

연안방재 구조물의 설계기술 개발(I)

Development of Design Technology of Structures
for Coastal Hazard Reduction(I)

1997. 12

한국해양연구소

제 출 문

한 국 해 양 연 구 소 장 귀하

본 보고서를 “연안방재 구조물의 설계기술 개발(I)” 과제의 1차년도 최종보고서로 제출합니다.

1997년 12월

총괄연구책임자 : 이광수

연 구 원 : 송원오, 염기대, 이달수,
채장원, 서승남, 소재귀,
정원무, 박우선, 오영민,
진재율, 김태림, 김상익,
박진순, 이호진, 황근춘

위 축 연 구 원 : 이상룡(부산대),
윤성범(한양대),
정신택(원광대)

연 구 조 원 : 김용권, 박영길, 백원대,
송한준, 김선정, 장세철,
김선정, 김윤철, 김미경

요 약 문

I. 제 목

연안방재 구조물의 설계기술 개발 (I)

II. 연구개발의 필요성 및 목적

우리나라는 국토 면적이 협소하여 인구가 증가하고 경제가 발달함에 따라 연안공간의 개발 및 활용이 크게 요구되고 있으며, 이에 따라 항만, 방조제, 임해공업단지, 인공섬 등 많은 연안구조물의 건설이 필요한 실정이다. 이러한 연안구조물의 설계시 설계과, 설계해면 등 구조물 설계조건의 신빙성 있는 산정을 통하여 구조물의 과대설계에 의한 건설비 낭비 또는 과소설계에 따른 구조물의 파괴로 인한 인명 피해를 방지할 필요가 있다. 또한 연안구조물의 수리학적 또는 구조적 특성 및 문제점을 파악하고 구조물의 성능 및 시공성 측면에서 보다 나은 이점을 제공할 수 있도록 기존 구조물을 개량하거나 새로운 형태의 구조 형식을 개발할 필요가 있다.

또한 이러한 연안구조물의 건설이 중요한 부분을 차지하는 연안개발은 연안구조물의 안정성을 확보하는 것 뿐 아니라 항내 정온도 악화, 주변 해안의 침식과 퇴적 및 개펄의 유실, 그리고 주변 해역의 수질악화에 의한 환경 파괴 등 각종 부작용을 예측하고 그 피해를 저감시킬 필요가 있다.

본 연구의 목적은 1) 항내 정온도가 문제시 되는 항만에 대하여 현장관측 및 수치모형을 이용하여 원인을 규명하고 그 대책을 제시함과 아울러 새로운 형태의 수치모형을 개발하며, 2) 항만 수질을 개선하기 위한 신형식의 방파제를 개발하며, 3) 사질퇴적환경에서 연안구조물 시공에 따라 발생할 수 있는 해안선 변화를 효율적으로 파악하기 위하여 해안모니터링 기법을 개선하며, 4) 사질퇴적환경에서 구

조물 건설에 따른 지형변화를 효율적으로 예측하기 위한 3차원 파랑류 모형을 개발하며, 5) 마지막으로 점성 혹은 점성 및 사질퇴적물 혼합퇴적상의 저면경계층에서 수리·퇴적작용을 난류규모로 관측할 수 있는 시스템을 수립함에 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

첫째, 항내정온도 검토를 위한 파랑 특성 파악과 수치모형 검증 자료 수집을 위하여 전년도(과학기술처, 1996)와 같이 강원도 동해항을 대상으로 실시한 장·단주기파 현장관측에 대하여 기술하였으며, 관측자료의 스펙트럼 분석을 통하여 단주기파의 항내 침입·변형과 장주기파의 증폭 현상을 검토하였다. 또한, 항만부진동 수치모형의 경우 환경사방정식 대신 전년도에 개발된 확장 환경사방정식을 사용하여 개선하였으며, 비선형 불규칙파의 해석을 위한 2차원 Boussinesq 모형을 수립하고 간단한 예제 해석을 수행하였다.

둘째, 항내 수질을 개선하기 위한 노력의 일환으로 개발된 원호수로형 방파제의 단면 최적화에 대해서 연구하였다. 원호수로 내의 파이프를 통하여 유입된 신선한 해수가 파이프를 이용하여 항내의 깊숙한 곳까지 투입이 가능한지를 파악하고, 케이슨에 작용되는 수평 및 연직 전파력 특성파악을 위하여 수리실험을 수행하였다. 또한, 원호수로내의 공진현상과 이로 인한 수로내 수위 증폭현상 및 반사율 저감현상 등을 예측할 수 있는 수치모델을 개발하였으며, 파랑조건 및 지반토성의 변화에 따른 케이슨의 주변의 간극수압 및 응력변화에 대해서 분석하였다.

셋째, 비디오를 이용한 해안선변화 모니터링 기법을 고찰하였다. 자연조건하에서 혹은 연안구조물에 의한 수리환경 변화로 인한 해안선의 변화를 지속적으로 모니터링함은 연안공간자원 보존을 위한 기초자료를 확보한다는 측면에서 중요하다. 그 동안 해안선 변화를 모니터링하기 위해서는 주로 현지측량과 항공측량에 의존하였으나, 이 방법들은 인원 및 현장조건, 그리고 경비측면에서 지속적인 방법

으로 사용하는 데에는 어려움이 따른다. 최근에 비디오 촬영을 이용하여 저렴한 비용으로 장기간에 걸쳐 해안선 변화를 모니터링하는 기법이 활발히 연구되고 있다. 이에 대한 기존의 연구 및 관련자료를 수집, 고찰하여 우리나라 동해안에서의 적용타당성을 검토한다.

넷째, 사질퇴적환경에서 연안구조물 축조로 야기되는 해저지형변화를 신뢰성 있게 예측하여, 지형변화로 인한 피해를 최소화할 수 있는 구조물 배치안 도출에 필수적인 기초자료 제공을 목적으로 3차원 연안류 수치모형을 세련화한다. 또한 모형의 적용성을 제고하기 위하여 기존 수치실험결과와의 비교, 검토한다.

마지막으로 우리나라 서남해안의 점성퇴적물 혹은 사질 및 점성 혼합퇴적물 환경에 설치할 구조물 안정성을 퇴적환경변화 측면에서 확보하기 위한 기초자료 생산을 목적으로 저면경계층 근방의 수리 및 퇴적작용 관측하기 위한 시스템을 수립하였다. 시스템의 효율성 확보를 위하여 기존의 연구와 각 센서의 특성을 분석하였으며, 기존 시스템보다 관측의 신뢰도를 제고할 수 있는 방안을 마련한다.

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

첫째, 동해항의 항내·외에서 파향·파고계와 수압식 파고계를 사용한 장·단 주기와 현장관측 결과 E~ESE 계열의 파랑 또는 유의파고 2 m 이상의 폭풍파 내습시 항내정온도 불량이 예측되었다. 자료 분석의 경우 수압식 파고계에 의한 단주기파 자료를 지금까지의 스펙트럼 분석과 transfer function을 사용하는 분석 방법 외에 Nielsen(1986)의 국부근사법과 스펙트럼 분석을 사용하는 방법도 같이 사용하여 양자를 비교·검토하였다. 또한, 장주기 부진동도 수압 자료의 스펙트럼 분석 대신 Nielsen의 방법으로 해수위 변동으로 변환시킨 자료를 사용하여 분석하였으며, 설치수심이 깊은 경우에는 후자의 적용이 요구되었다.

환경사방정식을 지배방정식으로 사용하는 복합요소 수치모형 대신 확장형 완

경사방정식과 무한 요소를 사용하는 부진동 수치모형을 수립하고 동해항에 적용하였으며 그 차이는 아주 미소한 것으로 나타났다. 천해역의 정밀한 파랑 변형 및 부진동 해석을 위해 일본의 항만기술연구소에서 개발한 2차원 Boussinesq 모형을 사용하여 일정 경사를 가진 사면에서의 전파·변형과 부분 개방된 정사각형 모형 항만에서의 중복파 재현에 대한 수치실험을 실시하여 적용성을 확인하였다. 앞으로 측면 투과 경계의 처리에 문제점이 노출된 Boussinesq 모형을 개선하고 장주기파 스펙트럼을 입사파 조건으로 사용할 수 있도록 모형을 확장함으로써 주기가 수 분 이하인 국부적 부진동의 보다 정확한 예측을 가능하게 할 예정이다. 또한, 단주기파의 항내 침입·변형에 대한 보다 정밀한 현장관측을 실시하여 Boussinesq 모형을 검증하고 실제 항만에 대한 적용도 실시할 예정이다.

둘째, 원호수로 내의 파이프를 통하여 유입된 신선한 해수를 항내의 깊숙한 곳까지 투입함으로써 원호수로 방파제의 적용 범위를 확장시켰다. 또한, 유한요소법을 이용한 파랑-지반-구조물 상호작용해석 모델과 원호수로 방파제의 수리현상을 모의할 수 있는 수치모델을 개발하였다. 이 모델들은 원호수로 방파제의 해수 교환성능 극대화 및 방파제 안전성 확보에 사용되어질 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 비디오 모니터링 기술 및 이의 해안에서의 적용에 대하여 검토하였다. 최근에 비디오 하드웨어 및 영상 처리 기술의 발달로 인하여 비디오 카메라를 이용한 해안선 변화, 연안 사주의 형태, 파의 쳐올림 및 swash 운동 등에 대한 관측이 가능해졌다. 특히 영상의 디지털화, 좌표수정 및 처리과정을 통하여 비디오 영상으로부터 정량적인 정보를 얻을 수 있게 되었다. 비디오 모니터링 기술은, 비록 정밀도가 낮고 육지 및 해수 표면에 대한 정보만을 간접적으로 제공하지만, 기존의 관측 기술에 비해 훨씬 적은 비용으로 장기간의 관측을 가능하게 해 준다.

넷째, 기수립된 3차원 파랑류 수치모형, WINC3D (3-dimensional Wave Induced Nearshore Circulation model)의 난류확산계수 산정을 $k-\epsilon$ 모형을 도입

하여 신뢰성을 높였다. 또한 Da Silva Lima(1981)의 수리실험결과의 비교, 검도를 통하여 어느 정도의 적용성은 확보하였으나 아직은 부족한 상태이며, 추후 비교,검토할 실험자료의 확보와 현장관측이 요구되었다.

마지막으로 해저면 경계층 주변의 수리·퇴적현상 관측시스템 구축을 위하여 기존 연구 및 각 센서의 특성을 분석한 결과, 난류관측을 위해서는 Acoustic Doppler Velocimeter(ADV)와 Modular Acoustic Velocity Sensor(MAVS)가 가장 효율적인 것으로 판단되었다. 탁도계는 우리나라 서·남해안의 경우에 여러 가지 측면에서 transmissometer 보다는 OBS 센서가 유리하였다. 그러나 OBS 센서는 현장탁도를 농도로 환산하는 과정에서 신뢰성이 요구되므로, 이를 위하여 원하는 시간에 자동으로 채수할 수 있는 자동채수기(AUTTLE)를 개발하였다. 또한 센서 설치삼각대를 개선하여 자동채수기가 현장의 수리·퇴적환경을 교란하지 않도록 하였으며, 자료저장장치도 개선하였다. Benthic SPHINX(Sedimentary Process and Hydraulic Information Xeroxing system)라 명명한 본 관측시스템은 난류를 측정할 수 있는 초음파 유속계 4개와 3개의 탁도계, 8개의 AUTTLE, 그리고 수온·파고·조위계와 data logger로 구성된다.

SUMMARY

I. Title

Development of Coastal Hazard Reduction Technologies (I)

II. Significance and Objective of the Study

Korea of small land area, with rapid increase of population and economic growth, needs development and utilization of coastal areas, and accordingly needs are increased to construct a number of coastal structures such as harbors, tidal barriers, coastal industrial complexes, artificial islands, and so on. In the design of such coastal structures, reliable estimation of such design parameters as wave, tide, storm surge, etc is essential to prevent either waste of construction cost due to overdesign or significant damage of the structures due to underdesign. It is also necessary to investigate either hydraulic or structural characteristics and problems of coastal structure in order to improve them or to propose new types of structures which provide advantages in their functional performance and easiness of construction.

On the other hand, in the development of coastal areas in which the construction of coastal structures is of importance, in addition to proper design of them, it is also necessary to predict and control such environmental impacts as harbor tranquility, coastal erosion and deposition, or deterioration of water quality in the nearby coastal areas.

The objectives of the present study are as follows : 1) Investigation and presentation of alternatives for harbor tranquility through field measurements

and numerical model, 2) Development of new type breakwaters to improve water quality inside harbors, 3) Establishment of coastline video monitoring system, 4) Development of 3-dimensional wave induced nearshore circulation model, 5) Setting up of sedimentary processes and hydraulic information collecting system near turbulent bottom boundary layer.

III. Contents and Scope of the Study

First, in order to investigate the wave characteristics for harbor tranquility analysis and to obtain field data for the verification of mathematical models, we performed field measurement of waves at Donghae harbor. Through spectral analysis, we investigated the propagation of short-period waves into the harbor and the resonance of long-period waves. For mathematical models which predict harbor resonance, we selected the extended mild-slope equation model which improves the conventional mild-slope equation model by including higher-order bottom effects. We also selected the two-dimensional Boussinesq equation model which predicts the transformation of nonlinear random waves.

Second, the optimal design for the Circular Channel Breakwater(CCB) has been studied to help supplying fresh sea-water into a harbor. The fresh seawater going into the harbor through the pipe inside the CCB was pursued whether it is transmitted into deep inside the harbor. The horizontal and uplift force were measured to investigate the characteristics of the wave force acting on the caisson by the hydraulic model experiment. The numerical model was developed to predict the resonance inside the CCB, the water level amplifying and the reduction of wave reflection. It was also analysed the pore water

pressure and the stresses around the caisson in response to the change of wave and foundation conditions.

Fourth, in the aspect to get the basic data which are necessary in order to conserve and secure coastal areas, it is very important to continuously monitor the shoreline changes which are occurred under natural condition or by the changes in hydraulic conditions caused by the construction of coastal structures. The existing methods such as field measurement and aircraft, survey, however, have their inherent limits in its continuous monitoring because of the field conditions and the expense etc. Recently, a new monitoring techniques using video camera has been studied, and the method has various merits for continuous long-term monitoring of shoreline changes. The studies on the new techniques have been surveyed and reviewed.

Fifth, the numerical model, WINC3D, which simulates 3-dimensional wave induced nearshore circulation, will be refined by coupling $k-\epsilon$ turbulent submodel and verified with a hydraulic experiment in order to give input data for a 3-dimensional sand transport model which will be set up in the near future.

Finally, in order to get the basic data which are necessary to secure the stability of the coastal structure in muddy or sandy mud coasts such as western or southwestern coast of Korea, a bottom boundary monitoring system to collect sedimentary and hydraulic information has been established. Based on the survey and analyses about existing studies and the sensors characteristics related with the monitoring system, more efficient and reliable measuring system will be suggested.

IV. Results and Recommendations

First, we collected wave data inside and outside Donghae harbor through the Directional Waverider Buoy and the pressure-type wave gauge. We found, through field measurements, that a serious degree of harbor agitation problem happened by the storm waves with direction of E~ESE or with significant wave height over 2 m. In analyzing characteristics of short-period waves, we used not only the convectional spectral method with the transfer function but also Nielsen's(1986) local approximation method. In analyzing characteristics of long-period waves, we used Neilson's method with raw data of water surface elevations instead of the conventional spectral method with raw data of pressures.

We compared numerical results of two method for the resonance of Donghae harbor, one by the conventional mild-slope equation and the other by the extended mild-slope equation. The comparison showed just little differences between these. In order to predict wave transformation in shallow water and harbor agitations, we obtained the two-dimensional Boussinesq equation model which was developed by PHRI(Port and Harbor Research Institute). The model was verified by applying it to two causes, one with waves propagating over a plane slope and the other with waves propagating into a partially open rectangular harbor. Firstly, we would improve the Boussinesq equation model by specifying lateral transmitting boundary conditions properly. Secondly, we would predict harbor resonance by the waves with period of a few minutes, which may be possible by modifying the original model to get input conditions of long-period waves. Thirdly, we would measure detailed data of short-period waves which propagate through the harbor in order to verify the Boussinesq equation model.

Second, the performance of the CCB was increased by supplying the fresh seawater into deep inside the harbor through the pipe installed in the CCB. The numerical model using FEM was developed to simulate the interaction of wave, foundation and structures and the hydrodynamic phenomena of the CCB. It would be very helpful to maximize the water exchange performance and the stability of the CCB.

Fourth, video monitoring techniques and their applications to the beach were reviewed. The recent development of video hardware and image process made it possible to measure shoreline changes, sandbar morphology, wave runup, swash motion, and so on using video cameras. Especially, quantitative informations from the video image can be obtained by digitization of image, rectification procedure, and image process. Using video monitoring techniques, measurements can be made at much lower cost and for long periods of time compared to the traditional measurement techniques, although these techniques are of lower accuracy and only provide informations indirectly describing the land and water surface.

Fifth, WINC3D(3-D Wave Induced Nearshore Circulation model) has been refined by coupling $k-\epsilon$ turbulent closure model, and verified in some degree with Da Silva Lima's(1981) results of hydraulic experiment. It is, however, required to compare with experiments conducted in the larger wave basin as well as with field measurements.

Finally, through the survey and analyses about the existing studies and the characteristics of the sensors related to bottom boundary measuring system, 4

modular acoustic velocity sensors(MAVS) and 1 acoustic doppler velocimeter (ADV) have been selected as the current meters for our system. Optical backscatterance(OBS) sensor has been adopted with considering that it has more merits than transmissometers, especially in the western and southwestern coastal area of Korea. It was, however, required to improve the conversion method of its output voltages to real concentrations. In order to overcome this inherent limitation of turbidity sensors, a new time-selectable automatic sampler(model : KORDI AUTTLE) has been developed. Additionally, a new tripod with a rotatable arm equipped with AUTTLE array has been developed in order to not generate undesirable upstream turbulence. Data logger has been also improved to store considerably large data(1GB hard disk), and a 3-axis compass has been added to the logger in order to yield exact the earth-coordinate based 3-dimensional current components reliably. Through these improvements and developments, a benthic sedimentary and hydraulic information monitoring system, Benthic SPHINX(Sedimentary and Hydraulic INformation Xeroxing system) has been set up, which consists of 4 acoustic current meters, 3 OBS sensors, 8 AUTTLEs, and wave&tide gauge(Aanderaa WTR9).

목 차

요약문	(3)
목차	(15)
그림목차	(27)
표목차	(53)
사진목차	(55)
제1장 서론	1
제2장 현장관측과 수치모델링을 통한 항내정온도 검토	5
제1절 개 요	5
제2절 파랑 관측	5
1. 현장관측	5
2. 단주기파 전파·변형 분석	7
가. 관측기간 중의 정점 W에서의 파랑 특성	8
나. 폭풍파 분석	8
다. 파의 항내 전파·변형 특성 분석	14
라. 국부근사법	28
3. 장주기파 분석	30
가. 분석 방법	30
나. 시계열 자료 검토	36
다. 스펙트럼 분석 결과	41

제3절 부진동 수치실험	49
1. 수치모형	49
2. 수치실험	53
가. 수치 계산 입력조건	53
나. 유속 분포	53
제4절 Boussinesq 모델	54
1. 기초방정식	59
2. 차분식	60
가. x- sweep	60
나. y- sweep	65
3. 경계조건	69
가. 투과 경계	69
나. 외해측 입사 경계	69
다. 반사 경계	69
4. 쇄파 계산	72
가. 쇄파의 판정	72
나. 쇄파 감쇠계수	73
다. 차분 계산	73
5. 적용성 시험	75
가. 일정 경사 사면에서의 파랑 변형	75
나. 부분 개방된 정사각형 모형 항만	79
제5절 결론 및 토의	95
1. 결론	95
2. 토의	96
제3장 원호수로형 해수교환 방파제의 단면 최적화	97
제1절 서론	97

제2절 해수교환성능개선	99
1. 개요	99
2. 대상방파제 및 도수 파이프	99
가. 대상방파제	99
나. 집수함 및 도수 파이프	100
3. 실험파랑 및 계측센서 설치	101
가. 실험파랑	101
나. 계측센서	102
4. 실험결과 및 분석	102
가. 자료독취 및 분석방법	102
나. 반사율	103
다. 전면 수위변동	105
라. 원호수로 입구에서의 동압력 변동	106
마. 원호수로 내 수위변동	108
바. 해수유입효과	109
제3절 케이슨에 작용하는 전파력 특성	125
1. 개요	125
2. 3분력 검출기의 제원	125
3. 무공 케이슨에 작용하는 파력특성	127
가. 측정장비의 설치	127
나. 파력측정 결과	127
다. 파압측정 결과	133
4. 원호수로 케이슨에 작용하는 파력측정	137
5. 무공 케이슨과 원호수로 케이슨에 작용하는 파력의 비교	140
제4절 반사 및 원호수로내 공진 특성 모의	142
1. 개요	142
2. 수학적 모형	142

3. 유한요소 모형	145
가. 영역의 분할	145
나. 유한요소 근사	146
다. 유한, 무한 및 접합요소	147
4. 수치모델의 검증	150
가. 마운드가 없는 원호수로 방파제	150
나. 마운드가 있는 원호수로 방파제	155
제5절 지반의 간극수압 및 응력분포	161
1. 개요	161
2. 수학적 모형	161
가. 파동장의 유체입자의 거동	162
나. 흙 골조와 간극수의 거동	164
3. 지반내의 간극수압 및 응력분포	166
제6절 결론 및 토의	174
제4장 해안 모니터링 기술 고찰	175
제1절 서론	175
제2절 비디오 모니터링 기술	176
1. 비디오 카메라 설치 및 운용	177
2. 영상 처리과정	180
제3절 비디오 모니터링의 해안 응용	185
제4절 연구 가능성 및 계획	189
제5장 3차원 연안역 해수유동	191
제1절 서론	191
제2절 3차원 파랑류 수치모형	193
1. 기본방정식	193
가. 운동량방정식	194

나. 전단응력 연직분포	198
다. 난류마감모형	201
2. 수치기법	202
3. 모형검증	203
4. 결론 및 토의	218
제6장 저면경계층 수리·퇴적현상 관측시스템	221
제1절 서론	221
제2절 유속센서 특성분석	225
1. 기계적 회전 센서	225
2. Hot-wire 및 hot-film probes	226
3. 전자기 유속계	226
4. Doppler 유속계	230
가. Doppler 효과	230
나. 레이저 Doppler 유속계	231
다. 초음파 Doppler 유속계	232
5. 초음파 유속계	233
제3절 탁도센서 특성분석	237
1. 탁도의 정의와 단위	237
2. Transmissometer와 Nephelometer	238
가. Transmissometer	239
나. Nephelometer	239
3. OBS 센서	239
4. OBS 센서와 Transmissometer의 비교	241
5. OBS 센서의 측정오차	242
가. Power-up transient(Self-heating 효과)	242
나. 수온효과	243

다. 기타 오차원인	243
6. OBS 센서의 교정	246
가. 탁도표준액을 이용한 교정	246
나. 퇴적물을 이용한 교정	247
제4절 자동채수기 개발	248
1. 개발의 필요성	248
2. AUTTLE의 개발	251
제5절 Benthic SPHINX 구축	253
1. 유속센서 선정	253
2. 탁도계 선정	254
3. Data Logger	255
4. 삼각설치대 설계와 AUTTLE Array	255
5. Prototype Benthic SPHINX	256
제7장 결론 및 토의	259
참고문헌	263
부록	271

CONTENTS

Summary	(9)
Contents	(21)
List of Figures	(27)
List of Tables	(53)
List of Photos	(55)
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Analysis of Harbor Tranquility through Field Measurements and Numerical Experiments	5
Section 1. Introduction	5
Section 2. Wave measurement	5
1. Field measurement	5
2. Analysis of propagation and transformation of short-period wave	7
a. Characteristics of waves at station W	8
b. Analysis of storm waves	8
c. Analysis of wave propagation into the harbor	14
d. Local approximation method	28
3. Analysis of long-period waves	30
a. Method of analysis	30
b. Investigation of time series data	36

c. Results of spectral analysis	41
Section 3. Numerical experiment of harbor resonance	49
1. Mathematical model	49
2. Numerical test	53
a. Input conditions for numerical test	53
b. Distribution of water particle velocities	53
Section 4. Numerical model using Boussinesq equations	54
1. Governing equations	59
2. Discretisation of model equations	60
a. x - sweep	60
b. y - sweep	65
3. Boundary conditions	69
a. Transmitting boundary condition	69
b. Offshore boundary condition of incident waves	69
c. Reflecting boundary condition	69
4. Computation of energy decay of of breaking waves	72
a. Criterion of wave breaking	72
b. Energy decay coefficient	73
c. Discretisation of modified model equations	73
5. Applicability test of Boussinesq model	75
a. Wave transformation over a plane slope	75
b. Wave propagation through a partially opened rectangular harbor	79
Section 5. Conclusion and discussion	95
1. Conclusion	95
5. Discussion	96

Chapter 3. Optimization of Performance of a Circular Channel

Breakwater	97
Section 1. Introduction	97
Section 2. Improvement of seawater exchange capability	99
1. General	99
2. Reference CCB and flow pipe system	99
a. Reference CCB	99
b. Flow gathering box with pipes	100
3. Wave conditions and installation of measuring sensors	101
a. Wave conditions	101
b. Measuring sensors	102
4. Experimental results and discussion	102
a. Data acquisition and analysis	102
b. Reflection coefficient	103
c. Wave runup and the front of CCB	105
d. Hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel ..	106
e. Wave runup in the circular channel	108
f. Sea water input	109
Section 3. Characteristics of wave force acting on the caisson	125
1. General	125
2. Specification of 3-component load cell	125
3. Measurement of wave force acting on the non-perforated wall caisson	127
a. Installation of 3-component load cell	127
b. Results of wave force measurement	127
c. Results of wave pressure measurement	133
4. Measurement of wave force acting on the CCB	137
5. Comparison of wave forces acting on the non-perforated wall caisson and CCB	140

Section 4. Simulation of wave reflection and resonance phenomenon in the circular channel	142
1. General	142
2. Mathematical model	142
3. Finite element model	145
a. Division of the analyzed region	145
b. Finite element approximation	146
c. Finite, infinite and joint elements	147
4. Verification of the numerical model	150
a. CCB w/o rubble mound	150
b. CCB w./ rubble mound	155
Section 5. Pore water pressure and stresses around the CCB	161
1. General	161
2. Mathematical model	161
a. Behaviors of fluid particles	162
b. Behaviors of soil skeletal frame and pore water	164
3. Pore water pressure and stresses in the seabed	166
Section 6. Conclusions and discussions	174
Chapter 4. Review of Coastline Video Monitoring	175
Section 1. Introduction	175
Section 2. Video monitoring technology	176
1. Video camera installation and operation	177
2. Image process	180
Section 3. Application	185
Section 4. Possibility of further research	189
Chapter 5. 3-D Nearshore Circulation	191

Section 1. Introduction	191
Section 2. 3-D wave induced nearshore circulation model	193
1. Governing equations	193
a. Momentum conservation equation	194
b. Vertical distribution of shear stress	198
c. Turbulent closure model	201
2. Numerical methods	202
3. Verification	203
4. Conclusion and discussion	218
Chapter 6. Benthic Sedimentary and Hydraulic Processes Measuring System	221
Section 1. Introduction	221
Section 2. Characteristics of current meters	225
1. Mechanical sensors	225
2. Hot-wire and hot-film probes	226
3. Electromagnetic current meters	226
4. Doppler current meters	220
a. Doppler effect	230
b. Laser Doppler current meters	231
c. Acoustic Doppler current meters	232
5. Acoustic travel-time current meters	233
Section 3. Characteristics of turbidity sensors	237
1. Definition and units of turbidity	237
2. Transmissometer and nephelometer	238
가. Transmissometer	239
나. Nephelometer	239
3. OBS sensor	239

3. OBS sensor	239
4. Comparison of OBS sensor and transmissometer	241
5. Measuring errors of OBS sensor	242
a. Power-up transient(Self-heating effect)	242
b. Temperature effect	243
c. Other errors	243
6. Calibration of OBS sensor	246
a. Calibration using a turbidity standard	246
b. Calibration using sediments	247
Section 4. Development of automatic sampling bottle(AUTTLE)	248
1. Significance of AUTTLE	248
2. Development of AUTTLE	251
Section 5. Benthic SPHINX	253
1. Current meters	253
2. Turbidity sensors	254
3. Data Logger	255
4. Frame design and AUTTLE array	255
5. Prototype Benthic SPHINX	256
 Chapter. 7 Conclusions and Discussions	 259
 References	 263
 Appendix	 271

List of Figures

Fig. 2.1.1	Location map of field measurement stations	6
Fig. 2.2.1	Time series of $H_{1/3}$, $T_{H1/3}$ and mean wave direction measured at station W in May, 1997	9
Fig. 2.2.2	Time series of $H_{1/3}$, $T_{H1/3}$ and mean wave direction measured at station W in June, 1997	10
Fig. 2.2.3	Directional spectra of waves measured at station W (May 20 11:00, 1997)	11
Fig. 2.2.4	Directional spectra of waves measured at station W (May 24 21:00, 1997)	12
Fig. 2.2.5	Directional spectra of waves measured at station W (June 1 20:00, 1997)	13
Fig. 2.2.6	Directional spectra of waves measured at station W (May 18 19:00, 1997)	15
Fig. 2.2.7	Directional spectra of waves measured at station W (May 21 3:00, 1997)	16
Fig. 2.2.8	Time series of H_s measured at stations W, P2 and P3 (May 9~19, 1997)	18
Fig. 2.2.9	Time series of H_s measured at stations W, P2, P3 and P4(May 26~June 7, 1997)	19
Fig. 2.2.10	Time series of H_s measured at stations W, P2, P3 and P4(June 7~19, 1997)	20
Fig. 2.2.11	Time series of T_p measured at stations W, P2 and P3 (May 9~19, 1997)	21
Fig. 2.2.12	Time series of T_p measured at stations W, P2, P3	

	and P4(May 26~June 7, 1997)	22
Fig. 2.2.13	Time series of T_p measured at stations W, P2, P3 and P4(June 7~19, 1997)	23
Fig. 2.2.14	Time series of ration of wave height at inner stations (P3, P4) to wave height at outer station(W) (May 9~19, 1997)	25
Fig. 2.2.15	Time series of ration of wave height at inner stations (P2, P3, P4) to wave height at outer station(W) (May 26~June 7, 1997)	26
Fig. 2.2.16	Time series of ration of wave height at inner stations (P2, P3, P4) to wave height at outer station(W) (June 7~June 19, 1997)	27
Fig. 2.2.17	Time series of pressure data and sea level data measured at station P1 for 1 hour from June 7 15:00, 1997	32
Fig. 2.2.18	Time series of pressure data and sea level data measured at station P2 for 1 hour from June 7 15:00, 1997	33
Fig. 2.2.19	Time series of pressure data and sea level data measured at station P3 for 1 hour from June 7 15:00, 1997	34
Fig. 2.2.20	Time series of pressure data and sea level data measured at station P4 for 1 hour from June 7 15:00, 1997	35
Fig. 2.2.21	Transfer function of Butterworth high-pass filter of order 6 with cutoff period of 40 min.	37
Fig. 2.2.22	Results of spectral analysis for pressure data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 12 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	38
Fig. 2.2.23	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 12 15:00, 1997,	

	upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	39
Fig. 2.2.24	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	43
Fig. 2.2.25	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	44
Fig. 2.2.26	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	46
Fig. 2.3.1	Boundary value problem	50
Fig. 2.3.2	Velocity vector plot of waves with period of 1,114 seconds	55
Fig. 2.3.3	Velocity vector plot of waves with period of 406 seconds	56
Fig. 2.3.4	Velocity vector plot of waves with period of 236 seconds	57
Fig. 2.3.5	Velocity vector plot of waves with period of 166 seconds	58
Fig. 2.4.1	Finite difference grids showing location of variables	61
Fig. 2.4.2	Plan view of boundary conditions	70
Fig. 2.4.3	Finite difference grids for reflecting boundary	71
Fig. 2.4.4	Computational domain of sloping beach	76
Fig. 2.4.5	Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8(regular waves normally incident to J- axis)	77
Fig. 2.4.6	Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8(regular waves 30 ° obliquely	

	incident to J- axis)	78
Fig. 2.4.7	Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8(multi-directional irregular waves ($S_{max} = 75$) normally incident to J- axis)	80
Fig. 2.4.8	Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8(multi-directional irregular waves ($S_{max} = 75$) 30 ° obliquely incident to J- axis)	81
Fig. 2.4.9	Contour of water surface elevations at t = 500 seconds (regular waves, normal incident to J- axis)	82
Fig. 2.4.10	Contour of water surface elevations at t = 500 seconds and P8(regular waves 30 ° obliquely incident to J- axis)	83
Fig. 2.4.11	Contour of water surface elevations at t = 500 seconds and P8(multi-directional irregular waves ($S_{max} = 75$) normally incident to J- axis)	84
Fig. 2.4.12	Contour of water surface elevations at t = 500 seconds and P8(multi-directional irregular waves ($S_{max} = 75$) 30 ° obliquely incident to J- axis)	85
Fig. 2.4.13	Velocity vector of waves at t = 500 seconds (regular waves, normal incident to J- axis)	86
Fig. 2.4.14	Velocity vector of waves at t = 500 seconds and P8(regular waves 30 ° obliquely incident to J- axis)	87
Fig. 2.4.15	Velocity vector of waves at t = 500 seconds and P8(multi-directional irregular waves($S_{max} = 75$) normally incident to J- axis)	88
Fig. 2.4.16	Velocity vector of waves at t = 500 seconds and P8(multi-directional irregular waves($S_{max} = 75$) 30 ° obliquely incident to J- axis)	89
Fig. 2.4.17	Computational domain of wave propagation through a partially opened rectangular harbor	90

Fig. 2.4.18	Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 300$ seconds(regular waves -30° obliquely incident to J- axis)	91
Fig. 2.4.19	Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 600$ seconds(regular waves -30° obliquely incident to J- axis)	92
Fig. 2.4.20	Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 900$ seconds(regular waves -30° obliquely incident to J- axis)	93
Fig. 2.4.21	Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 1,200$ seconds(regular waves -30° obliquely incident to J- axis)	94
Fig. 3.1.1	Conceptual diagram of the Circular Channel Breakwater (CCB)	98
Fig. 3.2.1	Overall configuration of the model structure of a circular channel breakwater	100
Fig. 3.2.2	Flow gathering systems	100
Fig. 3.2.3	Wave gauges, a pressure transducer, and current meter for measuring hydraulic characteristics of the CCB	102
Fig. 3.2.4	Wave reflection coefficients for various wave conditions	104
Fig. 3.2.5	Wave runup at the front of the CCB	106
Fig. 3.2.6	Hydrodynamic pressure at the entrance of circular channel	107
Fig. 3.2.7	Wave runup in the circular channel	109
Fig. 3.2.8	Non-dimensionalized net flow rates from a conduit w/o the flow gathering box	115
Fig. 3.2.9	Non-dimensionalized net flow rates from two conduits	

	w/ the flow gathering box only	115
Fig. 3.2.10	Non-dimensionalized net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m	116
Fig. 3.2.11	Non-dimensionalized net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m	116
Fig. 3.2.12	Non-dimensionalized net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m	117
Fig. 3.2.13	Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box only	117
Fig. 3.2.14	Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m	118
Fig. 3.2.15	Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m	118
Fig. 3.2.16	Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m	119
Fig. 3.2.17	Net flow rates per unit area from a conduit w/o the flow gathering box	120
Fig. 3.2.18	Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box only	120
Fig. 3.2.19	Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m	121
Fig. 3.2.20	Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m	121
Fig. 3.2.21	Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m	122
Fig. 3.2.22	Net flow rates per unit area from three conduits w/ the flow gathering box only	122
Fig. 3.2.23	Net flow rates per unit area from three conduits	

	w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m	123
Fig. 3.2.24	Net flow rates per unit area from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m	123
Fig. 3.2.25	Net flow rates per unit area from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m	124
Fig. 3.3.1	Sketch of 3-component load cell	126
Fig. 3.3.2	Installation of 3-component load cell	126
Fig. 3.3.3	Dimension of load measuring system	129
Fig. 3.3.4	Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson(T=1.6s, H=14cm)	131
Fig. 3.3.5	Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson for 1 period	132
Fig. 3.3.6	Time series of horizontal force and pressures acting on the non-perforated wall caisson	134
Fig. 3.3.7	Time series of uplift force and pressure acting on the non-perforated wall caisson	136
Fig. 3.3.8	Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson(T=1.6s, H=14cm)	138
Fig. 3.3.9	Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson for 1 period	139
Fig. 3.4.1	Definition of an analyzed region and boundaries	143
Fig. 3.4.2	Division of analyzed region and field variables	145
Fig. 3.4.3	Conceptual finite element mesh including IE's, FE's and JE's	147
Fig. 3.4.4	Definition of element coordinate systems	148
Fig. 3.4.5	An example structure of CCB w/o the rubble mound	151

Fig. 3.4.6	Comparison of numerical and experimental results for wave runup in the circular channel	151
Fig. 3.4.7	Comparison of numerical and experimental results for reflection coefficients	152
Fig. 3.4.8	Variation of wave runups in the circular channel	153
Fig. 3.4.9	Variation of reflection coefficients in the circular channel	154
Fig. 3.4.10	An example structure of CCB with the rubble mound	155
Fig. 3.4.11	Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H03 ($H = 3\text{cm}$)	156
Fig. 3.4.12	Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H05 ($H = 5\text{cm}$)	157
Fig. 3.4.13	Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H07 ($H = 7\text{cm}$)	158
Fig. 3.4.14	Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H09 ($H = 9\text{cm}$)	159
Fig. 3.4.15	Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H12 ($H = 12\text{cm}$)	160
Fig. 3.5.1	Definition sketch for the Wave-seabed-structure interaction problem	162
Fig. 3.5.2	Definition of analyzed regions, boundaries and field variables	163
Fig. 3.5.3	An example structure of the prototype CCB	166
Fig. 3.5.4	Contour diagrams for normalized maximum responses in the seabed with sand layer: $T = 10 \text{ sec}$, $H = 3 \text{ m}$	168
Fig. 3.5.5	Contour diagrams for normalized maximum responses	

	in the seabed with sand layer: $T = 8$ sec, $H = 2$ m	169
Fig. 3.5.6	Contour diagrams for normalized maximum responses in the seabed w/o sand layer: $T = 10$ sec, $H = 3$ m	170
Fig. 3.5.7	Contour diagrams for normalized maximum responses in the seabed w/o sand layer: $T = 8$ sec, $H = 2$ m	171
Fig. 3.5.8	Sequential vector plots for water particle motions and deformation of the CCB with seabed: $T = 10$ sec, $H = 3$ m	172
Fig. 4.2.1	A video camera installed at a beach for video monitoring (Reproduced by courtesy of Dr. Rusty Erdman)	178
Fig. 4.2.2	Video monitoring procedure	179
Fig. 4.2.3	The geometry and leveling conventions used in the rectification process (modified from Lippmann and Holman, 1989)	183
Fig. 4.2.4	An example of the oblique image taken from a beach in Florida (a) and its rectified image (b)(Reproduced by courtesy of Dr. Rusty Erdman)	184
Fig. 4.3.1	Photo examples showing shoreline changes during a storm using video monitoring techniques(Reproduced by courtesy of Dr. Rusty Erdman)	186
Fig. 4.3.2	Temporal variation of pixel intensity levels along a line perpendicular to the shoreline(from Holland and Holman. 1993)	188
Fig. 5.1.1	Three-dimensional resultant mean velocities in the surf zone(from Svendsen and Lorenz, 1989)	192
Fig. 5.2.1	Schematics of the longshore current on a plane beach (after Basco, 1982)	197
Fig. 5.2.2	Flow chart of the computer program	204

Fig. 5.2.3	Da Silva Lima's experimental set-up and water depth contour	206
Fig. 5.2.4	Map showing the model grid system and the reference points	207
Fig. 5.2.5	Vector plots of the measured depth-mean current velocity(top) and the computed depth-mean velocity with the 0-Eq. closure(bottom)(run2)	208
Fig. 5.2.6	Vector plots of the measured depth-mean current velocity(top) and the computed depth-mean velocity with the 2-Eq. closure(bottom)(run2)	209
Fig. 5.2.7	Vector plots of the computed velocities with the 0-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed (run2)	211
Fig. 5.2.8	Vector plots of the computed velocities with the 2-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed (run2)	212
Fig. 5.2.9	Comparison of the computed U-velocities at 4 selected points between with the 0-Eq. closure and with the 2-Eq. closure (run2)	213
Fig. 5.2.10	Comparison of the computed V-velocities at 4 selected points between with the 0-Eq. closure and with the 2-Eq. closure (run2)	214
Fig. 5.2.11	Vector plots of the computed depth-mean velocity with the 0-Eq. closure(top) and with the 2-Eq. closure(run5)	215
Fig. 5.2.12	Vector plots of the computed velocities with the 0-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed(run5)	216
Fig. 5.2.13	Vector plots of the computed velocities with the 2-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed(run5)	217

Fig. 5.2.14	Comparison of the vertical distributions of the cross-shore component of nearshore currents between the calculated values and the measured values(run5)	219
Fig. 6.2.1	Schematic diagrams of the measurement principle of electromagnetic current meters	227
Fig. 6.2.2	Sensor configurations of EMCM and velocity vectors	228
Fig. 6.2.3	Schematic diagram of the probe part of ADV	232
Fig. 6.2.4	Schematic diagram of the BASS(a), the positions of acoustic transducers and the acoustic paths(b) (after Thwaites and Williams, 1997)	234
Fig. 6.2.5	Sensor head of the MAVS prototype(a), and model MAVS-1 of G.O. MAVS Inc(b)	236
Fig. 6.3.1	Optical particle detectors	238
Fig. 6.3.2	Volume scattering functions	240
Fig. 6.3.3	OBS sensor and transmissometer calibrations with Amazon River mud	241
Fig. 6.3.4	Power-up errors	242
Fig. 6.3.5	Water temperature effects	243
Fig. 6.3.6	Particle size and concentration effects	244
Fig. 6.3.7	Noise versus sand concentration	245
Fig. 6.4.1	Formazin and sediment calibration curves	249
Fig. 6.4.2	Response of OBS sensor at high concentration	250
Fig. 6.4.3	Prototype of AUTTLE	252
Fig. 6.4.4	Block diagram of AUTTLE operation	252
Fig. 6.5.1	Prototype of Benthic SPHINX	257

Fig. A1.1	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at stations W and P1 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 9~21, 1997), upper : H_s , lower : T_z	273
Fig. A1.2	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at stations W and P1 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~June 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z	274
Fig. A1.3	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at stations W and P1 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z	275
Fig. A1.4	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P2 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~Junr 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z	276
Fig. A1.5	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P2 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z	277
Fig. A1.6	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P3 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z	278
Fig. A1.7	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P3 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~June 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z	279
Fig. A1.8	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P3 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z	280
Fig. A1.9	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P4 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z	281
Fig. A1.10	Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P4 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~June 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z	282
Fig. A1.11	Comparison of H_s and T_z for wave data measured	

	at station P4 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z	283
Fig. A2.1	Time series of raw sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	284
Fig. A2.2	Time series of raw sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	285
Fig. A2.3	Time series of raw sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	286
Fig. A2.4	Time series of raw sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	287
Fig. A2.5	Time series of filtered sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	288
Fig. A2.6	Time series of filtered sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	289
Fig. A2.7	Time series of filtered sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	290
Fig. A2.8	Time series of filtered sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997	291
Fig. A2.9	Time series of raw sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	292
Fig. A2.10	Time series of raw sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	293
Fig. A2.11	Time series of raw sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	294
Fig. A2.12	Time series of raw sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	295
Fig. A2.13	Time series of filtered sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	296
Fig. A2.14	Time series of filtered sea level data measured at	

	station P2 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	297
Fig. A2.15	Time series of filtered sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	298
Fig. A2.16	Time series of filtered sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997	299
Fig. A2.17	Time series of raw sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	300
Fig. A2.18	Time series of raw sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	301
Fig. A2.19	Time series of raw sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	302
Fig. A2.20	Time series of raw sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	303
Fig. A2.21	Time series of filtered sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	304
Fig. A2.22	Time series of filtered sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	305
Fig. A2.23	Time series of filtered sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	306
Fig. A2.24	Time series of filtered sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997	307
Fig. A3.1	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 9 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	308
Fig. A3.2	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 10 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	309
Fig. A3.3	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 11 15:00, 1997,	

	upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	310
Fig. A3.4	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 13 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	311
Fig. A3.5	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 14 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	312
Fig. A3.6	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 15 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	313
Fig. A3.7	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 16 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	314
Fig. A3.8	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 17 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	315
Fig. A3.9	Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 18 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	316
Fig. A3.10	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 26 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	317
Fig. A3.11	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 27 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	318
Fig. A3.12	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 29 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	319
Fig. A3.13	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 30 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	320

Fig. A3.14	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 31 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	321
Fig. A3.15	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 2 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	322
Fig. A3.16	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 3 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	323
Fig. A3.17	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 4 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	324
Fig. A3.18	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 5 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	325
Fig. A3.19	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 6 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	326
Fig. A3.20	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 7 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	327
Fig. A3.21	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 8 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	328
Fig. A3.22	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 10 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	329
Fig. A3.23	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 11 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	330
Fig. A3.24	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 12 14:00, 1997,	

	upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	331
Fig. A3.25	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 13 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	332
Fig. A3.26	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 14 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	333
Fig. A3.27	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 15 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	334
Fig. A3.28	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 16 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	335
Fig. A3.29	Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 17 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio	336
Fig. A4.1	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.687$ sec($\omega^*=0.5$) & $H = 3.2$ cm	337
Fig. A4.2	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.406$ sec($\omega^*=0.6$) & $H = 3.35$ cm	338
Fig. A4.3	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the	

	circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.205$ sec($\omega^*=0.7$) & $H = 3.3$ cm	339
Fig. A4.4	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.054$ sec($\omega^*=0.8$) & $H = 3.3$ cm	340
Fig. A4.5	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.992$ sec($\omega^*=0.85$) & $H = 3.15$ cm	341
Fig. A4.6	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.937$ sec($\omega^*=0.9$) & $H = 3.25$ cm	342
Fig. A4.7	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.888$ sec($\omega^*=0.95$) & $H = 3.4$ cm	343
Fig. A4.8	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.844$	

sec($\omega^*=1.0$) & $H = 3.3$ cm 344

Fig. A4.9 Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.803$ sec($\omega^*=1.05$) & $H = 3.3$ cm 345

Fig. A4.10 Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.767$ sec($\omega^*=1.1$) & $H = 3.2$ cm 346

Fig. A4.11 Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.734$ sec($\omega^*=1.15$) & $H = 2.1$ cm 347

Fig. A4.12 Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.703$ sec($\omega^*=1.2$) & $H = 2.0$ cm 348

Fig. A4.13 Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.687$ sec($\omega^*=0.5$) & $H = 5.3$ cm 349

- Fig. A4.14 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.406$ sec ($\omega^*=0.6$) & $H = 5.4$ cm 350
- Fig. A4.15 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.205$ sec ($\omega^*=0.7$) & $H = 5.3$ cm 351
- Fig. A4.16 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.054$ sec ($\omega^*=0.8$) & $H = 5.4$ cm 352
- Fig. A4.17 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.992$ sec ($\omega^*=0.85$) & $H = 5.2$ cm 353
- Fig. A4.18 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.937$ sec ($\omega^*=0.9$) & $H = 5.5$ cm 354
- Fig. A4.19 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C),

	the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.888$ sec($\omega^*=0.95$) & $H = 5.35$ cm	355
Fig. A4.20	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.844$ sec($\omega^*=1.0$) & $H = 5.3$ cm	356
Fig. A4.21	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.803$ sec($\omega^*=1.05$) & $H = 5.3$ cm	357
Fig. A4.22	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.687$ sec($\omega^*=0.5$) & $H = 7.6$ cm	358
Fig. A4.23	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.406$ sec($\omega^*=0.6$) & $H = 7.4$ cm	359
Fig. A4.24	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit	

	(q) under the regular wave condition of $T = 1.205$ sec($\omega^*=0.7$) & $H = 7.5$ cm	360
Fig. A4.25	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.054$ sec($\omega^*=0.8$) & $H = 7.5$ cm	361
Fig. A4.26	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.992$ sec($\omega^*=0.85$) & $H = 7.6$ cm	362
Fig. A4.27	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.937$ sec($\omega^*=0.9$) & $H = 7.7$ cm	363
Fig. A4.28	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.888$ sec($\omega^*=0.95$) & $H = 7.5$ cm	364
Fig. A4.29	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.844$ sec($\omega^*=1.0$) & $H = 7.4$ cm	365

Fig. A4.30	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.687$ sec($\omega^*=0.5$) & $H = 9.6$ cm	366
Fig. A4.31	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.406$ sec($\omega^*=0.6$) & $H = 9.6$ cm	367
Fig. A4.32	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.205$ sec($\omega^*=0.7$) & $H = 9.6$ cm	368
Fig. A4.33	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.054$ sec($\omega^*=0.8$) & $H = 9.7$ cm	369
Fig. A4.34	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.992$ sec($\omega^*=0.85$) & $H = 9.6$ cm	370
Fig. A4.35	Time series for water surface elevations at the front of	

	the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.937$ sec($\omega^*=0.9$) & $H = 10.5$ cm	371
Fig. A4.36	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 0.888$ sec($\omega^*=0.95$) & $H = 9.4$ cm	372
Fig. A4.37	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.687$ sec($\omega^*=0.5$) & $H = 12.5$ cm	373
Fig. A4.38	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.406$ sec($\omega^*=0.6$) & $H = 12.8$ cm	374
Fig. A4.39	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.205$ sec($\omega^*=0.7$) & $H = 13.0$ cm	375
Fig. A4.40	Time series for water surface elevations at the front of the caisson(η_F) and inside of the circular channel(η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the	

	circular channel(p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T = 1.054$ sec($\omega^*=0.8$) & $H = 12.3$ cm	376
Fig. A5.1	Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson($T=1.2s$, $H=9cm$)	377
Fig. A5.2	Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson($T=1.4s$, $H=9cm$)	378
Fig. A5.3	Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson($T=1.4s$, $H=12cm$)	379
Fig. A5.4	Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson($T=1.6s$, $H=12cm$)	380
Fig. A5.5	Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson($T=1.2s$, $H=9cm$)	381
Fig. A5.6	Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson($T=1.4s$, $H=9cm$)	382
Fig. A5.7	Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson($T=1.4s$, $H=12cm$)	383
Fig. A5.8	Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson($T=1.6s$, $H=12cm$)	384

List of Tables

Table 2.2.1	Location of measurement stations	7
Table 2.2.2	Peak period and amplitude ratio of resonance mode obtained from spectral analysis of measured data	47
Table 3.2.1	Wave conditions employed in the present model testings	101
Table 3.2.2	Wave reflection coefficients for various wave conditions	103
Table 3.2.3	Wave runup at the front of the CCB	105
Table 3.2.4	Hydrodynamic pressure at the entrance of circular channel	107
Table 3.2.5	Wave runup in the circular channel	108
Table 3.2.6	Net flow rates from a conduit w/o the flow gathering box	110
Table 3.2.7	Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box only	110
Table 3.2.8	Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 3m	111
Table 3.2.9	Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 6m	111
Table 3.2.10	Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 9m	112
Table 3.2.11	Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box only	112

Table 3.2.12	Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 3m	113
Table 3.2.13	Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 6m	113
Table 3.2.14	Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 9m	114
Table 3.3.1	Wave steepness(=H/L) for experimental conditions	130
Table 3.3.2	Wave forces acting on the non-perporated wall caisson and CCB according to the wave conditions	141
Table 3.5.1	Material properties of the prototype CCB	167
Table 5.2.1	Da Silva Lima's experimental wave conditions (Da Silva Lima, 1981)	210
Table 6.2.1	Specifications of MAVS-1 of G.O. MAVS Inc	237
Table 6.3.1	Solution volumes for formazin calibrations (D&A Instrument Company, 1991.)	247
Table 6.4.1	Specification of AUTTLE	253
Table A1.1	Characteristics of wave data measured at station W in Donghae Harbor	385

List of Photos

Photo 3.3.1	Side view of load measuring system	128
Photo 3.3.2	Front view of load measuring system	128

제1장 서 론

우리나라는 국토 면적이 협소하여 인구가 증가하고 경제가 발달함에 따라 연안공간의 개발 및 활용이 크게 요구되고 있으며, 이에 따라 항만, 방조제, 임해공업단지, 인공섬 등 많은 연안구조물의 건설이 필요한 실정이다. 이러한 연안구조물의 설계시 설계과, 설계해면 등 구조물 설계조건의 신빙성 있는 산정을 통하여 구조물의 과대설계에 의한 건설비 낭비 또는 과소설계에 따른 구조물의 파괴로 인한 인명 피해를 방지할 필요가 있다. 또한 연안구조물의 수리학적 또는 구조적 특성 및 문제점을 파악하고 구조물의 성능 및 시공성 측면에서 보다 나은 이점을 제공할 수 있도록 기존 구조물을 개량하거나 새로운 형태의 구조 형식을 개발할 필요가 있다.

또한 이러한 연안구조물의 건설이 중요한 부분을 차지하는 연안개발은 연안구조물의 안정성을 확보하는 것 뿐 아니라 항내 정온도 악화, 주변 해안의 침식과 퇴적 및 개펄의 유실, 그리고 주변 해역의 수질악화에 의한 환경 파괴 등 각종 부작용을 예측하고 그 피해를 저감시킬 필요가 있다.

본 연구의 목적은 1) 항내 정온도가 문제시 되는 항만에 대하여 현장관측 및 수치모형을 이용하여 원인을 규명하고 그 대책을 제시함과 아울러 새로운 형태의 수치모형을 개발하며, 2) 항만 수질을 개선하기 위한 신형식의 방파제를 개발하며, 3) 사질퇴적환경에서 연안구조물 시공에 따라 발생할 수 있는 해안선 변화를 효율적으로 파악하기 위하여 해안모니터링 기법을 개선하며, 4) 사질퇴적환경에서 구조물 건설에 따른 지형변화를 효율적으로 예측하기 위한 3차원 파랑류 모형을 개발하며, 5) 마지막으로 점성 혹은 점성 및 사질퇴적물 혼합퇴적상의 저면경계층에서 수리·퇴적작용을 난류규모로 관측할 수 있는 시스템을 수립함에 있다.

이와 같은 목적으로 수행된 본 사업의 내용은 다음과 같다.

첫째, 항내정온도 검토를 위한 파랑 특성 파악과 수치모형 검증 자료 수집을 위하여 전년도(과학기술처, 1996)와 같이 강원도 동해항을 대상으로 실시한 장·단주기파 현장관측에 대하여 기술하였으며, 관측자료의 스펙트럼 분석을 통하여 단주기파의 항내 침입·변형과 장주기파의 증폭 현상을 검토하였다. 또한, 항만부진동 수치모형의 경우 환경사방정식 대신 전년도에 개발된 확장 환경사방정식을 사용하여 개선하였으며, 비선형 불규칙파의 해석을 위한 2차원 Boussinesq 모형을 수립하고 간단한 예제 해석을 수행하였다.

둘째, 항내 수질을 개선하기 위한 노력의 일환으로 개발된 원호수로형 방파제의 단면 최적화에 대해서 연구하였다. 원호수로 내의 파이프를 통하여 유입된 신선한 해수가 파이프를 이용하여 항내의 깊숙한 곳까지 투입이 가능한지를 파악하고, 케이슨에 작용되는 수평 및 연직 전파력 특성파악을 위하여 수리실험을 수행하였다. 또한, 원호수로내의 공진현상과 이로 인한 수로내 수위 증폭현상 및 반사를 저감현상 등을 예측할 수 있는 수치모형을 개발하였으며, 파랑조건 및 지반토성의 변화에 따른 케이슨의 주변의 간극수압 및 응력변화에 대해서 분석하였다.

셋째, 비디오를 이용한 해안선변화 모니터링 기법을 고찰하였다. 자연조건하에서 혹은 연안구조물에 의한 수리환경 변화로 인한 해안선의 변화를 지속적으로 모니터링함은 연안공간자원 보존을 위한 기초자료를 확보한다는 측면에서 중요하다. 그 동안 해안선 변화를 모니터링하기 위해서는 주로 현지측량과 항공측량에 의존하였으나, 이 방법들은 인원 및 현장조건, 그리고 경비측면에서 지속적인 방법으로 사용하는 데에는 어려움이 따른다. 최근에 비디오 촬영을 이용하여 저렴한 비용으로 장기간에 걸쳐 해안선 변화를 모니터링하는 기법이 활발히 연구되고 있다. 이에 대한 기존의 연구 및 관련자료를 수집, 고찰하여 우리나라 동해안에서의 적용타당성을 검토한다.

넷째, 사질퇴적환경에서 연안구조물 축조로 야기되는 해저지형변화를 신뢰성 있게 예측하여, 지형변화로 인한 피해를 최소화할 수 있는 구조물 배치안 도출에 필수적인 기초자료 제공을 목적으로 3차원 연안류 수치모형을 세련화한다. 또한 모

형의 적용성을 제고하기 위하여 기존 수리실험결과와의 비교, 검토한다.

마지막으로 우리나라 서남해안의 점성퇴적물 혹은 사질 및 점성 혼합퇴적물 환경에 설치할 구조물 안정성을 퇴적환경변화 측면에서 확보하기 위한 기초자료 생산을 목적으로 저면경계층 근방의 수리 및 퇴적작용 관측하기 위한 시스템을 수립하였다. 시스템의 효율성 확보를 위하여 기존의 연구와 각 센서의 특성을 분석하였으며, 기존 시스템보다 관측의 신뢰도를 제고할 수 있는 방안을 마련한다.

제2장 현장관측과 수치모델링을 통한 항내정온도 검토

제1절 개요

항만정온도 검토에 사용되는 수치모형들을 검증할 자료를 수집하기 위하여 대상 항만인 동해항 내외에서 Datawell Inc.의 제품인 부이형 파향·파고계(DWB : Directional Waverider Buoy) 1대와 Paro scientific sensor를 장착한 수압식 파고계(SWTG : Self-recording Wave and Tide Gauge) 4대를 사용하여 단주기파의 항내 침입·변형 및 장주기파 현장관측을 실시하였다. Fig. 2.1.1에 관측 정점의 위치를 ■(또는 W)와 ●(또는 P1~P4)로 표시하였는데 전자가 DWB, 후자가 SWTG의 위치를 각각 나타낸다.

제2절 파랑 관측

1. 현장관측

단주기파의 항내 침입·변형을 파악하기 위하여 1997년 5월 9일부터 6월 19일까지 전술한 5개 정점에서 현장관측을 실시하였다. 관측점의 자세한 위치는 Fig. 2.1.1 및 Table 2.2.1에 제시되었다. DWB에 의한 관측은 매시간마다 2,048개(약 26.7분)씩의 해수위 변동 및 파향에 관한 자료가 수집되도록 실시되었다. DWB에 의한 관측치들은 수신기인 WAREC(파향·파고계용)에 수신

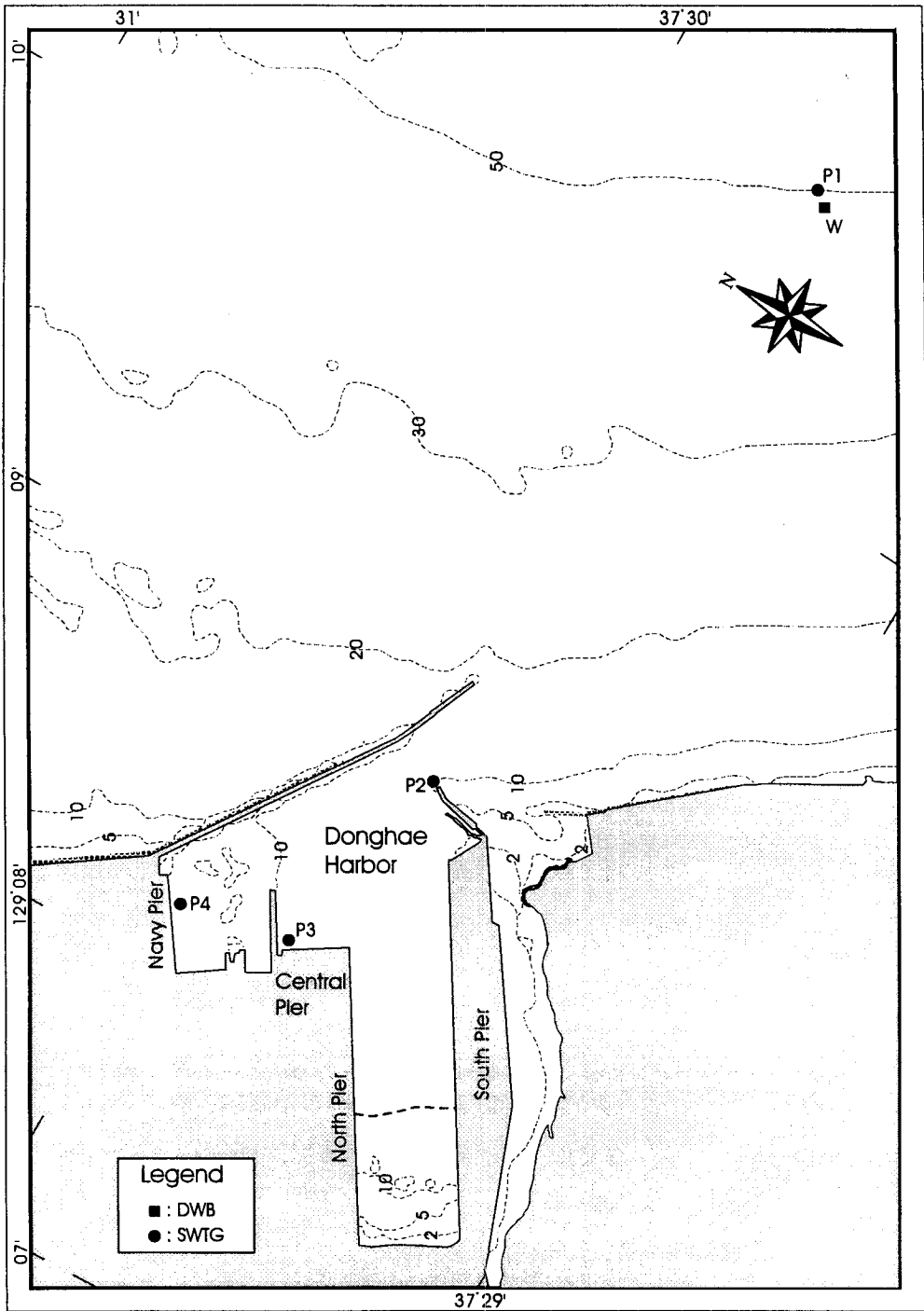


Fig. 2.1.1 Location map of field measurement stations.

된 후 자료전송 케이블과 RS232C port를 통하여 휴대용 컴퓨터의 하드 디스크에 디지털 형태로 저장되었다. SWTG에 의한 관측은 매초마다 연속적으로 수위변동에 대한 자료가 기기에 내장된 data logger에 저장되었다. 한편, 정점 P1 외에 항외에 1개 정점에서 관측을 실시하였으나 기기를 분실하였다. 또한, 정점 P2의 경우 5월 9일~19일의 자료는 상태가 불량하여 분석에서 제외하였다.

Table 2.2.1 Location of measurement stations.

Station	Measuring instrument	Data sampling interval(s)	Location of measurement		Water depth(m)
			Longitude	Latitude	
W	DWB	0.78125	129° 10' 34.1" E	37° 29' 24.8" N	50.5
P1	SWTG	1.0	129° 10' 48.4" E	37° 29' 29.5" N	50.0
P2(second)	SWTG	1.0	129° 08' 35.0" E	37° 29' 30.0" N	7.5
P2(third)	SWTG	1.0	129° 08' 48.0" E	37° 29' 39.0" N	14.7
P3	SWTG	1.0	129° 08' 16.3" E	37° 29' 44.6" N	14.3
P4	SWTG	1.0	129° 08' 10.3" E	37° 29' 59.8" N	10.1

2. 단주기파 전파·변형 분석

파랑 자료는 전년도(과학기술처, 1996)와 동일하게 파별분석법, spectral method, MEM(Maximum Entropy Method) 등에 의하여 각각 분석되었으며 상세한 내용에 대해서는 동 보고서를 참조하기 바란다. 한편, 수압식 파고계에 의한 파랑 자료에는 Nielsen(1986)의 국부근사법(local approximation method)를 시험적으로 적용하여 DWB의 자료 및 수압 자료를 스펙트럼 분석하고 transfer function을 사용하여 파랑 스펙트럼으로 변환하는 방법에 의한 결과들과 비교·검토하였다.

가. 관측기간 중의 정점 W에서의 파랑 특성

정점 W에서 관측된 파랑특성계수 중 파별분석법에 의한 유의파고($H_{1/3}$), 유의파주기($T_{H_{1/3}}$) 및 Longuet-Higgins법으로 구해진 평균파향($\bar{\theta}$)의 시간적 변화를 1997년 5~6월에 대해 Fig. 2.2.1과 2.2.2에 각각 제시하였다.

먼저, 평균파향은 거의 NNE~NE 사이에 분포하나 E~SE 사이의 파향도 일부 출현(유의파고는 대부분 0.8 m 이하)하였다. 유의파주기는 폭풍파가 영향을 미친 기간(5월 18일~22일, 6월 1일~3일)을 제외하면 대체로 8초 이하이다. 유의파고가 2 m를 초과하는 경우를 폭풍파로 설정하면 관측기간 중에는 5월 19일~21일, 5월 24일~25일, 6월 1일의 3회에 걸쳐 폭풍파가 발생하였다. 특히 5월 18일~21일의 폭풍파는 연속하여 40시간 이상 유의파고가 2 m를 초과하는 폭풍파가 내습하였다. 한편, 정점 W의 관측자료에 대한 스펙트럼 및 파별분석법에 의한 파랑특성계수들은 부록의 Table A1.1에 수록하였다.

나. 폭풍파 분석

관측기간 중 3회 발생한 폭풍파 중 각 경우에서 유의파고가 가장 컸던 5월 20일 11시, 5월 24일 21시 및 6월 1일 20시의 자료에 대해 주파수-방향 스펙트럼 분석을 실시하고 그 결과들을 Fig. 2.2.3~2.2.5에 각각 제시하였다. Fig. 2.2.3의 상부에 위치한 그림에서 등치선들은 방향-주파수 스펙트럼의 최대 에너지에 대하여 무차원화한 것이다. 이 그림에서 굵은 실선은 0.1을 나타내고 그 안의 가는 실선들은 내측으로 각각 0.1씩 증가하며, 굵은 실선 외부의 가는 실선들은 외측으로 각각 0.01씩 감소한다. Fig. 2.2.3의 에너지 분포를 살펴보면 침두 주기에서의 파향이 NE 방향이며 주파수 및 방향별 에너지 집중도가 비교적 낮다($H_s = 3.24\text{m}$, $T_p = 11.0\text{sec}$). Fig.

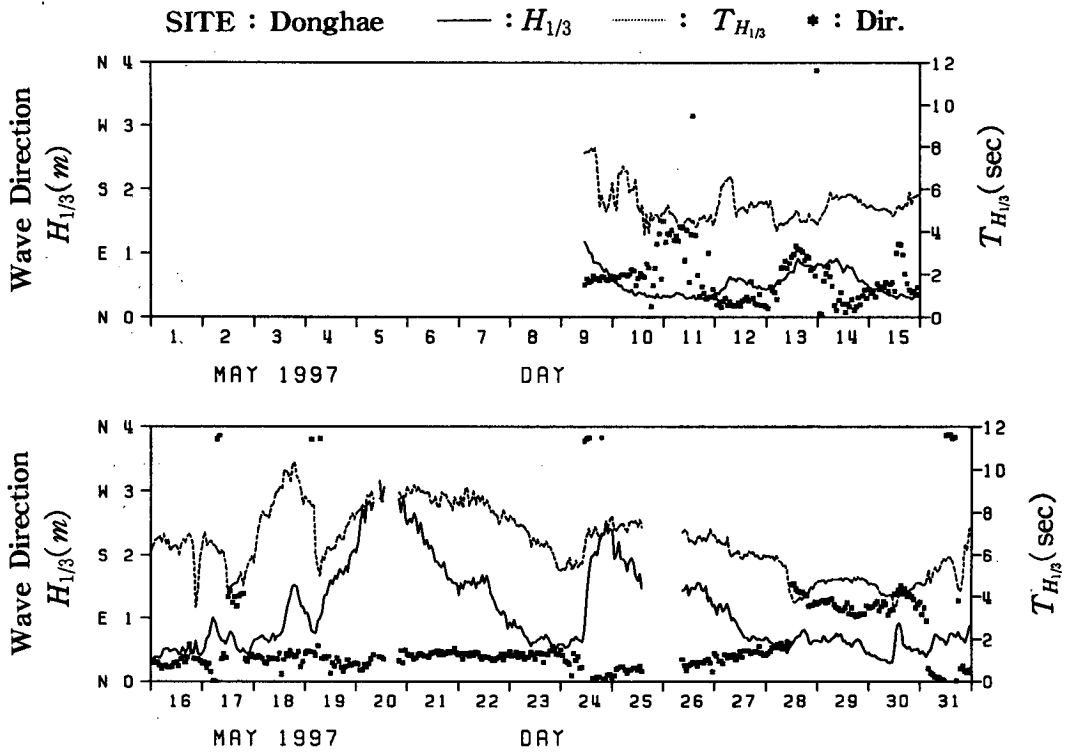


Fig. 2.2.1 Time series of $H_{1/3}$, $T_{H_{1/3}}$ and mean wave direction measured at station W in May, 1997.

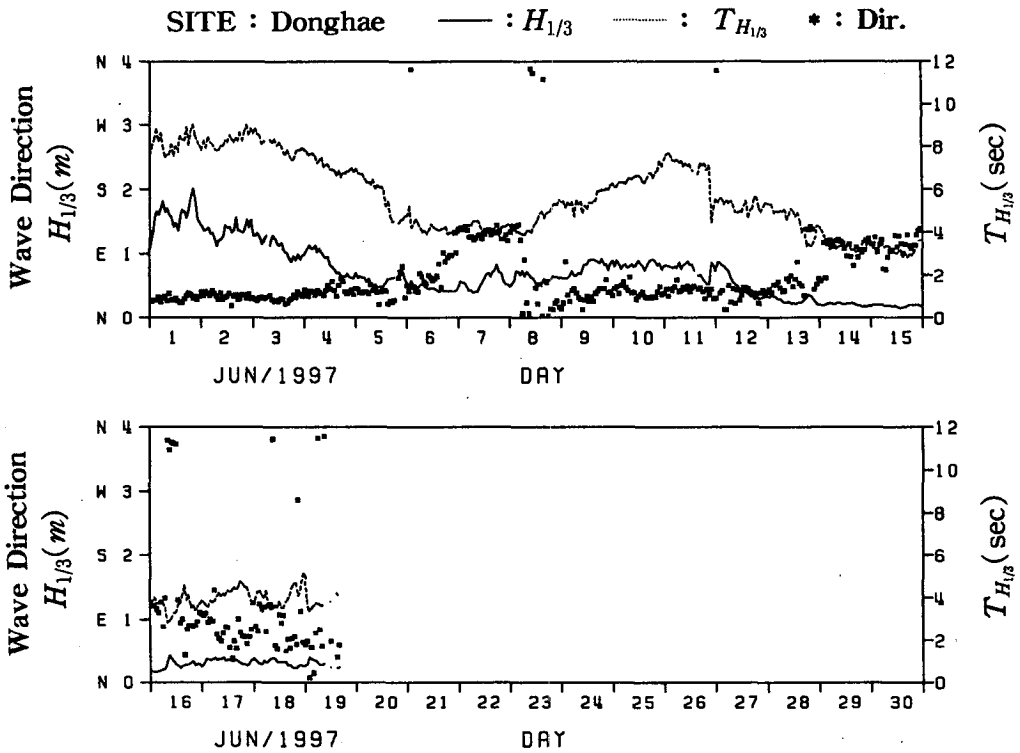


Fig. 2.2.2 Time series of $H_{1/3}$, $T_{H_{1/3}}$ and mean wave direction measured at station W in June, 1997.

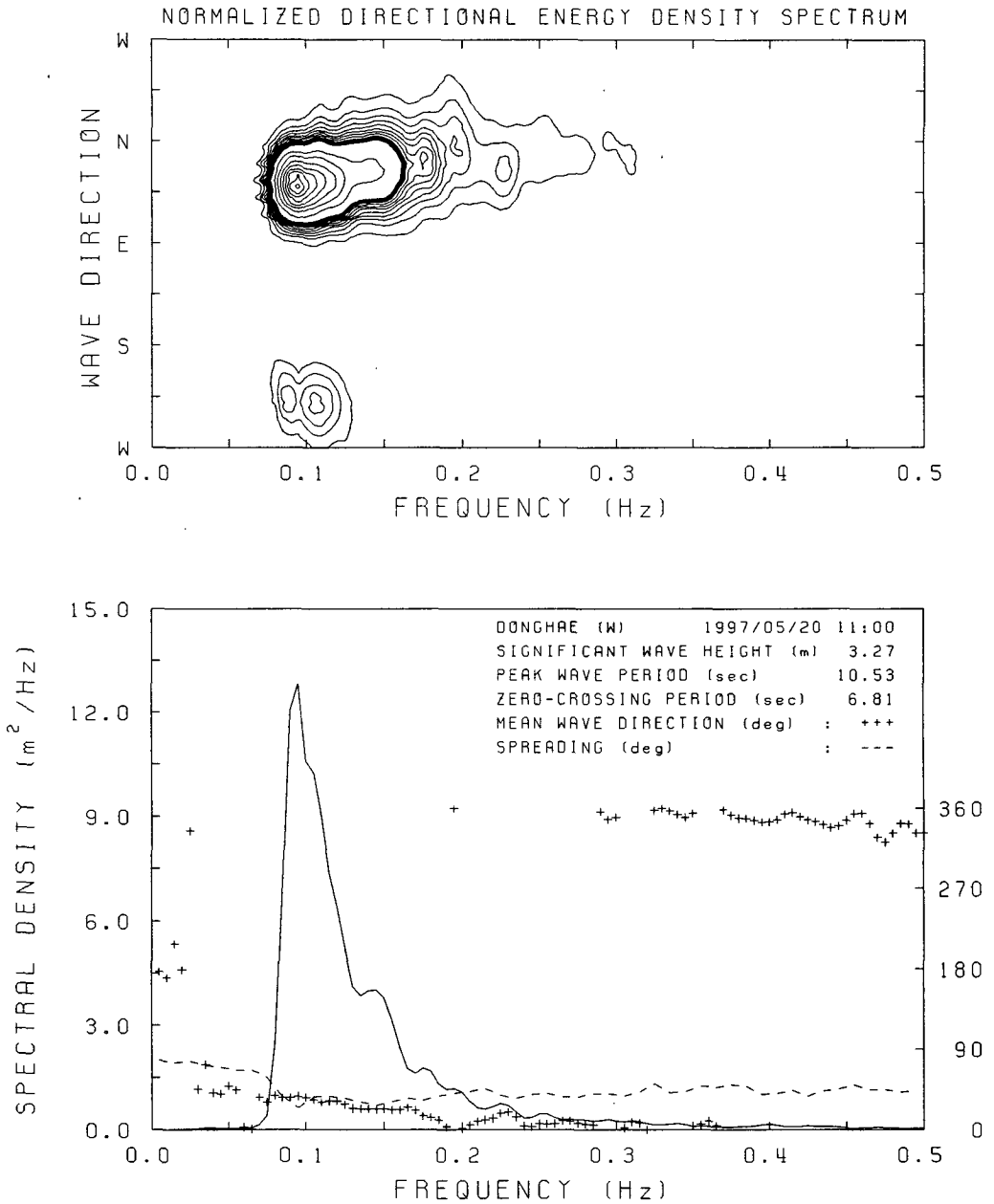


Fig. 2.2.3 Directional spectra of waves measured at station W (May 20 11:00, 1997).

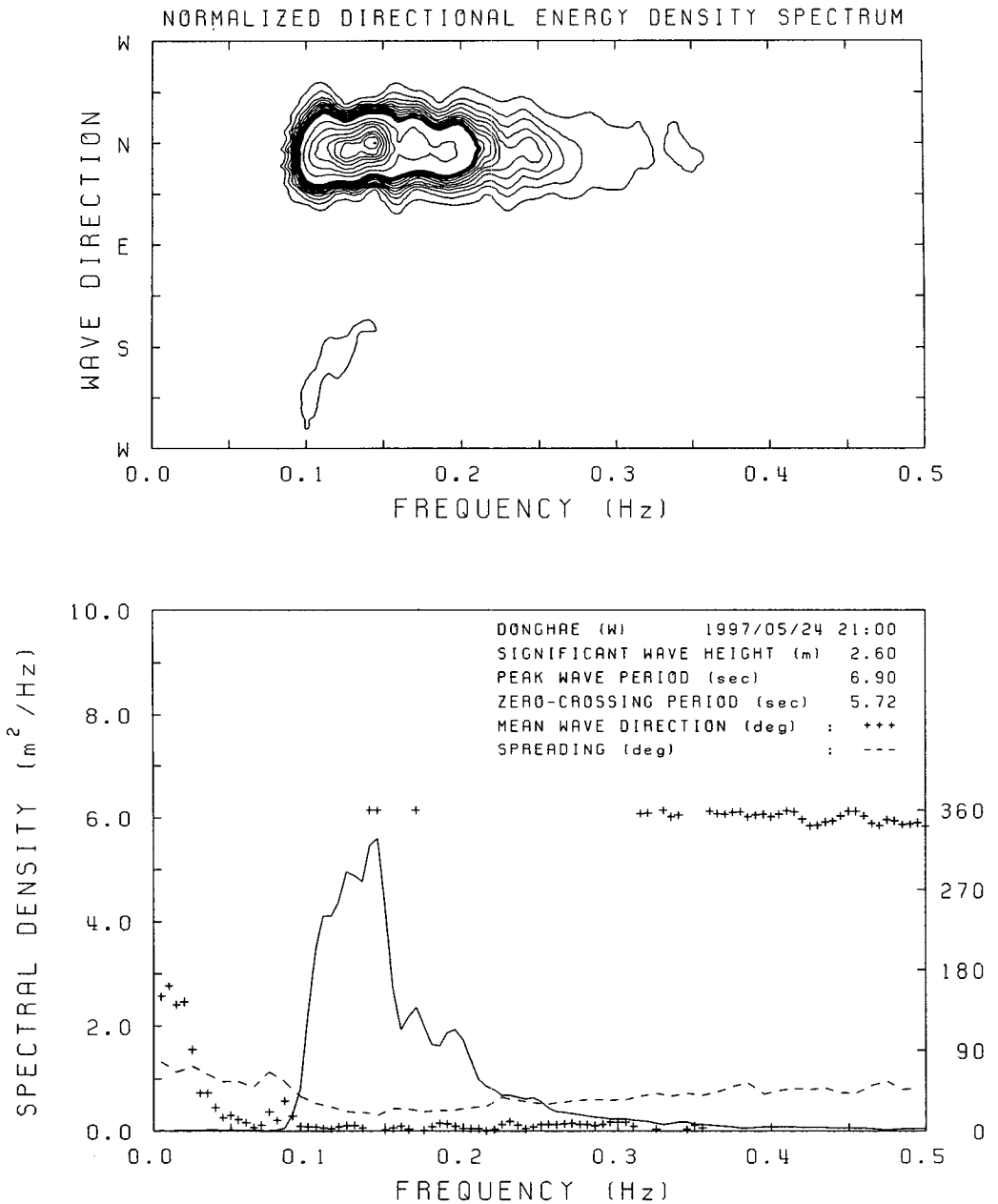


Fig. 2.2.4 Directional spectra of waves measured at station W (May 24 21:00, 1997).

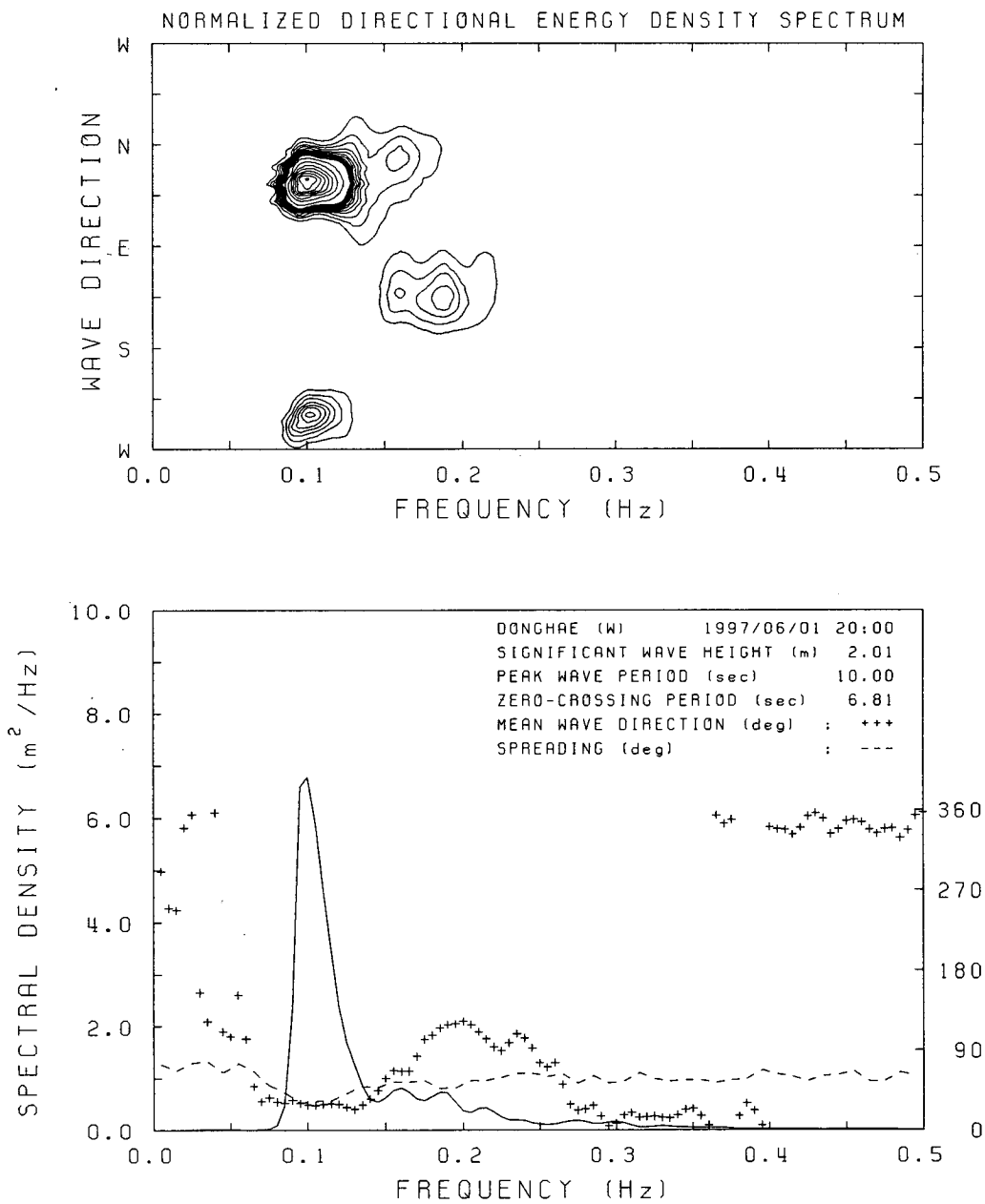


Fig. 2.2.5 Directional spectra of waves measured at station W (June 1 20:00, 1997).

2.2.4를 살펴보면 침두 주기에서의 파향이 N 방향이며 방향 집중도는 Fig. 2.2.3에 비해 약간 높으나 주파수에 대한 에너지 분포가 매우 넓고 침두 주기도 7.1초로 비교적 짧아서 지역적인 바람에 의해 생성된 폭풍파로 보여진다($H_s = 2.60\text{m}$). Fig. 2.2.5의 경우 침두 주기에서의 파향이 NE 부근이며 주파수 및 방향에 대한 집중도가 Fig. 2.2.3~2.2.4에 비해 상당히 높고 침두 주기도 10.2초로 비교적 길어서 원거리의 바람에 의해 생성되어 전파해 온 폭풍파로 보여진다($H_s = 2.06\text{m}$).

파고가 동일할 경우 주기가 긴 파가 항내정온도에 더 큰 영향을 미치는 국내·외의 연구 결과[예를 들면, 정 등(1997)]를 참조하여 침두 주기가 매우 길었던 2개의 파랑(5월 18일 19시와 5월 21일 3시)에 대해 주파수-방향 스펙트럼 분석을 실시하고 그 결과들을 Fig. 2.2.6과 Fig. 2.2.7에 각각 제시하였다. Fig. 2.2.6을 살펴보면 침두주기에서의 파향이 NE 방향이고 주파수 및 방향에 대한 집중도가 매우 높으며 침두 주기는 11.8초이므로($H_s = 1.55\text{m}$) 원거리의 바람에 의해 생성되어 전파해 온 폭풍파이다. 침두 주기에서의 파향인 NE와 거의 반대 방향인 SW 부근에 무차원 에너지비가 0.25 정도인 파랑 성분이 출현하는 점이 특이하다. 이는 DWB가 개방된 해역에 설치되어 구조물에 의한 반사파가 존재하기 어려웠던 점을 감안하면 강한 흐름에 의한 반사파 또는 이에 의해 DWB가 경사진 상태에서 계류 시스템이 일종의 공진을 일으켜서 나타난 현상으로 보여지며 상세한 검토가 요구된다. Fig. 2.2.7의 경우에도 침두 주기(11.0초)에서의 파향은 NE 부근이며 Fig. 2.2.6과는 약간 달리 W 방향에서 무차원 에너지비가 0.2 정도인 파랑 성분이 출현한다($H_s = 2.66\text{m}$). 이 경우에는 주파수 및 방향에 대한 집중도가 Fig. 2.2.7에 비해 상당히 낮다.

다. 파의 항내 전파·변형 특성 분석

총 4개 관측정점에서의 자료 중 P1에서의 자료는 관측기기의 설치수심이 50 m에 달하여 단주기파 특성을 파악하기에는 곤란하여 제외하였다.

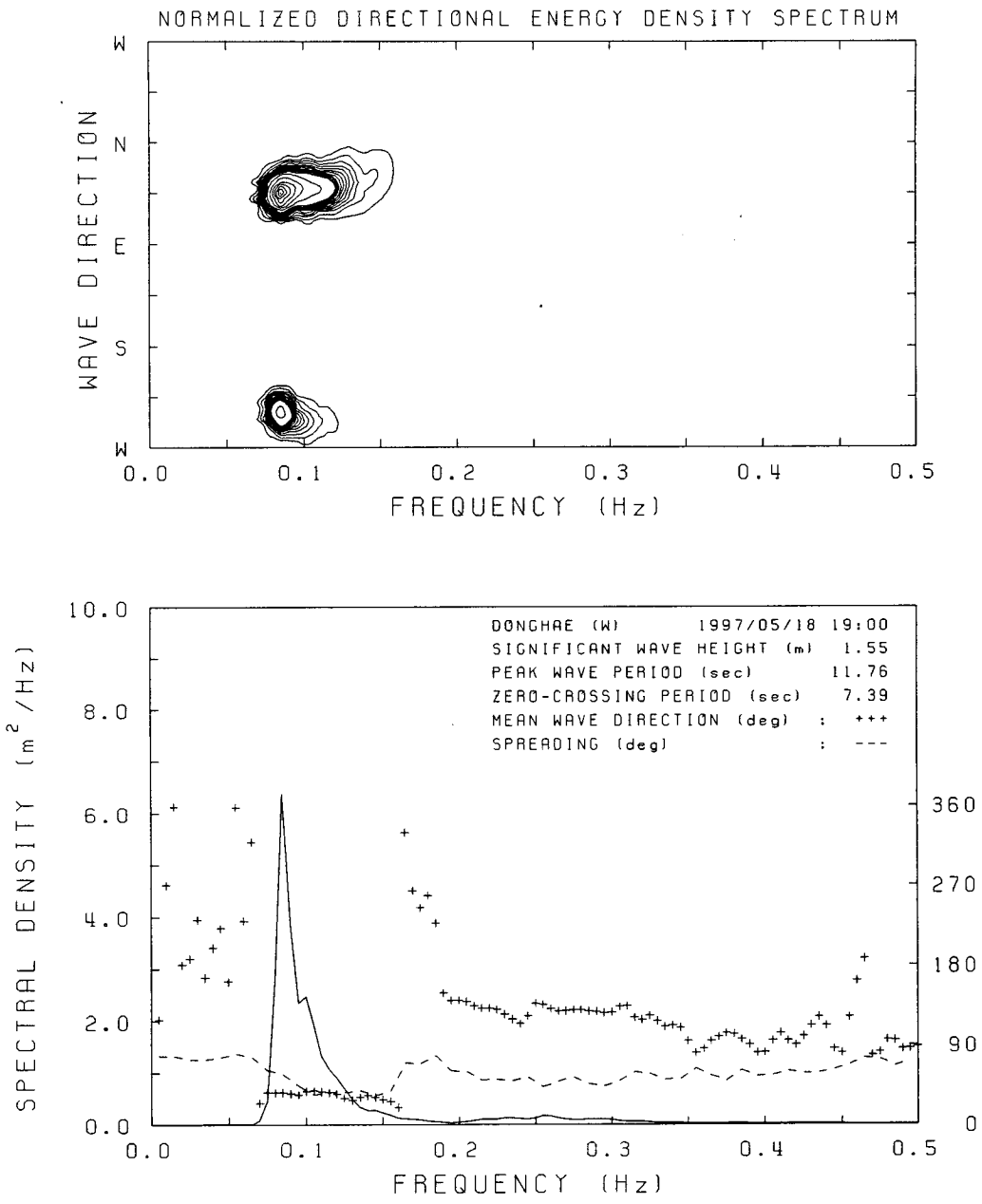


Fig. 2.2.6 Directional spectra of waves measured at station W (May 18 19:00, 1997).

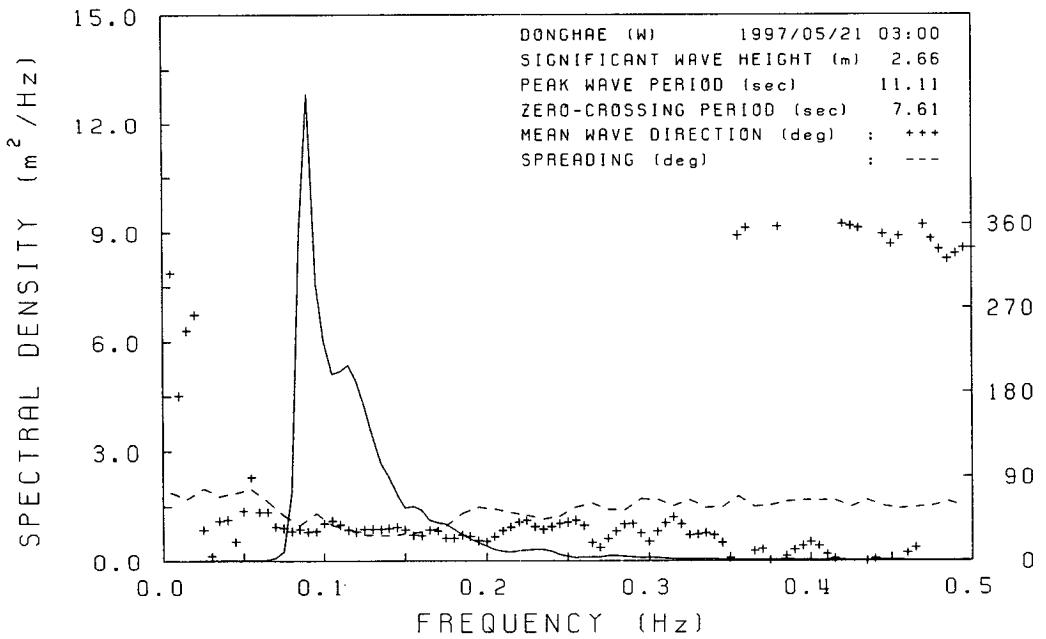
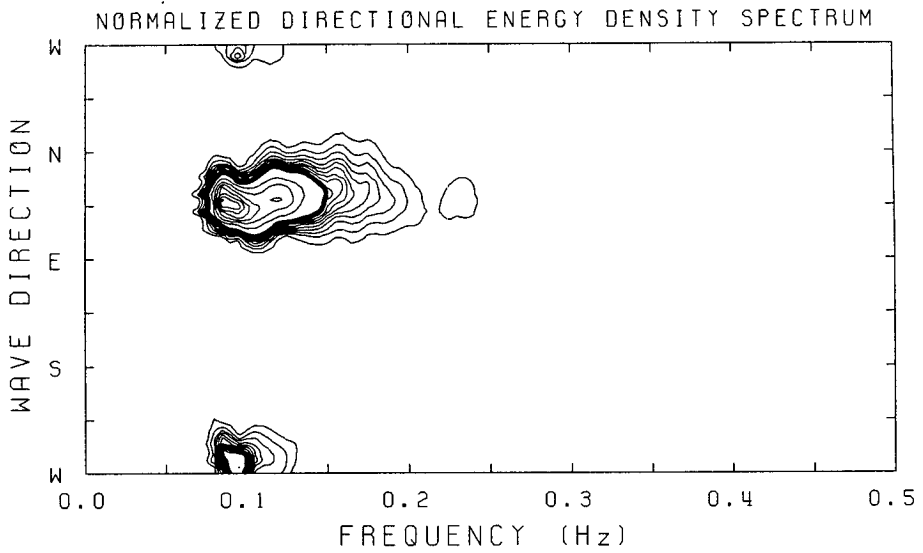


Fig. 2.2.7 Directional spectra of waves measured at station W (May 21 3:00, 1997).

먼저, 5월 9일~19일까지 정점 W 및 P3와 P4의 동시관측에서 유의파고(H_s)의 변화를 Fig. 2.2.8에 제시하였다. 수압식 파고계로 관측된 자료는 후술하는 Nielsen(1986)의 Local approximation method를 적용하지 않는 한파별분석법의 적용이 불가능하므로 항내·외 정점 모두 스펙트럼 분석법에 의한 결과를 이용하였다. Fig. 2.2.8을 살펴보면 정점 P3와 P4에서의 파고는 대부분 0.1 m 정도이나 13일, 17일 및 18일에는 0.25~0.35 m 정도로 항내파고가 상당히 컸다.

5월 27일~6월 7일까지 정점 W 및 P2~P4의 동시관측에서 유의파고(H_s)의 변화를 Fig. 2.2.9에 제시하였다. Fig. 2.2.9를 살펴보면 정점 P2는 항입구에 위치하여 전반적으로 정점 P3와 P4에서의 파고보다 큰 값을 보였으며 5월 28~29일에는 0.4~0.45 m, 5월 30일에는 0.55 m, 6월 1~2일에는 0.4~0.65 m의 상당히 큰 파고가 관측되었다. 정점 P3에서는 비슷한 시기에 0.25~0.35 m의 파고를 보였으며, 정점 P4에서는 0.3~0.55 m의 상당히 큰 파고를 나타냈다. 즉, 이 경우에도 5월 28일, 5월 30일~6월 2일 및 6월 4일~6일에는 정점 P4에서의 파고가 P3보다 컸으며 이에 대한 분석은 파고비 부분에서 상술하기로 한다.

6월 7일~19일까지 정점 W 및 P2~P4의 동시관측에서 유의파고(H_s)의 변화를 Fig. 2.2.10에 제시하였다. Fig. 2.2.10을 살펴보면 역시 항입구에 위치한 정점 P2에서 전반적으로 정점 P3와 P4에서의 파고보다 큰 값을 보인다. 한편, 이 경우에도 6월 7일~8일에는 정점 P4에서의 파고가 P3보다 컸다. 6월 13일 이후에는 정점 W에서의 파고가 0.4 m 이하로 작았기 때문에 자세한 분석은 생략하였다.

전술한 3 시기의 자료에 대한 분석 결과 증첩두 주기의 변화를 Figs. 2.2.11~2.2.13에 각각 제시하였다. 이들을 살펴보면 인접한 자료에서도 주기의 변화가 상당히 증첩두 주기를 상호 비교하는 것은 곤란하다. 전술한 바와 같이 수압식 파고계에 의한 자료는 파별분석법의 적용이 불가능하므로 보다 안정된 값을 보이는 유의파주기($T_{H_{1/3}}$)의 비교를 실시하지 못하였다.

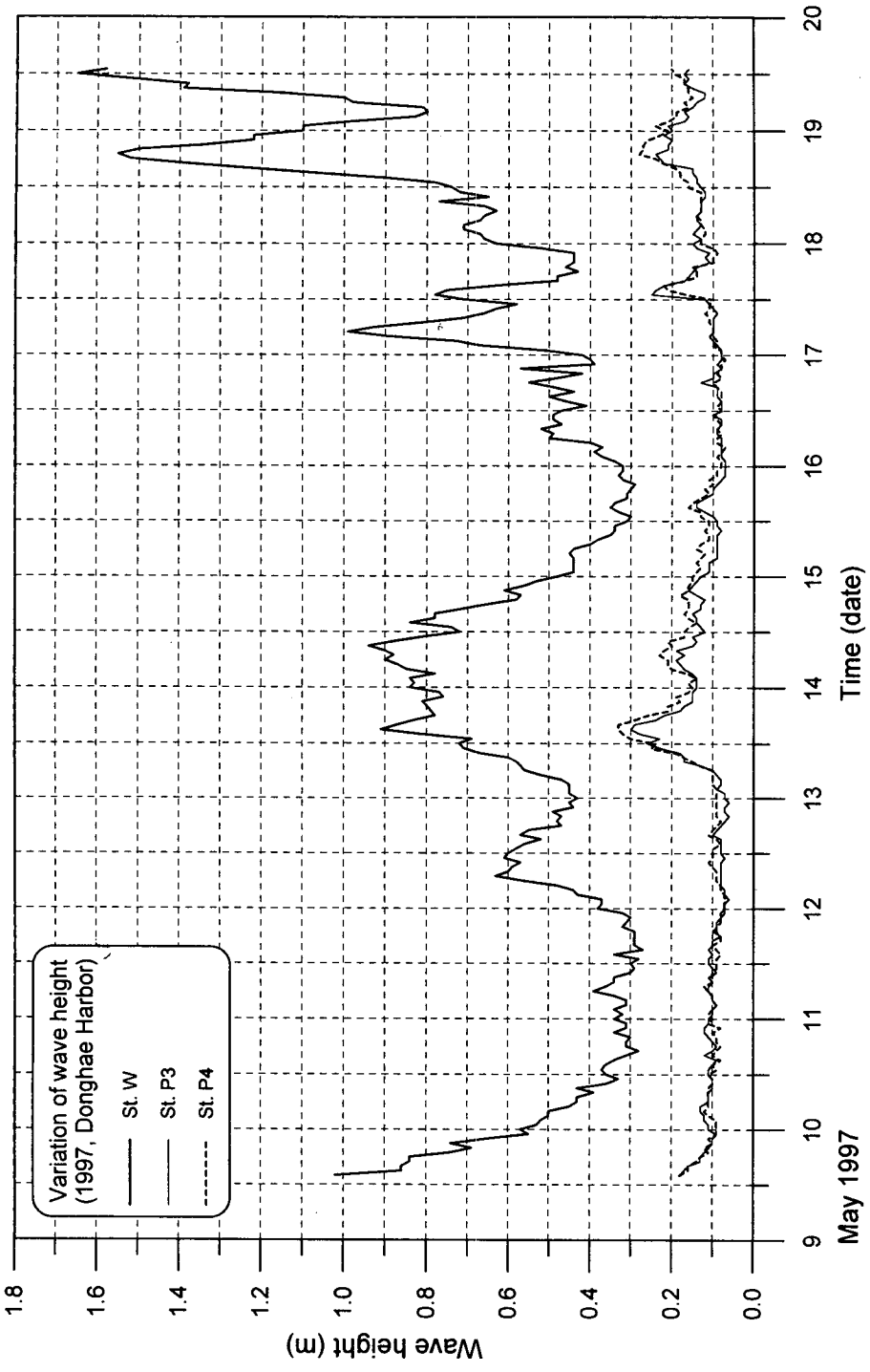


Fig. 2.2.8 Time series of H_s measured at stations W, P2 and P3 (May 9~19, 1997).

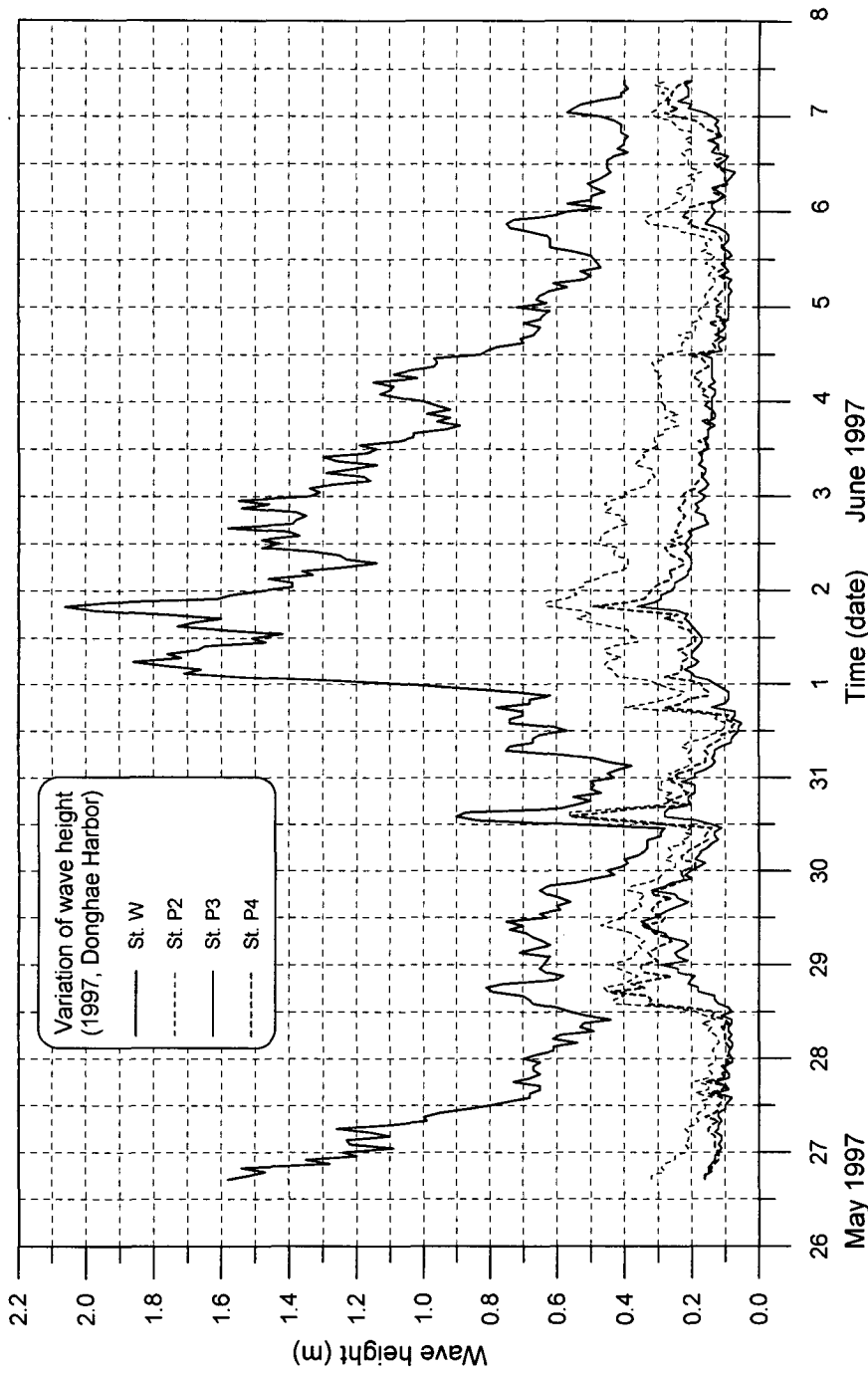


Fig. 2.2.9 Time series of H_s measured at stations W, P2, P3 and P4 (May 26~June 7, 1997).

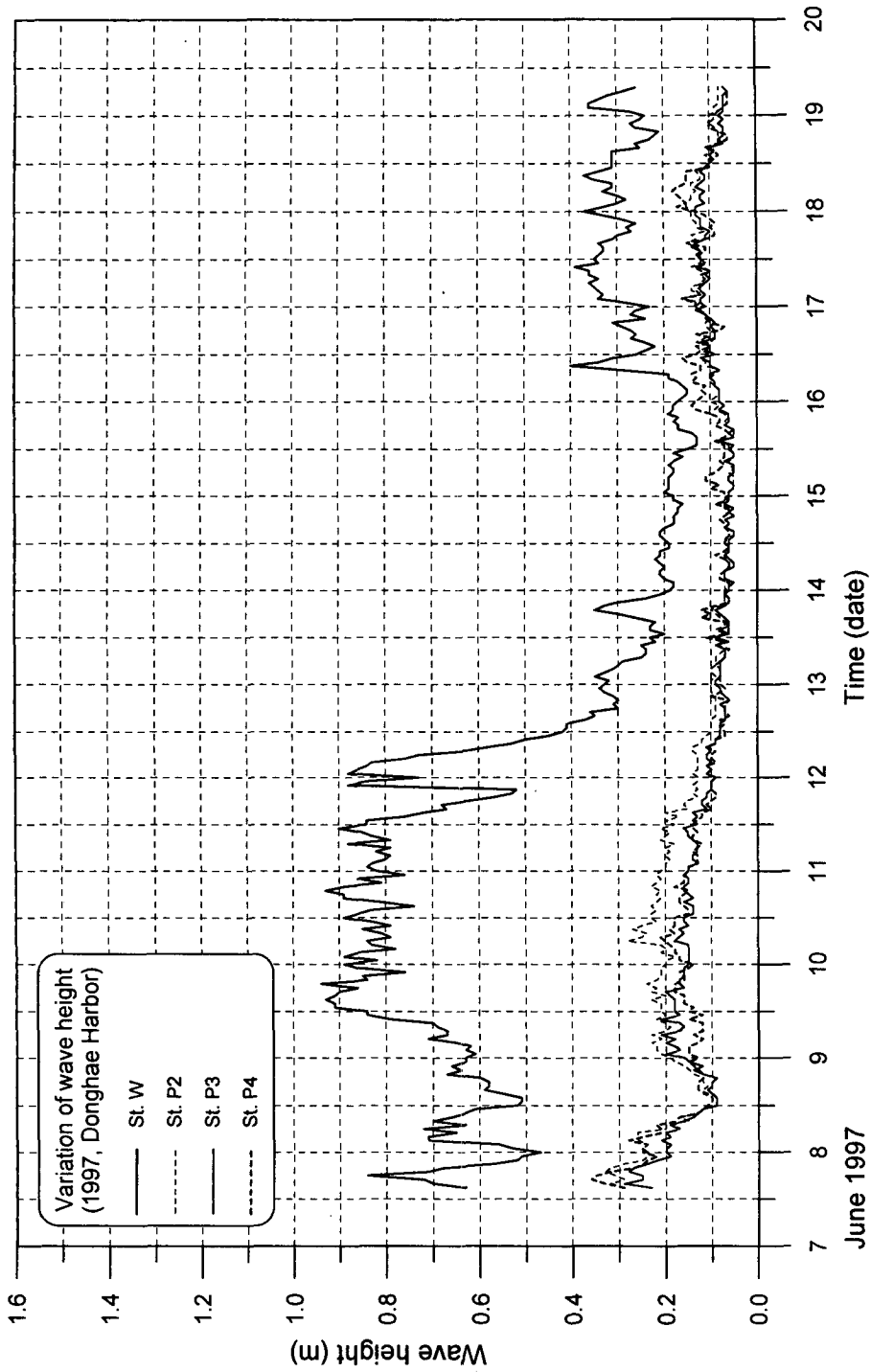


Fig. 2.2.10 Time series of H_s measured at stations W, P2, P3 and P4 (June 7~19, 1997).

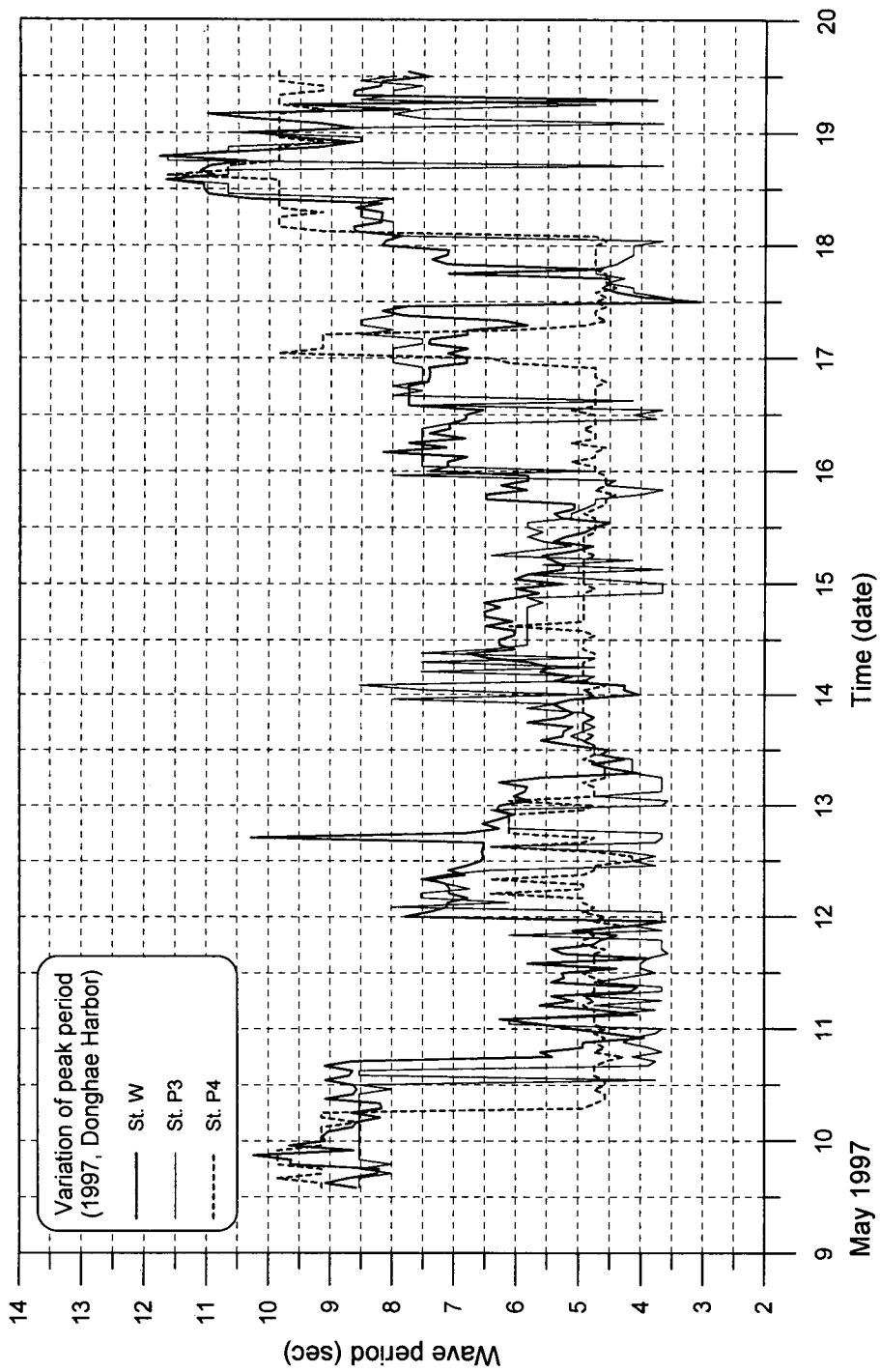


Fig. 2.2.11 Time series of T_p measured at stations W, P2 and P3 (May 9~19, 1997).

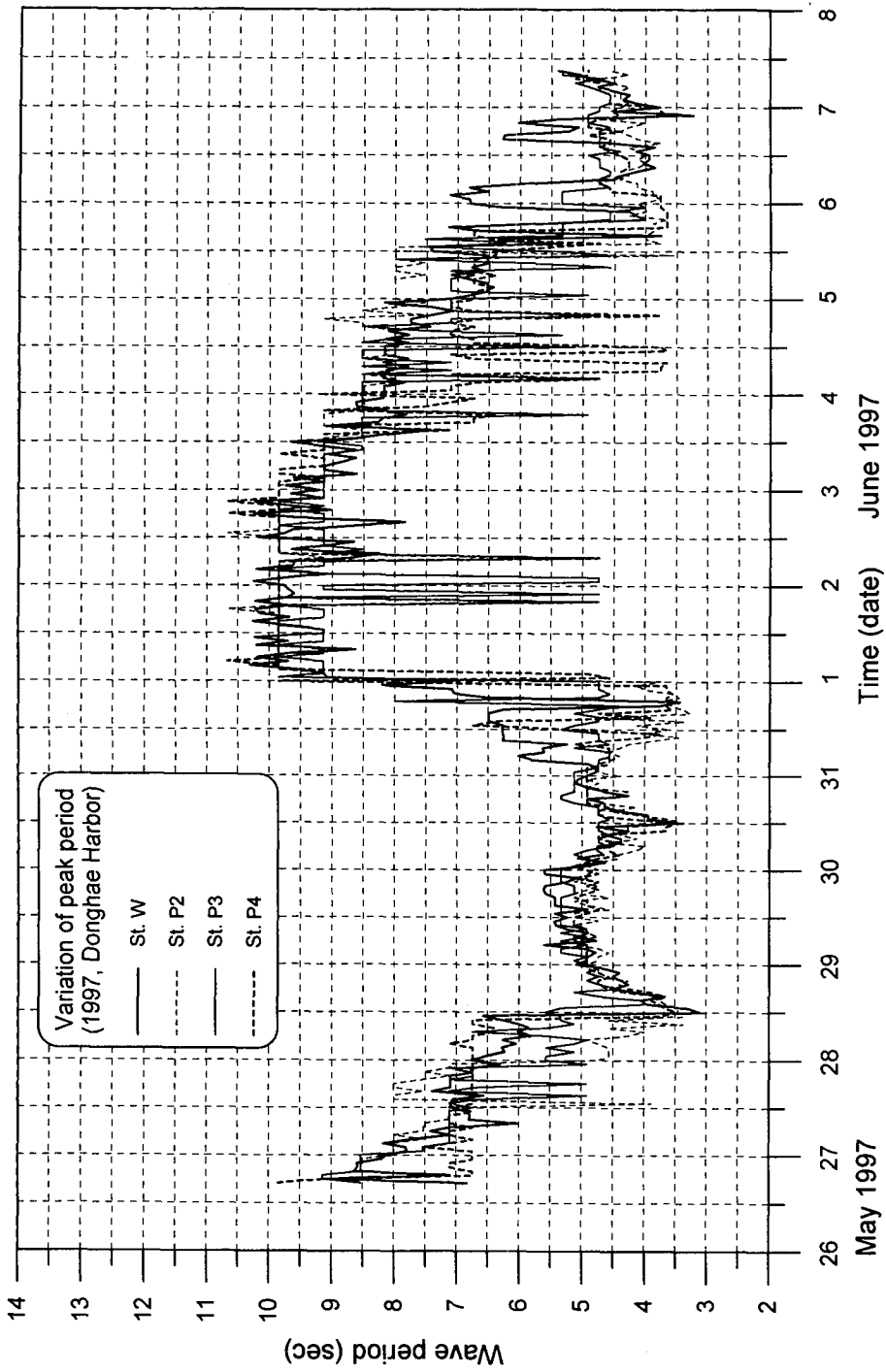


Fig. 2.2.12 Time series of T_p measured at stations W, P2, P3 and P4 (May 26~June 7, 1997).

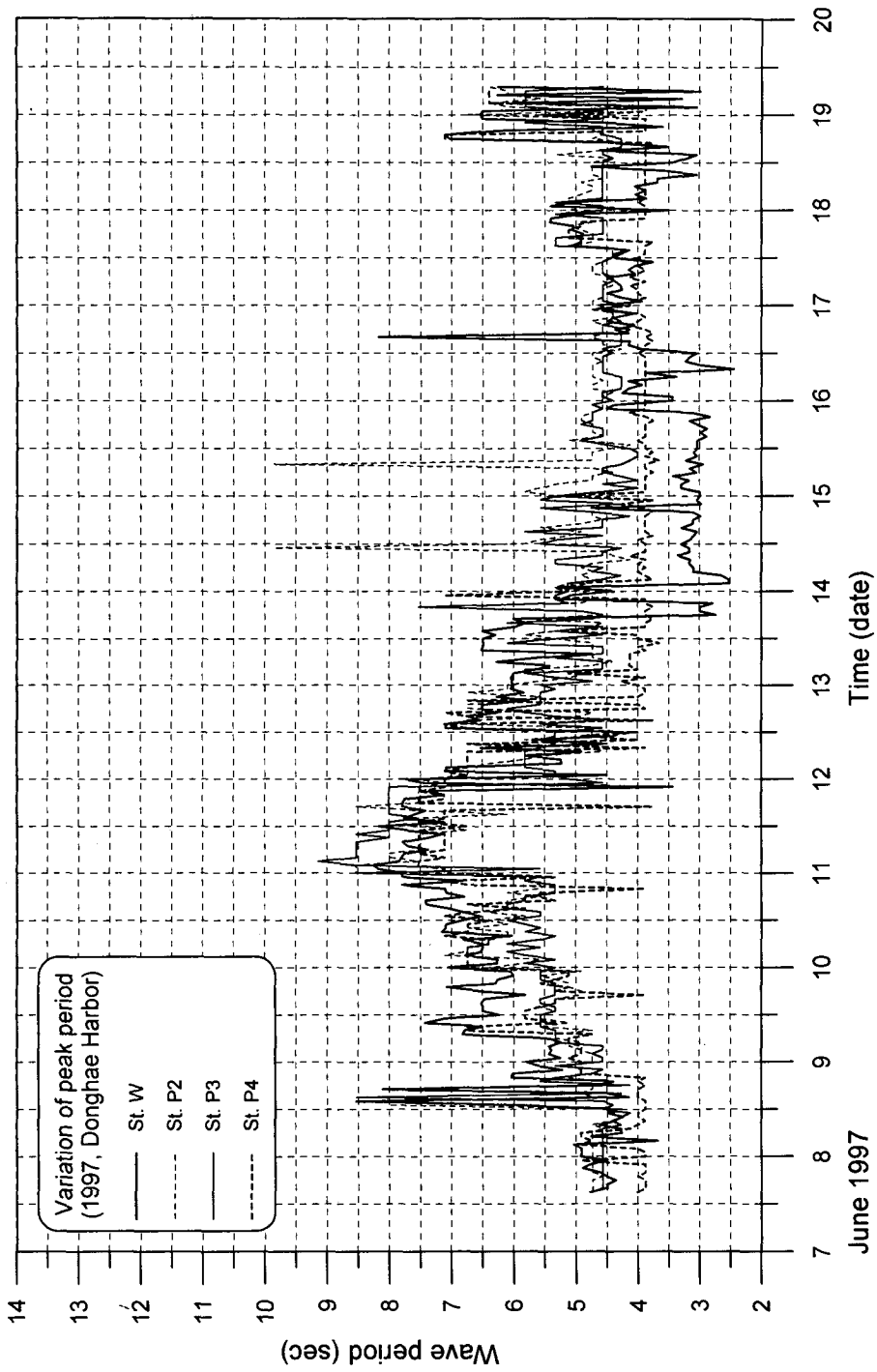


Fig. 2.2.13 Time series of T_p measured at stations W, P2, P3 and P4 (June 7~19, 1997).

항외 정점 W에 대한 항내 정점 P2~P4에서의 파고비 변화를 전술한 3 시기의 자료에 대해 Figs. 2.2.14~2.2.16에 각각 제시하였다. 먼저, Fig. 2.2.14를 살펴보면 항내 2 지점에서의 파고비는 대체로 0.15~0.40 사이에서 변화하였다. 5월 10~11일, 13일, 15일의 일부 기간 중에 2 정점에서의 파고비가 0.3~0.4 정도로 상당히 큰 경우는 정점 W에서의 파향이 ENE~ESE 방향(Table A1.1 참조)이어서 파가 항내로 침입해오기 쉬웠기 때문으로 생각된다. 한편, 5월 13일 13시~16일 3시, 18일 11시~19일 4시에는 정점 P3에서의 파고비가 P4보다 크게 나타났다. 이 기간 중의 상당한 부분에서 항외의 유의파고가 0.5 m 이하로 상당히 작았으므로 관측 오차를 생각할 수도 있으나 정점 P4에서는 정점 P3에 비해 안벽에서의 다중 반사가 상당히 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 2.2.15의 경우 항입구의 정점 P2에서는 파고비가 0.2~0.35인 기간과 0.5 이상인 기간으로 크게 구분된다. 이 중 후자는 정점 W에서의 파향이 E~SE 방향(Table A1.1 참조)이어서 파가 항입구로 침입해오기 쉬웠기 때문으로 생각된다. 정점 P3와 P4의 경우에도 비슷한 시기에 0.4~0.65의 파고비를 나타내어 다른 시기의 0.25 이하와 큰 차이를 보였다. 한편, 이 시기에는 전반적으로 정점 P3에서의 파고비가 P4보다 크게 나타났다. 그러나, 항외파고가 1.2~2.1 m로 상당히 컸던 6월 1~2일에 P4에서의 파고비가 P3보다 0.05 정도 큰 점과 항외의 입사 파향이 ENE~SE 방향일 때 항내 정점 P3와 P4에서의 파고비가 0.5 이상을 나타내는 점 등은 특수 부두에서의 정온도 불량 문제와 연계하여 금후 심도있게 검토돼야 할 것으로 사료된다.

Fig. 2.2.16에서도 항입구 및 항내 정점에서의 파고비가 0.4 이상인 기간과 0.3 이하인 기간으로 크게 구분할 수 있으며 이 경우에도 전자는 정점 W에서의 파향이 E~SE 방향(Table A1.1 참조)이어서 파가 항입구로 침입해오기 쉬웠기 때문으로 생각된다.

단주기파 분석 결과 전반적으로 중앙 부두 전면의 P3에서보다 특수 부

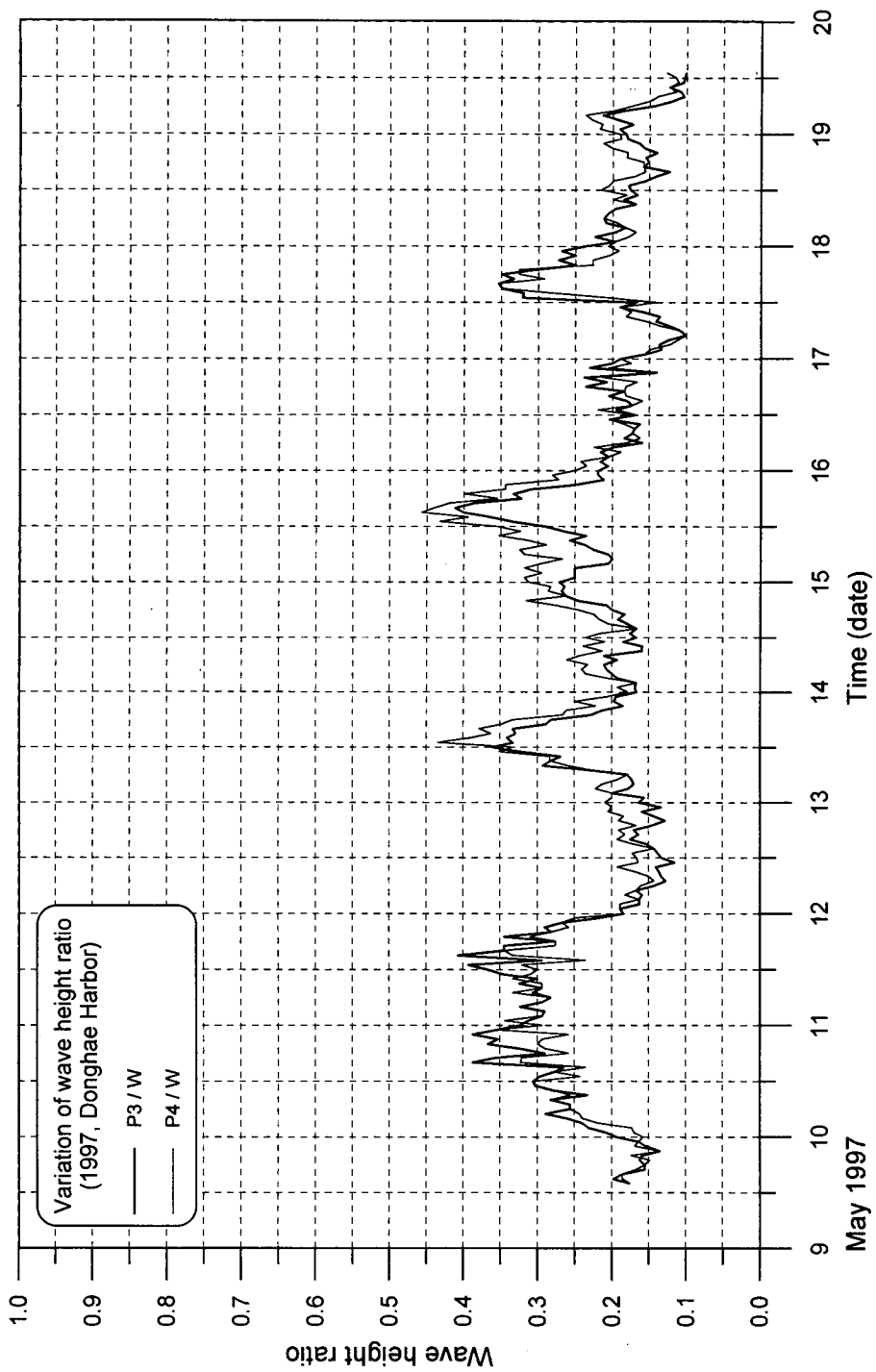


Fig. 2.2.14 Time series of ration of wave height at inner stations (P3, P4) to wave height at outer station (W) (May 9~19, 1997).

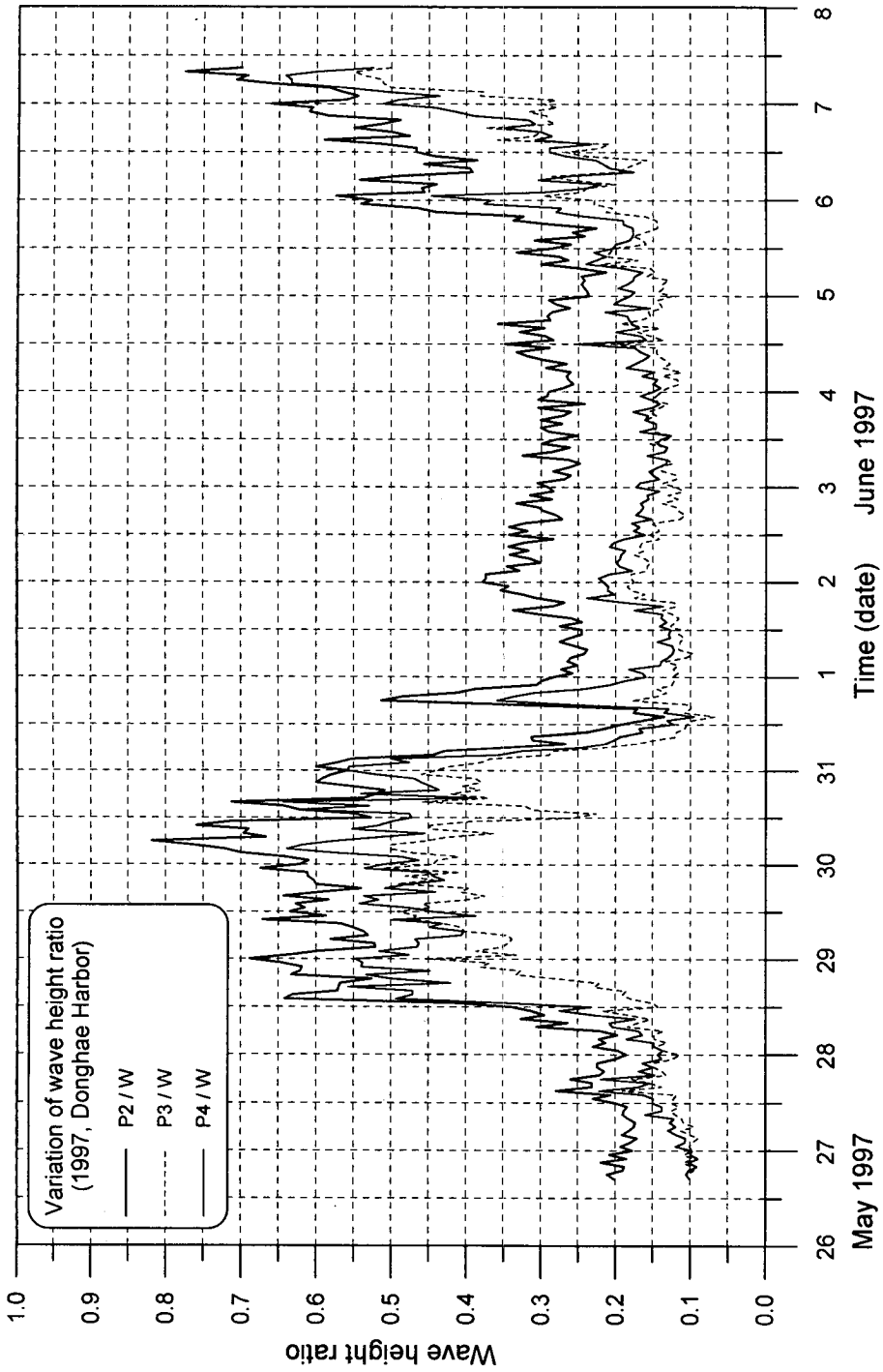


Fig. 2.2.15 Time series of ration of wave height at inner stations (P2, P3, P4) to wave height at outer station (W) (May 26~June 7, 1997).

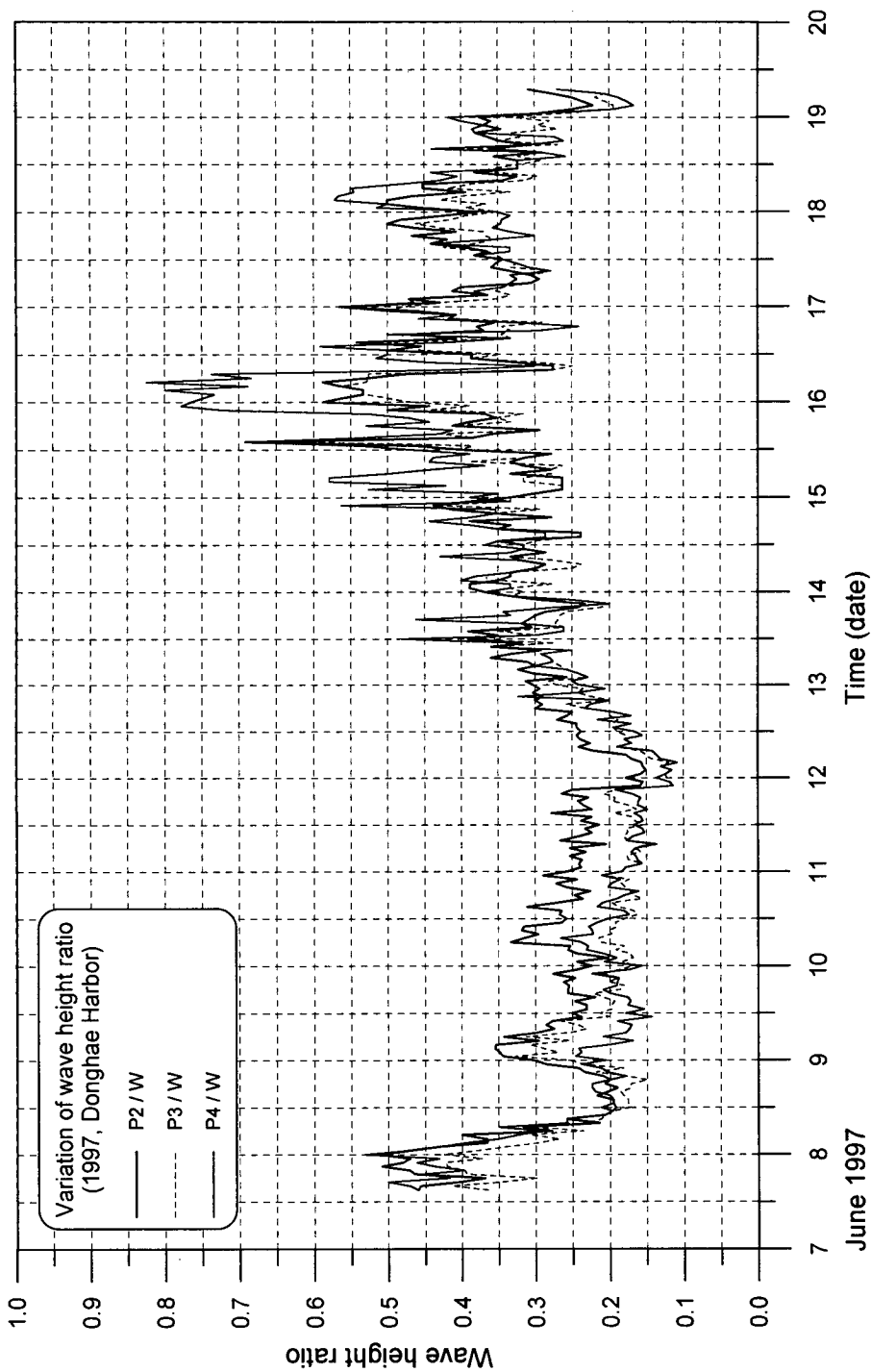


Fig. 2.2.16 Time series of ration of wave height at inner stations (P2, P3, P4) to wave height at outer station(W) (June 7~June 19, 1997).

두의 P4에서의 파고가 약간 더 컸다. 이는 P4가 P3보다 항내에 위치하며 3 방향에 안벽이 축조되어 있는 점을 감안(P4는 2 방향)하면 특수 부두 수역에서 다중 반사로 파고가 증대된 것으로 생각되며 동 수역의 정온도 불량 원인을 어느 정도 설명해주는 것으로 사료된다. 참고로 거의 동일한 위치에서 관측되었던 전년도(과학기술처, 1996)에서도 유사한 경향이 상당히 출현하였다.

라. 국부근사법 (local approximation method)

수압 자료를 해수위 자료로 환산하는 방법은 지금까지의 많은 연구 결과를 기준하면 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는, 본 연구에서도 사용된 수압 자료의 주파수 스펙트럼에 주파수 응답 함수(transfer function)를 곱하여 표면파의 주파수 스펙트럼을 추정하는 유형의 주파수 영역에서의 해석법이다. 다음은 수압파와 표면파의 관계를 나타내는 회귀식에 기초하여 표면파를 추정하는 유형의 시간 영역에서의 해석법을 들 수 있다. 그러나, 많은 연구에도 불구하고 정확도나 안정성 측면에서 크게 만족할 수 있는 환산 방법은 아직까지도 제시되지 못한 실정이다(橋本 等, 1993).

한편, Nielsen(1986)은 실험 수로에서 구해진 자료에 근거하여 다음 식으로 주어지는 환산식을 제안하였다.

$$\eta_n = \frac{p_n}{\rho g} \exp\left[\left(\frac{2}{3} + \frac{0.34z}{d}\right) \times \frac{-p_{n-M} + 2p_n - p_{n+M}}{p_n g (M\Delta t)^2} \left(d + \frac{p_n}{\rho g} - z\right)\right] \quad (2.2.1)$$

$$M \approx \frac{\sqrt{d/g}}{\Delta t} \quad (2.2.2)$$

여기서, η 는 수면파, p 는 수압파의 시계열을 각각 나타내며, ρ 는 유체의 밀도, g 는 중력가속도를 나타낸다. d 는 수심, z 는 수압식 파고계의 설치수심, Δt 는 시계열 자료의 자료 수집 간격이며 $p_n = p(n\Delta t)$ 이다. 식 (2.2.1)

에 의해 수압과 자료를 표면파를 환산하는 방법을 국부근사법(Local approximation method)으로 부르기도 한다. 이 방법은 천해역의 비선형적인 파에도 적용이 가능하지만 시계열 자료가 평균치를 교차하는 부분에서 현저한 오차를 주는 경우가 있다(橋本 等, 1993).

스펙트럼법으로 처리한 정점 W의 DWB 자료, 스펙트럼 해석과 transfer function을 이용하는 방법(이하에는 SPM 방법으로 명명)으로 처리한 정점 P1의 자료 및 Nielsen의 방법으로 처리한 정점 P1의 자료들의 분석 결과 중에서 유의파고(H_s)와 평균주기(T_2)의 변화를 부록의 Figs. A1.1~A1.3에 각각 제시하였다(그림에서 SPM은 spectral method를 나타냄).

먼저, 5월 9~21일의 변화를 제시한 Fig. A1.1(상부가 유의파고, 하부가 평균주기)을 살펴보면 유의파고가 1.0 m 이하인 경우에는 분석 방법에 관계없이 수압식 파고계로 관측한 파고가 파향·파고계로 관측된 파고보다 작게 나타났다. 그러나, 유의파고가 1.5 m 이상으로 클 때는 수압 자료를 SPM 방법으로 처리하여 구한 파고가 파향·파고계로 관측된 파고보다 크게 나타났다. 한편, Nielsen 방법에 의한 파고는 모두 파향·파고계로 관측된 파고보다 작게 나타났다. 하부의 평균 주기의 변화를 살펴보면 Nielsen 방법에 의한 결과는 대체로 파고가 큰 시기에는 파향·파고계로 관측한 값보다 길고 파고가 작은 시기에는 짧게 제시되었다. 그러나, SPM 방법에 의한 결과는 모두 파향·파고계로 관측한 값보다 상당히 길게 제시되었다. 이러한 경향은 5월 26일~6월 7일까지의 변화를 제시한 Fig. A1.2와 6월 7~19일까지를 제시한 Fig. A1.3에서도 비슷하게 나타났다.

정점 P2의 자료를 SPM 방법과 Nielsen의 방법으로 처리하여 구한 5월 26일~6월 7일 및 6월 7~19일의 유의 파고(H_s)와 평균 주기(T_2)의 변화를 Fig. A1.4와 A1.5에 각각 제시하였다. 이를 살펴 보면 유의 파고의 경우 Nielsen의 방법에 의한 결과가 약간 작게 제시되었으며, 평균 주기는 대체로 유의 파고가 클 때는 Nielsen의 방법에 의한 결과가 길고 파고가 작을 때는 이와 반대의 경향을 나타냈다.

정점 P3의 자료를 SPM 방법과 Nielsen의 방법으로 처리하여 구한 5월

7~19일, 5월 26일~6월 7일 및 6월 7~19일의 유의 파고와 평균 주기의 변화를 Figs. A1.6~A1.8에, 그리고 정점 P4의 자료를 동일하게 처리하여 구한 5월 7~19일, 5월 26일~6월 7일 및 6월 7~19일의 유의 파고와 평균 주기의 변화를 Figs. A1.9~A1.11에 각각 제시하였다. 이들의 경우에도 정점 P2의 경우와 거의 동일한 경향을 보였다.

전술한 것처럼 수압식 파고계에 의한 파고가 파향·파고계에 의한 파고와 차이를 보이는 이유는 적용한 transfer function이 수심 20 m까지의 보정(한국과학기술원 부설 해양연구소, 1988 참조) 결과에 기초한 점과 설치 수심이 약 50 m에 달하여 해수 표면의 압력 변화에 기기 내의 센서가 정확하게 반응하기 어려운 점 등이 문제가 되었을 것으로 생각할 수 있다.

이를 종합하면 파향·파고계 대신 수압식 파고계로 수심 30 m가 넘는 지점에서 파고를 관측하는 것은 무리라고 생각된다. 단, 폭풍시와 같이 파고가 큰 경우에는 수압식 파고계로 취득된 자료를 SPM 방법으로 처리하는 방법도 부분적으로 적용이 가능할 것으로 생각된다. 한편, 주기의 경우는 Nielsen 방법에 의한 경우가 파향·파고계에 의한 주기에 가깝지만 지금까지의 결과는 단주기파에 국한시켜서 고려해야 할 것이다.

3. 장주기파 분석

장주기파 현장관측은 단주기파와 같이 4 개 정점(Fig. 2.1.1에서 P2~P4는 동일한 자료를 단주기파와 장주기파에서 모두 사용)에서 실시되었으며 전술한 바와 같이 정점 P2의 일부 기간(5월 9일~19일)을 제외한 모든 기간과 정점에서 양호한 자료를 회수하였다.

가. 분석 방법

Paro scientific sensor를 장착한 수압식 파고계에 의해 1 초 간격으로 관측된

수압 자료들을 온도 보정과 Nielsen의 방법을 사용하여 해수위 자료로 변환하였다. 지금까지는 5초 간격으로 자료를 수집하였으며 기기의 설치 수심도 35 m를 초과하지 않았을 뿐만 아니라 분석 대상이 되는 주기도 수 분 이상의 장주기 부진동만을 고려하였으므로 온도 보정만 거친 수압 자료에 스펙트럼 분석법을 적용하여 공진 주기와 상대 진폭비를 구하였다. 이는 수압식 파고계의 설치 수심이 얕을 경우 주기 수심 초 이상의 장주기 변동은 수압과 수위에 거의 차이가 없기 때문이다. 그러나, 본 연구의 경우 항의 정점 P1의 설치 수심이 거의 50 m에 달하여 1초 간격으로 취득한 수압 자료를 온도 보정만 실시하고 수위 자료로 사용하는 것이 곤란할 것으로 사료되어 Nielsen의 방법을 시험적으로 적용하였다.

Fig. 2.2.17에는 정점 P1에서 6월 7일 15시부터 1시간 동안 관측된 수압 자료 3,600개와 이를 Nielsen의 방법으로 처리하여 구한 해수위 변동 자료 3,600개를 각각 도시하였다. 이 그림에서 상부의 3,600개가 수압 자료, 하부의 3,600개가 해수위 변동 자료(해수위 변동은 절대 기준면에서의 변동으로 표시하는 것이 일반적이거나 여기서는 수압 자료와의 비교를 위해 기준면을 설치 수심으로 변경하였음)를 각각 나타낸다. 이를 살펴 보면 수압 자료에 비해 해수위 자료의 변동 폭이 10 배 이상에 달하는 것을 알 수 있다. 단, 변환된 해수위 변동 자료를 자세히 살펴 보면 동일한 진폭이 다수 연속되는 불안정한 현상이 상당히 나타났으며 이와 같이 수심이 50 m에 달하는 지점에서 관측된 자료에는 Nielsen 방법을 적용하는 것이 다소 무리인 것으로 사료된다.

정점 P2~P4에서 동일한 기간 동안 관측된 수압 자료와 Nielsen 방법에 의한 해수위 자료 3,600개씩을 각각 Fig. 2.2.18~2.2.20에 제시하였다. 이 자료들은 수심이 10~15 m 사이여서 정점 P1의 경우처럼 양자의 차이가 크지는 않으나 해수위 변동이 수압 변동에 비해 대략 3~4배 정도의 진폭을 가진 것으로 변환되었다. 또한, 정점 P1의 경우와는 달리 변환된 해수위 자료에서는 불안정한 현상이 전혀 나타나지 않는다. 본 연구에서는 양자에 대해 스펙트럼 분석을 실시하여 상호 비교함으로써 타당성을 검토한 후 적절한 자료를 사용하는 것으로 하였다.

5월 28일 16시부터 1초 간격의 연속된 86,400개의 수압 및 해수위 변동 자료에

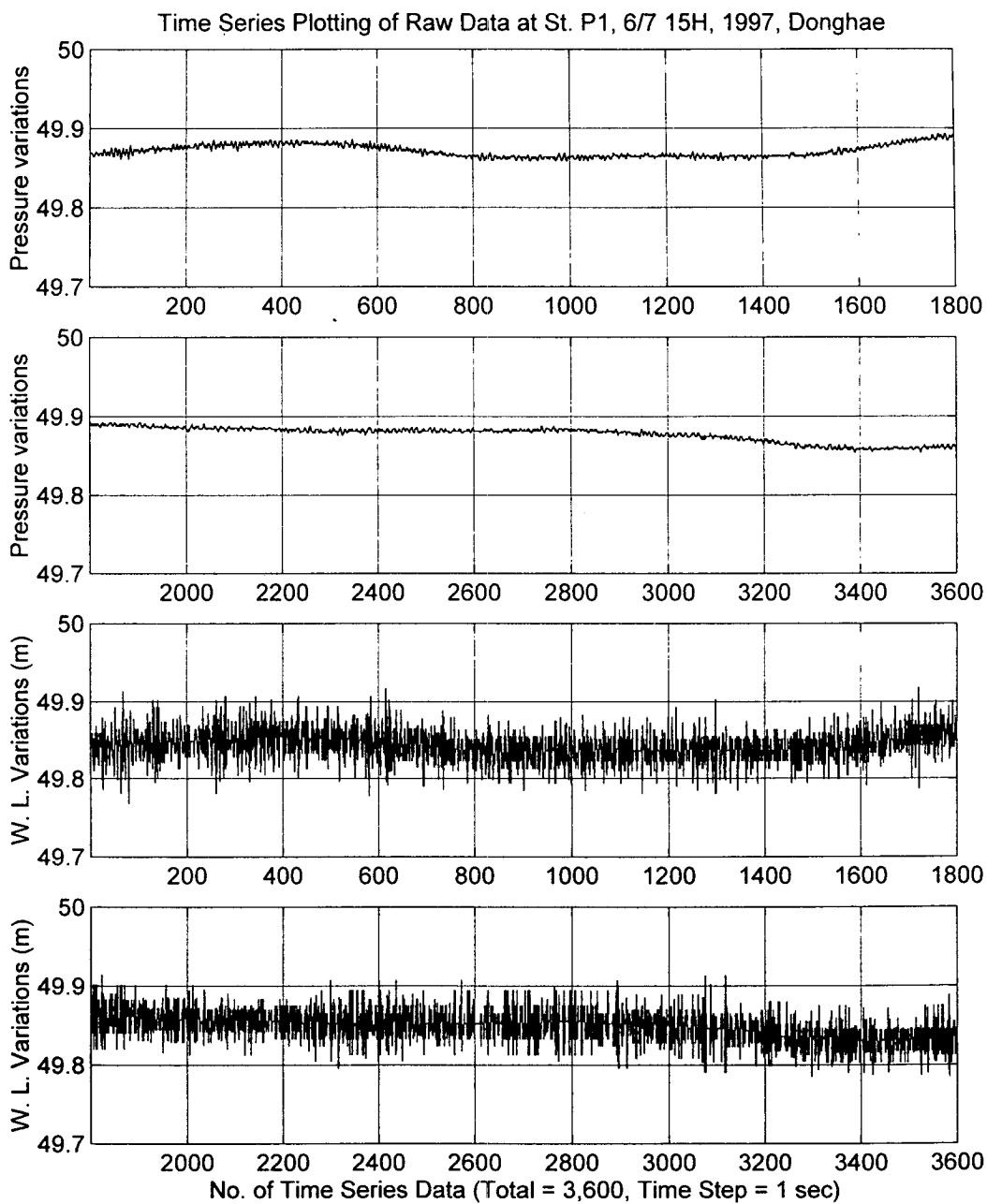


Fig. 2.2.17 Time series of pressure data and sea level data measured at station P1 for 1 hour from June 7 15:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P2, 6/7 15H, 1997, Donghae

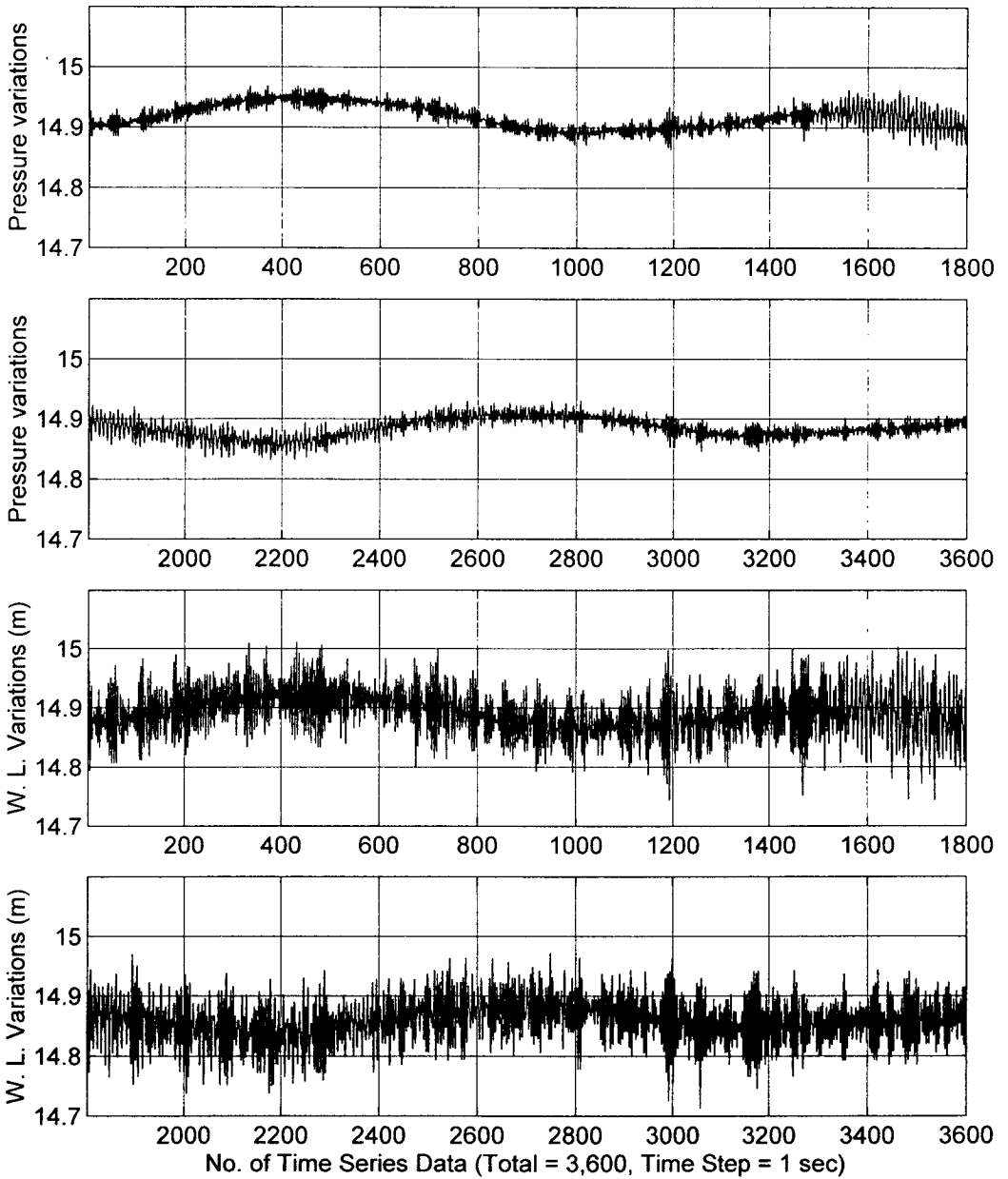


Fig. 2.2.18 Time series of pressure data and sea level data measured at station P2 for 1 hour from June 7 15:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P3, 6/7 15H, 1997, Donghae

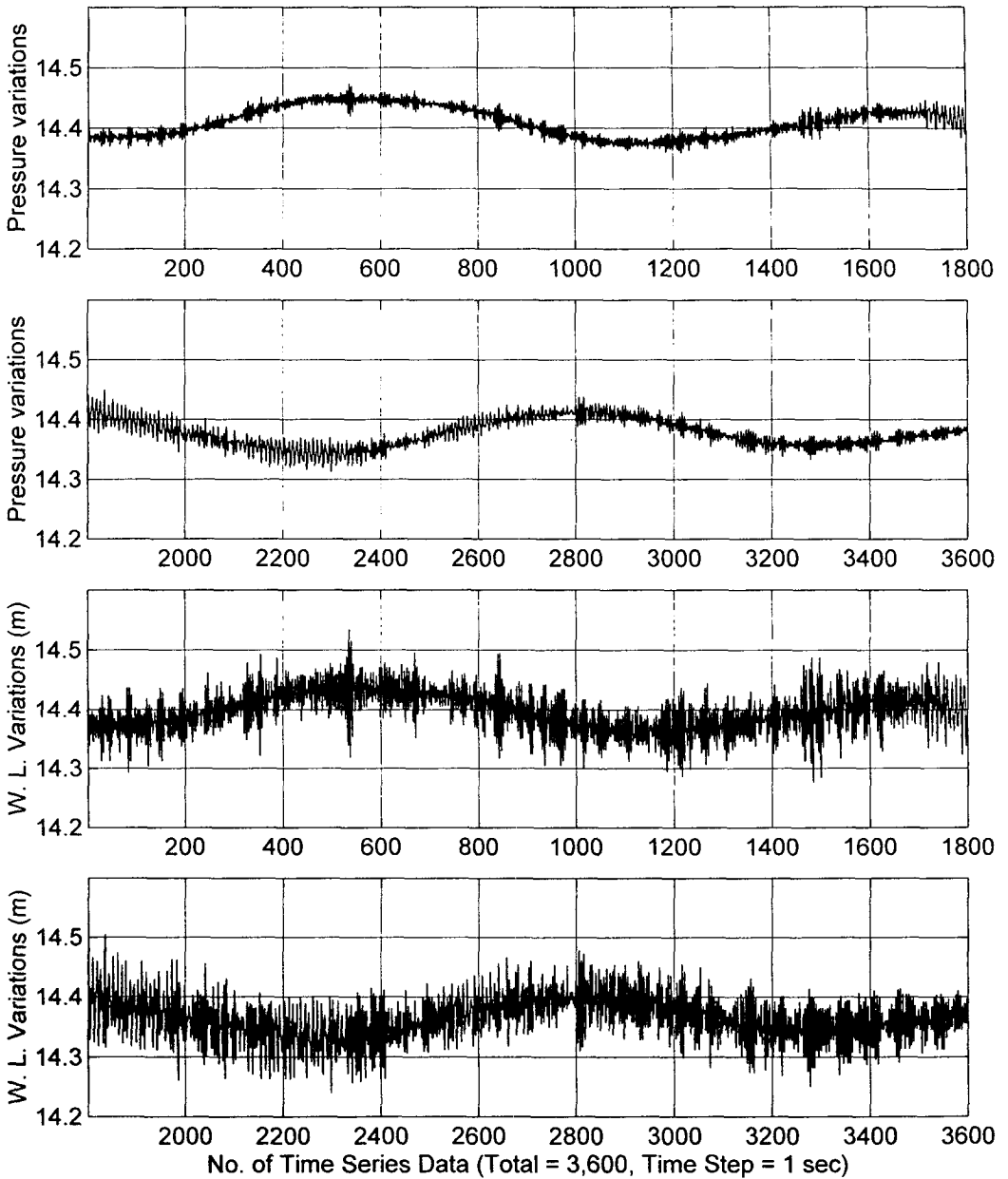


Fig. 2.2.19 Time series of pressure data and sea level data measured at station P3 for 1 hour from June 7 15:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P4, 6/7 15H, 1997, Donghae

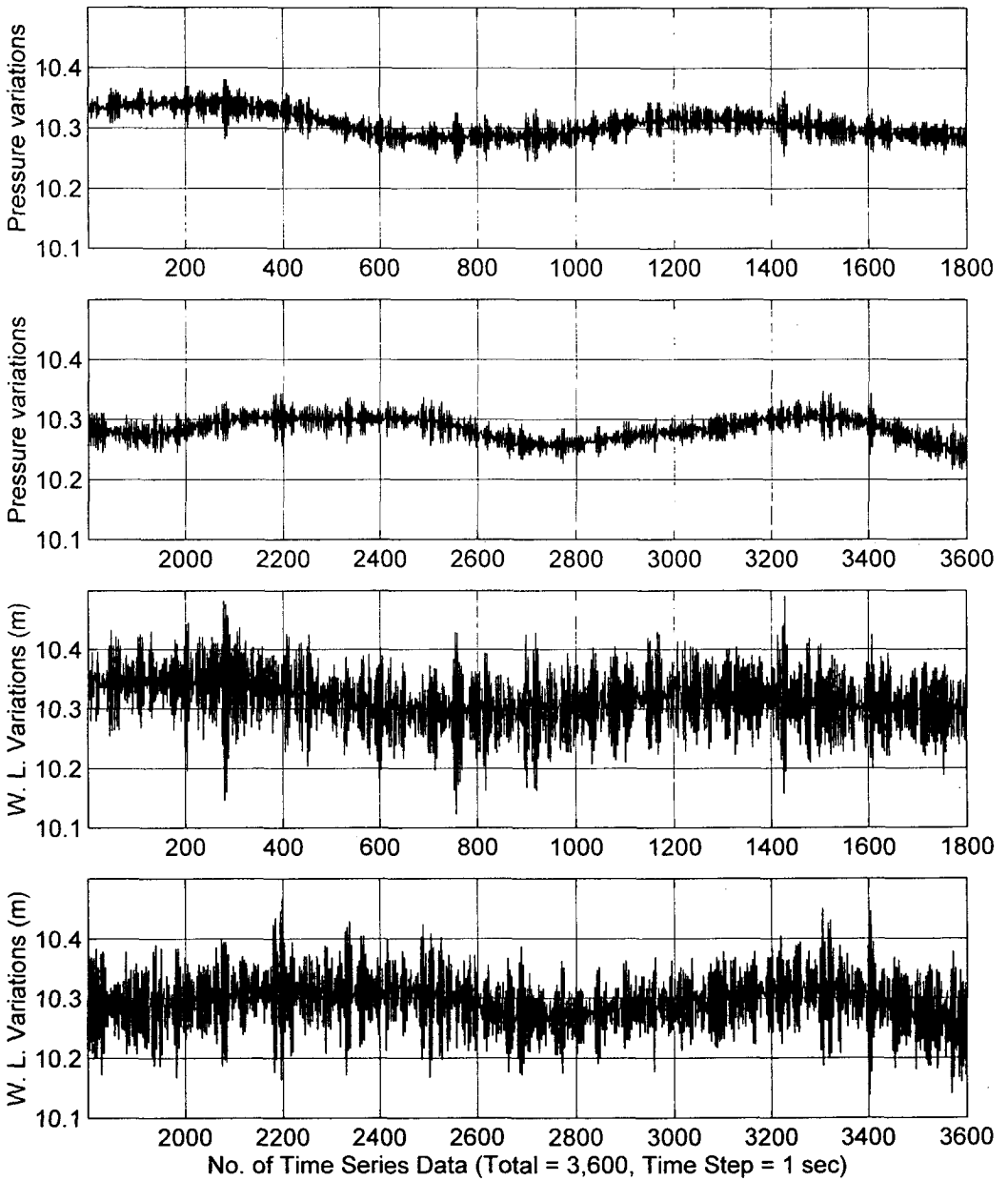


Fig. 2.2.20 Time series of pressure data and sea level data measured at station P4 for 1 hour from June 7 15:00, 1997.

대해 detrending과 Fig. 2.2.21에 transfer function이 제시된 6차 Butterworth high-pass filter(cutoff period는 40분)를 사용하여 조석 성분을 제거하였으며, 이들을 5개마다 다시 수집한(re-sampling) 5초 간격의 연속된 자료 16,384개(약 22.8시간)에 대해 FFT를 이용한 스펙트럼 분석을 실시하였다. 사용된 필터의 transfer function(Fig. 2.2.21에서 굵은 실선으로 표시)을 살펴보면 주기가 약 85분보다 긴 성분과 약 28분보다 짧은 성분은 대부분 차단 또는 통과시키며, 약 57분에서는 12% 정도, 그리고 약 35분에서는 94% 정도 통과시키도록 설계되었음을 알 수 있다. 스펙트럼 분석 결과는 128 개 주파수 성분에 대한 power density와 정점간 상대 진폭비로 제시되었다.

수압 자료 및 해수위 자료의 스펙트럼 분석 결과를 비교·검토하기 위하여 data set no. 4인 5월 12일 15시~10일 14시까지의 자료를 선택하였다. 수압 자료에 대한 spectral density와 상대 진폭비를 Fig. 2.2.22에, 그리고 Nielsen 방법에 의한 해수위 변동 자료에 대한 spectral density와 상대 진폭비를 Fig. 2.2.23에 각각 제시하였다. 이들을 살펴보면 주기 1,130초(약 18.8분)인 Helmholtz 공진 모드인 경우 spectral density의 형태나 상대 진폭비의 크기가 유사하여 방법에 따른 차이가 나타나지 않는다. 그러나, 동해항의 국부 공진 모드들에 해당되는 주기 600초 이하에서는 정점 P1의 spectral density가 서로 크게 차이를 알 수 있으며 이 차이로 인하여 상대 진폭비는 수압 자료의 경우 정점 P4에서 P1에 비해 5~20배인 반면 해수위 변동 자료의 경우 정점 P4에서 2~3배이다. 이러한 5~20배의 진폭비는 비현실적인 것으로 생각되므로 본 연구에서는 Nielsen 방법에 의한 해수위 변동 자료에 대해서만 분석을 실시하였다.

나. 시계열 자료 검토

관측자료들은 22.8 시간을 1 개로 설정할 경우 33 개가 되며 이들의 raw data 및 filtered data의 시계열 변화, 스펙트럼 분석 결과 등을 모두 수록하지 않고 평상시, 폭풍시 및 단주기파 관측시에 입사파향이 E~ESE인 시기 등의 세 경우를

Butterworth Digital High-pass Filter of Order 6 [n=1024], Cutoff Period = 40 min

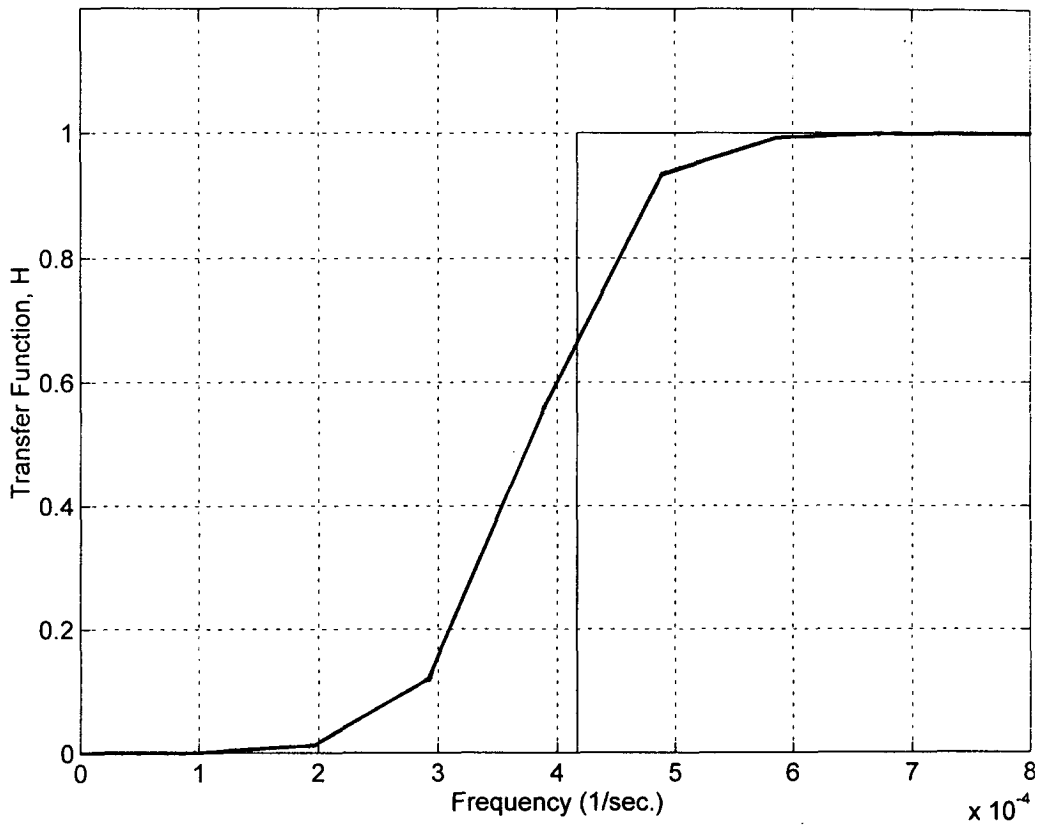


Fig. 2.2.21 Transfer function of Butterworth high-pass filter of order 6 with cutoff period of 40 min.

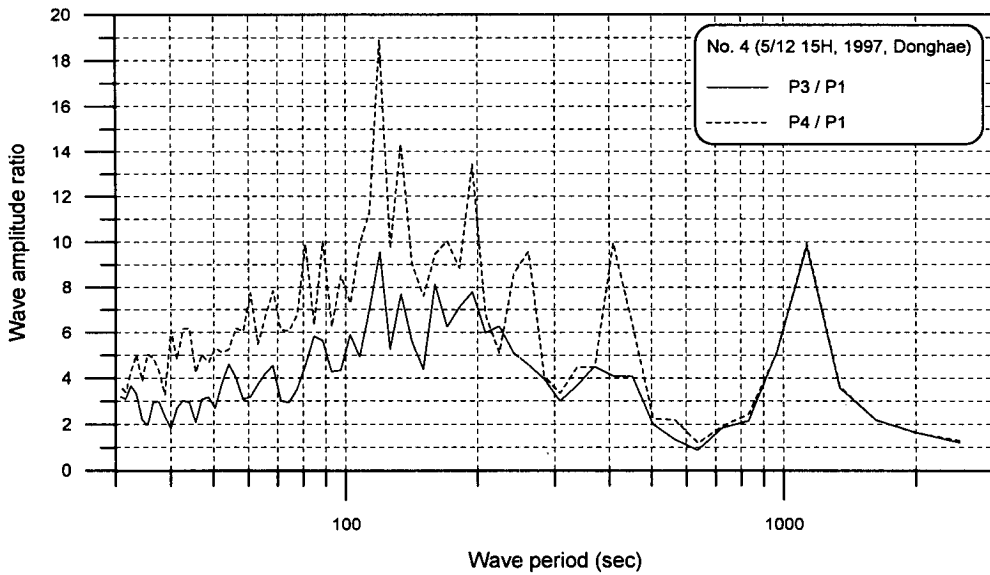
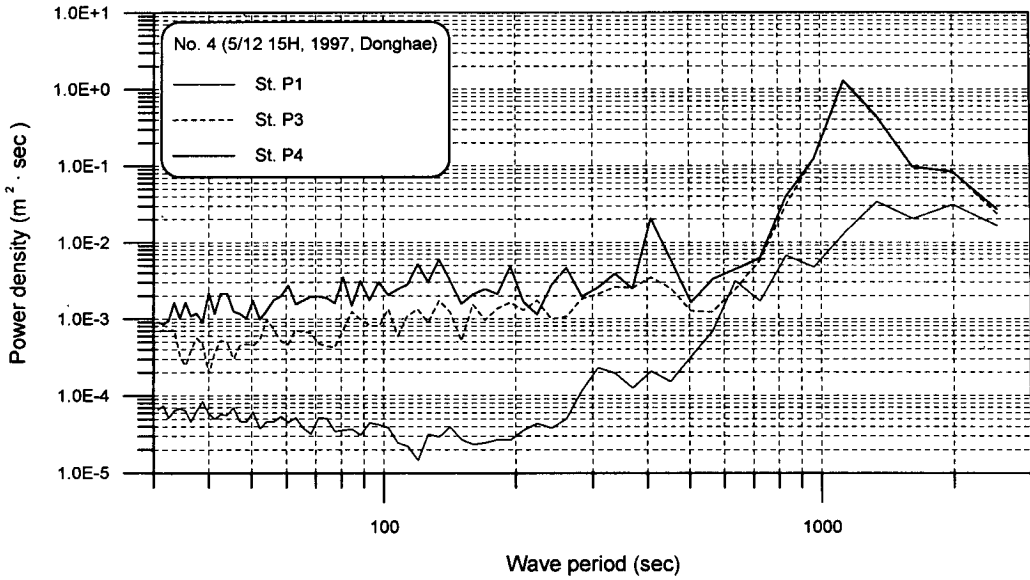


Fig. 2.2.22 Results of spectral analysis for pressure data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 12 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

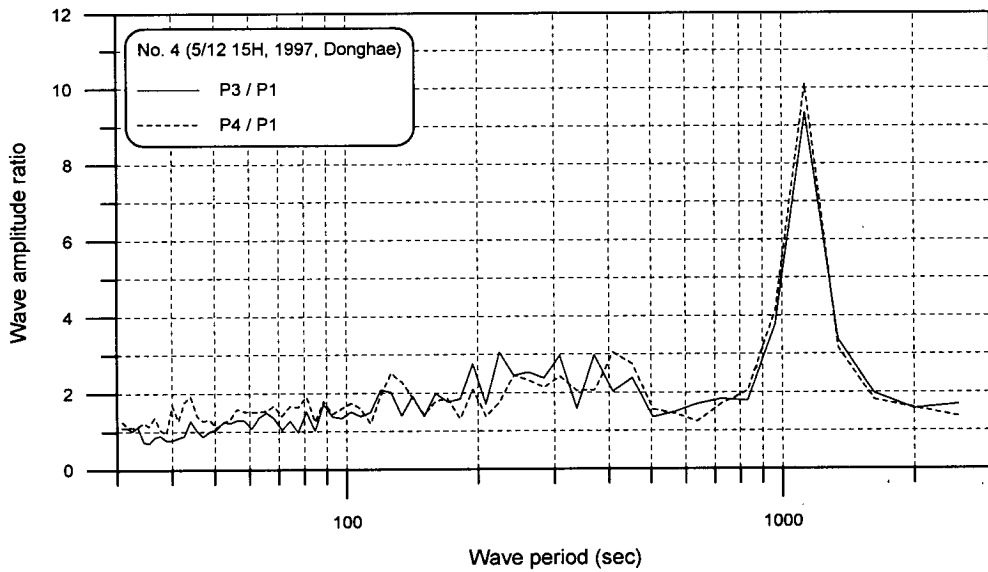
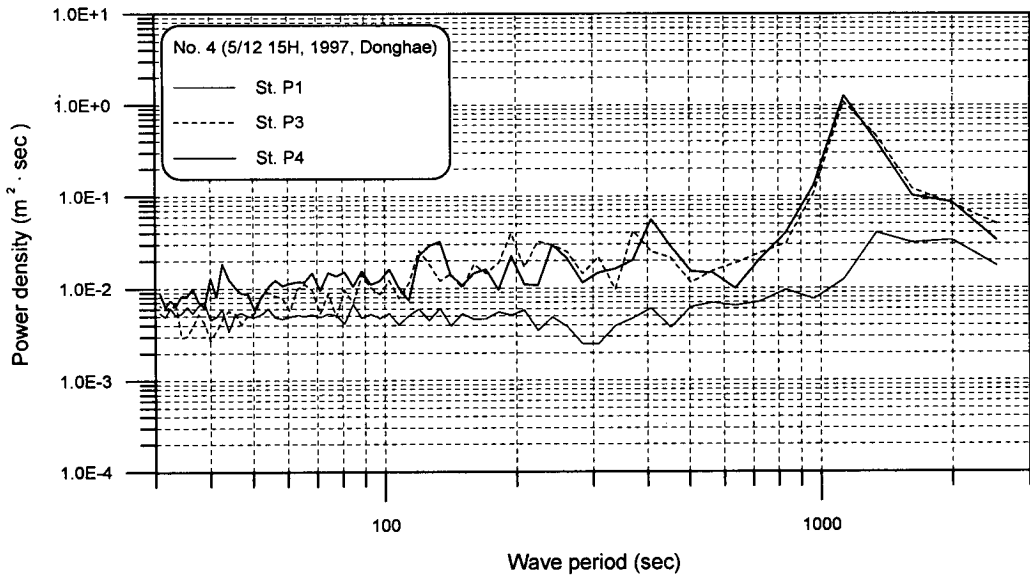


Fig. 2.2.23 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 12 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

선정하여 상세한 관측자료 및 분석 결과를 제시하였다.

(1) 평상시

정점 P1~P4에서 관측된 평상시의 수위 변동(자료수 = 16,384개; 자료 길이 = 약 22.8시간) 중 6월 9일 14시~10일 13시의 raw data의 시계열 변화를 부록의 Figs. A2.1~A2.4에 각각 제시하였다. 시계열 변화를 살펴보면 4개 정점 모두에서 일정 경사와 유사한 조석 성분이 뚜렷하게 나타난다. 한편, 부진동을 유발하기 쉬운 장주기와 성분(주기 수십 분 정도)은 항외 정점 P1에서도 어느 정도 구분이 가능하며 항입구 및 항내 정점들에서는 아주 뚜렷하게 나타난다. 단, 항외 정점에서의 장주기와 성분 주기보다 항내에서의 주기가 어느 정도 짧은 것을 육안으로 확인할 수 있다.

전술한 6차 Butterworth high-pass filter를 사용하여 조석 성분을 제거한 자료를 정점 P1~P4에 대해 Figs. A2.5~A2.8에 시계열 변화로 각각 제시하였는데 이들을 살펴보면 조석 성분이 잘 제거되었음을 알 수 있다. 항외 정점에서의 장주기와 진폭은 단주기와 성분이 중첩되어 정확하게 그 크기를 알기는 어렵지만 대략 2 cm 내외로 그다지 크지 않은 반면 항내 정점들에서는 주기 15 분 전후, 진폭 5~10 cm의 아주 뚜렷한 부진동 성분을 식별할 수 있다.

(2) 폭풍시

항외 정점에서의 유의파고가 1.5~2 m에 달하였던 6월 1일 16시~2일 15시에 정점 P1~P4에서 관측된 수위 변동의 raw data를 Figs. A2.9~A2.12에 각각 제시하였다. 이 중 항외 및 항입구 정점에서는 단주기와 성분으로 인하여 장주기와 성분을 구분하기 어려우나 항내 정점에서는 평상시와 마찬가지로 장주기와 성분이 뚜렷하게 구분된다.

전술한 high-pass filtering 과정을 거쳐 조석 성분을 제거한 자료를 정점 P1~P4에 대해 Figs. A2.13~A2.16에 각각 제시하였다. 이 경우에도 평상시와 유사하게 항외와 항입구 정점에서의 장주기와 진폭은 단주기와 성분이 중첩되어 정확

하게 그 크기를 알기 어려우나 항내 정점들에서는 주기 15 분 전후의 아주 뚜렷한 부진동 성분을 식별할 수 있다. 단, 이 그림들에서 진폭이 10 cm를 초과하는 것으로 판단하기 쉬우나 단주기와 성분이 혼재되어 있으므로 정확한 장주기와 진폭을 알기 위해서는 스펙트럼 분석 결과에 따라야 한다.

(3) 입사파향이 E~ESE인 경우

동해항의 입구는 SE 방향으로 열려 있으므로 이 방향에서 침입하는 파는 항내로 직접 전파되어 항내정온도를 매우 불량하게 할 우려가 있다. 실제로 중앙 부두나 특수 부두에서는 춘계에 SE 또는 ESE 방향에서 침입해오는 소규모 폭풍파 때문에 심각한 정온도 문제가 야기되는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 이 방향에서의 침입파 중 장주기 성분이 항내에서 증폭되는 현상을 파악하기 위하여 본 경우를 추가하였다.

항외 정점에서의 평균파향이 E~ESE였던 6월 9일 14시~10일 13시에 정점 P1~P4에서 관측된 수위 변동의 raw data를 Figs. A2.17~A2.20에 각각 제시하였다. 이 경우에는 폭풍시에 비해 항외 정점에서의 단주기 파고가 작아서 주기 수십분의 장주기와 성분이 비교적 뚜렷하게 구분되며 항입구 및 항내 정점에서는 다른 경우와 마찬가지로 장주기와 성분이 뚜렷하게 구분된다.

High-pass filtering 과정을 거쳐 조석 성분을 제거한 자료를 정점 P1~P4에 대해 Figs. A2.21~A2.24에 각각 제시하였다. 이 경우에도 항외 정점에서의 장주기와 성분은 raw data의 경우와 마찬가지로 어느 정도 구분되며 항입구 및 항내 정점들에서는 단주기와 성분이 장주기와 성분에 강하게 중첩되어 있다.

다. 스펙트럼 분석 결과

동시 관측된 자료의 스펙트럼 분석 결과를 도시한 Fig. 2.2.22와 2.2.23의 경우 정점별 침투 주기(peak period)의 구분에 유용하다. 그러나, 부진동이 완전 또는 부분 폐쇄된 수역에서 에너지가 증폭되어 나타나는 현상임을 감안하면 정점간의

상대진폭비를 파악하는 것이 중요함을 알 수 있다. 스펙트럼 분석으로 제시되는 n 개 주파수별 power density를 이용하면 기준 정점(예를 들면, 정점 P1)에 대한 임의 정점(정점 j)에서의 상대진폭비는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$R_{ji} = \sqrt{\frac{S(f_i)_j}{S(f_i)_1}}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2.2.1)$$

여기서, $S(f_i)$ 는 주파수 f_i 에 대한 스펙트럼 밀도치를 나타낸다.

(1) 정상시

Fig. 2.2.24에는 6월 9일 14시를 기점으로 한 정상시 자료(data set no. 25)에 대해 구해진 power density와 정점간 상대 진폭비를 도시하였다. 먼저, 상부에 제시된 power density를 살펴보면 정점 P1의 경우 특별한 첨두 에너지가 나타나지 않는다. 항입구 정점 P2의 경우 1,130초(Helmholtz 공진 모드)와 371~453초에서 첨두 에너지가 나타난다. 항내 정점 P3와 P4의 경우 1,130초와 409초에서 뚜렷한 첨두 에너지를 보이는 공진 모드가 출현한다. 정상시 자료의 정점 P1에 대한 정점 P2~P4에서의 상대진폭비를 Fig. 2.2.24의 하부에 도시하였다. 이를 살펴보면 주기 1,130초의 경우 정점 P2에서 10.3, P3에서 13.7, P4에서 14.3의 커다란 진폭비를 보이며, 주기 409 초의 경우 정점 P2에서 2.5, P3에서 2.1, P4에서는 5.1로 상당히 달리 나타났다. 기타 주기에서는 특별한 공진 모드가 출현하지 않는다.

(2) 폭풍시

Fig. 2.2.25에는 6월 1일 16시를 기점으로 한 폭풍시 자료(data set no. 17)에 대해 구해진 power density와 정점간 상대 진폭비를 도시하였다. 폭풍시의 power density를 정상시와 비교하면 에너지 수준이 전반적으로 높음을 알 수 있다. 한편, 정점 P2~P4의 power density의 첨두 에너지가 1,130~1,343초에 걸친 형태로 정상시에 비해 범위가 넓다. 이 경우에는 P2~P4에서 409초에서 첨두 에너지가 출현한다. Helmholtz 공진 모드의 상대 진폭비는 P2에서 6.3, P3에서 9.3, P4에서 9.4로 정상시에 비해 상당히 작다. 그리고, 409초의 공진 모드도 P2에서 2.6, P3에

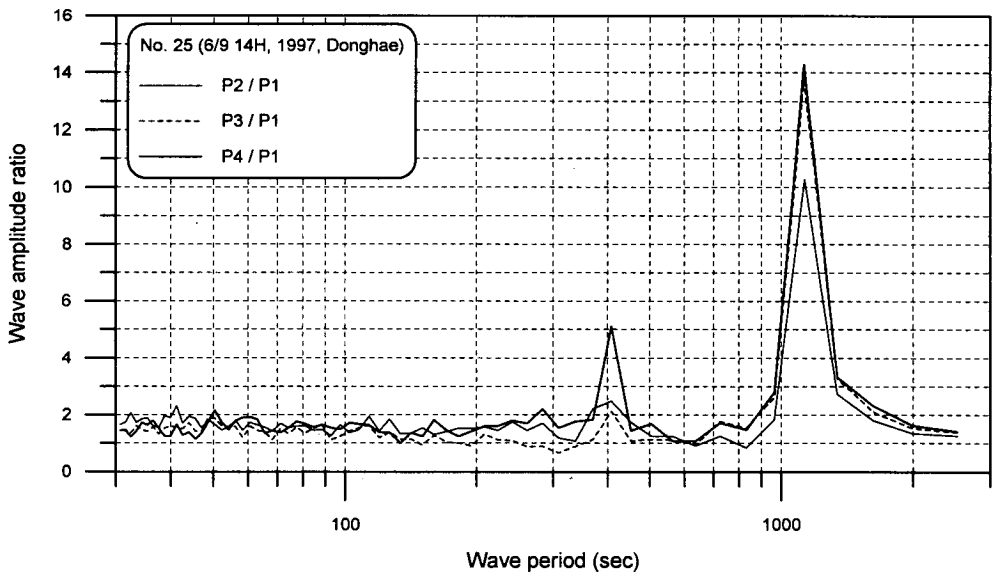
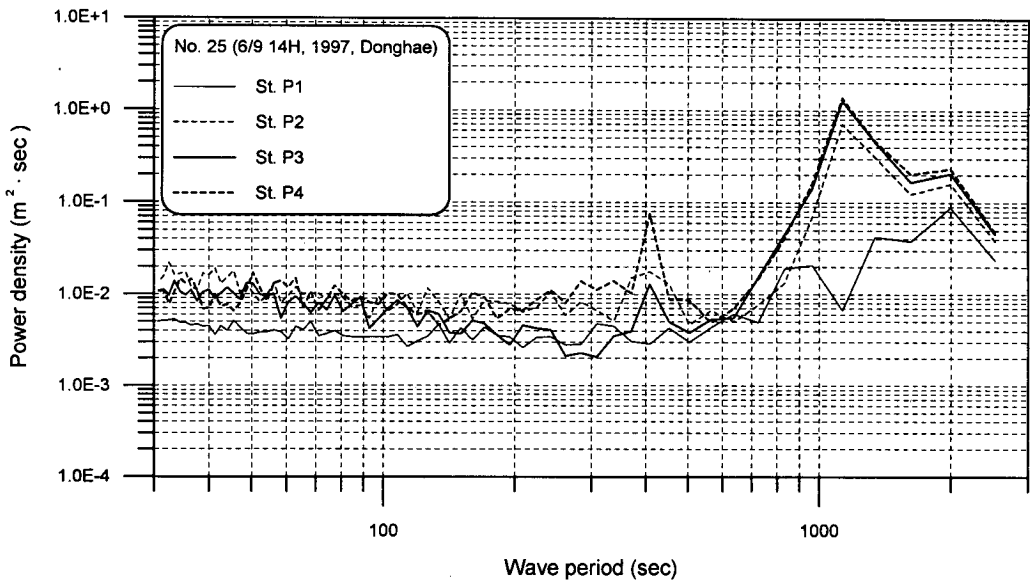


Fig. 2.2.24 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

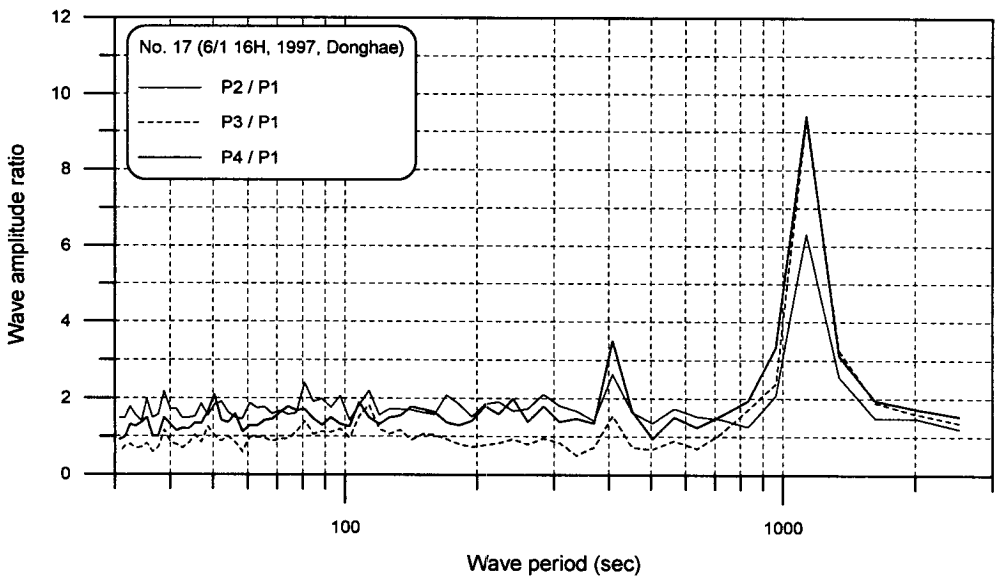
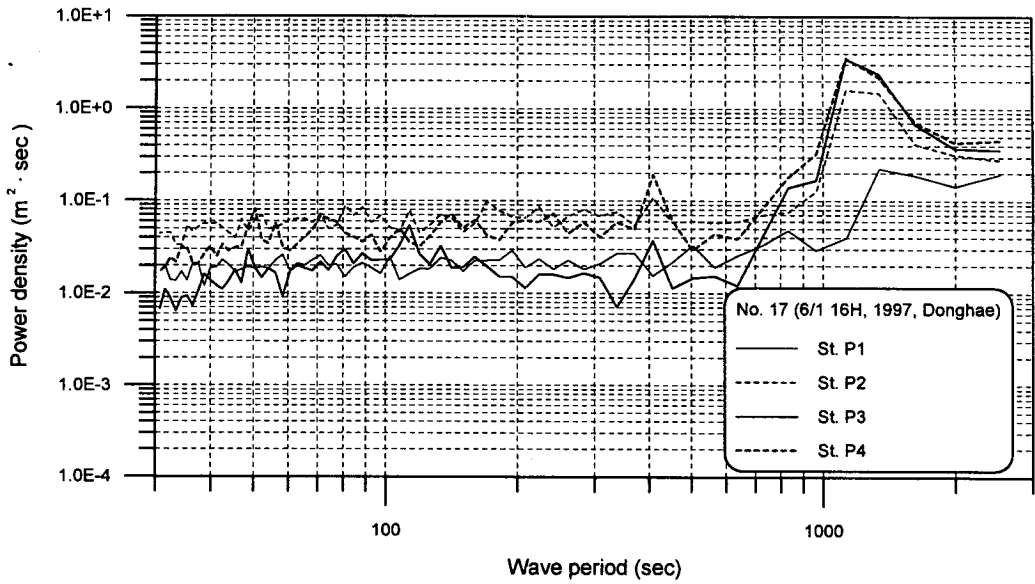


Fig. 2.2.25 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

서 1.5, P4에서 3.5의 상대 진폭비를 보여 평상시보다 작게 나타났다. 또한, 기타 주기에서는 평상시와 비슷하게 특별한 공진 모드가 출현하지 않으나 상대 진폭비는 평상시보다 약간 크다.

(3) 입사파향이 E~ESE인 경우

항의 정점에서의 단주기파의 입사파향이 E~ESE였던 5월 28일 16시를 기점으로 한 자료(data set no. 13)의 power density와 상대 진폭비를 Fig. 2.2.26에 제시하였다. 이 경우의 power density나 상대 진폭비의 분포 형태는 평상시나 폭풍시와 매우 다르게 나타났다. 먼저, 정점 P2~P4에서의 Helmholtz 공진 모드의 power density의 분포가 매우 넓게 나타났으며 정점 P1에서의 power density가 다른 정점보다 매우 작다. Helmholtz 공진 모드의 상대 진폭비는 정점 P2에서 7.1, P3에서 10.0, P4에서 12.0으로 평상시와 폭풍시의 중간 정도로 나타났다. 주기 500 초 이하에서는 정점 P1에서의 power density가 낮았으므로 항입구 및 항내 정점 P2~P4에서 모두 3~9의 매우 큰 상대 진폭비를 보였다. 이러한 현상은 부록에 제시한 data set nos. 14, 15 및 22에서도 나타났으며 심해의 단주기 파향이 E~ESE였던 시기와 거의 일치한다. 이는 춘계에 동해향으로 ESE 계열의 파가 침입할 때 정온도가 불량한 문제와도 연관성이 있을 것으로 사료되므로 앞으로 심도있는 연구가 요망된다

(4) 종합 검토

총 33 sets의 자료 중에서 앞에서 인용된 자료를 제외한 29 sets의 자료에 대한 스펙트럼 분석 결과를 주기별 power density와 상대 진폭비로 부록의 Figs. A3.1~A3.29에 제시하였다. 또한, 33 sets에 대해 스펙트럼 분석 결과에서 구해진 정점 P1에 대한 정점 P2~P4의 상대 비교로 구한 정점별 침투 주기와 상대 진폭비를 Table 2.2.2에 제시하였다.

Table 2.2.2에 따르면 33 sets 모두에서 항입구의 정점 P2 및 항내 정점 P3와

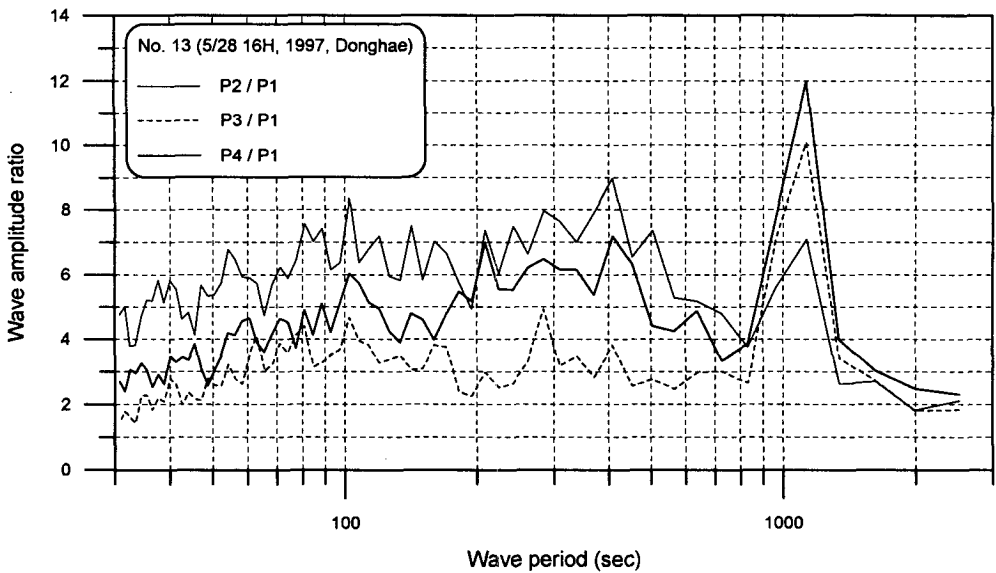
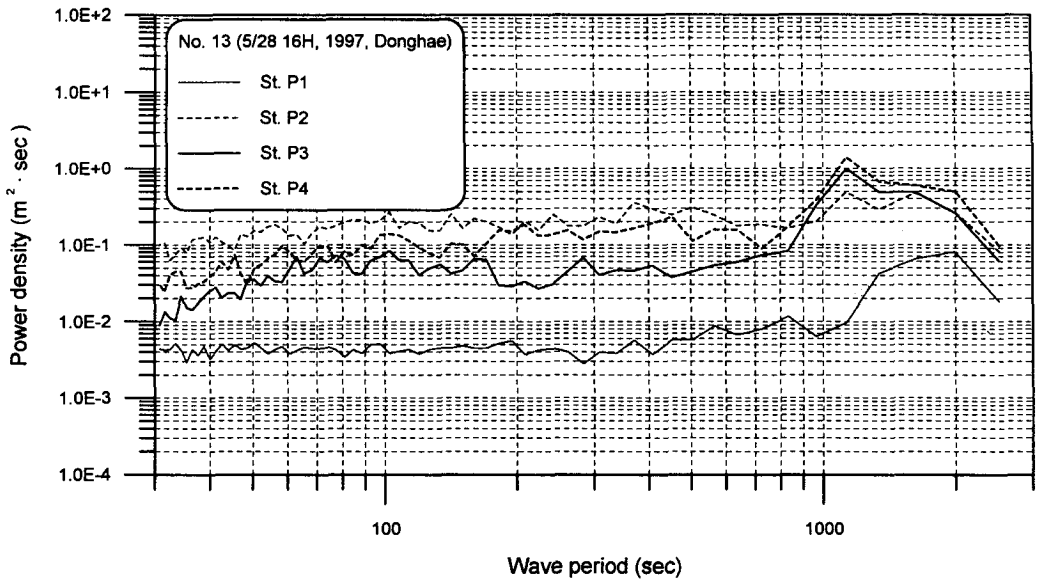


Fig. 2.2.26 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

P4에서 1,130초(약 18.8분)의 Helmholtz 공진 모드가 나타났으며 이는 전년도(과학기술처, 1996)의 연구 결과와 거의 일치한다. 409초(약 6.8분)의 공진 모드도 대부분의 data sets에서 나타났으나 그 상대 진폭비는 Helmholtz 공진 모드에 비해 상당히 작았다.

Table 2.2.2 Peak period and amplitude ratio of resonance mode obtained from spectral analysis of measured data.

Data set no.	Starting of data set	Peak period(min) and amplitude ratio of resonance mode		
		St. P2	St. P3	St. P4
1	5/09 15H	No data	18.8(9.4), 6.8(2.0)	18.8(9.5), 6.8(4.5)
2	5/10 15H	No data	18.8(8.0), 6.8(2.2)	18.8(8.2), 6.8(4.2)
3	5/11 15H	No data	18.8(7.2)	18.8(7.2)
4	5/12 15H	No data	18.8(9.3), 3.0~7.5(app. 2.5)	18.8(10.1), 2.0~7.5(app. 2.5)
5	5/13 15H	No data	18.8(12.5), 1.5~10.0(app. 2.5)	18.8(11.9), 1.5~10.0(app. 2.5)
6	5/14 15H	No data	18.8(12.5), 1.5~10.0(app. 2.5)	18.8(11.9), 6.8(2.6)
7	5/15 15H	No data	18.8(10.3)	18.8(10.3), 6.8(3.5)
8	5/16 15H	No data	18.8(9.9)	18.8(9.9), 6.8(3.1)
9	5/17 15H	No data	18.8(8.2), 6.8(2.2)	18.8(8.3), 6.8(5.1)
10	5/18 15H	No data	18.8(8.6)	18.8(8.6), 6.8(2.5)
11	5/26 16H	18.8(6.8), 12.1(2.5), 9.4(2.3), 7.5(2.1), 1.5~5.0(app. 2.0)	18.8(9.9)	18.8(10.5)
12	5/27 16H	18.8(6.8), 10.6(2.4), 8.4(2.6), 6.8(2.7), 0.6~6.0(app. 3.0)	18.8(10.2)	18.8(11.0), 6.8(2.6)
13	5/28 16H	18.8(7.1), 1.0~10.0(5.0~9.0)	18.8(10.1), 1.0~10.0(app. 3.5)	18.8(12.0), 1.0~10.0(4.0~7.0)
14	5/29 16H	18.8(7.6), 1.6(8.0), 7.5(6.6) 1.0~10.0(4.0~6.5)	18.8(11.6), 7.5(3.6), 1.0~4.0(2.0~3.5)	18.8(3.5), 7.5(5.6), 6.2(5.8), 1.0~4.0(2.0~3.5)
15	5/30 16H	18.8(6.9), 6.8(5.0), 1.0~5.0(2.5~4.5)	18.8(9.8), 6.8(2.8), 1.0~5.0(2.0~4.0)	18.8(10.5), 6.8(6.2), 1.0~4.0(app. 2.5)
16	5/31 16H	18.8(5.2)	18.8(7.8)	18.8(8.0), 6.8(2.4)
17	6/01 16H	18.8(6.3), 6.8(2.6), 4.7(2.1), 1.3~3.0(app. 2.0)	18.8(9.3)	18.8(9.4), 6.8(3.5),

Table 2.2.2 (Cont'd).

Data set no.	Starting of data set	Peak period(min) and amplitude ratio of resonance mode		
		St. P2	St. P3	St. P4
18	6/02 16H	18.8(5.6), 8.4(2.1), 6.8(3.1), 5.2(2.0), 3.7(2.3), 2.5(2.1), 2.2(2.2)	18.8(8.5), 6.8(2.0)	18.8(8.6), 6.8(3.8)
19	6/03 16H	18.8(8.4), 1.0~10.0(app. 2.5)	18.8(13.1)	18.8(13.7), 6.8(3.2), 3.7(2.6)
20	6/04 16H	18.8(6.7), 7.5~8.4(2.4~2.6), 2.0~3.0(app. 2.0)	18.8(10.5)	18.8(10.8), 6.8(3.0)
21	6/05 16H	18.8(6.3), 6.8(2.9), 5.2(2.6), 1.0~4.0(app. 2.5)	18.8(9.4), 6.8(2.8)	18.8(9.8), 6.8(6.4)
22	6/07 14H	16.1(4.9)~18.8(6.5), 1.0~10.0(app. 3.0)	18.8(9.4), 1.4(2.3), 1.2(2.2), 1.0(2.2), 1.0(2.4)	18.8(9.9), 6.8(6.0), 1.0~15.0(2.0~4.0)
23	6/08 14H	18.8(8.2), 6.8(2.3), 1.0~5.0(app. 2.5)	18.8(10.9), 1.7(2.7), 0.7~1.0(app. 2.0)	18.8(11.2), 6.8(4.0), 3.0~6.0(app. 2.0)
24	6/09 14H	18.8(7.1), 7.5(2.6), 5.6(2.2), 1.0~4.5(app. 2.0)	18.8(9.7), 6.8(2.2), 0.5~1.0(app. 2.0)	18.8(10.4), 6.8(5.3), 1.0~1.5(app. 2.0)
25	6/10 14H	18.8(10.3), 6.8(2.5)	18.8(13.7), 6.8(2.1)	18.8(14.3), 6.8(5.1) 4.7(2.2)
26	6/11 14H	18.8(5.4)	18.8(7.7)	18.8(8.4), 6.8(2.8)
27	6/12 14H	18.8(8.1)	18.8(11.1)	18.8(11.4), 6.8(2.1)
28	6/13 14H	18.8(6.7)	18.8(9.0)	18.8(9.5)
29	6/14 14H	18.8(7.4)	18.8(8.8)	18.8(9.2), 6.8(2.7)
30	6/15 14H	18.8(7.4(7.4)	18.8(10.3)	18.8(10.7), 6.8(2.6)
31	6/16 14H	18.8(8.8)	18.8(12.2)	18.8(12.8)
32	6/17 14H	18.8(6.1), 6.8(2.3), 4.4(2.1), 2.7(2.1)	18.8(8.2), 1.1(2.1)	18.8(8.3), 6.8(3.2), 4.4(2.2), 3.0(2.0), 2.7(2.3), 2.4(2.5)
33	6/18 14H	18.8(4.4)	18.8(6.1)	18.8(6.7)

제3절 부진동 수치실험

1. 수치모형

전년도(과학기술처, 1996)에는 지배방정식으로 완경사 방정식을 사용하고 방사 경계조건을 해석해와 결합하여 처리하는 복합요소법을 사용하였으나 본 연구에서는 아래와 같이 부분적으로 개선된 수치모형을 사용하여 동해항 부진동을 해석하였다. 그러나, 수치계산 결과는 거의 동일하게 나타났다.

항내 파랑 응답에 대한 경계치 문제를 효율적으로 수식화하기 위하여 대상 영역을 Fig. 2.3.1에 제시한 것처럼 항내를 포함하는 유한요소 영역 Ω_1 과 그 외부의 무한요소 영역 Ω_2 로 분리하였다. 영역 Ω_1 과 Ω_2 에서의 파동장은 경사가 완만한 해저면의 영향이 고려된 Berkhoff(1972) 방정식을 확장, 보완한 완경사 방정식(Massel, 1993; Suh and Park, 1995)을 사용하였다.

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi_i) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi_i - \omega^2 \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \phi_i = 0 \quad (2.3.1)$$

여기서, ϕ_i 는 속도포텐셜로 $i = 1$ 은 내부 영역을 $i = 2$ 는 외부 영역을 나타낸다. 또, C 는 파속, C_g 는 군속도, ω 는 각주파수를 나타내며, R_1 과 R_2 는 각각 해저면 경사의 제곱과 곡률에 관련되는 계수로 주기 및 수심의 함수로 주어진다(Massel, 1993; Suh and Park, 1995). 이 R_1 과 R_2 에 관계되는 세 번째 항을 무시하면 기존의 Berkhoff의 완경사방정식으로 변환된다.

영역 Ω_1 과 Ω_2 의 고체 경계면 Γ 를 따라서는 방파 구조물, 해안 경계 등에서의 파 에너지의 소산을 고려하기 위하여 다음과 같은 부분반사 경계조건을 사용하였다.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = ika \phi_i \quad (2.3.2)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (2.3.3)$$

이며, K_r 은 고체 경계면에서의 반사율을 나타낸다.

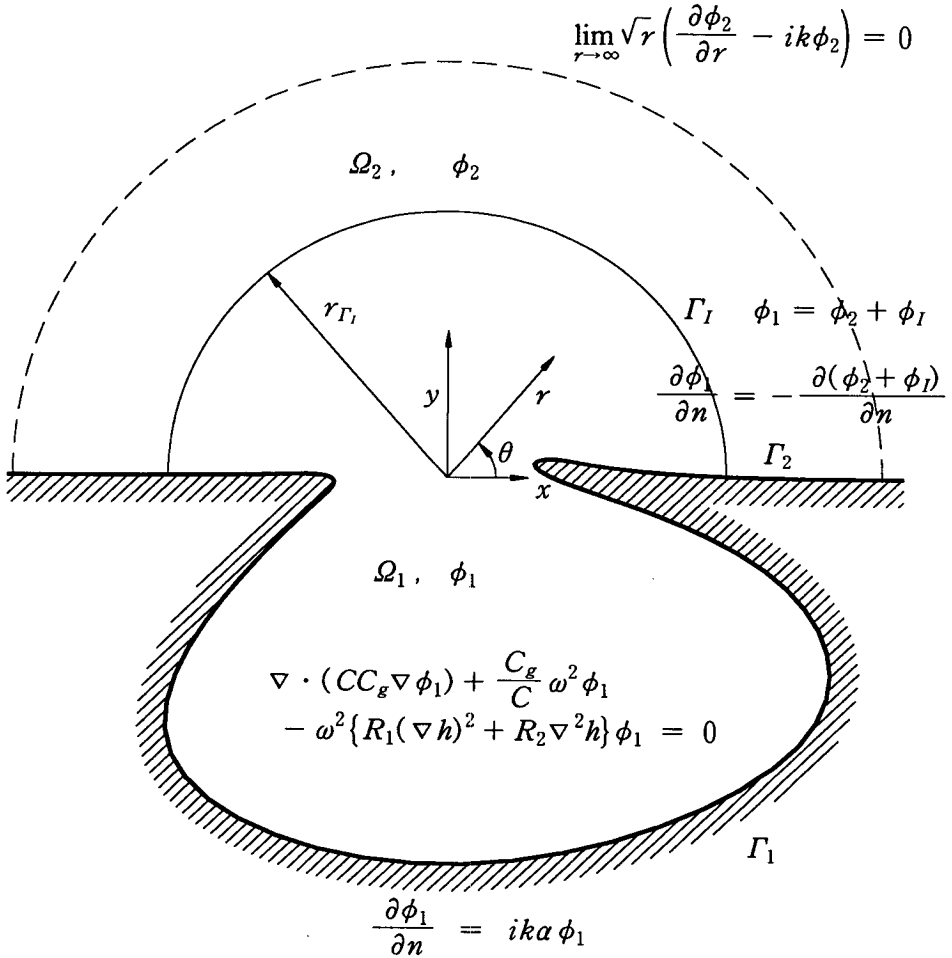


Fig. 2.3.1 Boundary value problem.

유한요소영역 Ω_1 과 무한요소영역 Ω_2 의 원호 경계면 Γ_I 를 따라서는 다음과 같은 정합 조건(matching condition)을 만족해야 한다.

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_I \quad \text{또는} \quad \phi_2 = \phi_1 - \phi_I \quad (2.3.4a)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial(\phi_2 + \phi_I)}{\partial n} \quad \text{또는} \quad \frac{\partial \phi_2}{\partial n} = -\frac{\partial(\phi_1 - \phi_I)}{\partial n} \quad (2.3.4b)$$

여기서, ϕ_1 은 유한요소 영역에서의 전체 속도 포텐셜을 나타내며, ϕ_2 는 무한요소내의 포텐셜로 입사파의 포텐셜 ϕ_I 를 제외한 산란파의 포텐셜을 나타낸다.

복합요소 모형 등의 기존의 수치모형은 외부 영역의 수심을 일정한 것으로 가정하여 문제를 풀어 왔다. 따라서, 이와 같은 가정을 하게 되는 기존 수치모형들은 원호 경계면을 따른 원하지 않는 반사의 영향으로 추가적인 공진 현상이 야기될 가능성이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 어느 정도 해결하고자 외부 영역의 수심을 반경 방향으로는 일정하나 해안선을 포함하는 원호 방향으로는 임의로 변하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정을 하는 경우에 추가적으로 외부 영역에서 다음과 같은 경계조건이 도입된다. 즉, 해저면의 직각 방향으로의 흐름이 없다는 조건이다.

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_I}{\partial n} \quad (2.3.5)$$

또, ϕ_2 는 무한 원방에서 다음의 방사 경계조건을 만족하여야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial r} - ik\phi_2 \right) = 0 \quad (2.3.6)$$

입사파가 θ_I 의 각도로 진입할 경우의 포텐셜 ϕ_I 는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_I = -\frac{iga_0}{\omega} e^{ikr \cos(\theta - \theta_I)} \quad (2.3.7)$$

여기서, a_0 는 입사파의 진폭을 의미한다.

Galerkin의 방법을 이용하면 상기 경계치 문제는 적분방정식의 형태로 변환시킬 수 있다. 영역을 n 개의 유한요소로 나눈 경우의 각 요소의 시스템 행렬은 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$\phi_i = \{N\}^T \{\phi_i\} \quad (2.3.8a)$$

$$\{R^e\} = - \int_{\Omega_i^e} \{N\} \left[\nabla \cdot (CC_g \phi_i) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \phi_i - \omega^2 \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \phi_i \right] d\Omega_i^e \quad (2.3.8b)$$

여기서, $\{N\}$ 은 가중함수로 요소의 보간 함수와 같다. 부분적분 기법을 이용하고 상기의 경계조건을 도입한 후 각 요소의 시스템 행렬을 조합하면 전체 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_e^n \{ ([K_{\Omega_i}^e] + [K_{\Gamma_i}^e]) \{\phi_i^e\} + \{F_{\Gamma_i}^e\} + \{F_{\Gamma_{ii}}^e\} + \{F_{\Omega_i}^e\} \} = \{0\} \quad (2.3.9)$$

여기서, 각 요소의 시스템 행렬, $[K_{\Omega_i}^e]$, $[K_{\Gamma_i}^e]$, $\{F_{\Gamma_i}^e\}$, $\{F_{\Gamma_{ii}}^e\}$ 는 다음과 같이 각 영역에 대해서 주어진다.

(1) 내부 영역(Ω_1) :

$$[K_{\Omega_1}^e] = \int_{\Omega_1^e} \left[CC_g \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial x} \right\}^T + \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial y} \right\}^T \right) - \omega^2 \left(\frac{C_g}{C} - \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \right) \{N\} \{N\}^T \right] d\Omega_1^e \quad (2.3.10a)$$

$$[K_{\Gamma_1}^e] = \int_{\Gamma_1^e} CC_g \alpha \{N\} \{N\}^T d\Gamma_1^e \quad (2.3.10b)$$

$$\{F_{\Gamma_1}^e\} = \{0\} \quad (2.3.10c)$$

$$\{F_{\Gamma_{ii}}^e\} = - \int_{\Gamma_i^e} CC_g \frac{\partial(\phi_2 + \phi_l)}{\partial n} \{N\} d\Gamma_i^e \quad (2.3.10d)$$

$$\{F_{\Omega_1}^e\} = \{0\} \quad (2.3.10e)$$

(2) 외부 영역(Ω_2) :

$$[K_{\Omega_2}^e] = \int_{\Omega_2^e} \left[CC_g \left(\left\{ \frac{\partial N}{\partial r} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial r} \right\}^T + \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial N}{\partial \theta} \right\} \left\{ \frac{\partial N}{\partial \theta} \right\}^T \right) - \omega^2 \left(\frac{C_g}{C} - \{R_1(\nabla h)^2 + R_2 \nabla^2 h\} \right) \{N\} \{N\}^T \right] d\Omega_2^e \quad (2.3.11a)$$

$$[K_{\Gamma_2}^e] = \int_{\Gamma_2^e} CC_g \alpha \{N\} \{N\}^T d\Gamma_1^e \quad (2.3.11b)$$

$$\{F_{\Gamma_2}^e\} = \int_{\Gamma_2^e} CC_g \left(\alpha \phi_I - \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \right) \{N\} d\Gamma_2^e \quad (2.3.11c)$$

$$\{F_{\Gamma_n}^e\} = - \int_{\Gamma_1^e} CC_g \frac{\partial(\phi_1 - \phi_I)}{\partial n} \{N\} d\Gamma_1^e \quad (2.3.11d)$$

$$\{F_{\Omega_2}^e\} = - \int_{\Omega_2^e} CC_g \frac{\partial \phi_I}{\partial n} \{N\} d\Omega_2^e \quad (2.3.11e)$$

내부 영역은 삼절점 삼각형 요소로 분할하였으며, 외부 영역은 Park et al.(1994)이 개발한 무한요소를 사용하여 분할하였다.

2. 수치실험

가. 수치계산 입력조건

수치계산 영역에 대한 유한요소망도는 전년도(과학기술처, 1996)에 작성된 것을 그대로 사용하였다. 이는 총 16,264개의 절점과 31,683개의 선형 삼각형 요소로 구성되었으며 절점간의 최대 거리를 30 m로 설정하여 주기 30초의 파도 해석할 수 있게 구성되었다. 또한, 고체 경계면에서의 반사율은 전년도와 같이 직립 안벽의 경우 0.99, 암초 해안의 경우 0.98, 테트라포드로 피복된 소파 구조물의 경우 0.97, 그리고 자연 해변의 경우 0.95를 전체 주기에 대해 사용하였다. 그리고, 수심의 경우 전년도와 같이 해도의 수심에 평균대조위인 0.3 m를 추가하였으며 파향의 경우도 NE 방향으로 가정하였다. 한편, 입사 경계에서의 입사파 진폭은 일률적으로 0.10 m를 사용하였다.

나. 유속 분포

전년도와 동일하게 수치실험을 실시한 결과 공진 모드나 진폭비가 거의 동일

하게 제시되었으므로 정점별 상대 진폭비의 변화, 진폭비 등치선도, 3차원 해수면 변위도 등은 제시하지 않기로 하였다.

본 연구에서는 주요 공진 모드의 유속 분포를 파악하기 위하여 주기인 1,114초, 406초, 236초 및 166초의 공진 모드에 대해 항내 가장 깊숙한 지점에서의 위상을 0으로 설정한 순간의 각 절점에서의 유속 벡터를 구하였다.

주기 1,114초(약 18.6분)의 Helmholtz 공진 모드에 대한 유속 벡터도를 Fig. 2.3.2에 제시하였다. 이를 살펴보면 유향이 모두 항외를 향하며 복이 형성되는 항의 가장 내측에서는 유속 성분이 거의 0이며 항입구 주변에서는 항외로 향하는 강한 흐름이 형성되고 있다. 항입구 부분에서의 유속은 대략 2.0~3.5 cm/sec로 나타났다.

주기 406초(약 6.8분)의 공진 모드에 대한 Fig. 2.3.3을 살펴보면 특수 부두 수역과 항입구 부분에서는 외측, 남향 수역에서는 내측의 유향을 나타내고 있다. 특수 부두 수역 및 남향 내의 유속은 대략 1.5 cm/sec 정도이다.

주기 236초(약 3.9분)의 공진 모드에 대한 Fig. 2.3.4를 살펴보면 특수 부두와 남향 수역에서는 외측, 항입구 수역에서는 내측의 반대되는 유향을 나타내고 있다. 이 경우의 남향 내의 유속은 작으며 특수 부두 수역에서는 대략 2.0 cm/sec 정도이다.

주기 166초(약 2.8분)의 공진 모드에 대한 Fig. 2.3.5를 살펴보면 남향 수역의 입구 부근에서 유향이 항외측과 항내측으로 달라지며 항입구 부근에서도 항내측과 항외측의 반대되는 유향을 나타내고 있다. 이 경우의 특수 부두 수역의 유속은 작으며 남향 수역에서는 대략 1.5 cm/sec 정도이다.

제4절 Boussinesq 모델

본 수치모형은 원래 일본 운수성 항만기술연구소(運輸省港灣技術研究所와 新日本氣象海洋株式會社, 1996)에서 개발하였다. 본 연구에서는 투과 및 반사 경계

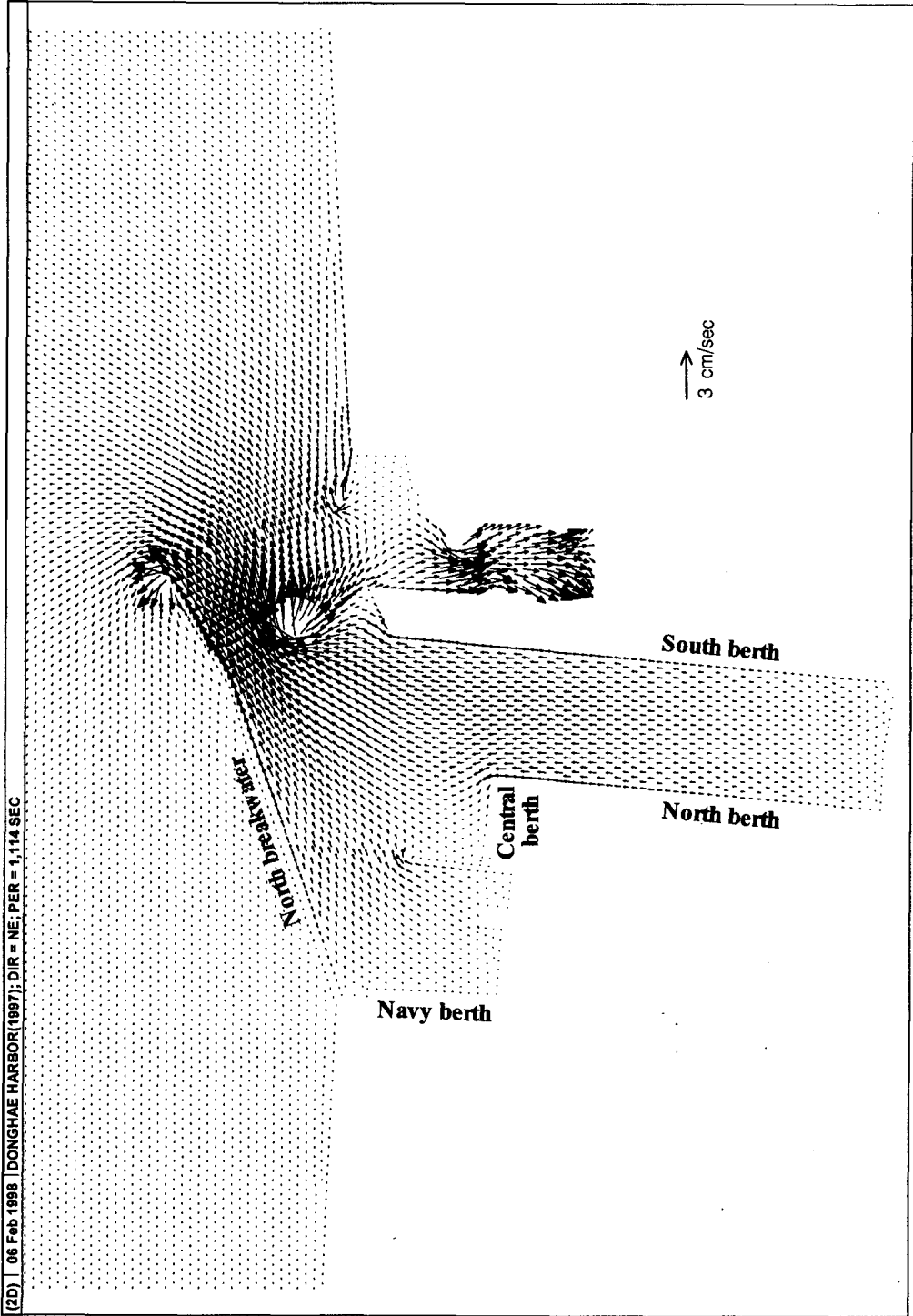


Fig. 2.3.2 Velocity vector plot of waves with period of 1,114 seconds.

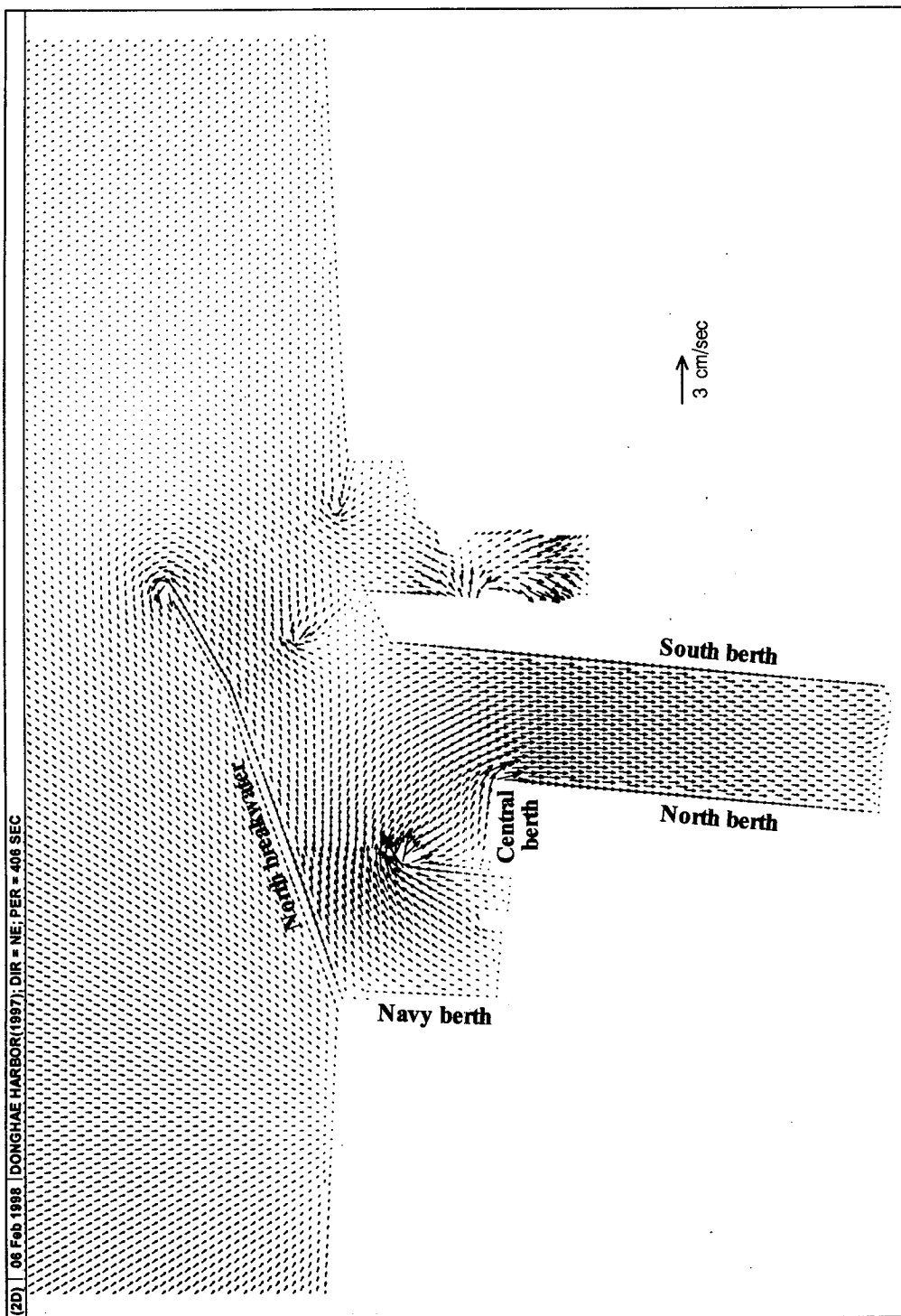


Fig. 2.3.3 Velocity vector plot of waves with period of 406 seconds.

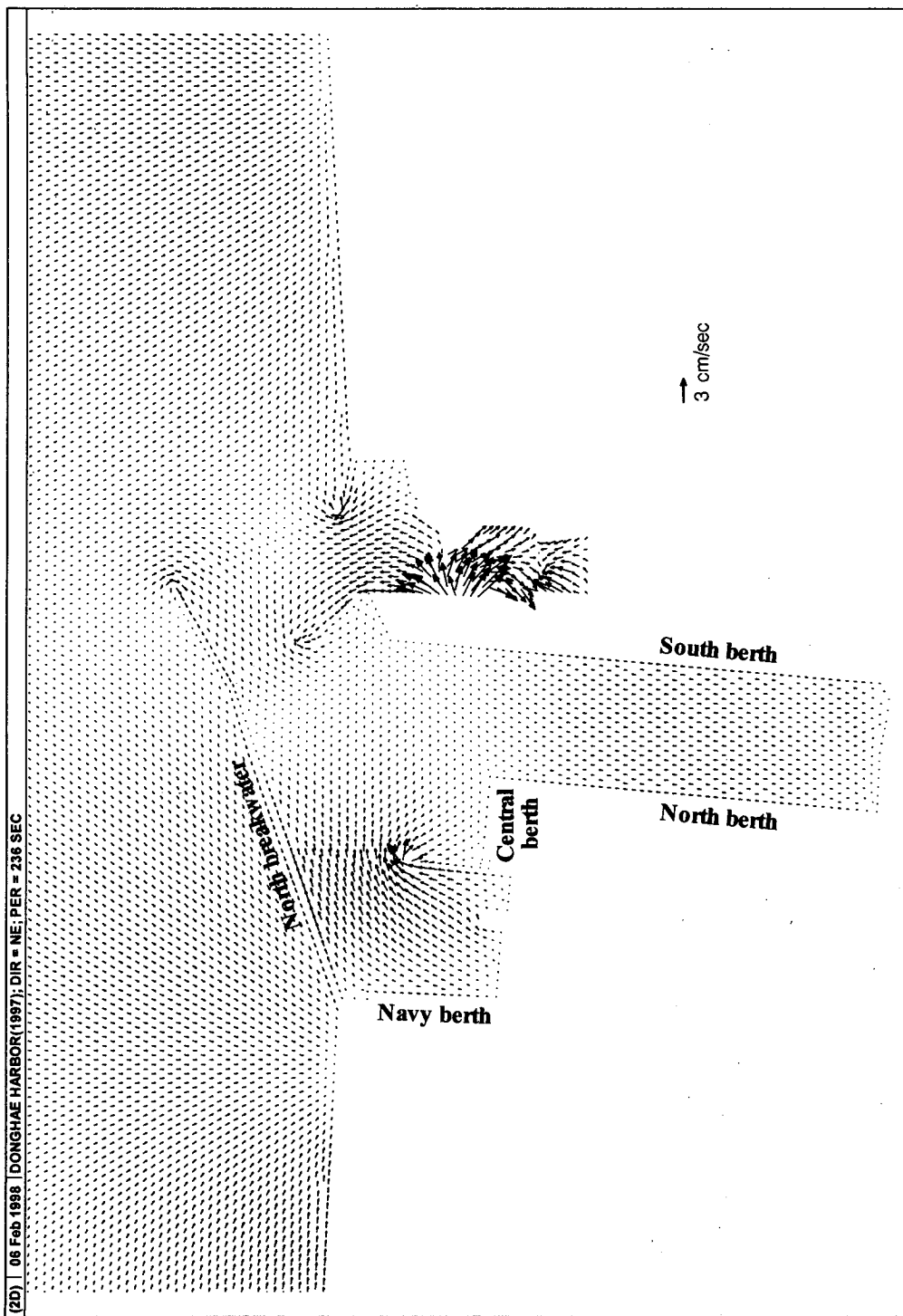


Fig. 2.3.4 Velocity vector plot of waves with period of 236 seconds.

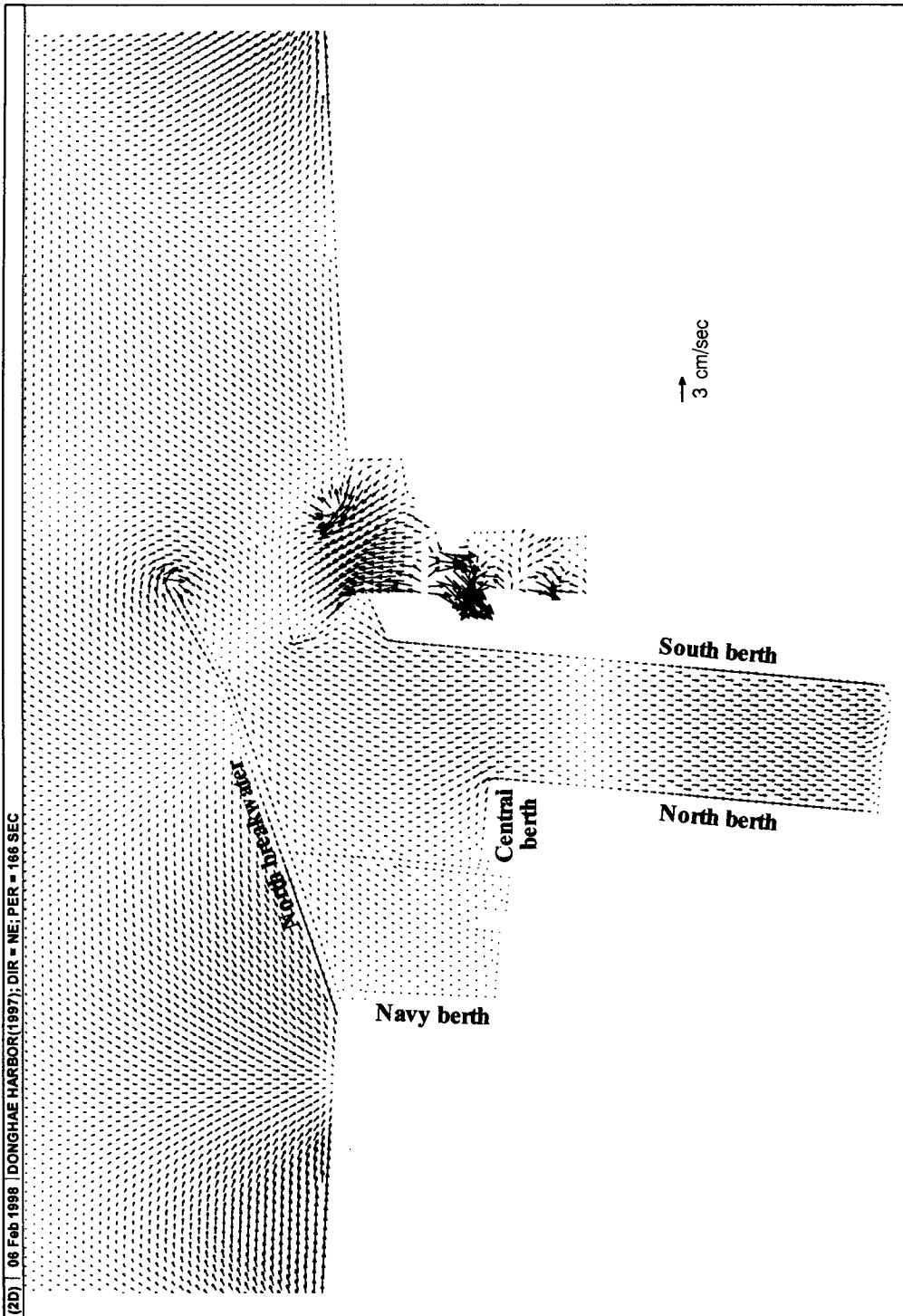


Fig. 2.3.5 Velocity vector plot of waves with period of 166 seconds.

와 천수 효과의 재현에 대한 수치실험을 간단하게 실시하였다. 또한, 본 연구를 통하여 자료의 입·출력 기법, 장주기 입사와 스펙트럼의 고려 방법, 부분 반사율의 고려 방법 등의 부분적인 수정을 추가하였다.

1. 기초방정식

계산의 지배방정식은 2차원 Boussinesq 방정식이며 이를 차분 근사하였다. 연속방정식은

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(Du)}{\partial x} + \frac{\partial(Dv)}{\partial y} = 0 \quad (2.4.1)$$

과 같으며 x -방향 및 y -방향의 운동량 방정식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \varepsilon u \\ = \frac{h}{2} \left[\frac{\partial^3(hu)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3(hv)}{\partial x \partial y \partial t} \right] - \frac{h^2}{6} \left[\frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y \partial t} \right] \\ - \frac{f}{D} u \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (2.4.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \varepsilon v \\ = \frac{h}{2} \left[\frac{\partial^3(hv)}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3(hu)}{\partial x \partial y \partial t} \right] - \frac{h^2}{6} \left[\frac{\partial^3 v}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y \partial t} \right] \\ - \frac{f}{D} v \sqrt{u^2 + v^2} \end{aligned} \quad (2.4.3)$$

여기서, η 는 정수면에서의 수위 변동, u 는 x 방향 유속, v 는 y 방향 유속, h 는 정수심, D 는 전수심($= h + \eta$), ε 은 에너지 흡수대(또는 경계)의 흡수계수, ν 는 쇄파에 의해 발생하는 교란에 의한 운동량의 혼합을 나타내는 와동점성계수, f 는 무차원 해저면 마찰계수를 각각 나타낸다.

2. 차분식

계산법의 배치는 수위 η 와 유속 u, v 를 교대로 두는 staggered mesh로 하고 ADI법(방향교대 음해법)에 의해 해를 구하였다(Fig. 2.4.1 참조). x - 방향의 음해법으로 계산할 때는 연속방정식과 x - 방향의 운동량 방정식을 연립시키고 $u^n, v^{n+1/2}, v^{n-1/2}, \eta^n$ 을 사용하여 $u^{n+1}, \eta^{n+1/2}$ 을 구한다. 결국, 연속방정식으로부터 $\eta^n \rightarrow \eta^{n+1/2}$, $(1/2) \Delta t$ 만큼 시간을 전진시킨다. 또, x - 방향의 운동량 방정식을 사용하여 $u^n \rightarrow u^{n+1}$, Δt 만큼 시간을 전진시킨다. 다음에 y - 방향의 음해법으로 계산할 때는 연속방정식과 y - 방향의 운동량 방정식을 연립시키고 $u^{n+1}, u^n, v^{n+1/2}, \eta^{n+1/2}$ 을 사용하여 $v^{n+3/2}, \eta^{n+1}$ 을 구한다. 결국, 연속방정식으로부터 $\eta^{n+1/2} \rightarrow \eta^{n+1}$, $(1/2) \Delta t$ 만큼 시간을 전진시킨다. 또, y - 방향의 운동량 방정식을 사용하여 $v^{n+1/2} \rightarrow v^{n+3/2}$, Δt 만큼 시간을 전진시킨다.

ADI법은 해를 구할 때 반복 계산(iteration)을 피하기 위해 선형화시킨 차분식을 유도할 필요가 있다. 연속방정식 중의 전수심 D 는 비선형이므로 미리 양해법으로 $\eta^{n+1/2}$ 에 해당되는 η^* 를 구하고 이것을 사용하여 $D^{n+1/2}$ 에 해당되는 D^* 를 구한다. x - 방향으로 음해법으로 계산할 때 이 D^* 를 사용함으로써 전수심이 음해법에 의한 해가 되는 것을 피한다.

가. x - sweep

$\eta^{n+1/2}$ 에 해당되는 η^* 는 다음과 같으며 이것으로부터 D^* 를 구한다.

$$\begin{aligned} \eta_{i+1/2, j+1/2}^* &= \eta_{i+1/2, j+1/2}^n \\ &- \frac{\Delta t}{2\Delta x} (D_{i+1, j+1/2}^n u_{i+1, j+1/2}^n - D_{i, j+1/2}^n u_{i, j+1/2}^n) \\ &- \frac{\Delta t}{2\Delta y} (D_{i+1/2, j+1}^n v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} - D_{i+1/2, j}^n v_{i+1/2, j}^{n+1/2}) \end{aligned} \quad (2.4.4)$$

\longrightarrow : u, D
 \uparrow : v, D
 o : η

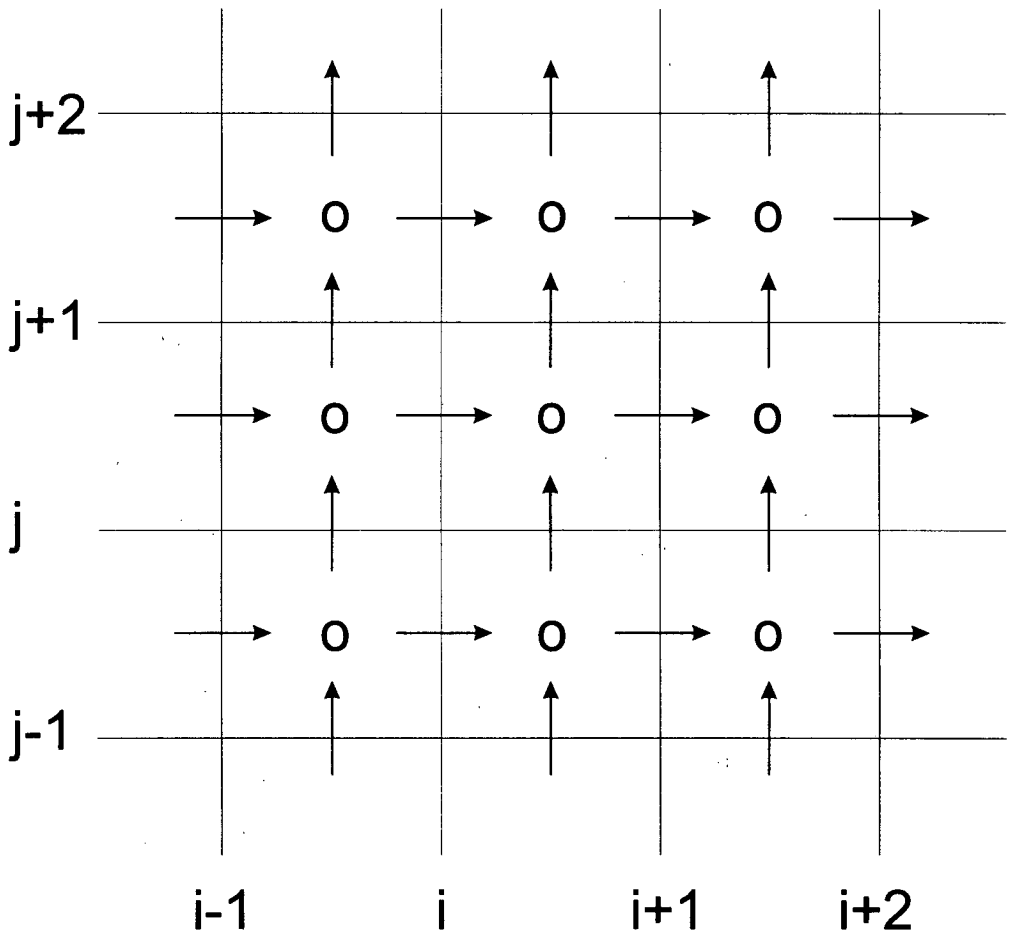


Fig. 2.4.1 Finite difference grids showing location of variables.

x- 방향의 운동량 방정식과 연속방정식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
u_{i,j+1/2}^{n+1} &= u_{i,j+1/2}^n \\
&- \frac{\Delta t}{8\Delta x} \{ (u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i+1,j+1/2}^{n+1}) (u_{i,j+1/2}^n + u_{i+1,j+1/2}^n) \\
&\quad - (u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i-1,j+1/2}^{n+1}) (u_{i,j+1/2}^n + u_{i-1,j+1/2}^n) \} \\
&- \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ (u_{i,j+3/2}^n - u_{i,j+1/2}^n) (v_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2}) \\
&\quad + (u_{i,j+1/2}^n - u_{i,j-1/2}^n) (v_{i-1/2,j}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j}^{n+1/2}) \} \\
&- g \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} - \eta_{i-1/2,j+1/2}^{n+1/2}) \\
&+ \nu_{i,j+1/2} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (u_{i+1,j+1/2}^n - 2u_{i,j+1/2}^n + u_{i-1,j+1/2}^n) \\
&+ \nu_{i,j+1/2} \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (u_{i,j+3/2}^n - 2u_{i,j+1/2}^n + u_{i,j-1/2}^n) \\
&- \varepsilon_{i,j+1/2} \Delta t u_{i,j+1/2}^{n+1} \\
&+ \frac{h_{i,j+1/2}}{2} \left[\frac{1}{\Delta x^2} \{ h_{i+1,j+1/2} u_{i+1,j+1/2}^{n+1} - 2h_{i,j+1/2} u_{i,j+1/2}^{n+1} \right. \\
&\quad + h_{i-1,j+1/2} u_{i-1,j+1/2}^{n+1} - h_{i+1,j+1/2} u_{i+1,j+1/2}^n \\
&\quad \left. + 2h_{i,j+1/2} u_{i,j+1/2}^n - h_{i-1,j+1/2} u_{i-1,j+1/2}^n \} \right. \\
&\quad - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ h_{i+1/2,j+1} v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} - h_{i+1/2,j} v_{i+1/2,j}^{n+1/2} \\
&\quad - h_{i-1/2,j+1} v_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + h_{i-1/2,j} v_{i-1/2,j}^{n-1/2} \\
&\quad - h_{i+1/2,j+1} v_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} + h_{i+1/2,j} v_{i+1/2,j}^{n-1/2} \\
&\quad \left. + h_{i-1/2,j+1} v_{i-1/2,j+1}^{n-1/2} - h_{i-1/2,j} v_{i-1/2,j}^{n-1/2} \} \right] \\
&- \frac{h_{i,j+1/2}^2}{6} \left[\frac{1}{\Delta x^2} \{ u_{i+1,j+1/2}^{n+1} - 2u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i-1,j+1/2}^{n+1} \right. \\
&\quad - u_{i+1,j+1/2}^n + 2u_{i,j+1/2}^n - u_{i-1,j+1/2}^n \} \\
&\quad - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} - v_{i+1/2,j}^{n+1/2} - v_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + v_{i-1/2,j}^{n+1/2} \\
&\quad - v_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} + v_{i+1/2,j}^{n-1/2} \\
&\quad \left. + v_{i-1/2,j+1}^{n-1/2} - v_{i-1/2,j}^{n-1/2} \} \right] \tag{2.4.5}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\eta_{i+1/2, j+1/2}^{n+1/2} &= \eta_{i+1/2, j+1/2}^n \\
&- \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1, j+1/2}^* (u_{i+1, j+1/2}^{n+1} + u_{i+1, j+1/2}^n) \\
&- D_{i, j+1/2}^* (u_{i, j+1/2}^{n+1} + u_{i, j+1/2}^n) \} \\
&- \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2, j+1}^* (v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} + v_{i+1/2, j+1}^{n-1/2}) \\
&- D_{i+1/2, j}^* (v_{i+1/2, j}^{n+1/2} + v_{i+1/2, j}^{n-1/2}) \} \quad (2.4.6)
\end{aligned}$$

연속방정식을 운동방정식에 대입하고 운동방정식으로부터 $\eta^{n+1/2}$ 을 소거한다. 이것에 의해 u^{n+1} 만을 미지수로 하는 음해법의 방정식이 구해진다. 운동방정식에서 압력항만을 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
-g \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\eta_{i+1/2, j+1/2}^n - \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1, j+1/2}^* (u_{i+1, j+1/2}^{n+1} + u_{i+1, j+1/2}^n) \right. \\
\left. - D_{i, j+1/2}^* (u_{i, j+1/2}^{n+1} + u_{i, j+1/2}^n) \} \right. \\
\left. - \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2, j+1}^* (v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} + v_{i+1/2, j+1}^{n-1/2}) \right. \\
\left. - D_{i+1/2, j}^* (v_{i+1/2, j}^{n+1/2} + v_{i+1/2, j}^{n-1/2}) \} \right. \\
\left. - \eta_{i-1/2, j+1/2}^n + \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i, j+1/2}^* (u_{i, j+1/2}^{n+1} + u_{i, j+1/2}^n) \right. \\
\left. - D_{i-1, j+1/2}^* (u_{i-1, j+1/2}^{n+1} + u_{i-1, j+1/2}^n) \} \right. \\
\left. + \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i-1/2, j+1}^* (v_{i-1/2, j+1}^{n+1/2} + v_{i-1/2, j+1}^{n-1/2}) \right. \\
\left. - D_{i-1/2, j}^* (v_{i-1/2, j}^{n+1/2} + v_{i-1/2, j}^{n-1/2}) \} \right]
\end{aligned}$$

윗 식에서는 $u_{i+1, j+1/2}^{n+1}$, $u_{i, j+1/2}^{n+1}$, $u_{i-1, j+1/2}^{n+1}$ 만이 미지수이며 이것들을 포함하는 항을 좌변에, 그리고 포함하지 않는 항을 우변에 모아서 다음의 형태,

$$A_i u_{i-1, j+1/2}^{n+1} + B_i u_{i, j+1/2}^{n+1} + C_i u_{i+1, j+1/2}^{n+1} = D_i \quad (2.4.7)$$

로 둔다. 이 때 A_i , B_i , C_i , D_i 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
A_i &= -\frac{\Delta t}{8\Delta x} (u_{i, j+1/2}^n + u_{i-1, j+1/2}^n) - \frac{g}{4} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 D_{i-1, j+1/2}^* \\
&- \frac{h_{i, j+1/2}}{2} \frac{1}{\Delta x^2} h_{i-1, j+1/2} + \frac{h_{i, j+1/2}^2}{6} \frac{1}{\Delta x^2} \quad (2.4.8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_i &= 1 + \frac{\Delta t}{8\Delta x} (u_{i+1,j+1/2}^n - u_{i-1,j+1/2}^n) + \frac{g}{2} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 D_{i,j+1/2}^* \\
&+ \varepsilon_{i,j+1/2} \Delta t + \frac{2}{3} \frac{1}{(\Delta x)^2} h_{i,j+1/2}^2
\end{aligned} \tag{2.4.9}$$

$$\begin{aligned}
C_i &= \frac{\Delta t}{8\Delta x} (u_{i,j+1/2}^n + u_{i+1,j+1/2}^n) - \frac{g}{4} \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} \right)^2 D_{i+1,j+1/2}^* \\
&- \frac{h_{i,j+1/2}}{2} \frac{1}{\Delta x^2} h_{i+1,j+1/2} + \frac{h_{i,j+1/2}^2}{6} \frac{1}{\Delta x^2}
\end{aligned} \tag{2.4.10}$$

$$\begin{aligned}
D_i &= u_{i,j+1/2}^n \\
&- \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ (u_{i,j+3/2}^n - u_{i,j+1/2}^n) (v_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2}) \\
&+ (u_{i,j+1/2}^n - u_{i,j-1/2}^n) (v_{i-1/2,j}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j}^{n+1/2}) \} \\
&- g \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_{i+1/2,j+1/2}^n - \eta_{i-1/2,j+1/2}^n) \\
&- g \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[- \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1,j+1/2}^* u_{i+1,j+1/2}^n - D_{i,j+1/2}^* u_{i,j+1/2}^n \} \right. \\
&\quad - \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2,j+1}^* (v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j+1}^{n-1/2}) \\
&\quad \quad - D_{i+1/2,j}^* (v_{i+1/2,j}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j}^{n-1/2}) \} \\
&\quad + \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i,j+1/2}^* u_{i,j+1/2}^n - D_{i-1,j+1/2}^* u_{i-1,j+1/2}^n \} \\
&\quad + \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i-1/2,j+1}^* (v_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + v_{i-1/2,j+1}^{n-1/2}) \\
&\quad \quad - D_{i-1/2,j}^* (v_{i-1/2,j}^{n+1/2} + v_{i-1/2,j}^{n-1/2}) \} \left. \right] \\
&+ v_{i,j+1/2} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (u_{i+1,j+1/2}^n - 2u_{i,j+1/2}^n + u_{i-1,j+1/2}^n) \\
&+ v_{i,j+1/2} \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (u_{i,j+3/2}^n - 2u_{i,j+1/2}^n + u_{i,j-1/2}^n) \\
&+ \frac{h_{i,j+1/2}}{2} \left[\frac{1}{\Delta x^2} \{ h_{i+1,j+1/2} u_{i+1,j+1/2}^{n+1} - 2h_{i,j+1/2} u_{i,j+1/2}^{n+1} \right. \\
&\quad + h_{i-1,j+1/2} u_{i-1,j+1/2}^{n+1} - h_{i+1,j+1/2} u_{i+1,j+1/2}^n \\
&\quad \left. + 2h_{i,j+1/2} u_{i,j+1/2}^n - h_{i-1,j+1/2} u_{i-1,j+1/2}^n \} \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ h_{i+1/2,j+1} v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} - h_{i+1/2,j} v_{i+1/2,j}^{n+1/2} \} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - h_{i-1/2,j+1} v_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + h_{i-1/2,j} v_{i-1/2,j}^{n+1/2} \\
& - h_{i+1/2,j+1} v_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} - h_{i+1/2,j} v_{i+1/2,j}^{n-1/2} \\
& - h_{i-1/2,j+1} v_{i-1/2,j+1}^{n-1/2} + h_{i-1/2,j} v_{i-1/2,j}^{n-1/2} \} \\
& - \frac{h_{i,j+1/2}^2}{6} \left[\frac{1}{\Delta x^2} \{ u_{i+1,j+1/2}^{n+1} - 2u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i-1,j+1/2}^{n+1} \right. \\
& \quad \left. - u_{i+1,j+1/2}^n + 2u_{i,j+1/2}^n - u_{i-1,j+1/2}^n \} \right. \\
& \quad \left. \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} - v_{i+1/2,j}^{n+1/2} - v_{i-1/2,j+1}^{n+1/2} + v_{i-1/2,j}^{n+1/2} \right. \\
& \quad \left. - v_{i+1/2,j+1}^{n-1/2} + v_{i+1/2,j}^{n-1/2} \right. \\
& \quad \left. + v_{i-1/2,j+1}^{n-1/2} - v_{i-1/2,j}^{n-1/2} \} \right] \tag{2.4.11}
\end{aligned}$$

ㄷ. y - sweep

$\eta^{n+1/2}$ 에 해당되는 η^* 는 다음과 같으며 이것으로부터 D^* 를 구한다.

$$\begin{aligned}
\eta_{i+1/2,j+1/2}^* &= \eta_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} \\
& - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \{ D_{i+1,j+1/2}^{n+1/2} u_{i+1,j+1/2}^{n+1} - D_{i,j+1/2}^{n+1/2} u_{i,j+1/2}^{n+1} \} \\
& - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \{ D_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} - D_{i+1/2,j}^{n+1/2} v_{i+1/2,j}^{n+1/2} \} \tag{2.4.12}
\end{aligned}$$

y - 방향의 운동량 방정식과 연속방정식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
v_{i+1/2,j}^{n+3/2} &= v_{i+1/2,j}^{n+1/2} \\
& - \frac{\Delta t}{8\Delta y} \{ (v_{i+1/2,j+1}^{n+3/2} + v_{i+1/2,j}^{n+3/2})(v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j}^{n+1/2}) \\
& \quad - (v_{i+1/2,j}^{n+3/2} + v_{i+1/2,j-1}^{n+3/2})(v_{i+1/2,j}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j-1}^{n+1/2}) \} \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ (v_{i+3/2,j}^{n+1/2} - v_{i+1/2,j}^{n+1/2})(u_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + u_{i+1,j-1/2}^{n+1}) \\
& \quad + (v_{i+1/2,j}^{n+1/2} - v_{i+1/2,j}^{n+1/2})(u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i,j+1/2}^{n+1}) \} \\
& - g \frac{\Delta t}{\Delta y} (\eta_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - \eta_{i+1/2,j-1/2}^{n+1}) \\
& + v_{i+1/2,j} \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} - 2v_{i+1/2,j}^{n+1/2} + v_{i+1/2,j-1}^{n+1/2})
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + v_{i+1/2,j} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (v_{i+3/2,j}^{n+1/2} - 2v_{i+1/2,j}^{n+1/2} + v_{i-1/2,j}^{n+1/2}) \\
& - \varepsilon_{i+1/2,j} \Delta t v_{i+1/2,j}^{n+3/2} \\
& + \frac{h_{i+1/2,j}}{2} \left[\frac{1}{\Delta y^2} \{ h_{i+1/2,j+1} v_{i+1/2,j+1}^{n+3/2} - 2h_{i+1/2,j} v_{i+1/2,j}^{n+3/2} \right. \\
& \quad + h_{i+1/2,j-1} v_{i+1/2,j-1}^{n+3/2} - h_{i+1/2,j+1} v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} \\
& \quad \left. + 2h_{i+1/2,j} v_{i+1/2,j}^{n+1/2} - h_{i+1/2,j-1} v_{i+1/2,j-1}^{n+1/2} \right] \\
& \quad - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ h_{i+1,j+1/2} u_{i+1/2,j+1}^{n+1} - h_{i+1,j-1/2} u_{i+1,j-1/2}^{n+1} \\
& \quad - h_{i,j+1/2} u_{i,j+1/2}^{n+1} + h_{i,j-1/2} u_{i,j-1/2}^{n+1} \\
& \quad - h_{i+1,j+1/2} u_{i+1/2,j+1}^n + h_{i+1,j-1/2} u_{i+1,j-1/2}^n \\
& \quad \left. + h_{i,j+1/2} u_{i,j+1/2}^n - h_{i,j-1/2} u_{i,j-1/2}^n \right\} \\
& - \frac{h_{i+1/2,j}^2}{6} \left[\frac{1}{\Delta y^2} \{ v_{i+1/2,j+1}^{n+3/2} - 2v_{i+1/2,j}^{n+3/2} + v_{i+1/2,j-1}^{n+3/2} \right. \\
& \quad \left. - v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} + 2v_{i+1/2,j}^{n+1/2} - v_{i+1/2,j-1}^{n+1/2} \right] \\
& \quad - \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ u_{i+1,j+1/2}^{n+1} - u_{i+1,j-1/2}^{n+1} - u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i,j-1/2}^{n+1} \\
& \quad - u_{i+1,j+1/2}^n + u_{i+1,j-1/2}^n \\
& \quad \left. + u_{i,j+1/2}^n - u_{i,j-1/2}^n \right\} \tag{2.4.13}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\eta_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} & = \eta_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} \\
& - \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1,j+1/2}^* (u_{i+1,j+1/2}^{n+1} + u_{i+1,j+1/2}^n) \\
& - D_{i,j+1/2}^* (u_{i,j+1/2}^{n+1} + u_{i,j+1/2}^n) \} \\
& + \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2,j+1}^* (v_{i+1/2,j+1}^{n+3/2} + v_{i+1/2,j+1}^{n+1/2}) \\
& - D_{i+1/2,j}^* (v_{i+1/2,j}^{n+3/2} + v_{i+1/2,j}^{n+1/2}) \} \tag{2.4.14}
\end{aligned}$$

연속방정식을 운동방정식에 대입하고 운동방정식으로부터 η^{n+1} 을 소거한다. 이것에 의해 $v^{n+3/2}$ 만을 미지수로 하는 음해법의 방정식이 구해진다. 운동방정식에서 압력항만을 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
& -g \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[\eta_{i+1/2, j+1/2}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1, j+1/2}^* (u_{i+1, j+1/2}^{n+1} + u_{i+1, j+1/2}^n) \right. \\
& \quad \left. - D_{i, j+1/2}^* (u_{i, j+1/2}^{n+1} + u_{i, j+1/2}^n) \right\} \\
& \quad - \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2, j+1}^* (v_{i+1/2, j+1}^{n+3/2} + v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2}) \\
& \quad \quad - D_{i+1/2, j}^* (v_{i+1/2, j}^{n+3/2} + v_{i+1/2, j}^{n+1/2}) \} \\
& \quad - \eta_{i+1/2, j-1/2}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1, j-1/2}^* (u_{i+1, j-1/2}^{n+1} + u_{i+1, j-1/2}^n) \\
& \quad \quad - D_{i, j-1/2}^* (u_{i, j-1/2}^{n+1} + u_{i, j-1/2}^n) \} \\
& \quad + \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2, j-1}^* (v_{i+1/2, j-1}^{n+3/2} + v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2}) \\
& \quad \quad - D_{i+1/2, j-1}^* (v_{i+1/2, j-1}^{n+3/2} + v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2}) \}
\end{aligned}$$

윗 식에서는 $v_{i+1/2, j+1}^{n+3/2}$, $v_{i+1/2, j}^{n+3/2}$, $v_{i+1/2, j-1}^{n+3/2}$ 만이 미지수이며 이것들을 포함하는 항을 좌변에, 그리고 포함하지 않는 항을 우변에 모아서 다음의 형태,

$$A_j v_{i+1/2, j-1}^{n+3/2} + B_j v_{i+1/2, j}^{n+3/2} + C_j v_{i+1/2, j+1}^{n+3/2} = D_j \quad (2.4.15)$$

로 둔다. 이 때 A_j , B_j , C_j , D_j 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
A_j &= -\frac{\Delta t}{8\Delta y} (v_{i+1/2, j}^{n+1/2} + v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2}) - \frac{g}{4} \left(\frac{\Delta t}{\Delta y} \right)^2 D_{i+1/2, j-1}^* \\
& \quad - \frac{h_{i+1/2, j}}{2} \frac{1}{\Delta y^2} h_{i+1/2, j-1} + \frac{h_{i+1/2, j}^2}{6} \frac{1}{\Delta y^2}
\end{aligned} \quad (2.4.16)$$

$$\begin{aligned}
B_j &= 1 + \frac{\Delta t}{8\Delta y} (v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} - v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2}) + \frac{g}{2} \left(\frac{\Delta t}{\Delta y} \right)^2 D_{i+1/2, j}^* \\
& \quad + \epsilon_{i+1/2, j} \Delta t + \frac{2}{3} \frac{1}{(\Delta y)^2} h_{i+1/2, j}^2
\end{aligned} \quad (2.4.17)$$

$$\begin{aligned}
C_j &= +\frac{\Delta t}{8\Delta y} (v_{i+1/2, j}^{n+1/2} + v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2}) - \frac{g}{4} \left(\frac{\Delta t}{\Delta y} \right)^2 D_{i+1/2, j+1}^* \\
& \quad - \frac{h_{i+1/2, j}}{2} \frac{1}{\Delta y^2} h_{i+1/2, j+1} + \frac{h_{i+1/2, j}^2}{6} \frac{1}{\Delta y^2}
\end{aligned} \quad (2.4.18)$$

$$\begin{aligned}
D_j &= v_{i+1/2, j}^{n+1/2} \\
& \quad - \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ (v_{i+3/2, j}^{n+1/2} - v_{i+1/2, j}^{n+1/2})(u_{i+1, j+1/2}^{n+1} + u_{i+1, j-1/2}^{n+1}) \\
& \quad \quad + \{ (v_{i+1/2, j}^{n+1/2} - v_{i-1/2, j}^{n+1/2})(u_{i, j+1/2}^{n+1} + u_{i, j-1/2}^{n+1}) \}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -g \frac{\Delta t}{\Delta y} (\eta_{i+1/2, j+1/2}^{n+1/2} - \eta_{i+1/2, j-1/2}^{n+1/2}) \\
& -g \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[-\frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1, j+1/2}^* (u_{i+1, j+1/2}^{n+1} + u_{i+1, j+1/2}^n) \right. \\
& \quad \left. - D_{i, j+1/2}^* (u_{i, j+1/2}^{n+1} + u_{i, j+1/2}^n) \right\} \\
& \quad - \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2, j+1}^* v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} - D_{i+1/2, j}^* v_{i+1/2, j}^{n+1/2} \} \\
& \quad + \frac{\Delta t}{4\Delta x} \{ D_{i+1, j-1/2}^* (u_{i+1, j-1/2}^{n+1} + u_{i+1, j-1/2}^n) \\
& \quad \quad - D_{i, j-1/2}^* (u_{i, j-1/2}^{n+1} + u_{i, j-1/2}^n) \} \\
& \quad + \frac{\Delta t}{4\Delta y} \{ D_{i+1/2, j+1}^* v_{i+1/2, j}^{n+1/2} - D_{i+1/2, j-1}^* v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2} \} \Big] \\
& + \nu_{i+1/2, j} \frac{\Delta t}{\Delta y^2} (v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} - 2v_{i+1/2, j}^{n+1/2} + v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2}) \\
& + \nu_{i+1/2, j} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (v_{i+3/2, j}^{n+1/2} - 2v_{i+1/2, j}^{n+1/2} + v_{i-1/2, j}^{n+1/2}) \\
& + \frac{h_{i+1/2, j}}{2} \left[\frac{1}{\Delta y^2} \{ -h_{i+1/2, j+1} v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} \right. \\
& \quad \left. + 2h_{i+1/2, j} v_{i+1/2, j}^{n+1/2} - h_{i+1/2, j-1} v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2} \} \right. \\
& \quad + \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ h_{i+1, j+1/2} u_{i+1, j+1/2}^{n+1} - h_{i+1, j-1/2} u_{i+1, j-1/2}^{n+1} \\
& \quad \quad - h_{i, j+1/2} u_{i, j+1/2}^{n+1} + h_{i, j-1/2} u_{i, j-1/2}^{n+1} \\
& \quad \quad - h_{i+1, j+1/2} u_{i+1, j+1/2}^n + h_{i+1, j-1/2} u_{i+1, j-1/2}^n \\
& \quad \quad \left. + h_{i, j+1/2} u_{i, j+1/2}^n - h_{i, j-1/2} u_{i, j-1/2}^n \} \right] \\
& - \frac{h_{i+1/2, j}^2}{6} \left[-\frac{1}{\Delta y^2} \{ v_{i+1/2, j+1}^{n+1/2} + 2v_{i+1/2, j}^{n+1/2} - v_{i+1/2, j-1}^{n+1/2} \} \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{\Delta x \Delta y} \{ u_{i+1, j+1/2}^{n+1} - u_{i+1, j-1/2}^{n+1} - u_{i, j+1/2}^{n+1} + u_{i, j-1/2}^{n+1} \right. \\
& \quad \quad - u_{i+1, j+1/2}^n + u_{i+1, j-1/2}^n \\
& \quad \quad \left. + u_{i, j+1/2}^n - u_{i, j-1/2}^n \} \right] \tag{2.4.19}
\end{aligned}$$

3. 경계조건

가. 투과 경계

투과 경계는 Fig. 2.4.2에 제시한 바와 같이 에너지 흡수층을 배치하여 실현하였다. 에너지 흡수층의 흡수계수 분포 $\epsilon(x)$ 로는 다음 식을 사용하였다.

$$\epsilon(x) = \frac{r\epsilon_m}{2(\sinh r - r)} \left\{ \cosh\left(\frac{rx}{F}\right) - 1 \right\} \quad (2.4.20)$$

여기서, x 는 투과 경계로부터의 거리, ϵ_m 은 흡수선 외측 가장자리의 흡수계수, F 는 흡수층의 폭(통상 파장의 2배 정도), r 은 매개변수로 3을 사용하였다.

나. 외해측 입사 경계

항의 입구를 Fig. 2.4.2와 같이 에너지 흡수층으로 둘러싸고 흡수층과 계산 영역의 경계에 경계선 입사법을 적용하였다. 경계선 입사법은 수치계산을 할 때 경계를 사이에 두는 계산 격자점을 중심으로 하는 차분식에 입사파 유속 u_{in} , v_{in} 또는 입사파 수위 η_{in} 을 더하거나 뺌으로써 경계선의 내측에서는 입사파와 반사파의 공존 영역, 외측에서는 반사파만이 존재하는 영역이 되도록 하는 방법이다. 그리하여 반사파 영역을 에너지 흡수층으로 함으로써 반사파를 흡수하고 반사파가 없는 입사 경계를 실현하는 것이다.

다. 반사 경계

Fig. 2.4.3과 같이 우측($i = ie$)이 완전반사 경계인 경우에는 다음과 같은 방법을 사용하였다. 예를 들면, $u_{ie-1, j+1/2}$ 을 계산하는 경우

$$u_{ie, j+1/2} = 0 \quad (2.4.21)$$

한편, 임의의 반사율을 가지는 경계는 시험적으로 반사율에 따른 혼합비로 완전반

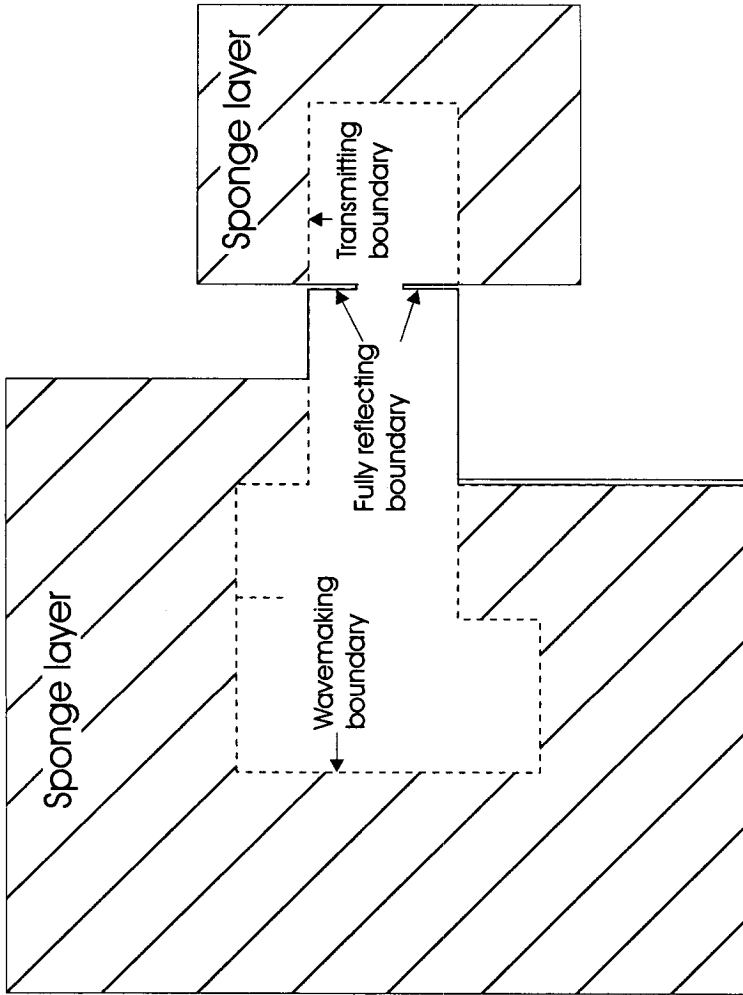


Fig. 2.4.2 Plan view of boundary conditions.

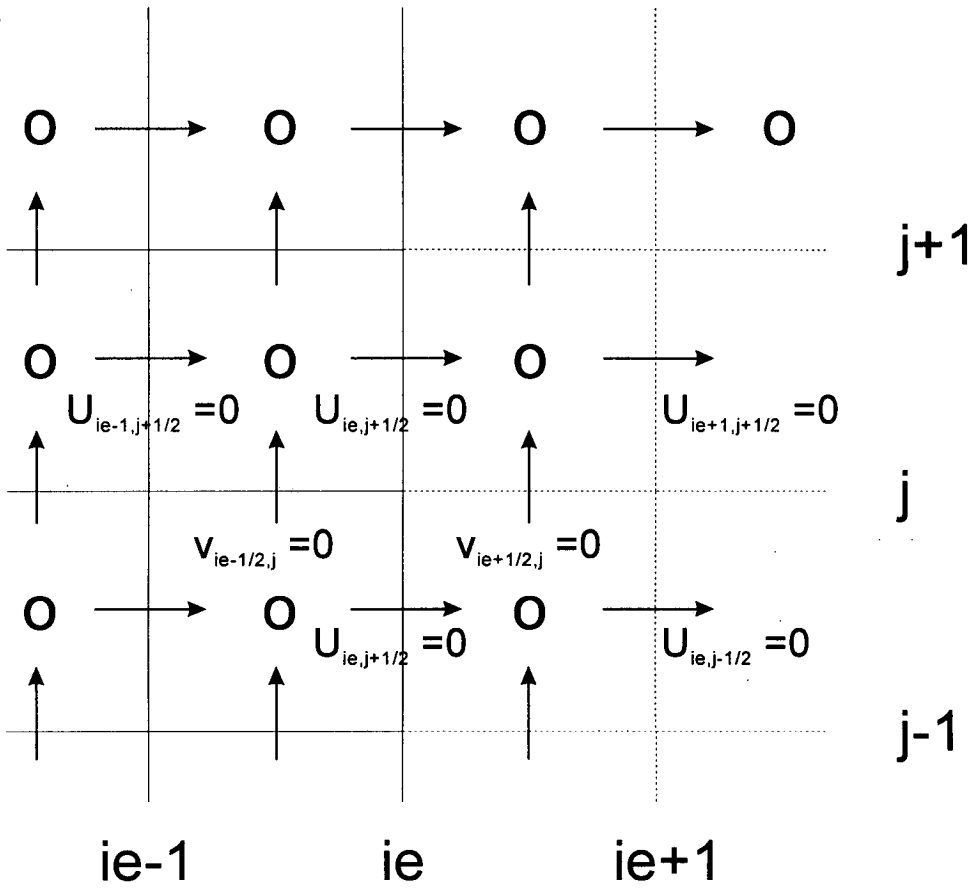


Fig. 2.4.3 Finite difference grids for reflecting boundary.

사 경계와 투과 경계를 평면적으로 혼합 배치하는 방법을 고려하였다.

4. 쇄파 계산

가. 쇄파의 판정

파봉에서의 수입자 속도 $\sqrt{u_s^2 + v_s^2}$ 과 파속 C 의 비를 사용하여 쇄파를 판정한다.

$$\frac{\sqrt{u_s^2 + v_s^2}}{C_b} > \gamma_b = (0.6 \sim 0.7) \times 0.8 \quad (2.4.22)$$

Boussinesq 방정식에서는 수 표면의 수입자속도의 x - 방향 성분 u_s 는 단면평균 유속 u 를 이용하면 다음 식으로 주어진다.

$$u_s = \bar{u} - \left(\frac{D^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} \quad (2.4.23)$$

동일하게 하면 y - 방향 성분 v_s 는 다음과 같이 주어진다.

$$v_s = \bar{v} - \left(\frac{D^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right) \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \quad (2.4.24)$$

파속은 장파의 파속 $C_b = \sqrt{gh}$ 을 사용하였다.

또, 파봉이 있는 조건으로

$$\eta > 0 \quad (2.4.25)$$

을 사용하였다.

해지면 경사가 파향에 대해 양(+)인 조건(파가 진행하는 방향으로 수심이 감소하는 상태)으로는 다음 식을 고려하였다.

$$\vec{u}_s \cdot \vec{s} < 0 \quad (2.4.26)$$

여기서,

$$\vec{u} = (u_s, v_s) \quad (2.4.27)$$

$$\vec{s} = (s_x, s_y) \quad (2.4.28)$$

여기서,

$$s_x = \frac{\partial h}{\partial x}, \quad s_y = \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.4.29)$$

나. 쇄파 감쇠계수

쇄파의 와동점성계수 ν 는 파의 유속 진폭 $\hat{U}(= \sqrt{\hat{u}^2 + \hat{v}^2})$ 를 사용하여 다음 식으로부터 계산한다.

$$\nu = \frac{\alpha_r \alpha_D s g d}{\sigma^2} \sqrt{\frac{g}{d} \cdot \frac{\hat{U} - U_r}{U_s - U_r}} \quad (2.4.30)$$

여기서, $\alpha_r = 2.5$, α_D 는 규칙파와 불규칙파의 에너지 감쇠 과정의 차이를 나타내는 계수, s 는 파향에 대한 해저면 경사, g 는 중력가속도, d 는 평균수심, σ 는 유의 파의 각주파수($= 2\pi/T$)를 각각 나타내며 U_r 과 U_s 로는 각각 다음 식을 사용하였다 (片山과 佐藤, 1993).

$$U_r = 0.135\sqrt{gd} \quad (2.4.31)$$

$$U_s = 0.4(0.57 + 5.3s)\sqrt{gd} \quad (2.4.32)$$

쇄파점에서는 이 값을 사용하고 쇄파점과 비쇄파점의 경계에서는 1 파장의 범위에서 선형적으로 감소하는 값을 사용하였다.

다. 차분 계산

$$u_{si,j+1/2}^N = \overline{u_{i,j+1/2}^N} - \left[\frac{(D_{i,j+1/2}^N)^2}{2} - \frac{(h_{i,j+1/2})^2}{6} \right] \cdot \frac{1}{2\Delta x} (\overline{u_{i+1,j+1/2}^N} - 2\overline{u_{i,j+1/2}^N} + \overline{u_{i-1,j+1/2}^N}) \quad (2.4.33)$$

$$v_{si+1/2,j}^N = \overline{v_{i+1/2,j}^N} - \left[\frac{(D_{i+1/2,j}^N)^2}{2} - \frac{(h_{i+1/2,j})^2}{6} \right] \cdot \frac{1}{2\Delta y} (\overline{v_{i+1/2,j+1}^N} - 2\overline{v_{i+1/2,j}^N} + \overline{v_{i+1/2,j-1}^N}) \quad (2.4.34)$$

$$\begin{aligned}
& (\sqrt{u_s^2 + v_s^2})_{i+1/2, j+1/2}^N \\
&= \frac{1}{2} \sqrt{(u_{si, j+1/2}^N + u_{si+1, j+1/2}^N)^2 + (v_{si+1/2, j}^N + v_{si+1/2, j+1}^N)^2}
\end{aligned} \tag{2.4.35}$$

$$(\sqrt{gh})_{i+1/2, j+1/2} = \sqrt{g \cdot h_{i+1/2, j+1/2}} \tag{2.4.36}$$

$$\eta_{i+1/2, j+1/2}^{N+1/2} > 0 \tag{2.4.37}$$

$$\begin{aligned}
(\vec{u}_s \cdot \vec{s})_{i+1/2, j+1/2}^N &= \frac{1}{2} (u_{si, j+1/2}^N + u_{si+1, j+1/2}^N) \\
&\quad \cdot \frac{1}{\Delta x} (h_{i+1, j+1/2} - h_{i, j+1/2}) \\
&\quad + \frac{1}{2} (v_{si+1/2, j}^N + v_{si+1/2, j+1}^N) \\
&\quad \cdot \frac{1}{\Delta y} (h_{i+1/2, j+1} - h_{i+1/2, j})
\end{aligned} \tag{2.4.38}$$

$$\begin{aligned}
v_{i+1/2, j+1/2}^N &= \frac{\alpha \gamma \alpha_D s_{i+1/2, j+1/2}^N g d_{i+1/2, j+1/2}}{\sigma^2} \\
&\quad \cdot \sqrt{\frac{g}{d_{i+1/2, j+1/2}}} \cdot \frac{\hat{U}_{i+1/2, j+1/2} - U_{\bar{r}i+1/2, j+1/2}}{U_{si+1/2, j+1/2} - U_{\bar{r}i+1/2, j+1/2}}
\end{aligned} \tag{2.4.39}$$

여기서,

$$s_{i+1/2, j+1/2} = \frac{(\vec{u}_s \cdot \vec{s})_{i+1/2, j+1/2}^N}{|\vec{u}_s|_{i+1/2, j+1/2}^N} = \frac{(\vec{u}_s \cdot \vec{s})_{i+1/2, j+1/2}^N}{(\sqrt{u_s^2 + v_s^2})_{i+1/2, j+1/2}^N} \tag{2.4.40}$$

$$\hat{U}_{i+1/2, j+1/2} = \sqrt{(\hat{u}_{i+1/2, j+1/2})^2 + (\hat{v}_{i+1/2, j+1/2})^2} \tag{2.4.41}$$

이며, $d_{i+1/2, j+1/2}$ 는

$$\frac{1}{4} (D_{i, j+1/2} + D_{i+1, j+1/2} + D_{i+1/2, j} + D_{i+1/2, j+1})$$

의 평균치를 사용한다. 그리고, $\hat{u}_{i+1/2, j+1/2}$ 와 $\hat{v}_{i+1/2, j+1/2}$ 는 각각

$$\frac{1}{2} (u_{i, j+1/2} + u_{i+1, j+1/2})$$

$$\frac{1}{2} (v_{i, j+1/2} + v_{i+1, j+1/2})$$

의 진폭이다. 그리고, $d_{i+1/2, j+1/2}$ 는 성분파 중 최대주기마다 계산하며,

$\hat{u}_{i+1/2, j+1/2}$ 와 $\hat{v}_{i+1/2, j+1/2}$ 는 각 지점에서 단일 파마다 계산한다.

5. 적용성 시험

가. 일정 경사 사면에서의 파랑 변형

본 연구에서 수립한 Boussinesq 모형의 적용성 시험을 위하여 먼저 Fig. 2.4.4에 제시된 계산 영역을 설정하고 300×240 개의 등방형 격자($\Delta x = \Delta y = 5$ m)를 구성하였다. 그림에서 알 수 있듯이 $I = 60$ 에 조파선을 설정(1방향 조파)하였으며 파가 진행하는 방향인 $I = 1 \sim 60$, $I = 261 \sim 300$, 그리고 그 좌우로 45 격자씩($J = 1 \sim 45$, $J = 196 \sim 240$)의 에너지 흡수층(sponge layer)를 설치하여 반사파와 투과파를 흡수하도록 하였다. 수심은 $I = 1 \sim 120$ 의 영역은 30 m, $I = 120 \sim 260$ 의 영역에서는 23 m에서 2 m까지 일정하게 감소하며 $I = 261 \sim 300$ 의 영역은 2 m로 설정하였다. 입사파 조건으로는 주기 10초, 파고 3 m의 규칙파가 I 축과 나란한 방향 및 I 축과 시계 방향으로 30° 를 이루는 각도로 입사하는 경우와 동일한 조건에서 $S_{\max} = 75$ 의 불규칙파가 입사하는 4 가지를 설정하였다.

일정한 지점에서의 파의 시계열 변화를 살펴보기 위하여 P1(30, 120), P2(90, 120), P3(150, 120), P4(190, 120), P5(225, 120), P6(250, 120), P2(250, 90), P8(250, 150)의 8개 정점을 설정하였다. 수치계산은 모두 600초까지 시도하였으나 입사 파향을 30° 로 설정하였을 때 규칙파의 경우는 578초, 불규칙파의 경우에는 584초에서 발산하였다.

Fig. 2.4.5에는 규칙파가 수직 입사(파향 0°)하는 경우 정점 P2(수심 23.0 m), P4(수심 12.5 m), P6(수심 3.5 m), P8(수심 3.5 m)에서 계산된 수위의 시간적 변화를 시작부터 400초까지 도시하였다. 4개 정점 모두에서 규칙적인 수위 변화가 제시되어 수치적인 불안정이 나타나지 않았다. 규칙파가 I 축과 시계 방향으로 30° 의 각도로 입사하는 경우 4개 정점에서 계산된 수위의 시간적 변화를 Fig. 2.4.6에 도시하였는데 이 경우에도 역시 규칙적인 수위 변화가 제시되고 있다. 단, 1 방향 조파이므로 정점 P2, P4, P6에서의 수위 변화는 수직 입사인 경우에 비해 작게 나타나고 있다. 주기 10초, 파고 3 m의 다방향 불규칙파($S_{\max} = 75$)가 수직 입사

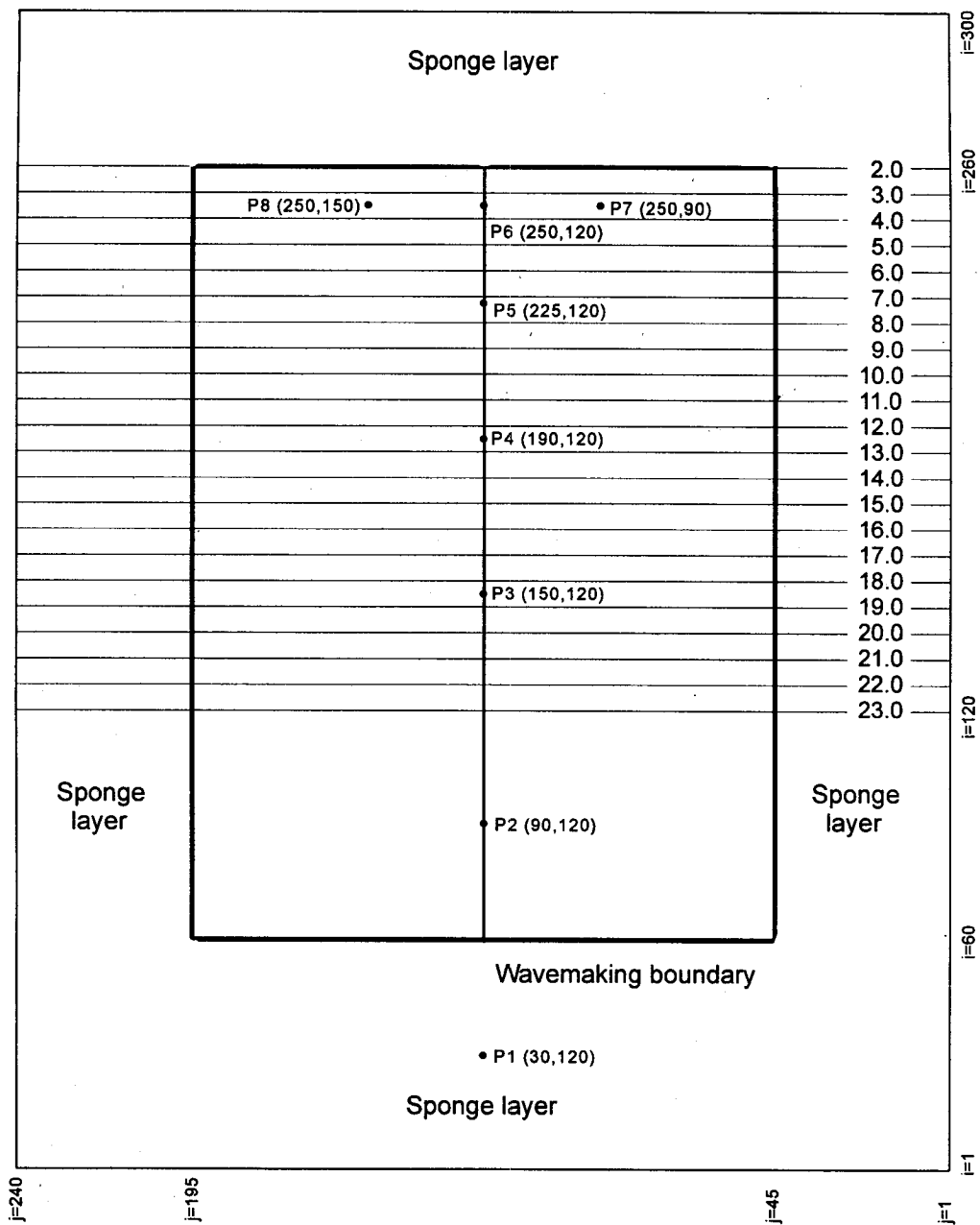


Fig. 2.4.4 Computational domain of sloping beach.

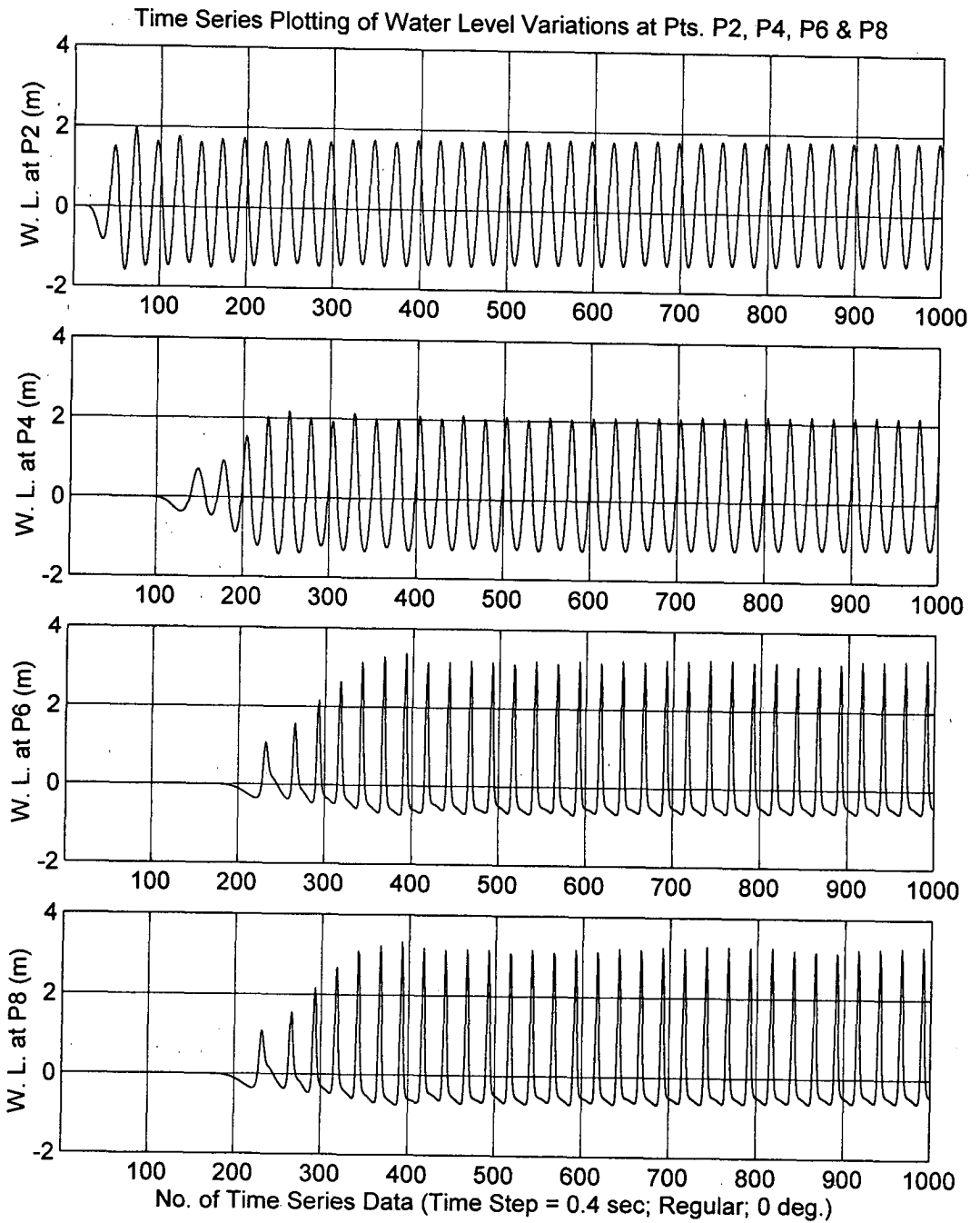


Fig. 2.4.5 Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8 (regular waves normally incident to J- axis).

Time Series Plotting of Water Level Variations at Pts. P2, P4, P6 & P8

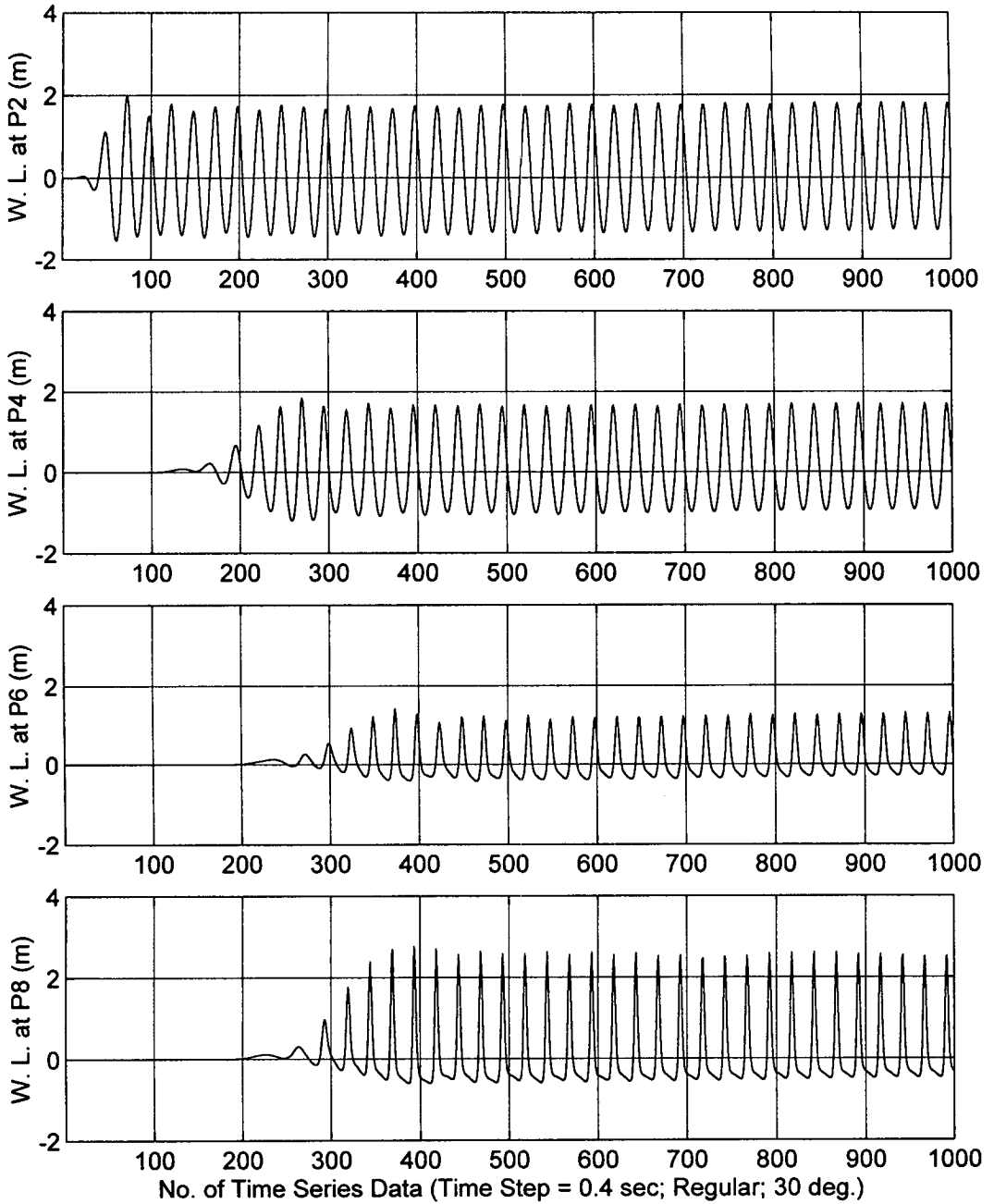


Fig. 2.4.6 Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8 (regular waves 30° obliquely incident to J-axis).

하는 경우에 대한 결과를 Fig. 2.4.7에 제시하였으며 이를 살펴보면 불규칙적인 파형이 잘 재현되고 있다. 다방향 불규칙파($S_{max} = 75$)가 30° 의 각도로 입사하는 경우에 대한 결과인 Fig. 2.4.8에서도 불규칙적인 파형이 잘 나타나고 있으며 수직 입사와의 차이는 규칙파의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있다. 조파 후 500초가 경과하였을 때의 해수위 등치선도를 상기 4가지 경우에 대해 Figs. 2.4.9~2.4.12에 각각 제시하였다($I = 61\sim 260$ 및 $J = 46\sim 195$ 의 범위에 대해 도시). 이들을 살펴보면 규칙파를 30° 의 각도로 입사시킨 Fig. 2.4.10의 경우 등치선의 형상이 굴곡이 심하고 좌측 하단에서 해수위가 비정상적으로 큰 부분이 나타나서 수치적으로 불안정한 상태임을 알 수 있다. 한편, 조파 후 400초가 경과하였을 때의 유속 벡터도를 동일한 4가지 경우에 대해 Figs. 2.4.13~2.4.16에 각각 제시하였다($I = 121\sim 260$ 및 $J = 71\sim 170$ 의 범위에 대해 도시). 이 경우들은 수치적 불안정이 나타나기 전이므로 모두 안정된 형태를 보여 준다.

나. 부분 개방된 정사각형 모형 항만

반사 경계조건의 안정성을 시험하기 위하여 Fig. 2.4.17에 제시된 계산 영역을 설정하고 350×400 개의 등방형 격자($\Delta x = \Delta y = 5$ m)를 구성하였다. 그림에서 알 수 있듯이 $I = 50$ ($J = 51\sim 350$), $J = 51$ 및 350 ($I = 50\sim 149$)에 조파선을 설정하는 3방향 조파를 설정하였다. 또한, $I = 1\sim 50$ 과 $I = 301\sim 350$, 그리고 $J = 1\sim 50$ 과 $J = 351\sim 400$ 의 에너지 흡수층을 설치하여 반사파와 투과파를 흡수하도록 하였다. $I = 149$ 및 350 과 $J = 51$ 및 350 에 반사율이 1.0인 방파제를 설치하여 절반이 개방된 정사각형 모형 항만을 구성하였으며, 수심은 전체 영역에서 10 m로 일정하게 설정하였다. 입사파 조건으로는 주기 10초, 파고 2 m의 규칙파가 I 축과 시계 방향으로 -30° 를 이루는 각도로 입사하는 경우를 설정하였으며, 수치계산은 1,200초까지 실시하였다.

조파 후 300, 600, 900 및 1,200초가 경과하였을 때의 해수위 등치선도를 Figs. 2.4.18~2.4.21에 각각 제시하였다($I = 101\sim 350$ 및 $J = 51\sim 350$ 의 범위에 대해 도시). 이들을 살펴보면 파가 항내로 침입한 후 방파제에 의해 반사되어 중복파를

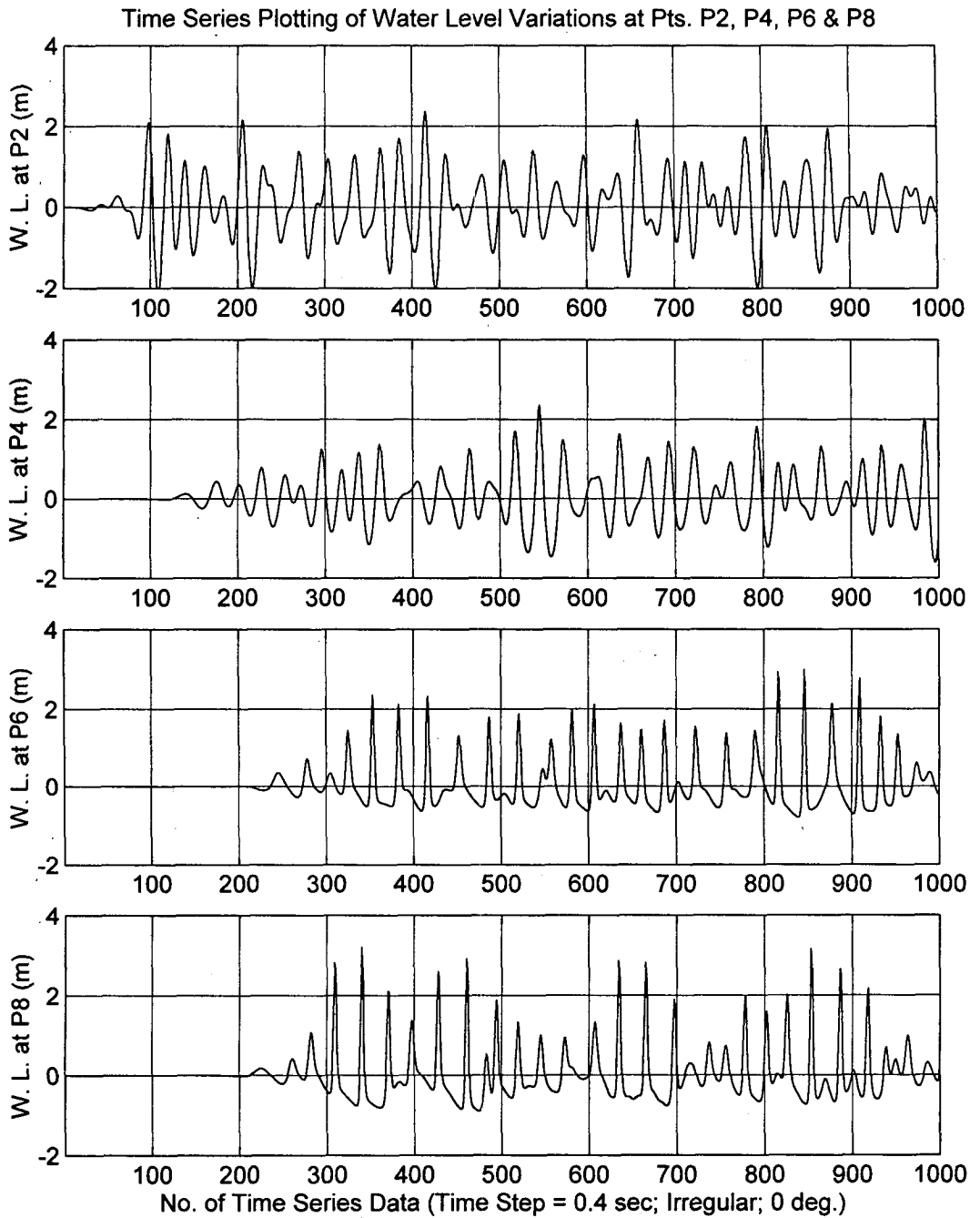


Fig. 2.4.7 Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8 (multi-directional irregular waves ($s_{max} = 75$) normally incident to J- axis).

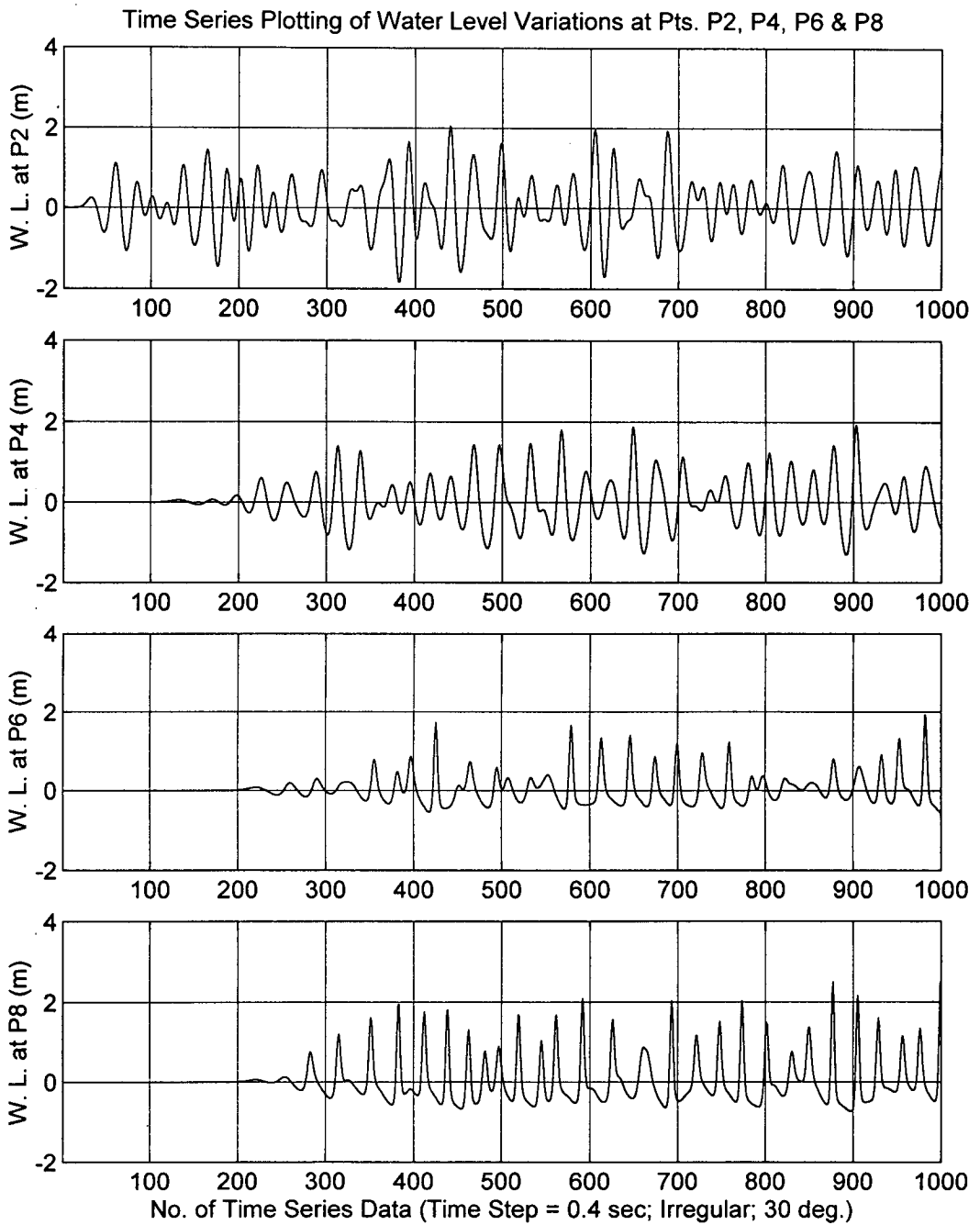


Fig. 2.4.8 Time series of water surface elevations at points P2, P4, P6 and P8 (multi-directional irregular waves ($S_{max} = 75$) 30° obliquely incident to J- axis).

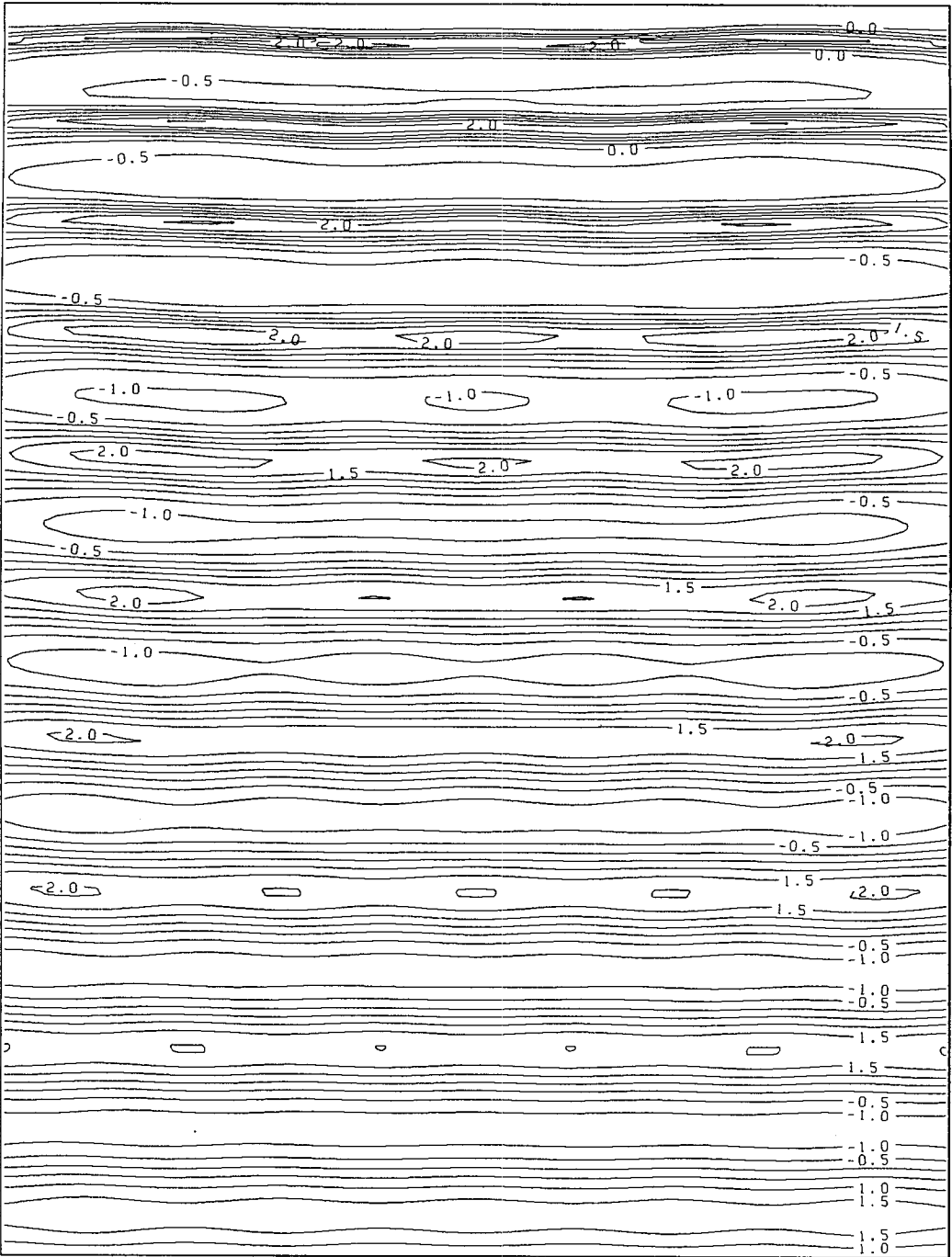


Fig. 2.4.9 Contour of water surface elevations at $t = 500$ seconds (regular waves, normal incident to J- axis).



Fig. 2.4.10 Contour of water surface elevations at $t = 500$ seconds and P8(regular waves 30° obliquely incident to J- axis).

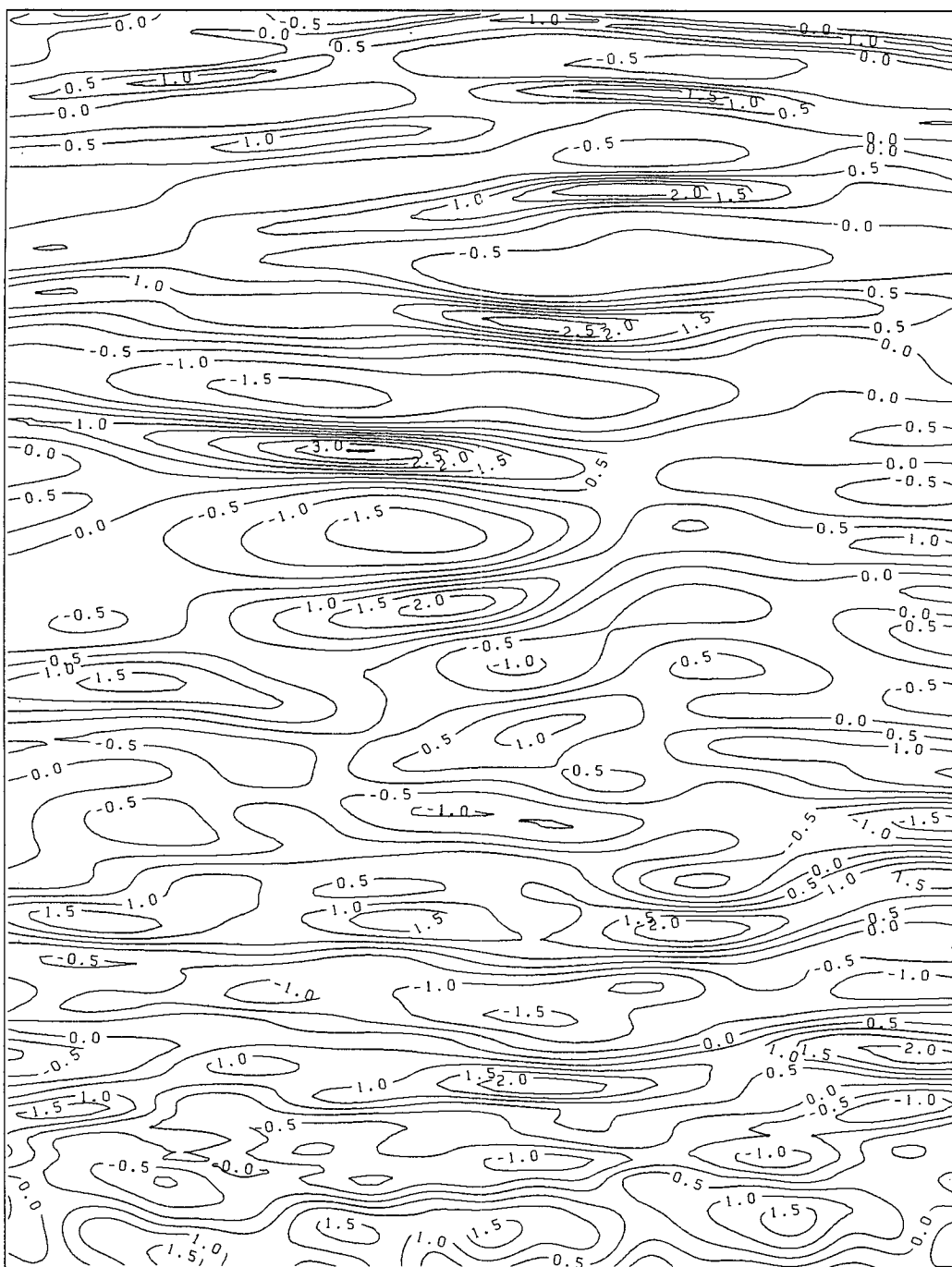


Fig. 2.4.11 Contour of water surface elevations at $t = 500$ seconds and P8 (multi-directional irregular waves ($s_{\max} = 75$) normally incident to J- axis).

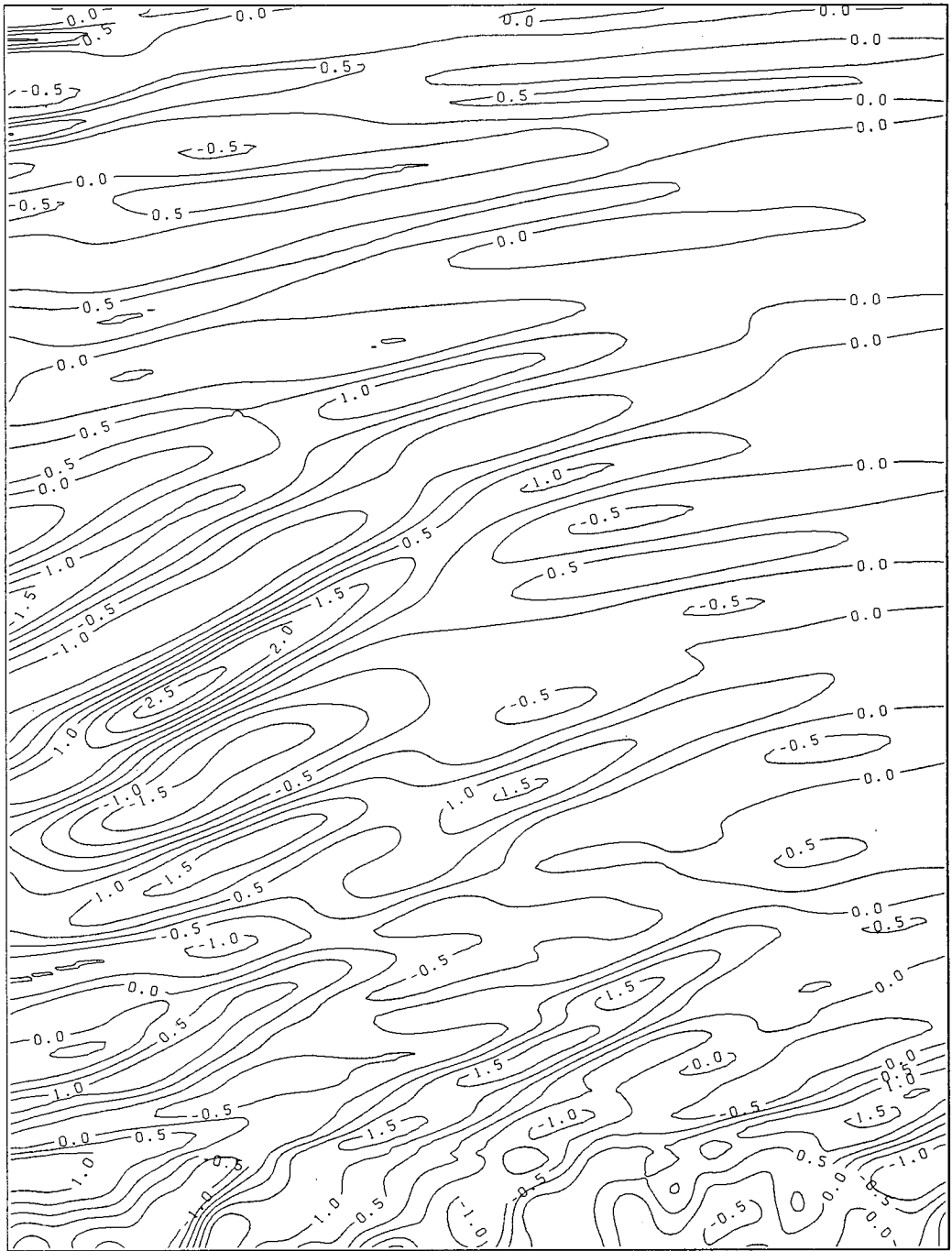


Fig. 2.4.12 Contour of water surface elevations at $t = 500$ seconds and P8 (multi-directional irregular waves ($s_{\max} = 75$) 30° obliquely incident to J- axis).

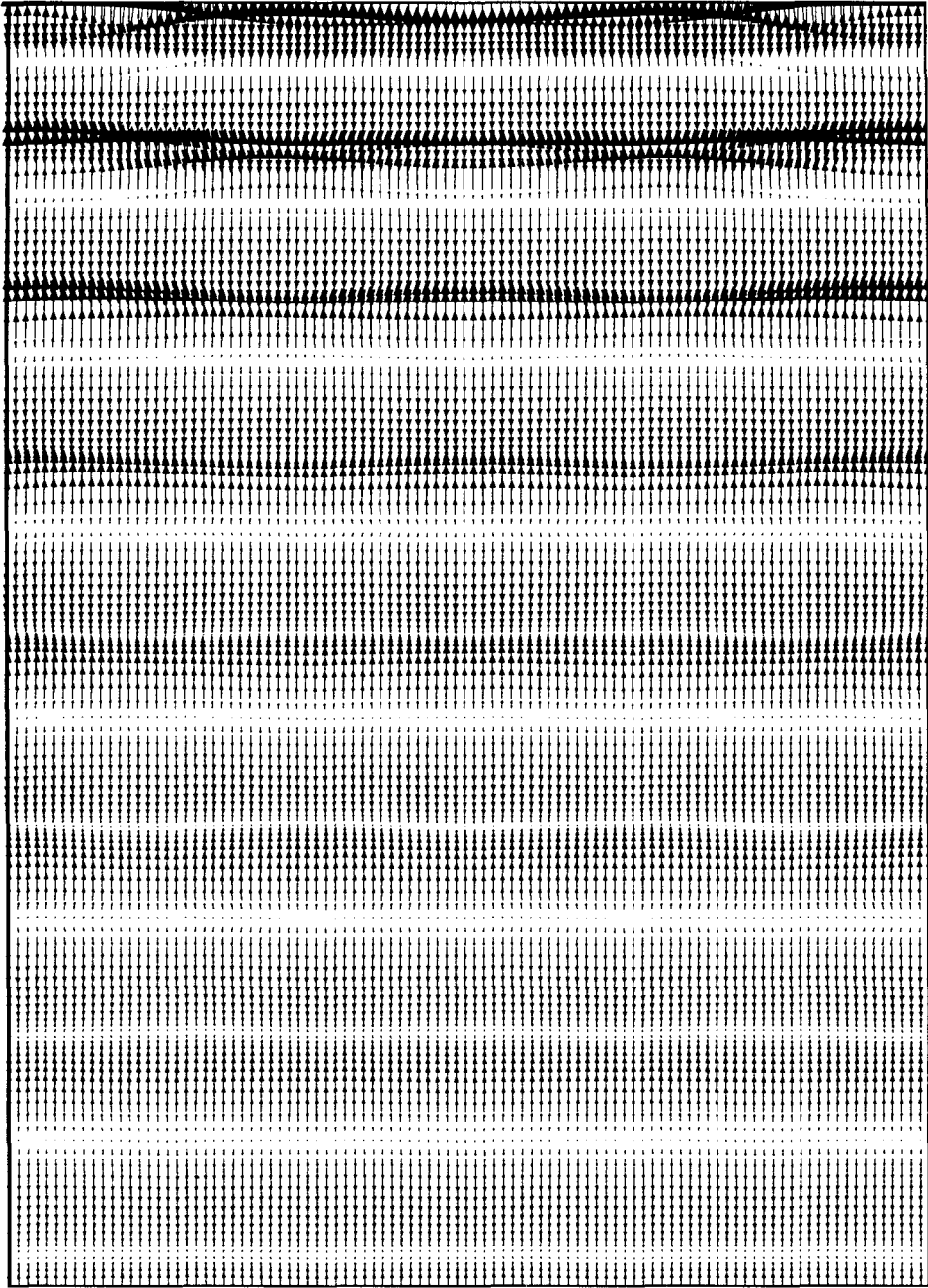


Fig. 2.4.13 Velocity vector of waves at $t = 500$ seconds
(regular waves, normal incident to J- axis).

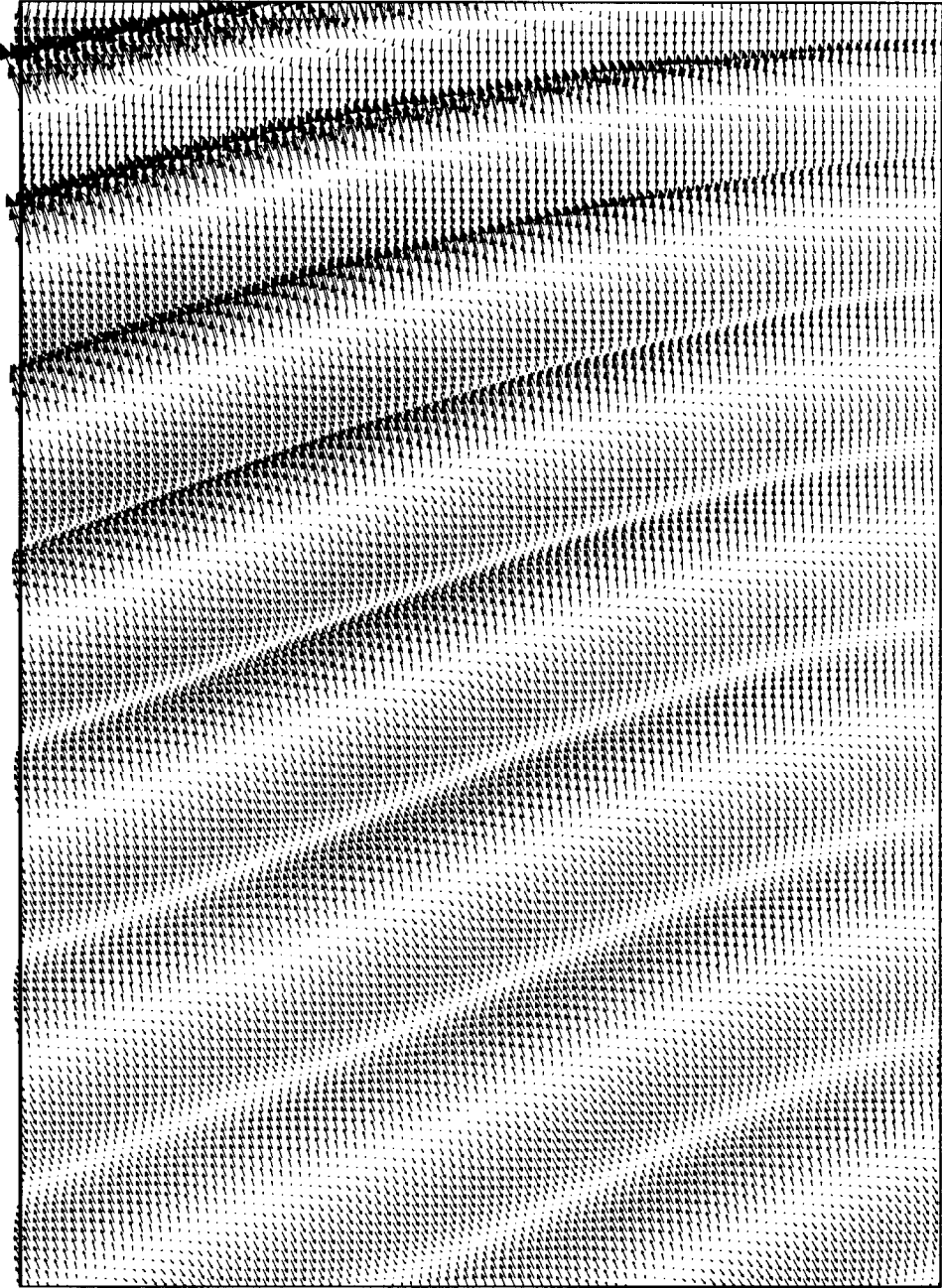


Fig. 2.4.14 Velocity vector of waves at $t = 500$ seconds and P8 (regular waves 30° obliquely incident to J- axis).

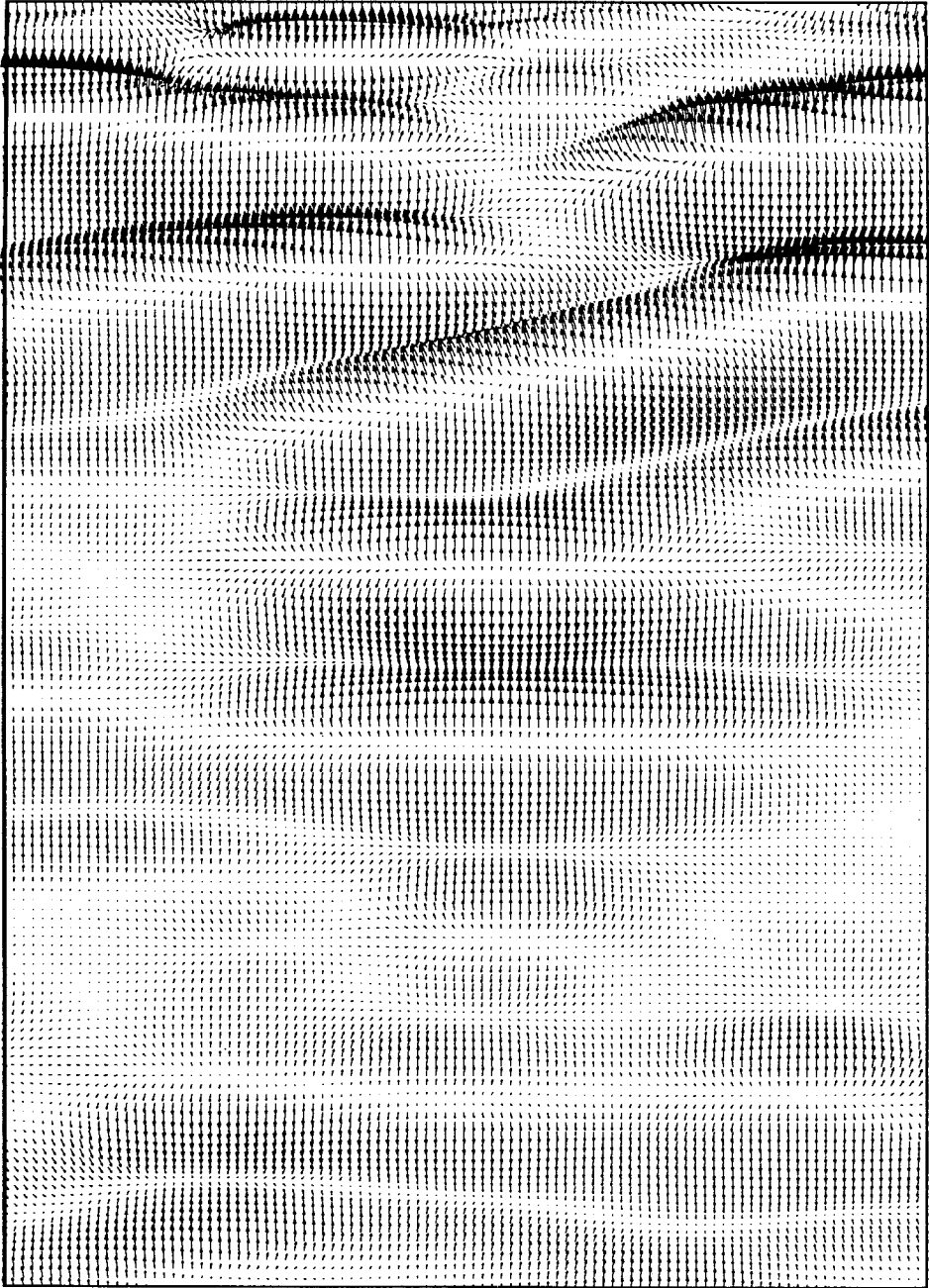


Fig. 2.4.15 Velocity vector of waves at $t = 500$ seconds and P8
(multi-directional irregular waves ($s_{\max} = 75$) normally incident to J-axis).

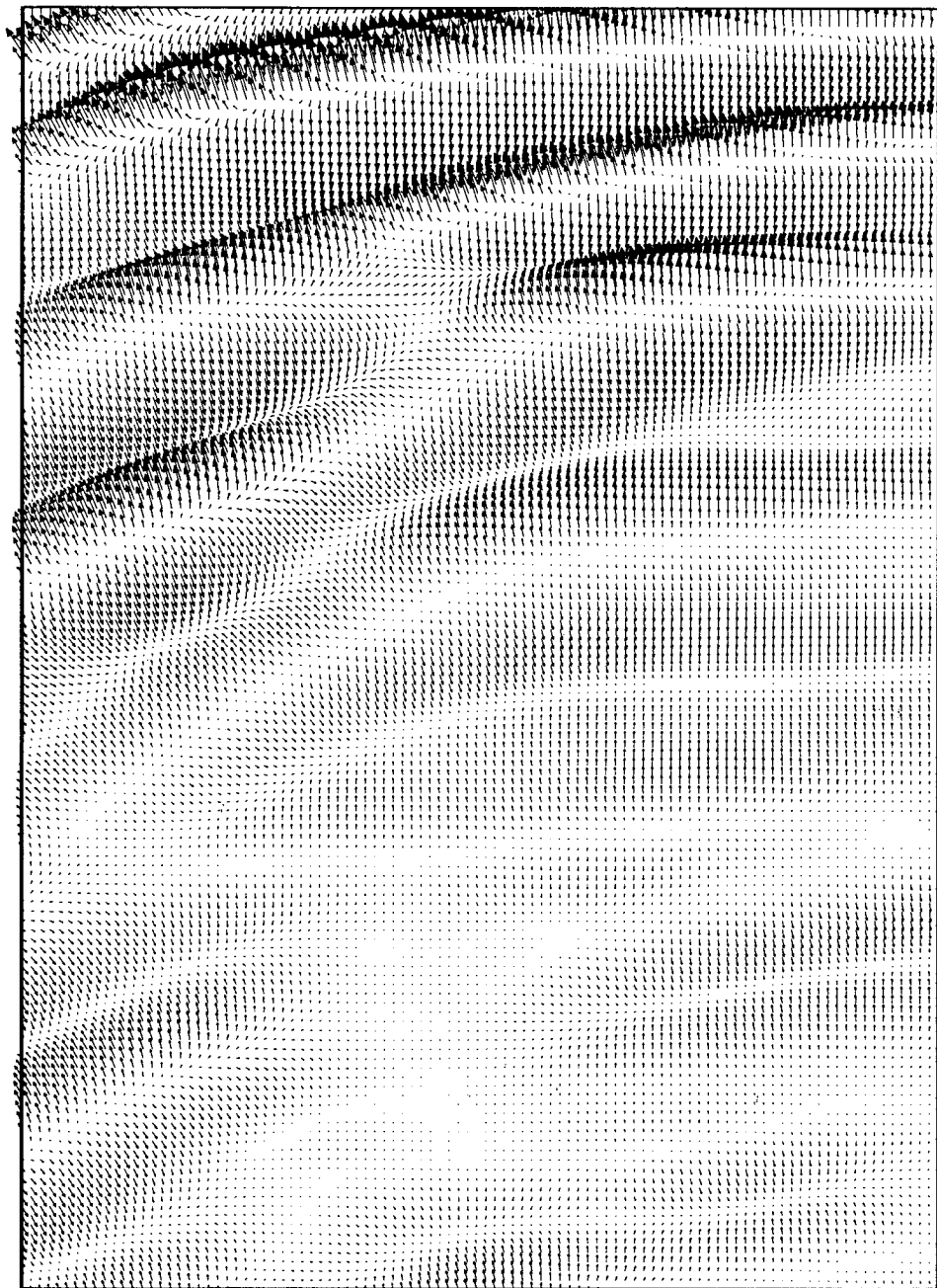


Fig. 2.4.16 Velocity vector of waves at $t = 500$ seconds and P8
(multi-directional irregular waves ($s_{\max} = 75$) 30° obliquely incident to J-axis).

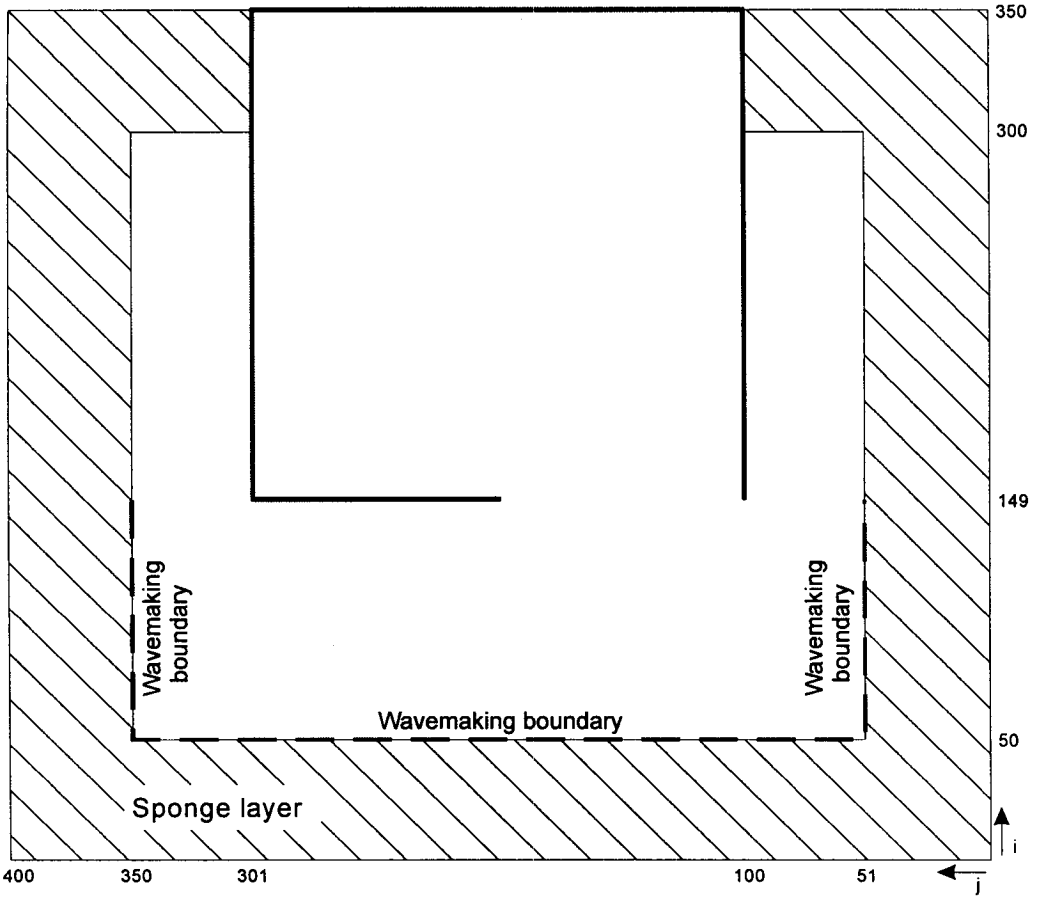


Fig. 2.4.17 Computational domain of wave propagation through a partially opened rectangular harbor.

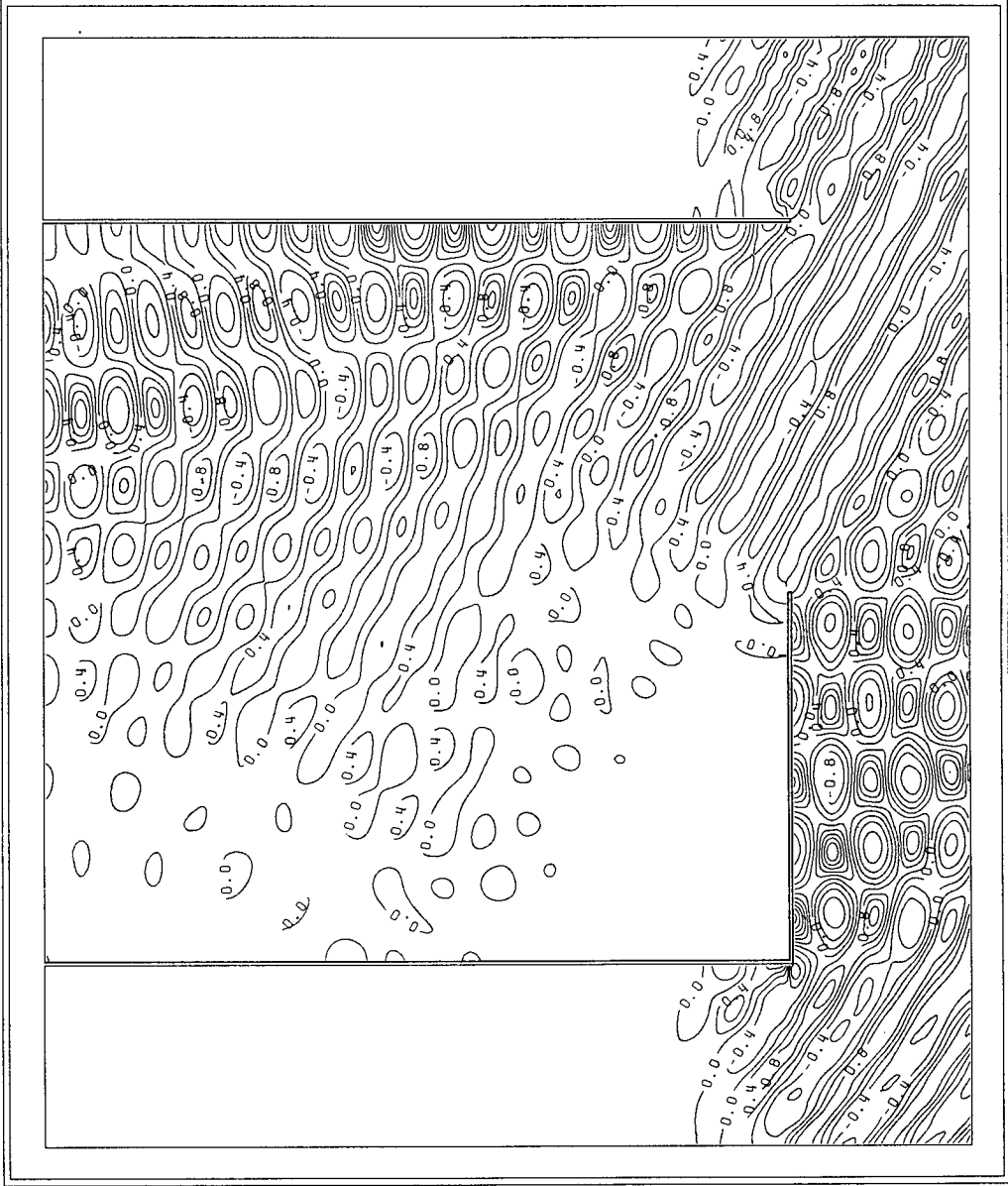


Fig. 2.4.18 Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 300$ seconds (regular waves -30° obliquely incident to J-axis).



Fig. 2.4.19 Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 600$ seconds (regular waves -30° obliquely incident to J-axis).

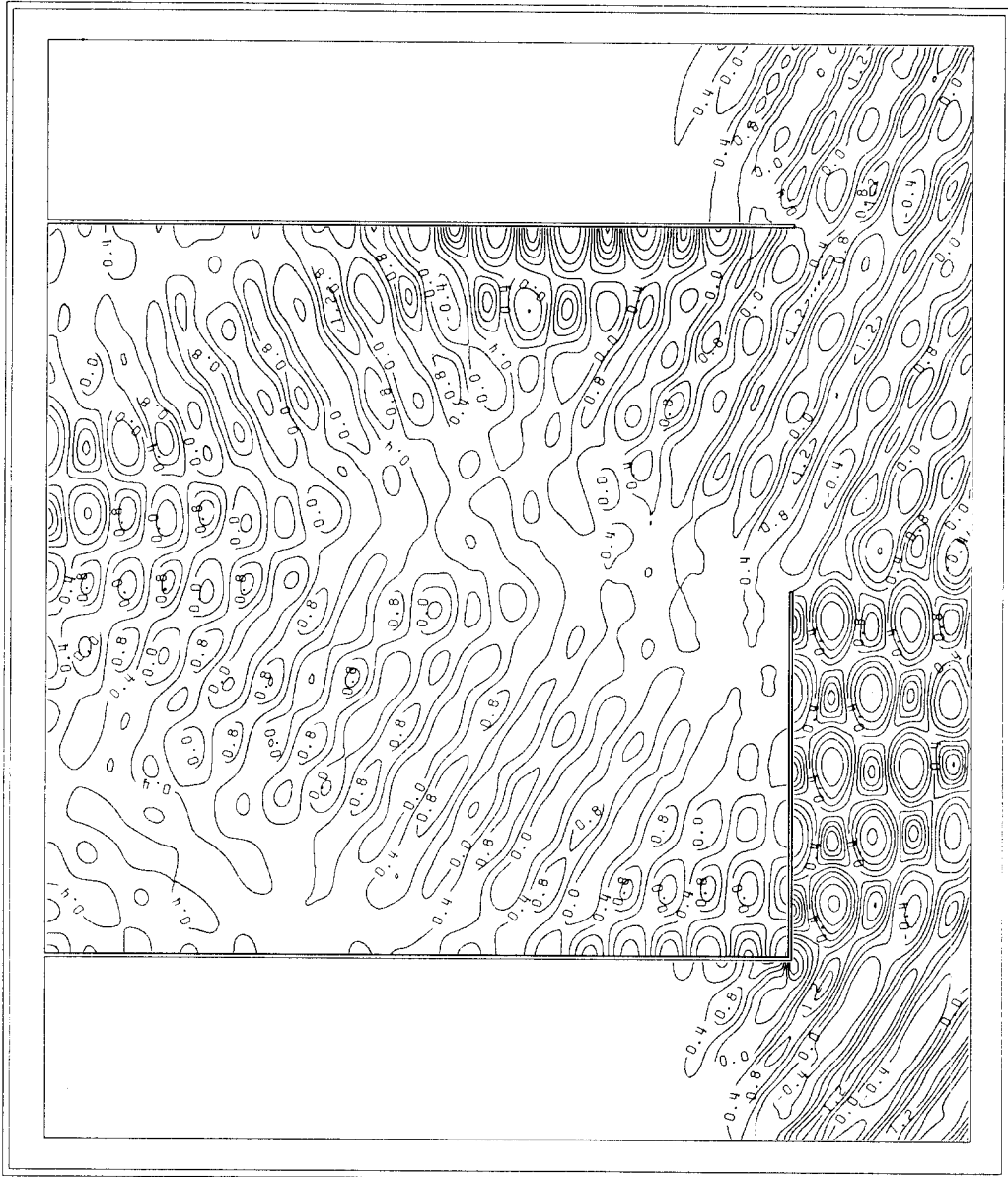


Fig. 2.4.20 Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 900$ seconds (regular waves -30° obliquely incident to J- axis).

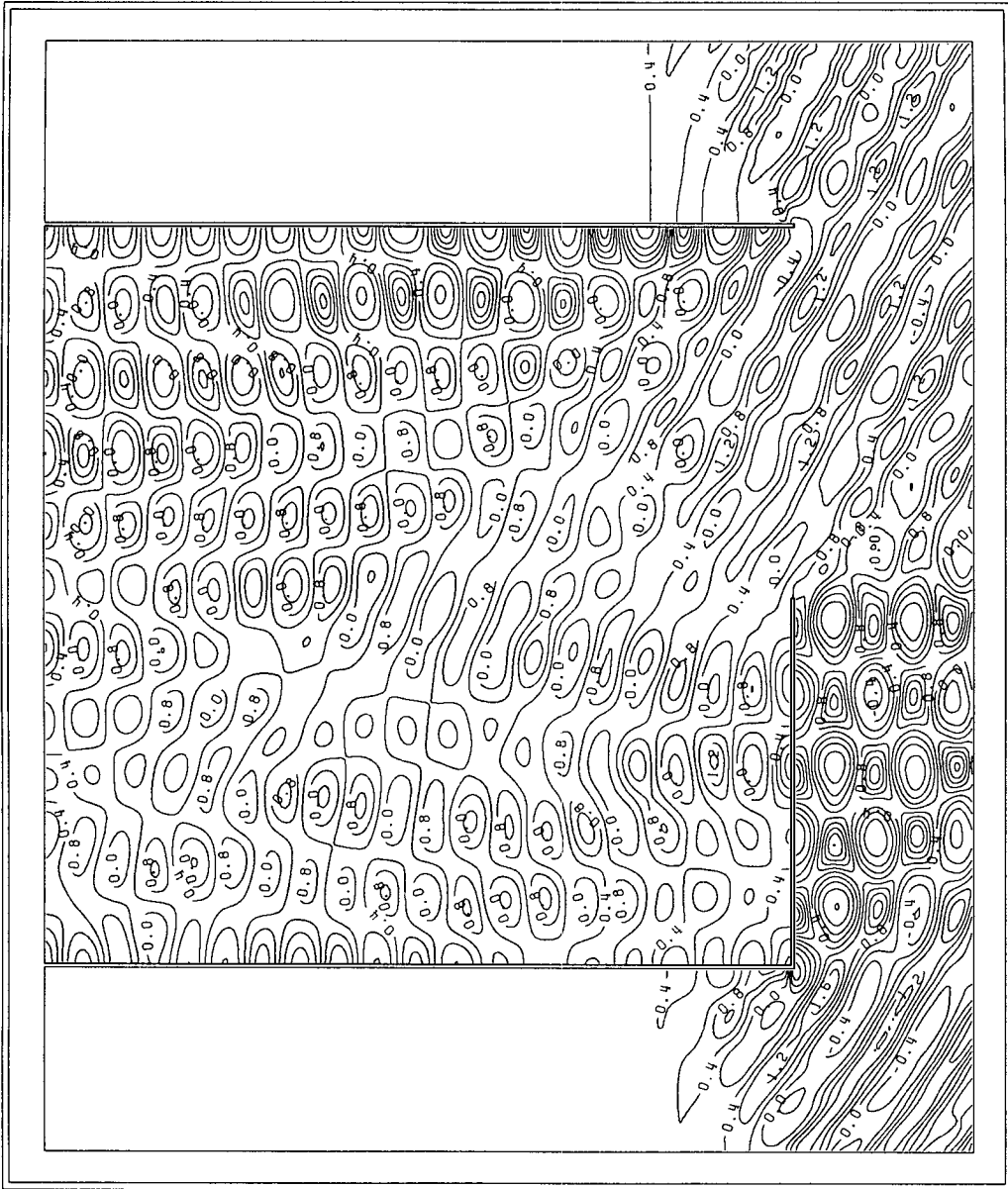


Fig. 2.4.21 Contour of water surface elevations around the harbor at $t = 1,200$ seconds (regular waves -30° obliquely incident to J- axis).

형성하는 모습을 분명하게 알 수 있다. 단, 이 그림들은 일정 시각에서의 해수위에 대한 snapshot이므로 파고 등치선도와는 다르다.

제5절 결론 및 토의

1. 결론

동해항의 정온도 분석과 파랑 변형 수치모형의 검증 자료를 수집하기 위하여 동해항의 항내·외에서 파향·파고계 1대와 수압식 파고계 4대를 사용하여 장·단주기파 현장관측을 실시하였다. 또한, 부진동 해석 수치모형을 개선하고 고정밀 파랑 해석이 가능한 Boussinesq 모형을 수립하였다. 본 장에서의 주요한 결론은 다음과 같다.

- 동해항은 입구가 ESE 방향으로 개방되어 이 방향의 파로 인한 정온도 불량 문제가 제기되고 있다. 주로 늦은 봄에서 여름에 걸쳐 이 방향의 파가 발생하는 경우가 많은 사실은 본 현장관측기간(5월 9일~6월 19일)에서도 E~ESE 방향의 파(파고 1.3 m)가 10일 정도 관측된 사실로 확인되었다.
- 단주기파 분석 결과 전반적으로 중앙 부두 전면의 P3에서보다 특수 부두의 P4에서의 파고가 약간 더 컸다. 이는 P4가 P3보다 항내에 위치하며 3 방향에 안벽이 축조되어 있는 점을 감안(P4는 2 방향)하면 특수 부두 수역에서 다중 반사로 파고가 증대된 것으로 생각되며 동 수역의 정온도 불량의 원인을 어느 정도 설명해주는 것으로 사료된다.
- 수압식 파고계에 의한 단주기파 자료를 지금까지의 스펙트럼 분석과 transfer function을 사용하는 분석 방법 외에 Nielsen(1986)의 국부근사법과 스펙트럼 분석을 사용하는 방법도 같이 사용하여 양자를 비교·검토했다.
- 장주기 부진동 자료도 수압 자료의 스펙트럼 분석 대신 Nielsen의 방법으로 해수위 변동으로 변환시킨 자료를 사용하여 분석하고 동해항의 Helmholtz 공진

모드 및 국부적인 공진 모드를 확인하였다.

- 완경사방정식을 지배방정식으로 사용하는 복합요소 수치모형 대신 확장 완경사방정식과 무한 요소를 사용하는 부진동 수치모형을 수립하고 동해항에 적용하였으며 양자의 차이는 미소한 것으로 나타났다.
- 천해역의 정밀한 파랑 변형 및 부진동 해석을 위해 일본의 항만기술연구소 파랑연구실과 협력하여 2차원 Boussinesq 모형을 수립하고 일정 경사를 가진 사면에서의 전파·변형과 부분 개방된 정사각형 모형 항만에서의 중복파 재현에 대한 수치실험을 실시하여 적용성을 확인하였다.

2. 토의

본 연구는 현재 진행중인 과제이며 차후 개선 사항 등을 포함한 토의 내용을 다음에 정리하였다.

- 관측자료에서 나타난 주기 수 분 이하의 공진 모드는 동해항의 형상과 수심 등에 의해 발생하는 국부적인 공진으로 생각되며 부진동 수치모형에 의해 거의 정확하게 재현되었다. 그러나, wave-wave interaction과 같은 비선형 효과로 발생하는 장주기 성분을 모의하기 위해서는 Boussinesq model 등을 이용하는 방법에 관한 연구가 추가되어야 한다.
- 대상 항만의 가동율을 분석하는 데는 장기간의 항외 파랑자료가 필요하다. 현재, 해양수산부가 시행 중인 전국 연안의 장기간 파랑 hindcasting 자료 구축 연구가 완료 단계이므로 앞으로는 동 자료를 사용한 항만의 연간가동율 산정 등을 통한 정확한 가동율 평가가 요망된다.
- 본 연구에서 실시한 Boussinesq 모형은 측면 경계의 처리에서 불안정성을 나타내어 이에 대한 개선이 요구되며 실제 항만에서의 관측 자료를 이용한 수치모형의 검증이 요구된다.

제3장 원호수로형 해수교환 방파제의 단면 최적화

제1절 서론

전통적으로 방파제란 단순히 파랑을 막는 구조물로만 인식되어 평상시 월파가 발생하지 않도록 축조되었고 이로 인하여 해수유통이 차단되어 항 내의 수질이 악화되는 문제가 발생되었다. 특히, 조차가 크지 않은 해역에서는 항 내의 물이 정체되어 항 내의 오염물질이 외해로 확산되지 못하여 부영양화가 빈번히 발생되고 있다. 이러한 항만 및 어항의 수질을 개선하기 위해서는 우선 오염원을 원천적으로 차단하는 것이 중요하며, 이와 더불어 방파제로 인하여 차단되었던 해수유통을 원활히 해 줄 수 있도록 하는 것이 또 다른 중요한 것이다.

이러한 실제적인 필요에 따라 Fig. 3.1.1에 보인 바와 같은 원호형 공진 수로와 도수로를 내장한 신형 해수교환 방파제가 개발되었다(과학기술처, 1994). 이 신형 방파제는 평상시의 대부분의 기간을 점하는 짧은 주기 및 낮은 파고의 파랑이 내습할 때 원호수로내의 공진 특성에 따른 수위상승효과를 이용하여 도수로 양단의 수위 차를 크게 함으로써 항 외의 신선한 해수를 지속적으로 항 내로 유입시키는 특징을 지니고 있다. 이 신형 방파제는 도수로를 포함한 원호수로의 형상이 주된 설계인자가 되며, 이의 변화에 따라 해수유입 성능이 크게 변화할 것으로 예상되므로 단면의 최적화를 위해서는 근본적인 수리현상의 이해와 수치적인 예측이 대단히 중요하다. 또한, 항 내로 유입된 신선한 해수를 내 측 깊숙한 곳에 위치한 정체 수역까지의 유입 가능성 여부가 본 방파제의 활용성 증가의 중요한 변수가 될 수 있다.

한편, 방파제는 근본적으로 설계외력에 대해 안정하여야 하므로 새로운 구조형식에 따른 작용파력의 변화특성 파악은 안정성을 증가시킬 수 있는 단면 도출에 가장 중요하다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같이 원호수로형 방파제 단면의 최

적화에 필요하다고 판단되는 4가지 항목에 대해서 연구를 실시하였다. 첫째는 방파제 후면에 도수로를 연장함으로써 외해수의 항 내 깊숙한 수역으로의 유입가능성에 대한 실험이고, 둘째는 3분력 검출기를 이용한 케이슨에 작용하는 전파력의 측정이고, 셋째는 수치적으로 원호수로내의 수위증폭과 반사특성변화를 모의할 수 있는 수치기법의 개발이며, 넷째는 방파제의 원호효과 및 부등침하의 원인이 될 수 있는 방파제 주변의 동적 간극수압 및 응력분포 변화 예측에 관한 것이다. 각 항목별 연구결과를 제2절에서 제5절까지 차례로 기술하였다.

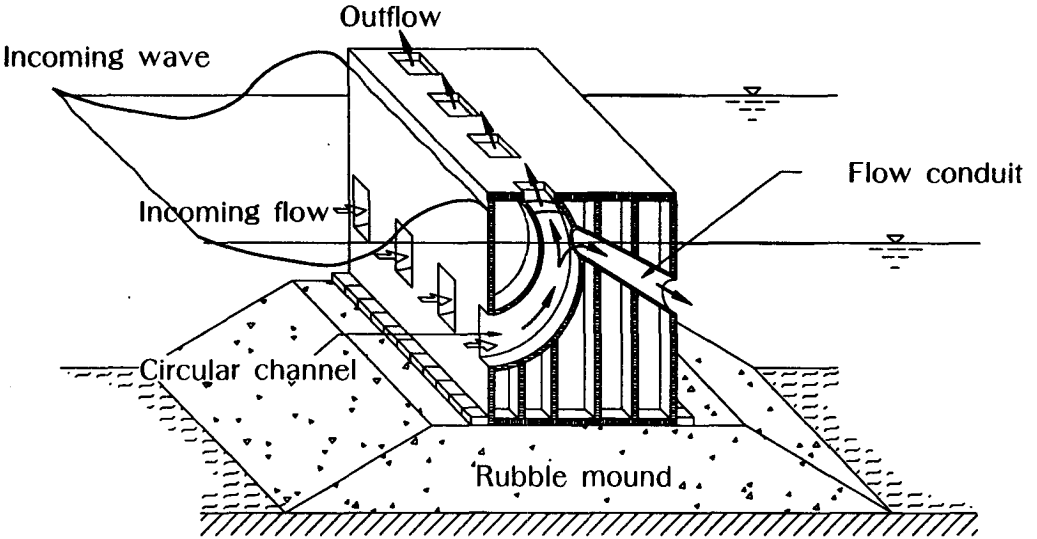


Fig. 3.1.1 Conceptual diagram of the Circular Channel Breakwater (CCB).

제2절 해수교환성능개선

1. 개요

원호수로형 방파제의 해수교환 성능은 앞서 수행한 수리실험과 이론적인 연구를 통하여 어느 정도 확인되었다(과학기술처, 1994). 그러나, 케이슨 내부의 도수로를 통하여 유입된 외해수가 방파제 주변에만 국한되어 흐름을 형성하게 된다면 항의 깊숙한 부분에 형성된 정체 수역의 수질 개선은 기대하기 어렵다. 따라서, 이의 해결책 여부는 본 방파제의 효용성 증대에 중요한 사항이라 하겠다.

본 연구에서는 이를 위하여 도수 파이프를 이용하여 신선한 외해수를 원하는 지점에 유입시키는 방법에 대해서 검토를 하였다. 도수 파이프의 길이변화에 따른 유입유량의 변화에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 여러 개의 도수로를 통하여 유입되는 해수를 하나의 도수로 내로 모아서 원하는 구역에 유입시키는 방안에도 대해서도 검토하였다.

2. 대상방파제 및 도수 파이프

가. 대상방파제

원호수로형 방파제는 가능한 한 항내측에 가까운 곳에 설치하는 것이 유리하다. 이러한 지역은 수심이 낮은 것이 일반적이다. 따라서, 본 연구에서는 실효역의 8m 수심을 대상으로 하고 길이 축척비를 1/20으로 선택하여, Fig. 3.2.1에 보인 모형방파제의 제원을 결정하였다. 축척이 1/20이므로 수심은 40cm, 마운드 위에서의 수심은 쇄파가 발생하지 않는 조건을 고려하여 24cm로 결정하였으며(Goda, 1985), 천단고는 8cm로 설정하였다. 방파제 케이슨은 두께 1cm의 투명 아크릴로 제작하였으며, 케이슨 저면에는 마운드 사석간의 마찰이 유지될 수 있도록 2cm 두께의 콘크리트 판을 부착하였다.

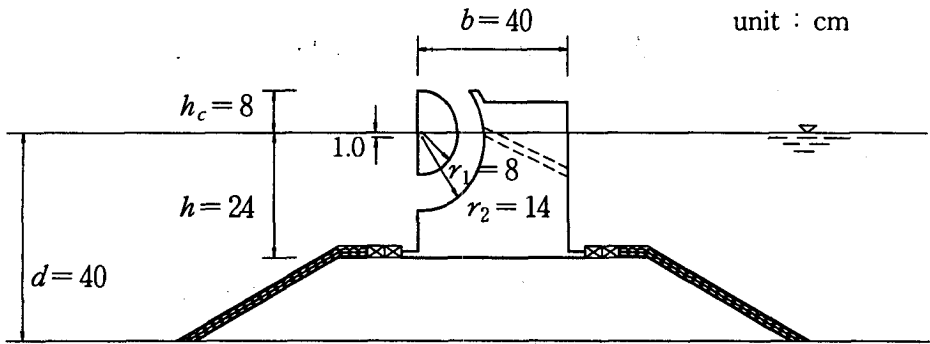


Fig. 3.2.1 Overall configuration of the model structure of a circular channel breakwater.

나. 집수함 및 도수 파이프

Fig. 3.2.2에 보인 것은 항내측 도수로 끝에 연결할 집수함이다. 이 집수함 하측에는 내경 4.4 및 5.4cm의 도수 파이프가 연결된다. 도수 파이프 끝단에는 내경 3.2cm의 원형 아크릴관을 연결하여 관측의 일관성을 유지하였다. 수리실험에서는 도수 파이프의 길이를 3m, 6m 및 9m 등 세 가지를 대상으로 하였다..

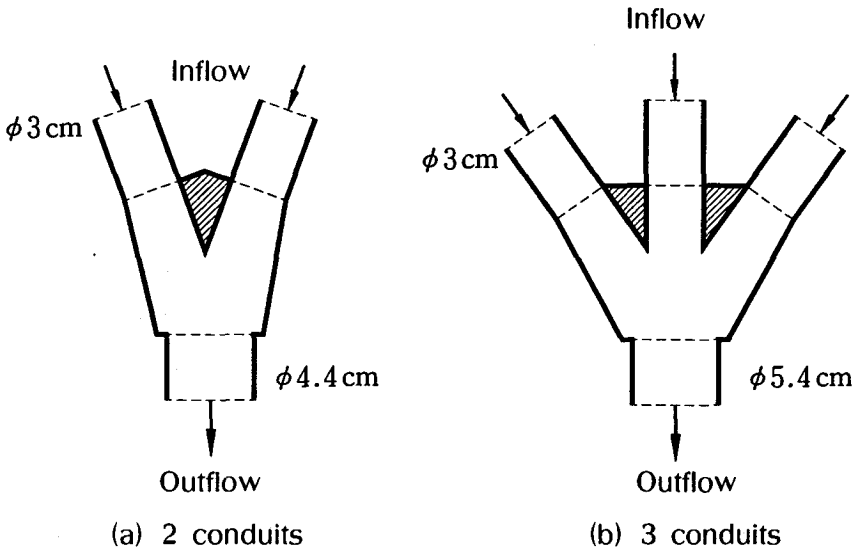


Fig. 3.2.2 Flow gathering systems.

3. 실험파랑 및 계측센서 설치

가. 실험파랑

실험파랑은 원호수로형 방파제의 공진특성을 잘 나타낼 수 있고 또 실제 해상 상태의 상대적으로 긴 주기의 경우도 포함할 수 있도록 설정하였다. 파고조건으로는 낮은 파고로부터 비교적 높은 파고까지 고려할 수 있도록 3cm급(H03), 5cm급(H05), 7cm급(H07), 9cm급(H09), 12cm급(H12) 등 5개 조건을 고려하였다. 실험에 사용된 파랑을 Table 3.2.1에 정리하여 나타내었다.

Table 3.2.1 Wave conditions employed in the present model testings.

T (sec)	ω^*	Wave heights (cm)					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	3.20	5.30	7.60	9.60	12.5	
1.406	0.60	3.35	5.40	7.40	9.60	12.8	
1.205	0.70	3.30	5.30	7.50	9.60	13.0	
1.054	0.80	3.30	5.40	7.50	9.70	12.3	
0.992	0.85	3.15	5.20	7.60	9.60	-	
0.937	0.90	3.25	5.50	7.70	10.50	-	
0.888	0.95	3.40	5.35	7.50	9.40	-	
0.844	1.00	3.30	5.30	7.40	-	-	
0.803	1.05	3.30	5.30	-	-	-	
0.767	1.10	3.20	-	-	-	-	
0.734	1.15	2.10	-	-	-	-	
0.703	1.20	2.00	-	-	-	-	

Note: $\omega^* = \omega/\omega_n$,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g \cos \theta_s}{R_c(\theta_s + \frac{\pi}{2})}}, \quad R_c = 11.0 \text{ cm}, \quad \theta_s = \frac{1}{2} \sin^{-1}\left(\frac{1}{14}\right)$$

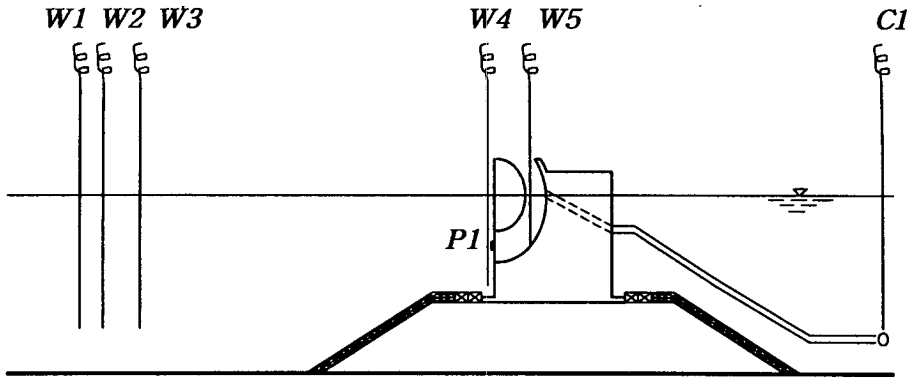


Fig. 3.2.3 Wave gauges, a pressure transducer, and current meter for measuring hydraulic characteristics of the CCB.

나. 계측센서

파랑 반사특성, 원호수로내 수위 증폭효과, 해수유입효과 등을 계측하기 위하여 Fig. 3.2.3과 같이 5개의 파고계와 파압계 및 유속계 각 1개씩을 사용하였다. 전면의 파고계 $W1 \sim W3$ 는 입반사파 분리를 통한 반사율 계산을 위한 것이며, $W4$ 는 케이슨 전면의 수위변동, $W5$ 는 원호수로내 수위변동을 계측하기 위한 것이다. 파압계는 원호수로 입구에서의 동압력의 변화를 살펴보기 위한 것으로 입구에 연직방향으로 폭이 얇은 알루미늄판을 설치하고 그 위에 스트레인 게이지형 파압계 ($P1$)를 부착하였다. 유속계 (CI)는 프로펠라형 센서로 내경 3.2cm 도수 파이프의 끝단 내부에 삽입하여 설치하였다.

4. 실험결과 및 분석

가. 자료독취 및 분석방법

실험파랑에 의한 수위($W1 \sim W5$), 유속변동(CI) 및 동압력($P1$)은 초당 20개의

자료를 저장하게 되는 독취율 20Hz로 관측하였으며, 조파와 동시에 계측을 시작하여 조파판으로부터 재반사된 파랑이 방파제에 도달하기 전까지 계측을 실시하였다 (참고로 Fig. A.4.1~Fig. A.4.20에 실험파랑별로 계측된 시계열을 제시하였음).

독취자료의 분석은 계측된 시그널을 도시하여 가장 정상상태에 가깝다고 판단되는 일정구간을 선택하여 실시하였다. 대부분의 실험조건에 대해서는 비교적 안정된 시계열을 얻을 수 있었으나, 주기가 짧고 파고가 상대적으로 높은 경우에는 특히, 공진조건 부근에 해당하는 파랑인 경우에는 계측된 시그널이 상당히 불규칙적으로 나타나 분석에 어려움이 있었다. 이러한 경우에는 보다 길게 실험자료를 선택하여 분석하였다. 입·반사파의 분리는 박 등(1992)이 개발한 3점 분리기법을 이용하여 수행하였다.

나. 반사율

입반사파 분리를 통하여 결정된 반사율을 Table 3.2.2에 정리하여 나타내었으

Table 3.2.2 Wave reflection coefficients for various wave conditions.

T (sec)	ω^*	Reflection coefficients					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.904	0.895	0.886	0.891	0.795	
1.406	0.60	0.837	0.814	0.772	0.734	0.618	
1.205	0.70	0.815	0.785	0.713	0.645	0.551	
1.054	0.80	0.770	0.678	0.515	0.526	0.166	
0.992	0.85	0.758	0.661	0.550	0.272	-	
0.937	0.90	0.561	0.374	0.324	0.710	-	
0.888	0.95	0.410	0.253	0.170	0.154	-	
0.844	1.00	0.122	0.161	0.234	-	-	
0.803	1.05	0.145	0.234	-	-	-	
0.767	1.10	0.510	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.708	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.850	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

며, 이를 Fig. 3.2.4에 무차원 주파수 ω^* 의 변화에 따라 도시하였다. 여기서, ω^* 는 입사파의 각주파수 ω 를 원호수로의 공진 각 주파수 ω_n 으로 나눈 무차원 주파수로($\omega^* = \omega/\omega_n$), $\omega^*=1.0$ 부근에 공진이 발생하는 조건이 된다. 파고 3cm급(H03)과 5cm급(H05)은 월파가 발생하지 않아 반사율에 공진효과가 효과가 잘 나타나고 있음을 볼 수 있다. 공진이 발생하는 조건에서 반사율이 감소하는 것은 원호수로의 입구에서의 유속이 크게 증폭되어 흐름분리 현상에 의한 에너지 손실이 증가하기 때문이다. 이와 같은 현상은 유공식 방파제의 경우에도 나타나는데 동일한 에너지 손실 미커니즘으로 설명되어진다.

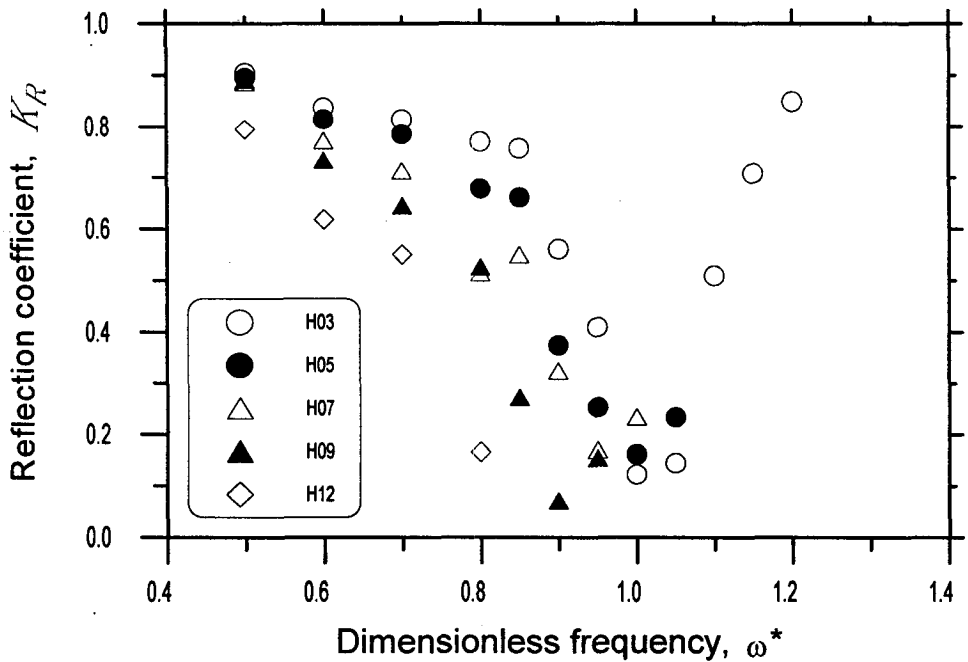


Fig. 3.2.4 Wave reflection coefficients for various wave conditions.

다. 전면 수위변동

케이슨 전면에서의 처올림 높이에 대한 분석결과를 입사파고 H 로 무차원하여 Table 3.2.3에 정리하여 나타내었다. Fig. 3.2.5는 이를 무차원 주파수 ω^* 의 변화에 따라 도시한 것으로, 반사율의 경우와 같이 공진조건 부근에서 처올림 높이가 낮아지는 현상을 볼 수 있다. 공진이 발생하지 않는 긴 주기조건의 경우는 무공직립형 케이슨제의 경우와 같이 1.0부근으로 접근됨 알 수 있다. 공진조건 부근에서 처올림 높이가 낮아지는 현상은 중복파의 절점(수위변동이 가장 작은 부분)에서의 수평방향 유속이 최대가 되는 것과 상관된다. 이러한 현상은 유공방파제의 경우에서도 찾아 볼 수 있다. 즉, 유공벽에 중복파의 절점이 놓이게 되는 조건부근에서 최대의 에너지 소모가 일어난다. 이와 같은 면에서 본 원호수로 방파제를 보면 일종의 유공방파제라고도 할 수 있다.

Table 3.2.3 Wave runup at the front of the CCB.

T (sec)	ω^*	Wave runup, η_F/H					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.995	1.011	0.947	0.924	0.950	
1.406	0.60	0.955	0.949	0.949	0.928	0.920	
1.205	0.70	0.884	0.926	0.936	0.908	0.928	
1.054	0.80	0.826	0.784	0.780	0.870	0.965	
0.992	0.85	0.776	0.701	0.719	0.790	-	
0.937	0.90	0.607	0.551	0.618	0.604	-	
0.888	0.95	0.383	0.434	0.490	0.555	-	
0.844	1.00	0.356	0.392	0.534	-	-	
0.803	1.05	0.602	0.598	-	-	-	
0.767	1.10	0.706	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.921	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.977	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

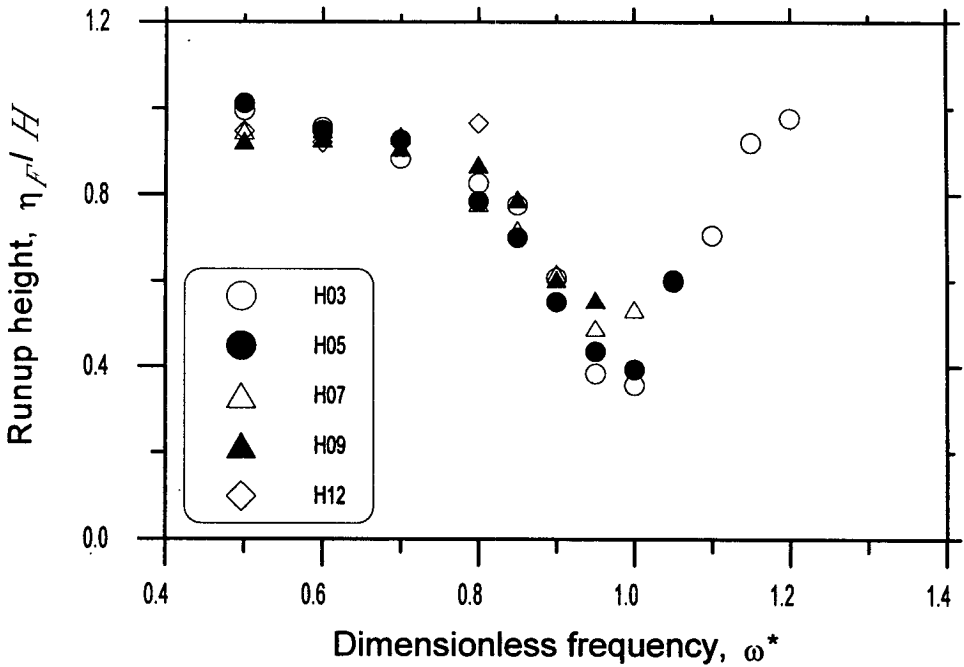


Fig. 3.2.5 Wave runup at the front of the CCB.

라. 원호수로 입구에서의 동압력 변동

원호수로 입구에서 측정된 동압력에 대한 분석결과를 변동성분과 평균성분으로 구분하여 Table 3.2.4에 정리하여 나타내었다. 통상 평균성분은 유속의 제곱에 비례하는 성분으로 볼 수 있다. 따라서 유속이 강할 것으로 예상되는 공진조건 부근에서 커야할 것 같은데 본 실험결과를 보면 평균값이 들쭉 날쭉 어떤 경향을 찾아보기 힘들다. 이는 먼저 센서를 설치하기 위해서 폭이 약 1.5cm 정도의 알루미늄 판을 입구에 설치한 후 그 위에 직경이 1.5cm 부착식 파압계를 설치하여 실제의 현상을 왜곡시킨 점과, 센서를 전면만을 바라보도록 설치하였으므로 원호수로를 타고 나오는 흐름에 의한 압력은 제대로 감지하지 못했을 것이라는 점에서 설명이 가능하다. 어쨌든 변동성분에 대한 결과를 도시한 Fig.3.2.6을 살펴보면, 반사율, 전면 처울림의 경우와 같이 공진조건 부근에서 감소하는 현상을 볼 수 있다.

Table 3.2.4 Hydrodynamic pressure at the entrance of circular channel.

T (sec)	ω^*	Hydrodynamic pressure, p_e/w_0H									
		H03		H05		H07		H09		H12	
		amp.	mean	amp.	mean	amp.	mean	amp.	mean	amp.	mean
1.687	0.50	0.783	0.081	0.774	0.044	0.739	0.031	0.723	0.004	0.728	-0.016
1.406	0.60	0.708	0.067	0.693	0.036	0.689	0.014	0.663	-0.006	0.639	-0.028
1.205	0.70	0.642	0.116	0.663	0.042	0.630	0.014	0.596	-0.012	0.564	-0.030
1.054	0.80	0.584	0.089	0.555	0.046	0.518	0.006	0.507	-0.019	0.490	-0.020
0.992	0.85	0.559	0.085	0.525	0.037	0.477	-0.008	0.434	0.000	-	-
0.937	0.90	0.447	0.077	0.421	0.023	0.407	0.002	0.463	-0.032	-	-
0.888	0.95	0.349	0.065	0.338	0.024	0.438	-0.024	0.225	0.012	-	-
0.844	1.00	0.269	0.073	0.264	0.077	0.257	0.002	-	-	-	-
0.803	1.05	0.213	0.079	0.262	0.018	-	-	-	-	-	-
0.767	1.10	0.172	0.050	-	-	-	-	-	-	-	-
0.734	1.15	0.195	0.175	-	-	-	-	-	-	-	-
0.703	1.20	0.202	0.182	-	-	-	-	-	-	-	-

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

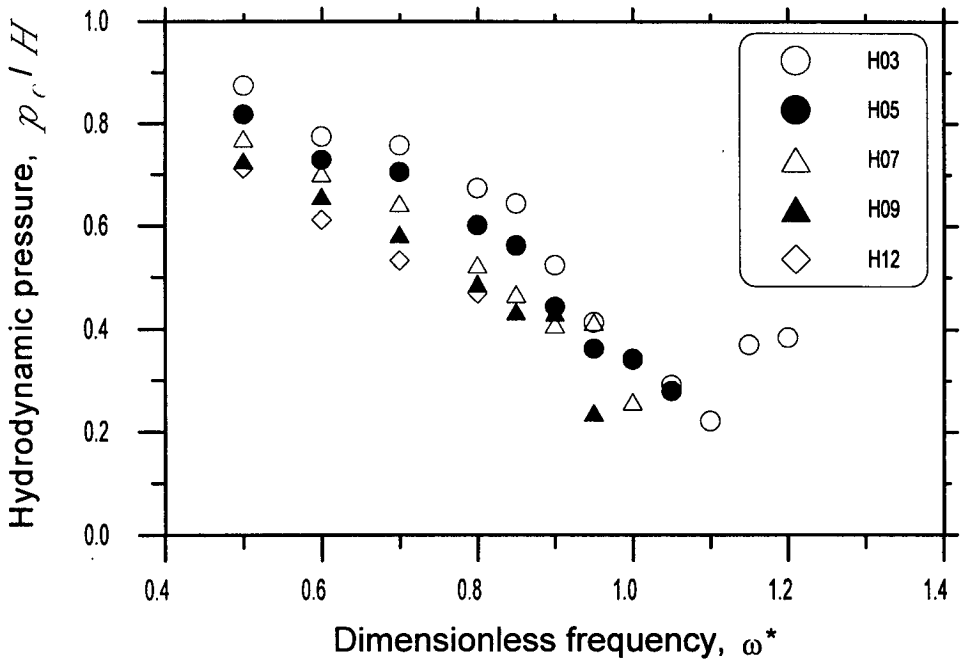


Fig. 3.2.6 Hydrodynamic pressure at the entrance of circular channel.

마. 원호수로 내 수위변동

원호수로 내에서의 수위변동에 대한 분석결과는 전면 수위변동의 경우와 같이 진폭과 평균값으로 구분하여 Table 3.2.5에 정리하여 나타내었다. Fig. 3.2.7은 이를 무차원 주파수 ω^* 의 변화에 따라 도시한 것으로, 반사율, 전면 수위변동 및 입구 동압력의 경우와는 달리 공진조건 부근에서 최대 처울림이 발생하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 파고가 작은 조건일수록 증폭되어 나타나며, 파고 3cm(H03)급 파랑인 경우는 최대 1.75배정도가 커짐을 알 수 있다(선형 이론상 무공 직립제에 완전 증폭파가 형성될 경우 최대가 1.0배임). 파고가 클수록 증폭율이 떨어지는 이유로는 파의 비선형성의 영향으로도 생각할 수 있으나 더 큰 이유는 케이슨의 천단고가 8cm로 제한되어 있어 원호수로 내의 처울림이 이를 넘기가 어렵기 때문으로 판단된다. 실제 현상에서는 천단고를 넘어 물기둥이 형성되기도 하지만 수로 내에 설치된 파고계에는 감지되지 않는 경우도 있어 다소 과소 평가

Table 3.2.5 Wave runup in the circular channel.

T (sec)	ω^*	Wave runup, η_c/H					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.819	0.936	0.967	0.953	0.932	
1.406	0.60	0.900	0.979	1.049	1.005	0.904	
1.205	0.70	0.985	1.112	1.124	1.055	0.855	
1.054	0.80	1.195	1.309	1.212	1.045	0.879	
0.992	0.85	1.445	1.459	1.214	1.070	-	
0.937	0.90	1.552	1.447	1.193	0.911	-	
0.888	0.95	1.687	1.391	1.135	0.999	-	
0.844	1.00	1.736	1.334	1.048	-	-	
0.803	1.05	1.678	1.277	-	-	-	
0.767	1.10	1.365	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.942	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.671	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

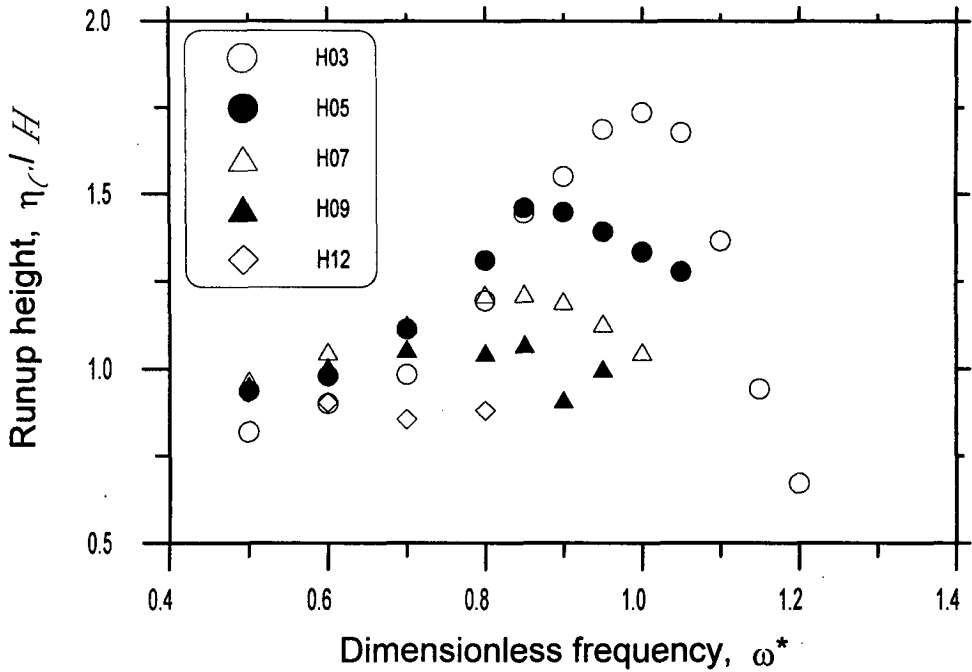


Fig. 3.2.7 Wave runup in the circular channel.

된 면도 있다. 이러한 문제를 해결할 수 있도록 원호수로의 수면 위 부분을 수정한다면 더 좋은 해수유입 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다. 예를 들면 도수호가 설치된 원호수를 천단고 위로 높게 연장하는 방안을 생각할 수 있다.

바. 해수유입효과

항 내의 깊숙한 정체수역으로의 해수유입 가능성을 알아보기 위하여 수행한 도수 파이프 길이 변화에 대한 실험결과를 $q^*(=\sqrt{2gHA})$ 로 무차원화하여 Table 3.2.6 ~ Table 3.2.14에 나타내었다. 여기서 H 는 입사파고, A 는 도수파이프의 단면적을 나타낸다. Table 3.2.6의 결과는 집수함없이 도수로 끝에서 관측한 결과이고 Table 3.2.7 ~ Table 3.2.10까지는 집수함에 케이슨의 도수호가 2개가 연결된 경우로 도수로 연장길이가 각각 0m, 3m, 6m, 9m에 대한 것이다. Table 3.2.11 ~ Table 3.2.14는 집수함에 케이슨의 도수호가 3개 연결된 경우에 대한 결과이다.

Table 3.2.6 Net flow rates from a conduit w/o the flow gathering box.

<i>T</i> (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.103	0.127	0.167	0.174	0.190	
1.406	0.60	0.086	0.111	0.155	0.168	0.167	
1.205	0.70	0.114	0.138	0.160	0.160	0.159	
1.054	0.80	0.137	0.157	0.149	0.146	0.131	
0.992	0.85	0.157	0.163	0.126	0.132	-	
0.937	0.90	0.170	0.139	0.115	0.893	-	
0.888	0.95	0.184	0.139	0.113	0.971	-	
0.844	1.00	0.193	0.137	0.107	-	-	
0.803	1.05	0.175	0.120	-	-	-	
0.767	1.10	0.180	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.132	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.107	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.7 Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box only.

<i>T</i> (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.135	0.168	0.207	0.200	0.188	
1.406	0.60	0.176	0.236	0.252	0.205	0.148	
1.205	0.70	0.221	0.254	0.249	0.198	0.131	
1.054	0.80	0.258	0.288	0.195	0.156	0.108	
0.992	0.85	0.280	0.279	0.181	0.145	-	
0.937	0.90	0.328	0.246	0.181	0.158	-	
0.888	0.95	0.331	0.238	0.179	0.119	-	
0.844	1.00	0.329	0.266	0.181	-	-	
0.803	1.05	0.322	0.239	-	-	-	
0.767	1.10	0.274	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.154	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.098	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.8 Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 3m.

T (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.168	0.205	0.216	0.193	0.137	
1.406	0.60	0.207	0.243	0.241	0.188	0.134	
1.205	0.70	0.249	0.275	0.244	0.164	0.114	
1.054	0.80	0.283	0.291	0.211	0.161	0.123	
0.992	0.85	0.315	0.271	0.194	0.155	-	
0.937	0.90	0.319	0.228	0.185	0.148	-	
0.888	0.95	0.319	0.215	0.182	0.117	-	
0.844	1.00	0.340	0.226	0.168	-	-	
0.803	1.05	0.304	0.226	-	-	-	
0.767	1.10	0.289	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.157	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.098	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.9 Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 6m.

T (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.160	0.203	0.212	0.183	0.143	
1.406	0.60	0.211	0.247	0.248	0.167	0.120	
1.205	0.70	0.226	0.266	0.242	0.168	0.116	
1.054	0.80	0.270	0.280	0.186	0.149	0.114	
0.992	0.85	0.300	0.271	0.201	0.154	-	
0.937	0.90	0.314	0.208	0.179	0.153	-	
0.888	0.95	0.331	0.198	0.172	0.134	-	
0.844	1.00	0.323	0.235	0.159	-	-	
0.803	1.05	0.312	0.238	-	-	-	
0.767	1.10	0.251	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.122	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.071	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.10 Net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 9m.

T (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.147	0.202	0.214	0.191	0.136	
1.406	0.60	0.196	0.245	0.245	0.188	0.128	
1.205	0.70	0.190	0.245	0.237	0.162	0.126	
1.054	0.80	0.249	0.270	0.213	0.160	0.122	
0.992	0.85	0.264	0.274	0.206	0.155	-	
0.937	0.90	0.272	0.237	0.162	0.140	-	
0.888	0.95	0.318	0.214	0.180	0.143	-	
0.844	1.00	0.304	0.224	0.163	-	-	
0.803	1.05	0.284	0.219	-	-	-	
0.767	1.10	0.213	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.095	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.048	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.11 Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box only.

T (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.158	0.216	0.267	0.262	0.231	
1.406	0.60	0.223	0.277	0.306	0.285	0.224	
1.205	0.70	0.271	0.318	0.313	0.274	0.184	
1.054	0.80	0.324	0.348	0.313	0.239	0.173	
0.992	0.85	0.358	0.371	0.274	0.228	-	
0.937	0.90	0.401	0.358	0.258	0.215	-	
0.888	0.95	0.396	0.355	0.254	0.192	-	
0.844	1.00	0.400	0.342	0.294	-	-	
0.803	1.05	0.378	0.327	-	-	-	
0.767	1.10	0.324	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.210	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.153	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.12 Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 3m.

T (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.190	0.243	0.252	0.250	0.189	
1.406	0.60	0.268	0.301	0.299	0.230	0.167	
1.205	0.70	0.297	0.326	0.304	0.243	0.160	
1.054	0.80	0.327	0.348	0.257	0.203	0.150	
0.992	0.85	0.374	0.355	0.215	0.189	-	
0.937	0.90	0.402	0.284	0.211	0.195	-	
0.888	0.95	0.403	0.288	0.212	0.179	-	
0.844	1.00	0.398	0.318	0.229	-	-	
0.803	1.05	0.382	0.302	-	-	-	
0.767	1.10	0.333	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.179	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.112	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.13 Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 6m.

T (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.216	0.263	0.277	0.273	0.211	
1.406	0.60	0.269	0.320	0.316	0.260	0.197	
1.205	0.70	0.301	0.338	0.321	0.250	0.184	
1.054	0.80	0.342	0.374	0.310	0.223	0.184	
0.992	0.85	0.378	0.383	0.265	0.222	-	
0.937	0.90	0.413	0.329	0.254	0.215	-	
0.888	0.95	0.406	0.332	0.263	0.199	-	
0.844	1.00	0.407	0.301	0.238	-	-	
0.803	1.05	0.406	0.328	-	-	-	
0.767	1.10	0.347	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.182	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.124	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

Table 3.2.14 Net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and the flow pipe of 9m.

T (sec)	ω^*	Net flow rate, q/q^*					Remarks
		H03	H05	H07	H09	H12	
1.687	0.50	0.203	0.260	0.275	0.272	0.212	
1.406	0.60	0.266	0.308	0.305	0.275	0.183	
1.205	0.70	0.270	0.327	0.311	0.257	0.194	
1.054	0.80	0.332	0.362	0.274	0.244	0.175	
0.992	0.85	0.362	0.366	0.267	0.219	-	
0.937	0.90	0.376	0.334	0.249	0.201	-	
0.888	0.95	0.405	0.284	0.236	0.207	-	
0.844	1.00	0.397	0.315	0.235	-	-	
0.803	1.05	0.369	0.325	-	-	-	
0.767	1.10	0.317	-	-	-	-	
0.734	1.15	0.173	-	-	-	-	
0.703	1.20	0.101	-	-	-	-	

Note: Wave height for each test case is listed in Table 3.2.1.

무차원화된 유입유량을 Fig. 3.2.8 ~ Fig. 3.2.16에 도수 파이프의 길이 변화에 따라 도시하였다. 유입 관의 수가 2개인 경우와 3개인 경우 모두 Fig. 3.2.7에 보인 원호수로내의 수위변동과 거의 같은 경향을 보임을 알 수 있다. 즉, 파고가 작은 경우에 공진 효과가 크게 나타나고, 큰 경우에는 그 현상이 잘 나타나지 않고 있다. 도수 파이프의 길이 변화의 영향을 살펴보면 그 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 이는 유입유량을 지배하는 기진력이 도수로 양단의 수위 차에 의한 정수압 성분이라는 것을 의미하는 것으로 볼 수 있다. 관성력에 의해 해수유입이 이루어진다면 길이에 반비례하게 된다. 따라서, 원호수로 내의 도수로 입구를 평균 수면하에 설치하는 것은 많은 양의 물이 다시 외해 쪽으로 나가는 것 외에 관성력의 영향이 상대적으로 클 것으로 예상되는 바 비효율적일 것으로 판단된다.

Fig. 3.2.17 ~ Fig. 3.2.25는 유입유량을 좀더 실제적인 면에서 살펴보기 위하여 무차원화 시키지 않고 단위면적 당 유입율로 다시 나타낸 것이다. 도시결과를 살펴보면 도수로를 통한 외해수 유입율은 주기가 긴 경우는 파고가 증가할수록 어

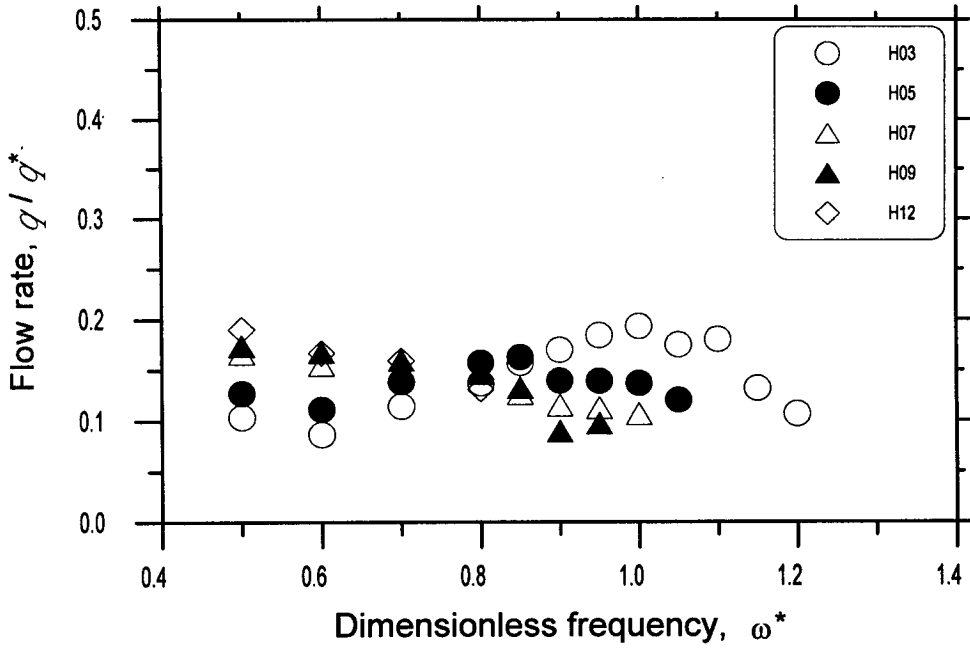


Fig. 3.2.8 Non-dimensionalized net flow rates from a conduit w/o the flow gathering box.

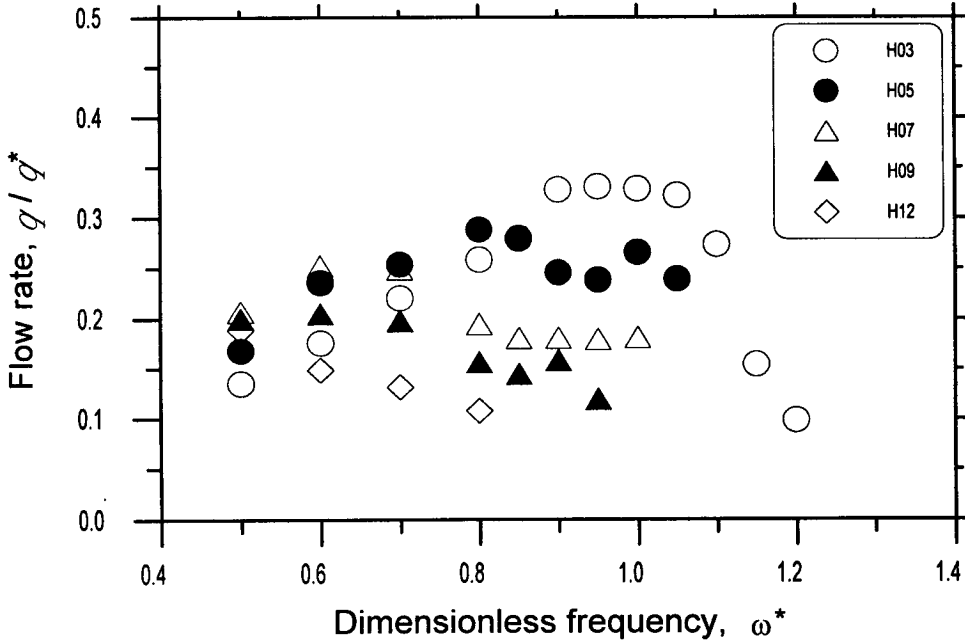


Fig. 3.2.9 Non-dimensionalized net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box only.

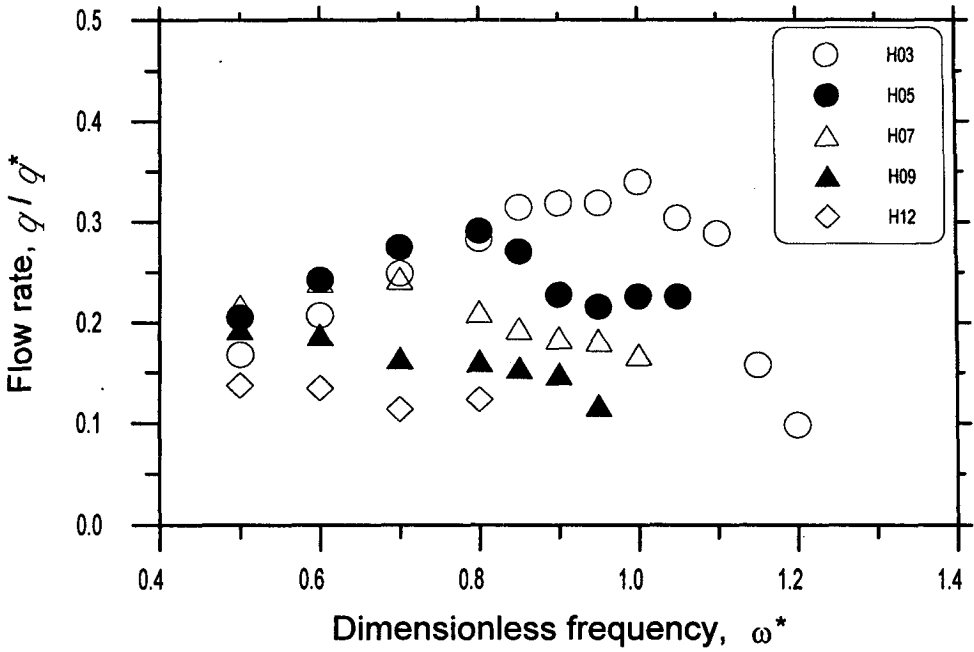


Fig. 3.2.10 Non-dimensionalized net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m.

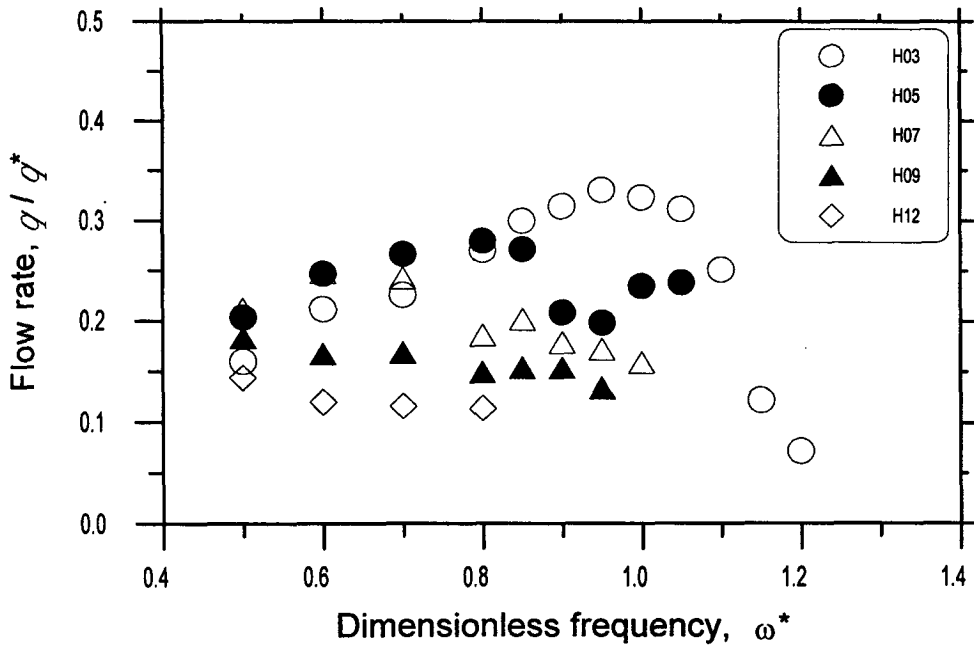


Fig. 3.2.11 Non-dimensionalized net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m.

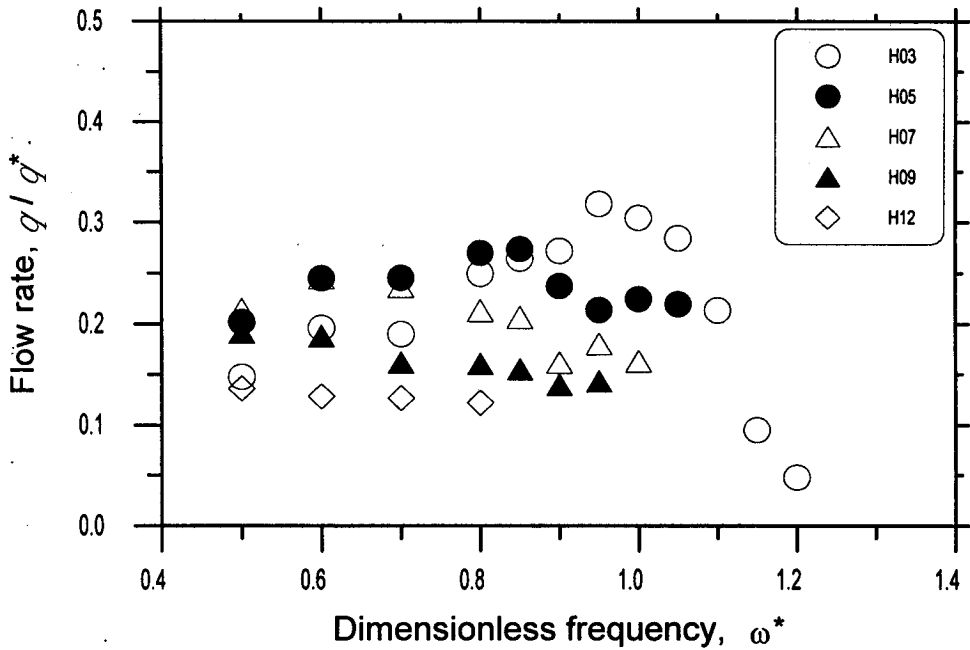


Fig. 3.2.12 Non-dimensionalized net flow rates from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m.

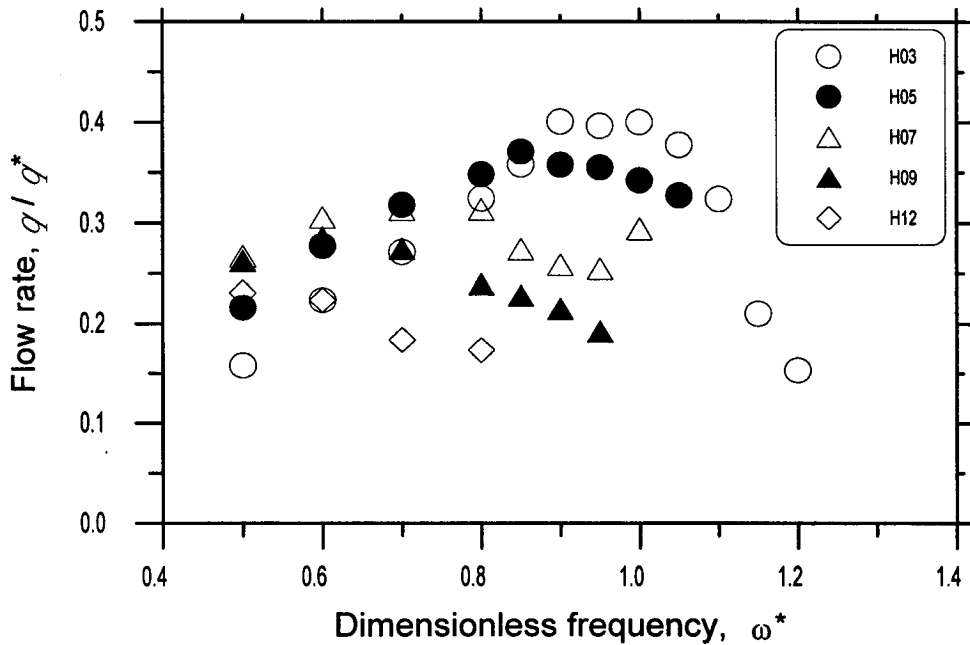


Fig. 3.2.13 Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box only.

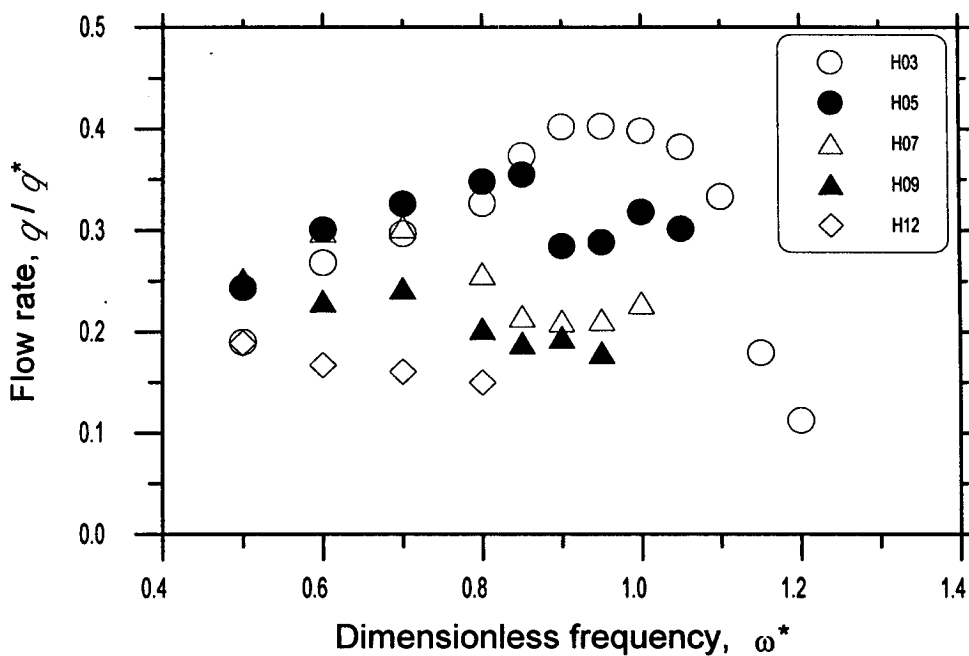


Fig. 3.2.14 Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m.

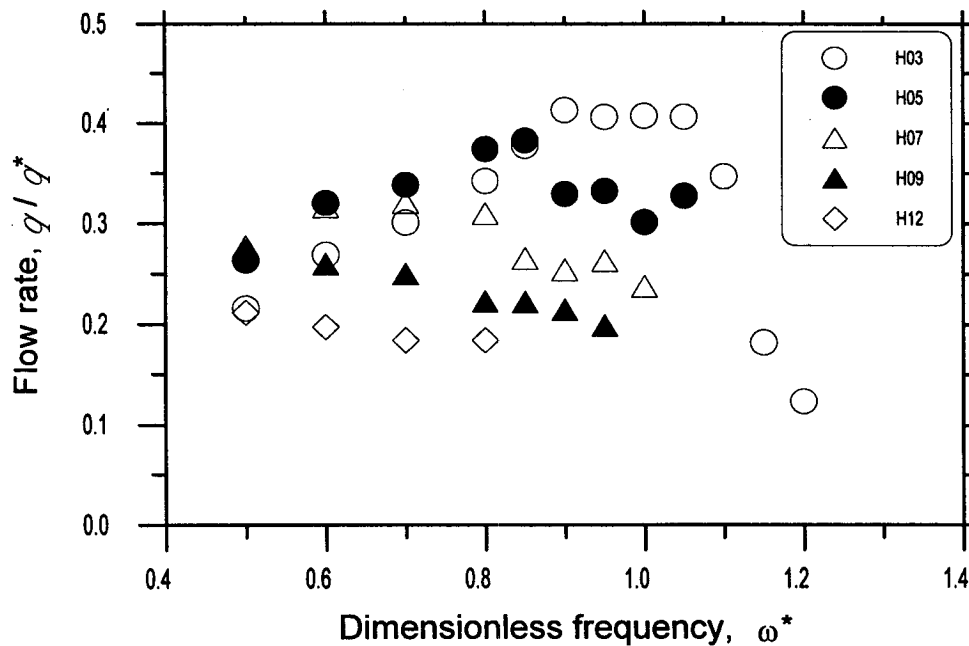


Fig. 3.2.15 Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m.

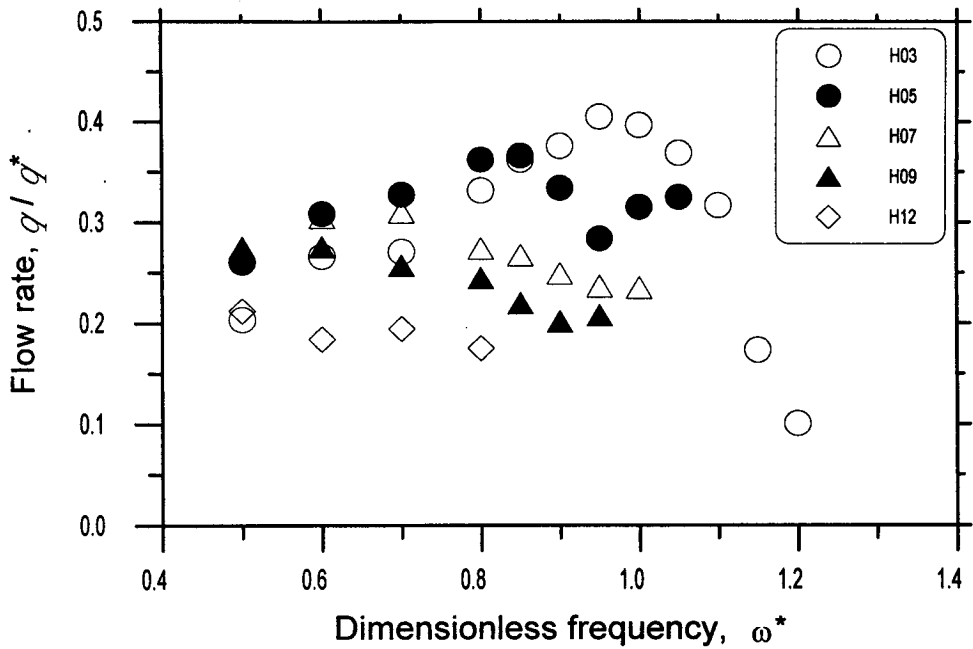


Fig. 3.2.16 Non-dimensionalized net flow rates from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m.

는 정도 증가하다가 일정 값으로 수렴함을 알 수 있으며, 파고가 낮은 경우는 공진 주기 부근에서 파고가 큰 경우에 상응하는 해수 유입율을 보이게 됨을 알 수 있다. 파고가 증가함에 따라 유입율이 일정값으로 수렴하는 현상은 천단고(보다 정확히 말하면 원호수로 유출구 높이)에 관계하는 현상으로 도수로 양단의 수위차가 거의 일정한 값 이하로 제한되기 때문에 발생하는 것이다. 이 현상을 이용하면 파고 및 주기에 따라 도수로를 통하여 항내로 유입되는 외해수의 양의 제어가 가능하다.

집수함을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우, 유입관이 2개인 경우와 3개인 경우의 결과를 서로 비교하여 살펴보면, 유입관 증가 수만큼 유량이 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 1차적으로는 집수함에서의 난류 발생에 의한 에너지 손실에 기인한 것으로 볼 수 있다. 따라서, 유입관이 합쳐지는 집수함에서 가능하면 난류가 적게 발생하도록 설계하는 것이 필요하며, 도수 파이프 끝의 유속을 고려하여 최적의 유입관 수를 결정하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

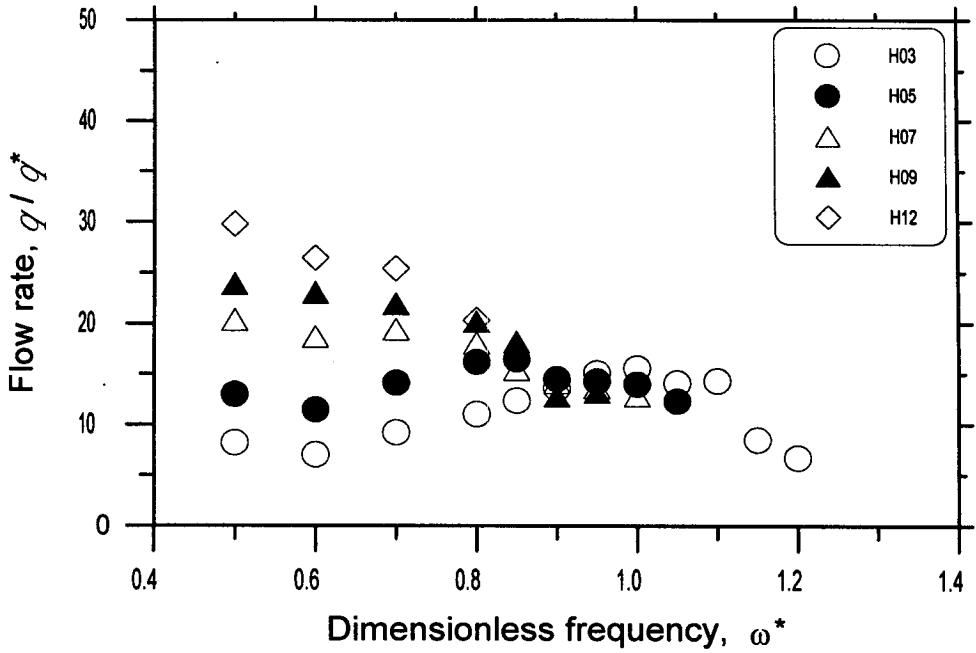


Fig. 3.2.17 Net flow rates per unit area from a conduit w/o the flow gathering box.

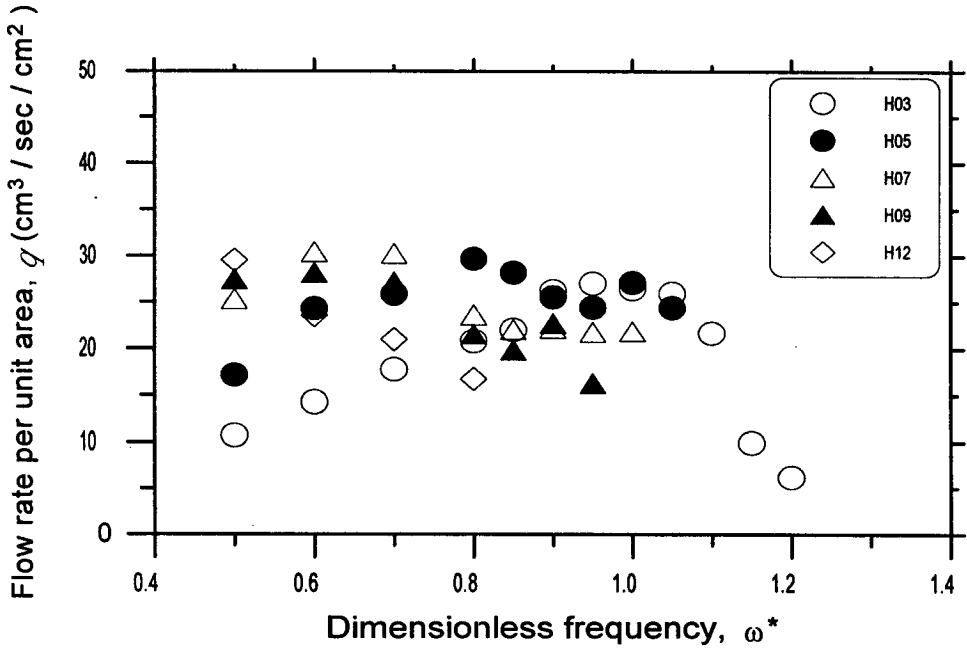


Fig. 3.2.18 Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box only.

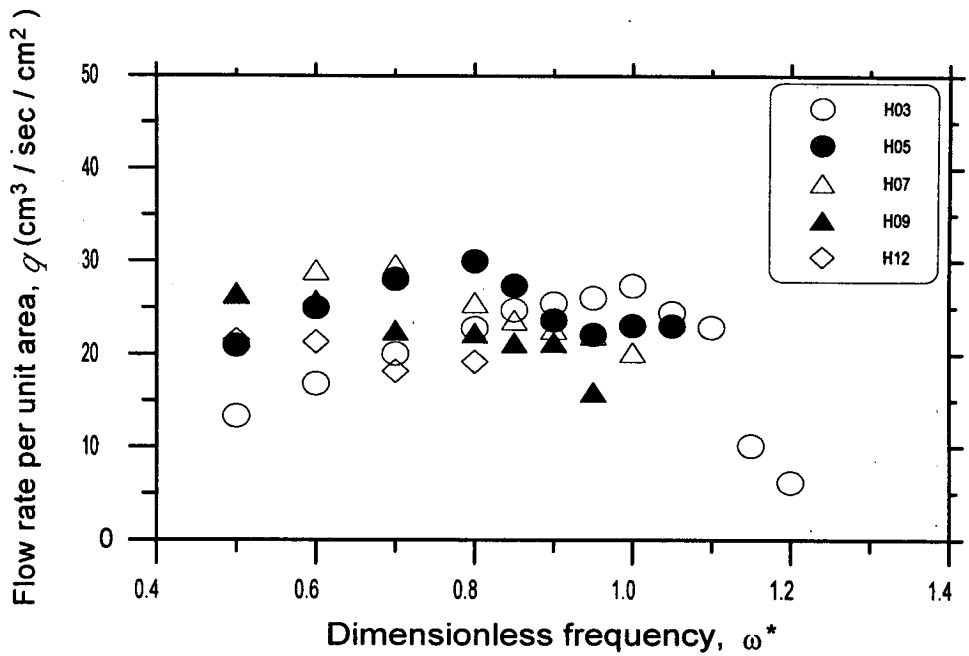


Fig. 3.2.19 Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m.

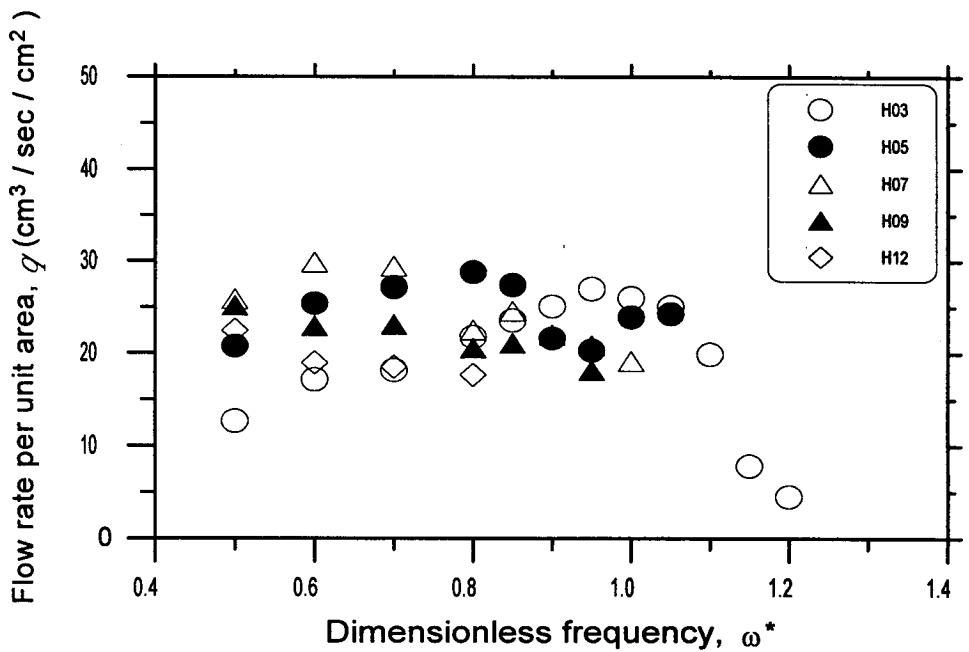


Fig. 3.2.20 Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m.

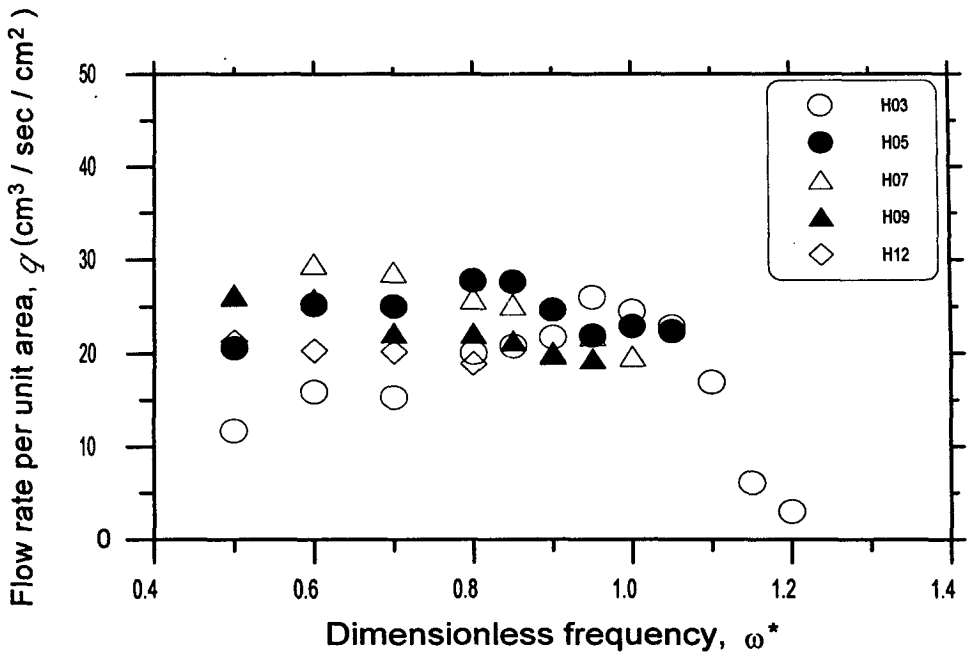


Fig. 3.2.21 Net flow rates per unit area from two conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m.

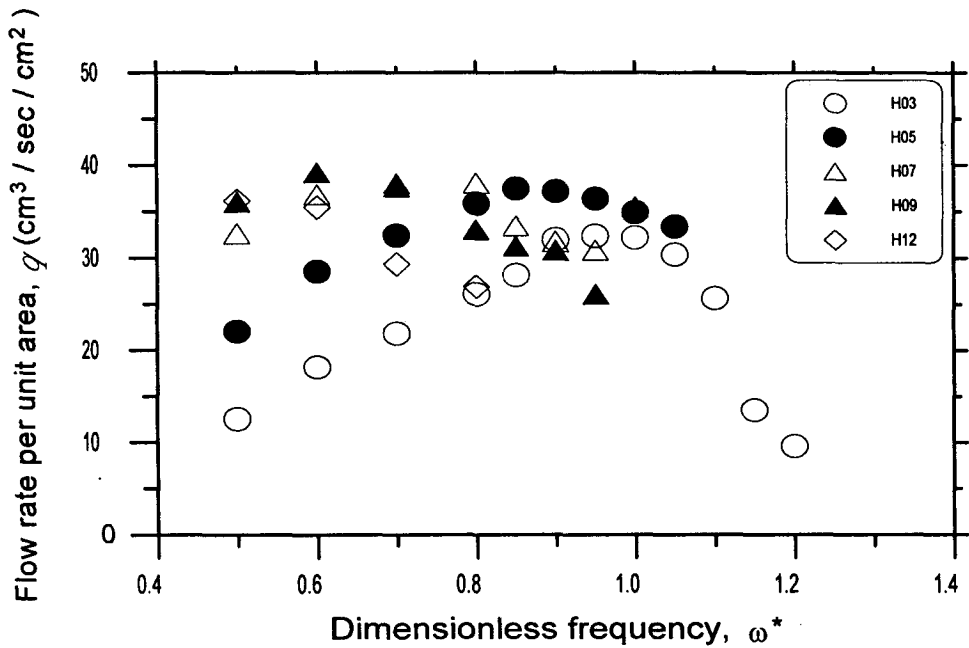


Fig. 3.2.22 Net flow rates per unit area from three conduits w/ the flow gathering box only.

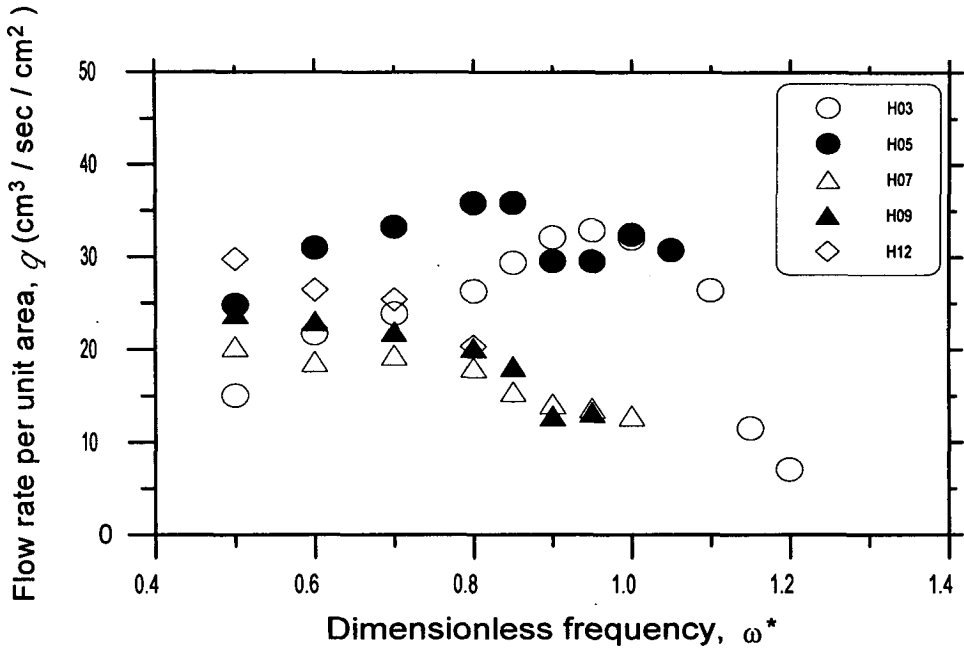


Fig. 3.2.23 Net flow rates per unit area from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 3m.

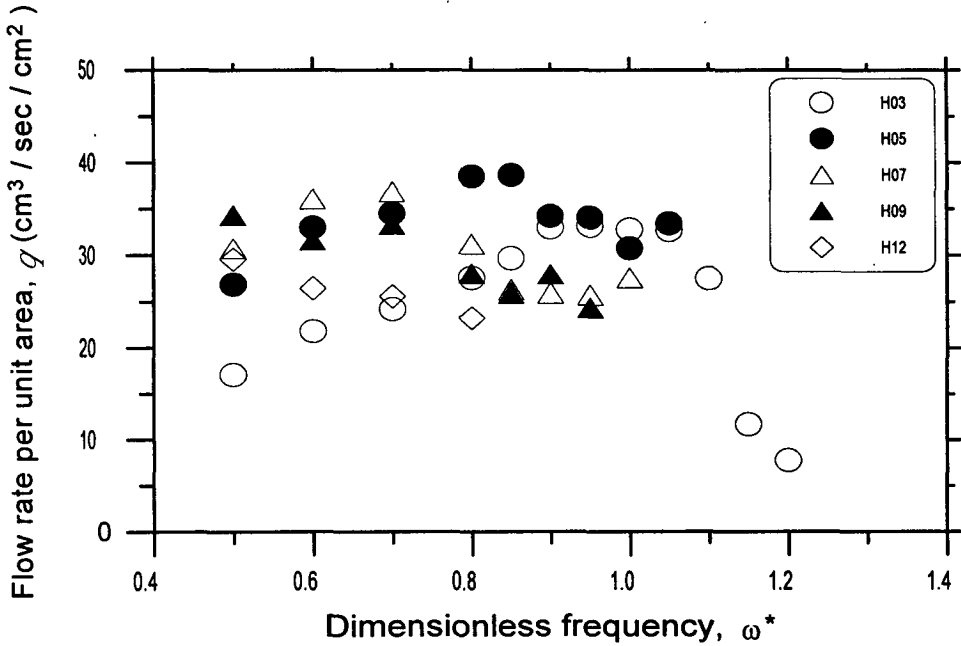


Fig. 3.2.24 Net flow rates per unit area from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 6m.

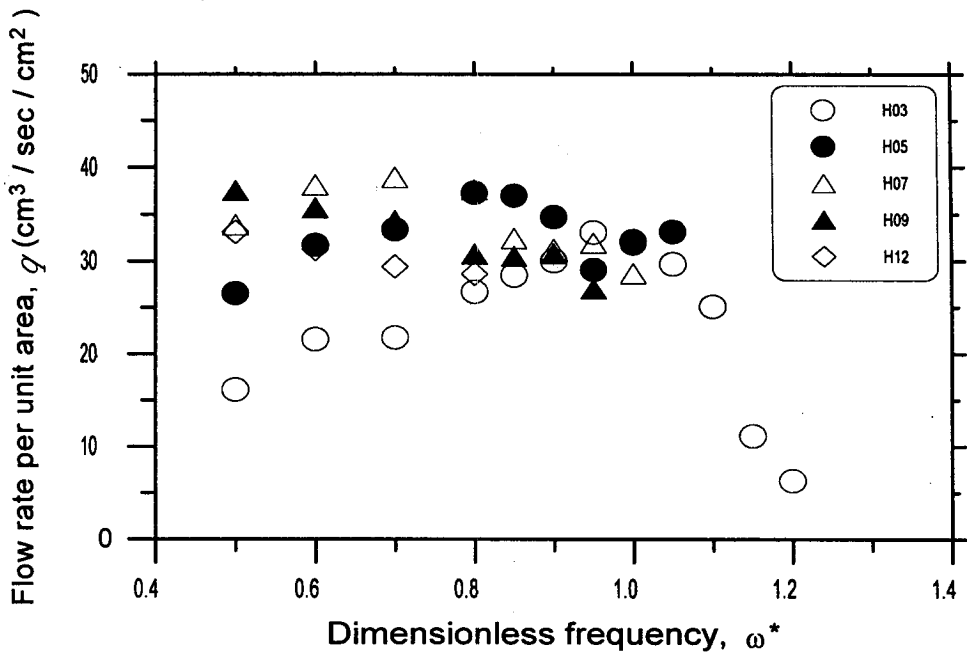


Fig. 3.2.25 Net flow rates per unit area from three conduits w/ the flow gathering box and flow pipe of 9m.

제3절 케이스에 작용하는 전파력 특성

1. 개요

연안 구조물에 작용하는 파력은 구조물의 안정성 예측에 가장 중요한 외력이나 구조물의 투영 단면의 크기가 동일하더라도 해수와 접촉하는 단면 형상의 변화에 따라 달라진다. 따라서, 개발 방파제의 단면 최적화를 위해서는 단면 형상 변화에 따른 수평파력 및 연직파력의 최대치 및 이들 최대치들 간의 발생 시간차 등에 관한 특성을 구체적으로 규명할 필요가 있으나 파압계를 이용한 파압 측정 결과로부터는 이들 현상을 정확히 규명할 수 없다.

본 연구에서는 3분력 검출기(3-component load cell)를 이용하여 원호수로형 방파제 케이스 및 외형은 이와 같으나 무공 케이스인 두 케이스 형태에 대해서 케이스에 작용하는 수평력, 연직력 및 이들로 인한 회전모멘트를 수리모형실험으로 관측하였다. 참조를 위해, 형상이 단순한 무공 케이스의 경우에는 3분력 검출기로 측정된 작용 외력을 파압계로 관측해 유추한 외력과 비교하였다.

2. 3분력 검출기의 제원

계측에 사용된 3분력 검출기는 일본 Nissho전기 제품으로 제품명은 LMC-3520-100이다. 최대 출력전압은 $\pm 10V$ 이며 이 값이 X(수평), Z(연직)방향의 파력 ± 100 kg과 Y 방향의 모멘트 ± 40 kg-m에 대응한다. 3분력 검출기에 작용하는 파력방향 및 모멘트 방향은 Fig. 3.3.1과 같다. 이 장비는 2개의 원통이 결합되어 있는 구조인데 큰 원통에는 힘을 감지하는 센서가 내장되어 있고 작은

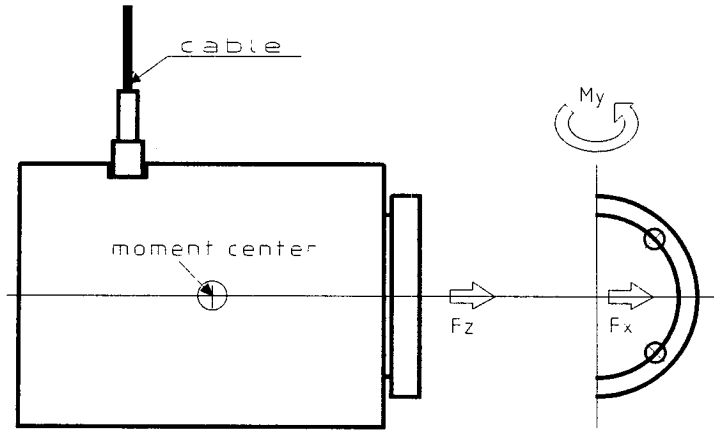


Fig. 3.3.1 Sketch of 3-component load cell

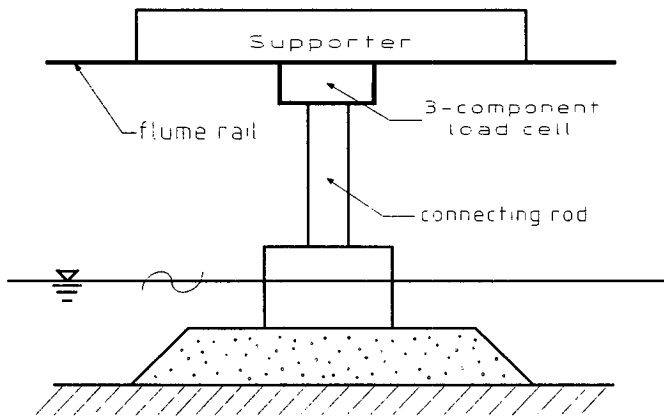


Fig. 3.3.2 Installation of 3-component load cell

원통은 힘을 받는 부분으로서 원통의 평면부에 직각으로 작용하는 힘이 F_z , 수평으로 작용하는 힘이 F_x 이며 큰 원통의 중앙부에 있는 모멘트 중심점을 기준으로 이 두 힘에 의한 모멘트의 합이 M_y 이다.

검출기는 방수가 되지 않으므로 사용할 때에는 물과 접촉하지 않도록 구조물로 부터 멀리 떼어 놓아야 안전하다. 따라서, 본 실험에서는 Fig. 3.3.2와 같이 검출기를 구조물의 상부에 설치하였다. 검출기는 또한, 외력에 의하여 자체가 움직여서는 안되므로 이를 고정시킬 수 있는 튼튼한 지지대가 필요하다. 검출기는 그림에서와 같이 조파수조의 연직벽 위에 고정된 지지대에 부착되었으며 모형과 검출기는 견고한 연결봉으로 연결되었다. 방파제 케이슨에 작용하는 파력을 측정하기 위하여 설치한 검출기의 측면도와 정면도는 각각 Photo 3.3.1, Photo 3.3.2와 같다.

3. 無孔 케이슨에 작용하는 파력측정

가. 측정장비의 설치

형상이 단순한 무공 케이슨에 3분력 검출기를 부착하고 아울러 파압계도 케이슨의 전면과 바닥면에 부착하여 파력측정과 동시에 파압계에 의한 파력산출치와 검출기로 측정한 측정치와 일치하는지도 조사하였다. 수심은 40 cm, 마운드의 높이는 16 cm로 마운드에서 수면까지의 높이는 24 cm이다. 검출기의 설치형상과 파압계의 부착위치는 Fig. 3.3.3과 같다. 또한, 케이슨 전면에서의 중복파고와 파력과의 관계를 비교하기 위하여 케이슨 전면에 파고계도 설치하였다.

나. 파력측정 결과

주기와 파고의 변화에 따른 파력특성을 살펴보기 위하여 주기 $T=1.2, 1.4, 1.6$ sec에 대하여 파고 $H=9, 12, 14$ cm를 갖는 규칙파를 조합하여 케이슨에 작용시켰

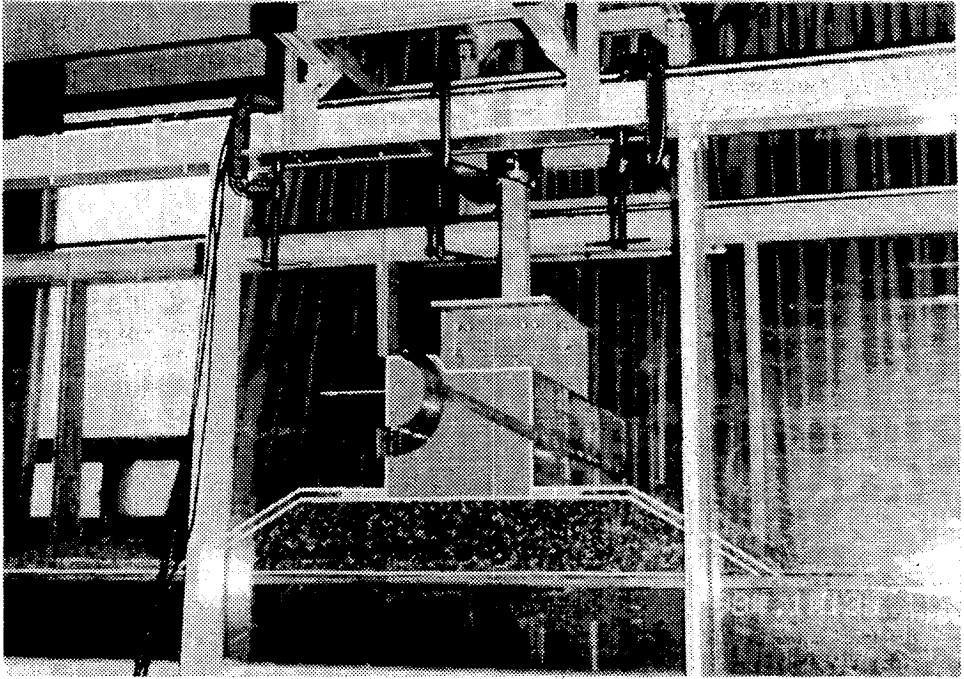


Photo 3.3.1 Side view of load measuring system

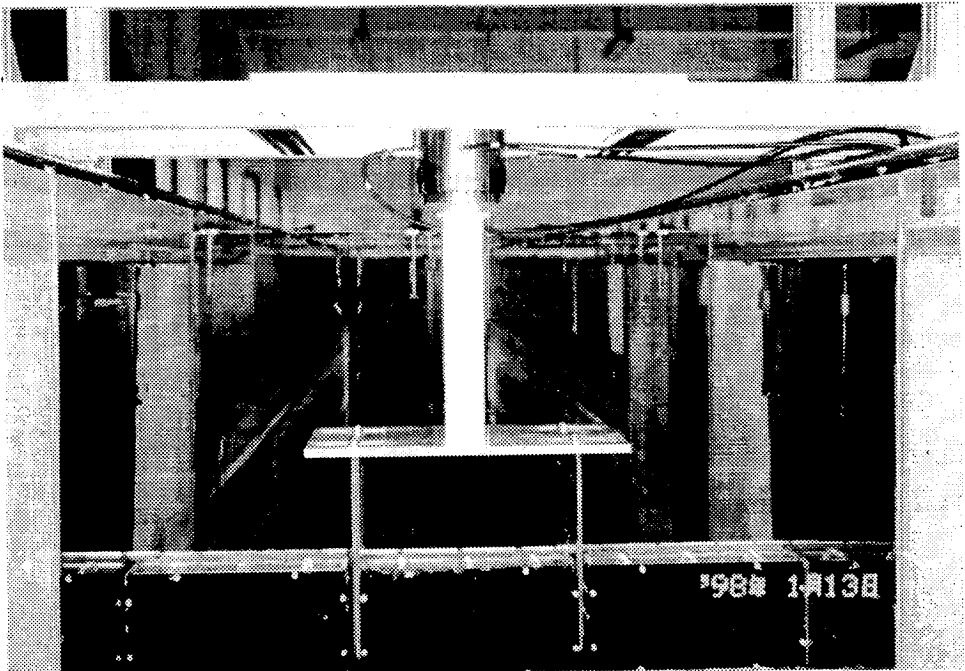


Photo 3.3.2 Front view of load measuring system

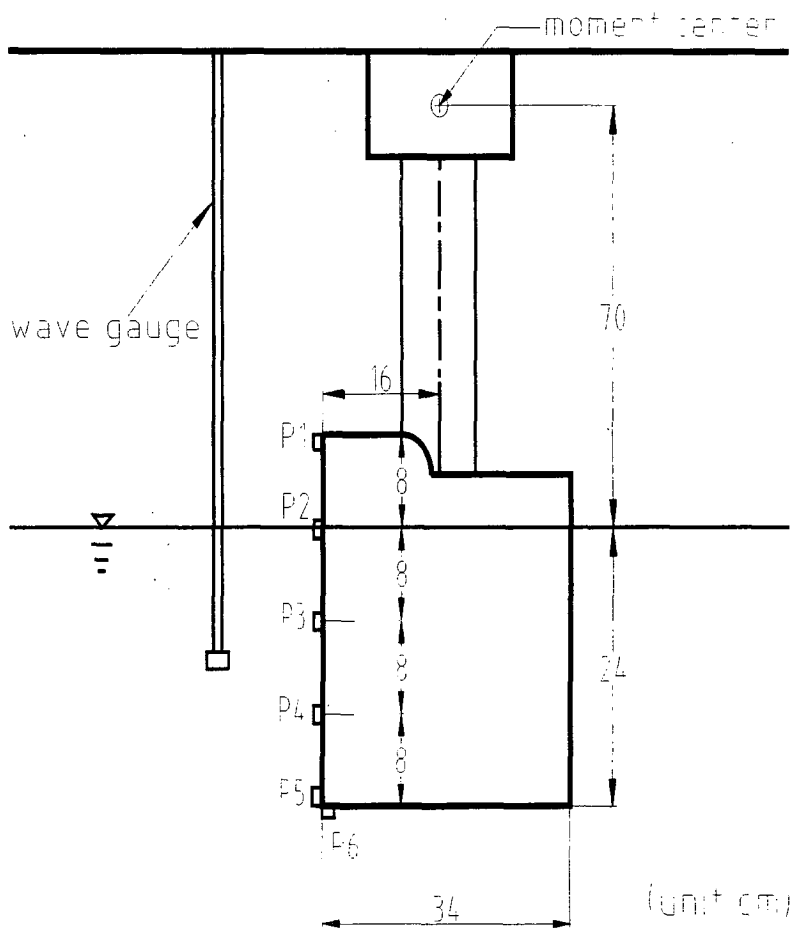


Fig. 3.3.3 Dimension of load measuring system

다. 파력특성은 주기와 파고에 따라 약간의 변화는 있으나 전반적으로는 비슷한 경향을 보인다. 따라서, 전부를 분석하는 대신 가장 파고가 크면서 파형경사가 작은 주기 $T=1.6$ sec, 파고 $H=14.0$ cm인 파랑에 대해서만 정밀분석을 실시하고 나머지는 파력의 시계열만을 부록에 제시하였다. 실험파랑의 파장에 대한 파고의 비인 파형경사는 Table 3.3.1과 같다.

Table 3.3.1 Wave steepness(= H/L) for experimental conditions

H \ T	1.2 s	1.4 s	1.6 s
9 cm	0.046	0.038	
12 cm		0.050	0.042
14 cm			0.049

3분력 검출기로 관측한 파력 및 모멘트와 케이슨 전면에서의 수면변위의 시계열증에서 파고가 균일한 4주기를 선정하여 Fig. 3.3.4에 제시하였다. 이 그림에서 전반적으로 파력형상은 규칙적으로 반복된다고 할 수 있으므로 정밀분석을 위하여 그 중에서 2번째 파에 대해서만 파력 시계열을 표시하면 Fig. 3.3.5와 같다. 이 그림에서 케이슨 전면에 작용하는 최대수평파력(=8.64 kg)이 바닥면에 작용하는 최대揚波力(=4.54 kg)보다 2배 정도 크며, 최대치의 발생시간은 바닥면에서 빨라 바닥면에 최대揚波力이 작용한 후에 최대수평파력이 작용함을 알 수 있다. 전면파고와 파력과의 관계를 살펴 보면 전면파고가 최대가 되는 시점에서 揚波力도 최대가 됨을 알 수 있다.

한편, 모멘트는 단지 3분력 검출기의 모멘트 중심점을 기준으로 관측된 값으로서 케이슨에 작용하는 실제 전도 모멘트는 아니다. 그러나 이로부터 전도 모멘트의 최대치 발생 시간은 알 수 있으며 최대치는 수평파력의 작용점을 계산하기 위하여

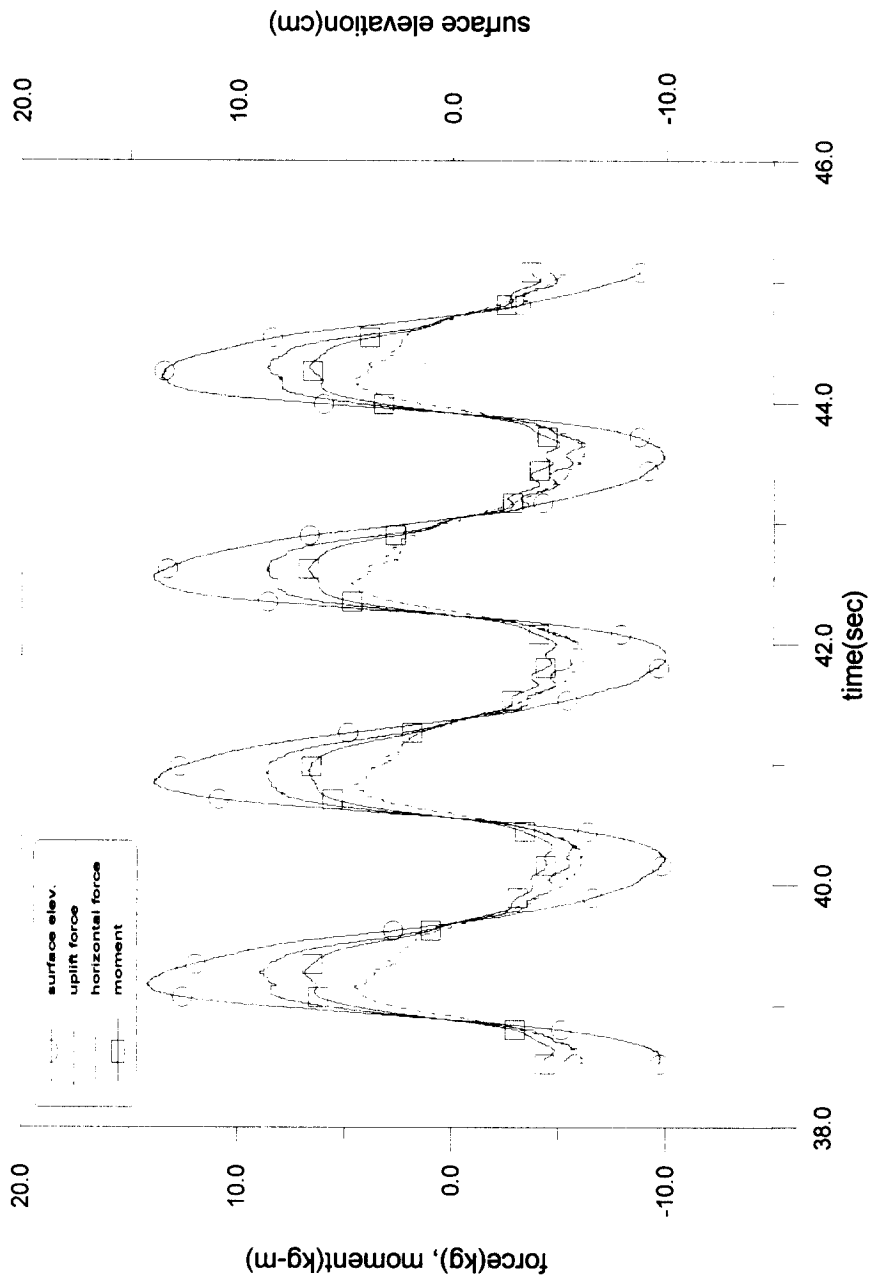


Fig. 3.3.4 Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson (T=1.6s, H=14cm)

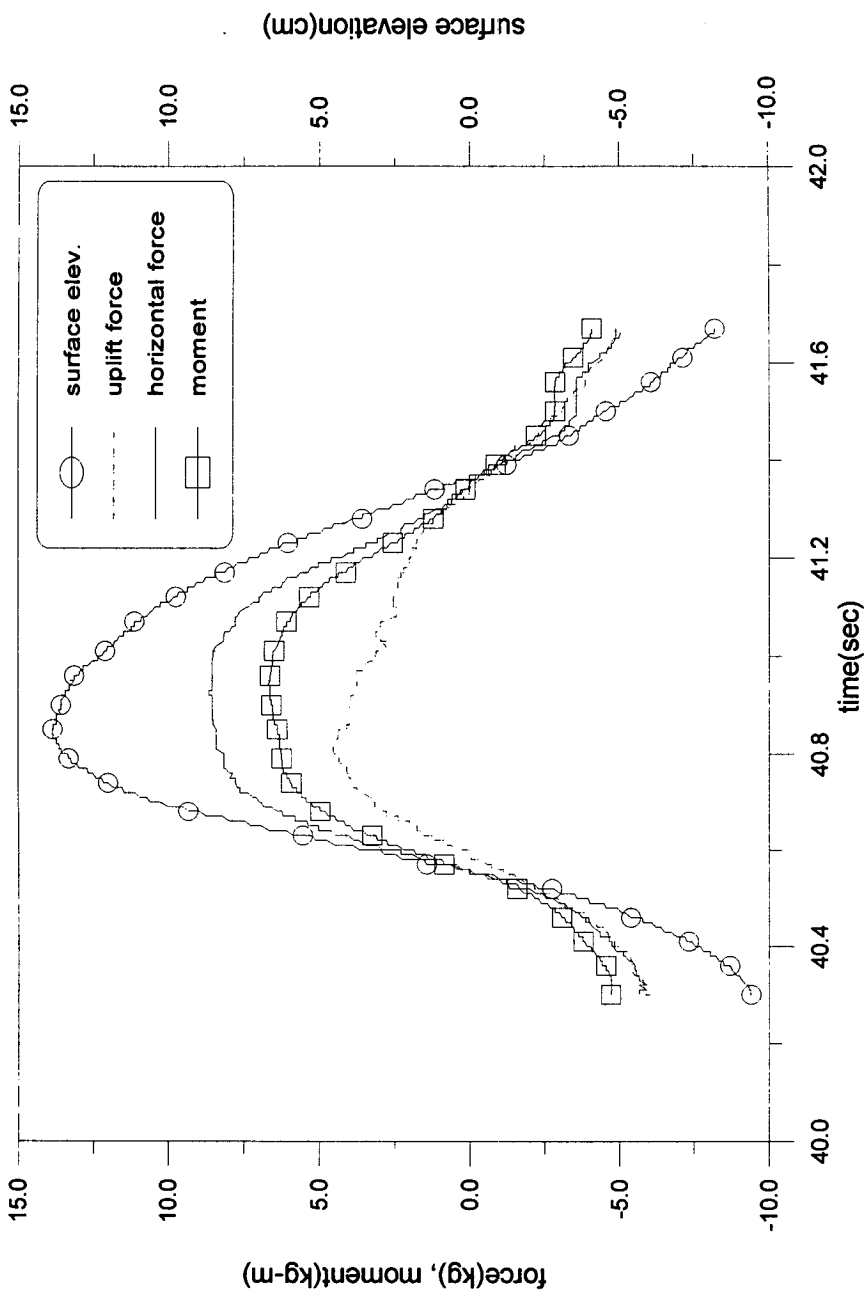


Fig. 3.3.5 Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson for 1 period

필요하다. 실험에서 관측 전도모멘트와 수평력들 간에는 다음 관계식이 성립한다.

$$M_y = F_x \times l_y - F_z \times l_x \quad (3.3.1)$$

여기서, l_y 는 케이슨 전면에 작용하는 수평파력 합력의 작용점으로부터 3분력 검출기의 모멘트 중심점까지의 연직거리이며 l_x 는 揚波力 합력의 작용점으로부터 3분력 검출기의 모멘트 중심점까지의 수평거리이다. 한편, 케이슨 저면에 작용하는 양압력은 전면부에서 최대이며 후면부에서 0 이되는 삼각형 분포를 갖는다고 가정하면 (Goda, 1985) l_x 는 기지의 값이 되는데, Fig. 3.3.3에서 케이슨의 폭이 34 cm 이고 모멘트 관측 중심점의 수평위치가 케이슨 전면으로부터 16 cm이므로 $l_x = 16 - 34/3 = 4.67$ cm가 된다. 따라서, 미지수는 l_y 하나만 남게 되므로 계산이 가능하다. 전면파력과 모멘트의 최대가 되는 시점이 서로 일치하므로 그 시점에서의 파력과 모멘트를 위 식에 대입하면 $M_y = 6.62$ kg-m, $F_x = 8.64$ kg, $F_z = 3.86$ kg 이므로 l_y 는 78.7 cm로서 최대 수평파력 합력의 작용점은 수면 하 8.7 cm가 된다. 계산 결과 우변의 첫 번째 항이 두 번째 항보다 월등히 크므로 실험에서 관측된 모멘트는 수평파력과 거의 같은 시간분포 형상을 보이는 것은 당연하다고 할 수 있다.

다. 파압측정 결과

파력측정과 동시에 파압도 전면과 바닥면에서 측정하였는데 전면에서는 5개 점, 바닥면에서는 1개 점에서 측정하였다. 관측 파압과 검출기로 관측한 파력과의 관계를 규명하기 위하여 전면파압과 수평파력 및 양압력과 揚波力의 한 주기간 시계열을 도시하였다. 먼저 케이슨 전면에 대한 작용력은 Fig. 3.3.6과 같다. 이 그림에서 파압은 위치에 따른 구별을 하지 않았지만 가장 파압이 작은 것이 케이슨의 최상

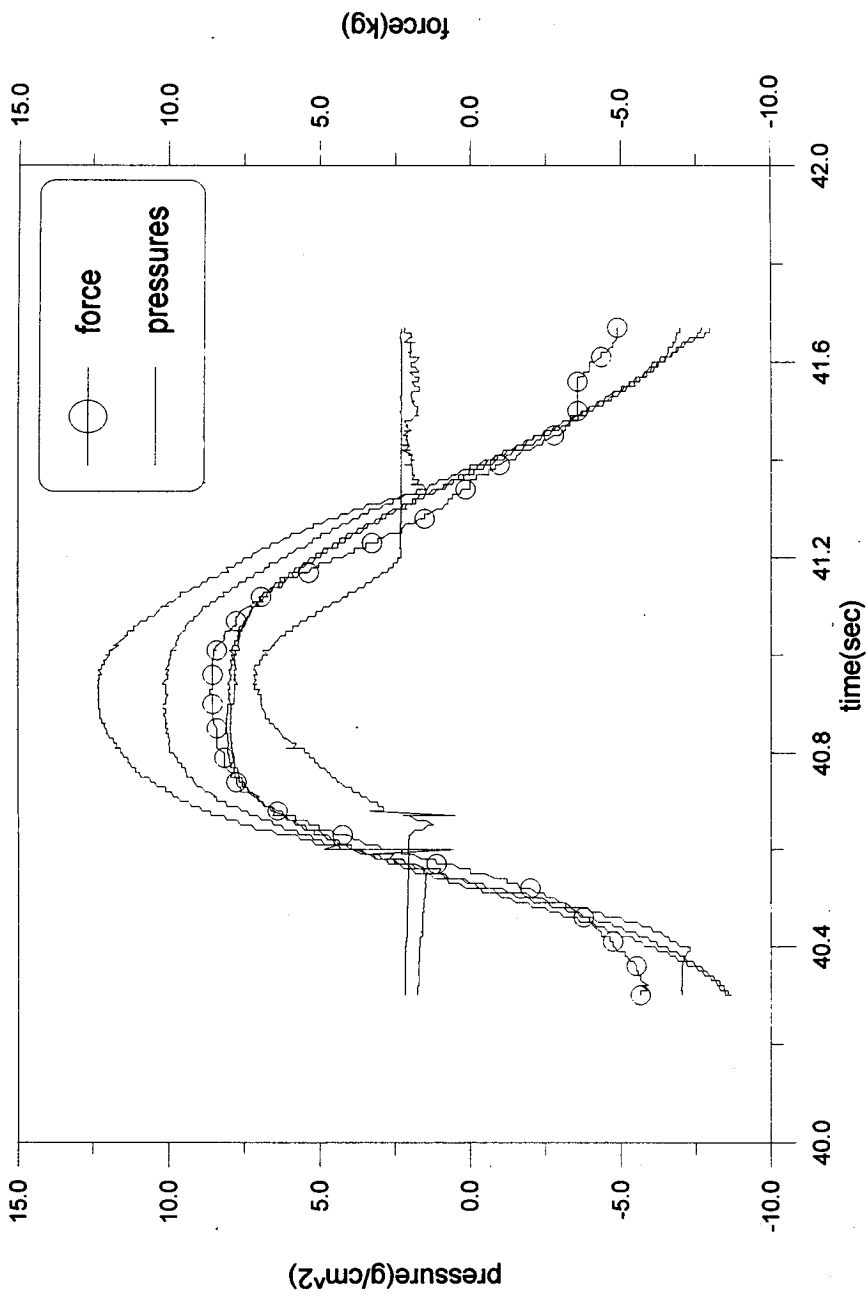


Fig. 3.3.6 Time series of horizontal force and pressures acting on the non-perforated wall caisson

부에 있는 P1 지점의 값이고 나머지는 파압이 큰 것에서 작은 것으로 갈수록 파압 측정점도 수면에서부터 아래로 내려간 것이다. 즉, 전면벽에서의 파압은 수면에서 가장 크고 아래로 내려 갈수록 작아짐을 알 수 있다. 이 그림에서 최대파력이 발생하는 시간은 수면에서의 최대파압의 발생시간과 거의 일치하며 수면 아래로 내려 갈수록 최대파압의 발생시간이 최대파력의 그것보다 빠르며 수면 위에서는 느려짐을 알 수 있다. 이는 파랑이 케이슨에 작용할 때 중복파의 경우는 아래에서부터 위로 쳐올라가는 특성(한국해양연구소, 1993)을 생각해 보면 당연한 결과이다. 최대파력이 발생하는 시점에서의 각 관측점의 파압을 이용하여 전면에 작용하는 최대 파력을 계산해 보면 관측점과 관측점 사이의 파압은 직선적으로 변한다고 가정할 때 $P_1=6.99$, $P_2=12.30$, $P_3=10.09$, $P_4=8.03$, $P_5=7.82$ g/cm^2 이므로 최대수평파력은 9.68 kg이 된다. 따라서, 파압을 이용하여 계산한 파력이 계측파력 8.64 kg보다는 큼을 알 수 있다.

케이슨 저면에 작용하는 파압과 파력과의 관계는 Fig. 3.3.7과 같은데, 파압과 파력의 최대치 발생 시간은 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 양압력이 작용하는 바닥면의 면적에 파압을 곱하면 파력이 되므로 양압력의 분포가 케이슨의 후면 모서리 부분의 파압이 0 인 삼각형 분포를 갖는다는 가정하에 파력을 계산하면 최대파압은 6.48 g/cm^2 이고 작용면적은 32 cm x 34 cm 이므로 파력은 3.53 kg이 된다. 그러나 이 값은 검출기로 측정된 최대치 4.54 kg보다 작으므로 후면 모서리 부분의 파압이 0 이 아니며 파압분포도 삼각형 보다는 사다리꼴 분포를 가정하는 것이 실제에 가깝다고 할 수 있다. 이는 한국해양연구소(1993)에서 수행한 파압측정실험에서도 나타났는데 후면 모서리에 설치한 파압계에서 파압이 감지되었다. 이를 근거로 사다리꼴 분포를 가정하여 양압력의 작용점을 다시 계산해 보면 후면 모서리 부분에서의 파압이 1.87 g/cm^2 이 되므로 사다리꼴 파압의 합력 작용점은 케이슨 전면에서 13.87 cm만큼 떨어진 지점이 된다. 따라서, 이 경우는 $L_x=16-13.87=2.13$

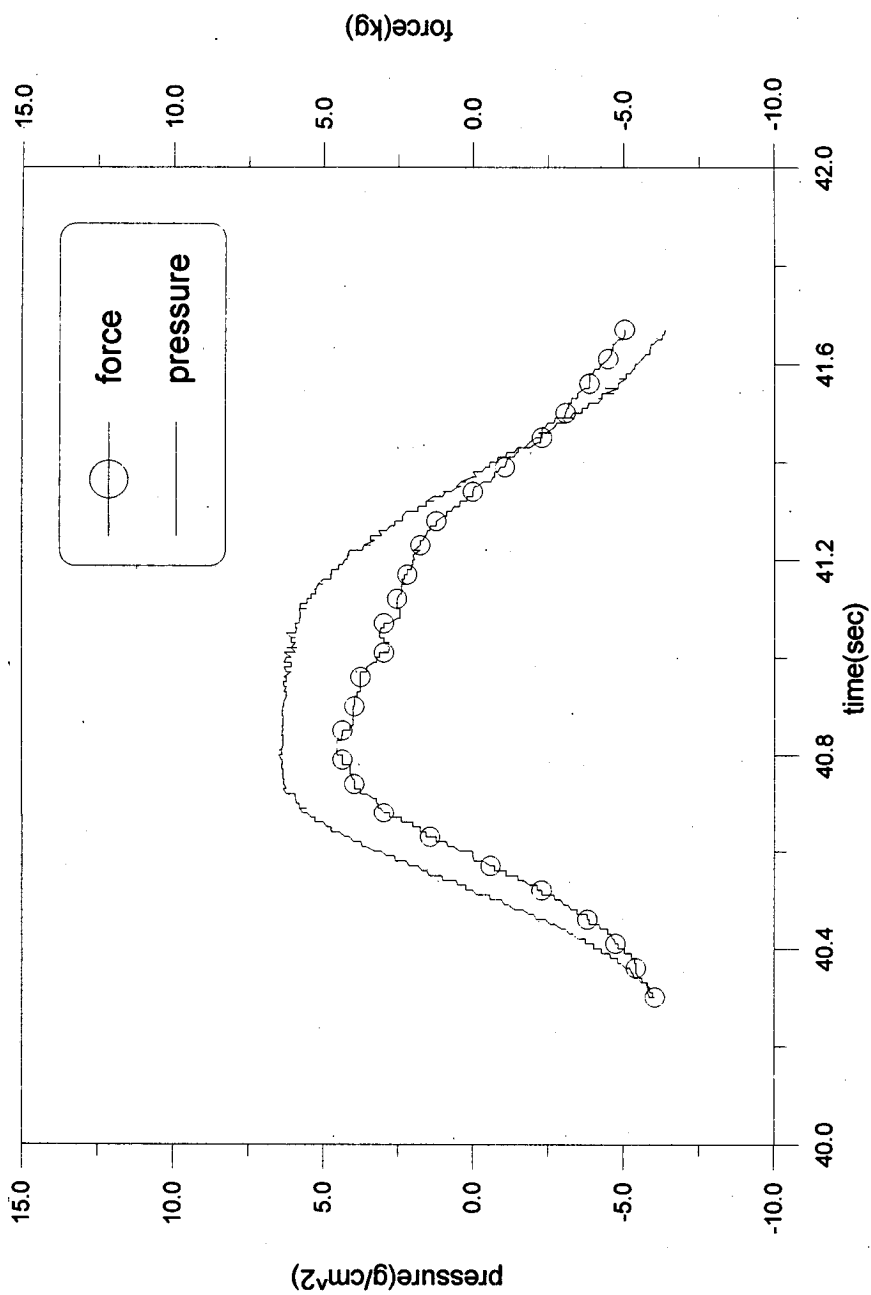


Fig. 3.3.7 Time series of uplift force and pressure acting on the non-perforated wall caisson

cm가 되고 이를 식 (3.3.1)에 대입하면 $l_y=77.6$ cm가 된다. 따라서, 수평파력 합력의 작용점은 저면 파력을 삼각형 분포로 가정할 때보다 1.1 cm 높아진다.

4. 원호수로 케이슨에 작용하는 파력측정

무공 케이슨에 이어 원호수로 케이슨에도 3분력 검출기를 설치하여 파력을 측정하였다. 파랑조건은 무공 케이슨에서의 경우와 동일하며 $T=1.6$ s, $H=14$ cm의 파랑에 대해서 계측된 파력과 모멘트 및 전면파랑의 시계열중에서 파고가 균일한 구간을 선정하여 Fig. 3.3.8에 제시하였다. 나머지 파랑에 대한 파력의 시계열은 부록에 제시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 시간별 파력형상은 거의 비슷하기 때문에 그 중에서 한 주기를 골라서 Fig. 3.3.9에 자세히 나타내었다. 원호수로 케이슨에 작용하는 파력의 가장 큰 특징은 尖頭波力이 다수 나타난다는 것인데, 이를 무공 케이슨의 경우인 Fig. 3.3.5와 비교하면 확연히 알 수 있다. Fig. A5.1~ A5.8에서 보다 잘 알 수 있듯이 수평파력의 첨두치가 복수로 발생하는 현상은 파형경사가 심할수록 두드러지고 무공 케이슨의 경우보다는 원호수로형 케이슨에서 더욱 두드러진다. 따라서 다수의 첨두파력 발생 현상은 케이슨의 형상에 따라서도 좌우되는 것을 알 수 있으며 구체적 평가를 위해서는 보다 심층적인 실험 및 비교가 필요하다. Fig. 3.3.9와 Fig. 3.3.5를 참조할 때 계측된 최대 수평파력은 원호수로 케이슨과 무공케이슨에서 각각 8.50 kg 및 8.64 kg으로서 별 차이가 없으나 최대揚波力은 원호수로 케이슨에서 3.32 kg인 반면 무공케이슨의 경우에는 3.86kg으로서 원호수로 케이슨의 경우가 훨씬 작음을 알 수 있다.

한편, 전면 중복파고와 수평파력의 최대치 발생 시점을 비교하면 전면파고는 최대 수평파력이 발생한 이후에가 최대가 된다. 이는 월파가 발생할 때 원호수로 케이슨에서는 전면 중복파고의 최대치가 원호수로의 출구로부터 나오는 수피가 월파

cm가 되고 이를 식 (3.3.1)에 대입하면 $l_y=77.6$ cm가 된다. 따라서, 수평파력 합력의 작용점은 저면 파력을 삼각형 분포로 가정할 때보다 1.1 cm 높아진다.

4. 원호수로 케이슨에 작용하는 파력측정

무공 케이슨에 이어 원호수로 케이슨에도 3분력 검출기를 설치하여 파력을 측정하였다. 파랑조건은 무공 케이슨에서의 경우와 동일하며 $T=1.6$ s, $H=14$ cm의 파랑에 대해서 계측된 파력과 모멘트 및 전면파랑의 시계열중에서 파고가 균일한 구간을 선정하여 Fig. 3.3.8에 제시하였다. 나머지 파랑에 대한 파력의 시계열은 부록에 제시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 시간별 파력형상은 거의 비슷하기 때문에 그 중에서 한 주기를 골라서 Fig. 3.3.9에 자세히 나타내었다. 원호수로 케이슨에 작용하는 파력의 가장 큰 특징은 尖頭波力이 다수 나타난다는 것인데, 이를 무공 케이슨의 경우인 Fig. 3.3.5와 비교하면 확연히 알 수 있다. Fig. A5.1~ A5.8에서 보다 잘 알 수 있듯이 수평파력의 첨두치가 복수로 발생하는 현상은 파형경사가 심할수록 두드러지고 무공 케이슨의 경우보다는 원호수로형 케이슨에서 더욱 두드러진다. 따라서 다수의 첨두파력 발생 현상은 케이슨의 형상에 따라서도 좌우되는 것을 알 수 있으며 구체적 평가를 위해서는 보다 심층적인 실험 및 비교가 필요하다. Fig. 3.3.9와 Fig. 3.3.5를 참조할 때 계측된 최대 수평파력은 원호수로 케이슨과 무공케이슨에서 각각 8.50 kg 및 8.64 kg으로서 별 차이가 없으나 최대揚波力은 원호수로 케이슨에서 3.32 kg인 반면 무공케이슨의 경우에는 3.86kg으로서 원호수로 케이슨의 경우가 훨씬 작음을 알 수 있다.

한편, 전면 중복파고와 수평파력의 최대치 발생 시점을 비교하면 전면파고는 최대 수평파력이 발생한 이후에가 최대가 된다. 이는 월파가 발생할 때 원호수로 케이슨에서는 전면 중복파고의 최대치가 원호수로의 출구로부터 나오는 수피가 월파

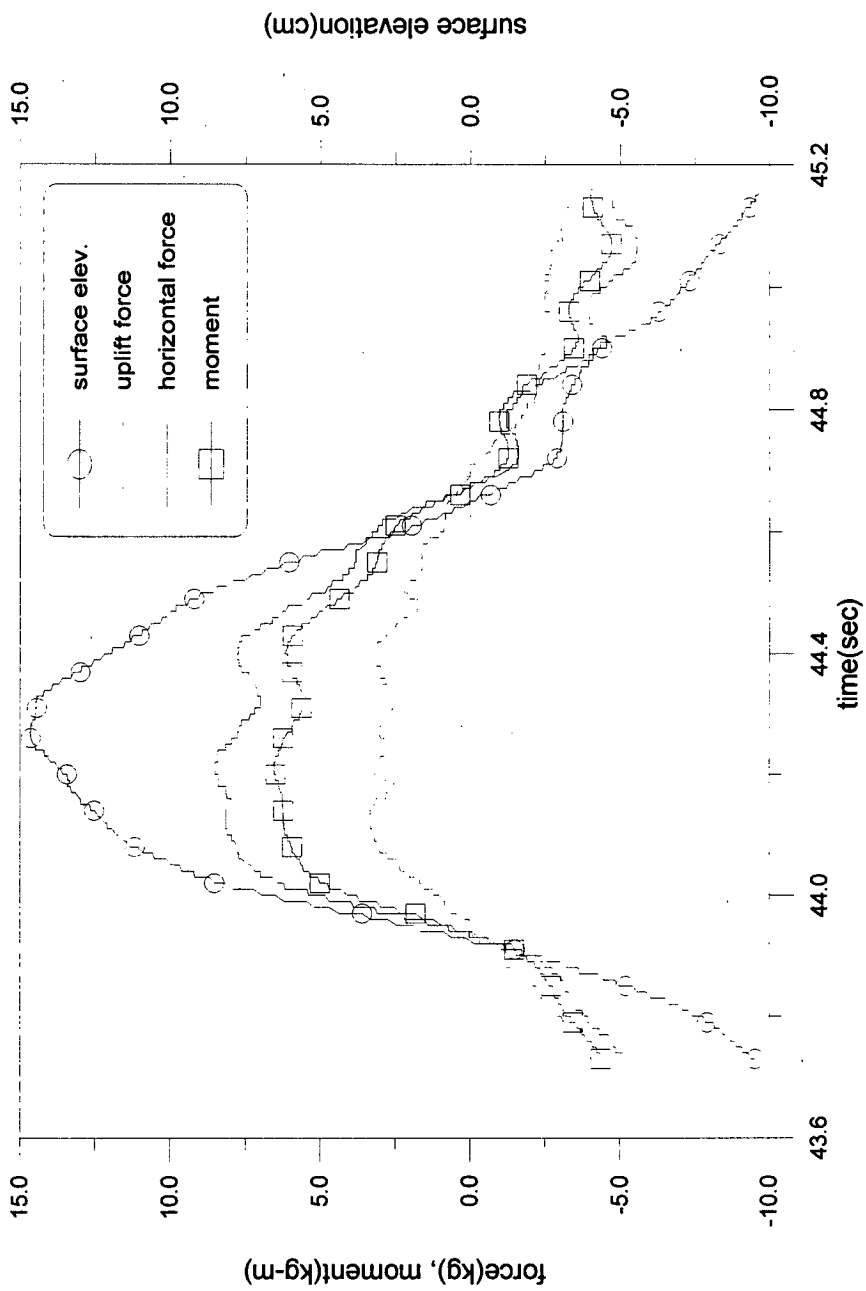


Fig. 3.3.9 Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson for 1 period

수괴와 충돌할 때 발생되며, 두 월파수괴의 충돌로 인한 전면파괴의 증가는 사실상 수평력의 증가에 크게 기여하지 않을 수 있음을 의미한다. 즉, 원호수로 방파제에 독특한 원호수로 상부에서의 두 월파수괴의 충돌로 인한 부수적인 월파 저지 메카니즘은 적어도 수평파력의 크기 관점에서는 원호수로형 케이슨의 안정성에 불리한 역할을 수행하는 징후를 아직 발견하지 못했음을 의미한다 하겠다.

5. 무공 케이슨과 원호수로 케이슨에 작용하는 파력의 비교

Table 3.3.2에는 무공 케이슨과 원호수로 케이슨에 작용하는 최대 수평파력과 최대 양파력을 비교하였다. 여기 제시된 4개씩의 값들은 한 번의 실험중에 재현된 4개의 개별파에 의한 관측치들이며 무공케이슨과 원호수로형 케이슨의 실험은 동시 관측된 것은 아니나 개략 비교를 위해 함께 제시한 것이다. 여기서, 최대 수평파력에는 어떤 일정한 경향을 발견하기 어려우나 본 실험 조건 내에서 최대 양파력은 무공 케이슨에 비해 원호수로 케이슨의 경우에서 23%~35% 정도 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

본 실험은 기존 모형을 이용한 개략 실험으로서 사용된 3분력 검출기의 작동 범위가 100kg 정도임에 비해 실제 관측된 파력의 범위는 이의 1/10 정도의 범위에 불과했다. 따라서, 향후 단면 형상의 변화에 따른 작용 파력의 변화 특성을 정밀 평가하기 위해서는 모형에서 파력을 받는 면적을 더 크게 함으로써 관측치들의 신뢰성을 향상시킬 필요가 있다 하겠다.

Table 3.3.2 Wave forces acting on the non-perforated wall caisson and CCB according to the wave conditions

파력 파랑	수평 파력(kg)		양파력(kg)	
	무공	원호수로	무공	원호수로
T=1.2s H=9cm	5.42	5.62	2.39	1.56
	5.27	5.42	2.39	1.61
	5.42	5.42	2.39	1.61
	5.37	5.81	2.39	1.61
T=1.4s H=9cm	6.05	5.52	2.98	2.00
	6.15	5.42	2.98	2.00
	6.05	5.42	2.98	2.00
	6.05	5.52	2.98	2.00
T=1.4s H=12cm	7.76	8.54	3.32	2.54
	7.76	8.50	3.56	2.54
	7.76	8.54	3.56	2.54
	7.76	8.54	3.56	2.54
T=1.6s H=12cm	8.54	8.15	4.35	3.22
	8.5	7.96	4.35	3.22
	8.5	7.86	4.35	3.22
	8.54	7.86	4.35	3.22
T=1.6s H=14cm	8.94	8.54	4.54	3.32
	8.64	8.50	4.54	3.32
	8.64	8.54	4.74	3.32
	8.64	8.50	4.64	3.32

제4절 반사 및 원호수로내 공진 특성 모의

1. 개요

원호수로형 해수교환 방파제의 해수교환 성능은 수로내의 공진현상에 의해 크게 좌우되게 된다. 수리실험 결과에 의하면 공진조건 부근에서 수로내 수위의 증폭현상이 발생하고 이에 비례하여 항내 유입수가 증가되는 것을 알 수 있으며, 이와 더불어, 공진조건 부근에서 반사율이 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 공진현상은 선형 포텐셜 이론에 근거한 간단한 이론모형에 의하여 확인된 바 있다 (과학기술처, 1996). 본 방파제의 주된 목적이 항내로 외해의 신선한 해수를 지속적으로 공급해 주는 것인 만큼 원호수로 내의 수위 증폭은 대단히 중요한 의미를 지닌다.

본 절에서는 이러한 수위 증폭현상과 반사율 변화를 수치적으로 모의하기 위하여 개발된 Galerkin 유한요소 모형에 대하여 언급하였다. 수리실험 결과와의 비교를 통하여 수치모델의 타당성을 입증하였다.

2. 수학적 모형

파동장의 유체입자의 거동은 일반적으로 Navier-Stokes의 방정식으로 나타낼 수 있으나 이를 이용하여 원호수로 방파제의 기본적인 수리특성을 파악한다는 것은 매우 비경제적이라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 유체를 비압축성, 비점성으로 가정하고 비회전류를 가정하는 포텐셜 이론을 사용하여 유체입자의 거동을 모형화하였다. 또한, 입사파랑의 파고가 작다는 가정 하에 자유수면에서의 경계조건을 단순화한 선형이론을 사용하였다. 이 이론에 의하면 원호수로내를 포함한 전 파동장을 다음의 Laplace 방정식으로 나타낼 수 있으며,

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (3.4.1)$$

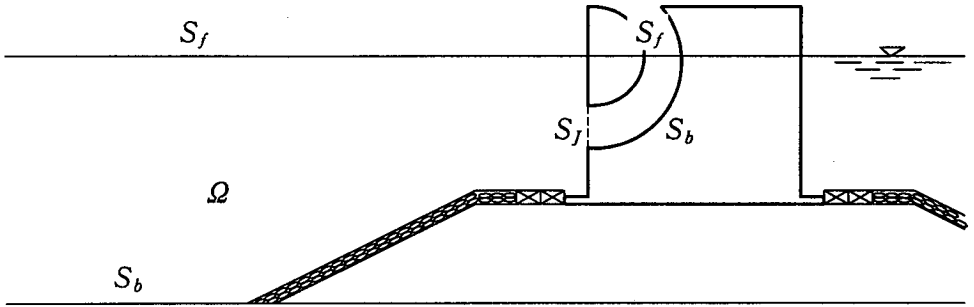


Fig. 3.4.1 Definition of an analyzed region and boundaries.

해석영역의 각 경계면에서는, 즉, 자유수면(S_f) 및 불투과 경계면(S_b)에서 다음과 같은 경계조건이 주어진다 (Fig. 3.4.1 참조).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \Phi \quad \text{on } S_f \quad (3.4.2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_b \quad (3.4.3)$$

원호수로 입구(S_j)에서는 단면 급축소/급확대에 의하여 발생하는 에너지 손실을 고려하기 위하여 다음과 같은 두 정합 조건식을 도입하였다.

$$u_1 = u_2 \quad (3.4.4)$$

$$\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} f_e u_2 |u_2| + \int_l \frac{\partial u_2}{\partial t} dl \quad (3.4.5)$$

여기서, u 와 p 는 유속과 동압력을 나타내며 하첨자 1과 2는 각각 수로입구에서의 외부 및 내부를 나타낸다. ρ 는 유체의 밀도, f_e 는 단면 변화에 따른 에너지 손실계수를 나타내며, l 은 입구에서 형성되는 제트류의 길이를 의미한다.

주파수 영역에서 해를 보다 효율적으로 구하기 위하여 식(3.4.5) 우변의 마지막

항은 제트류 상의 수입자의 가속도는 일정한 것으로 가정하였고, 두 번째에 나타난 비선형 항은 Lorentz 변환을 사용하여 다음과 같이 선형화하였다.

$$\frac{1}{2} f_e u_2 |u_2| = \frac{1}{2} \alpha u_2 \quad (3.4.6)$$

여기서, α 는 선형화된 손실계수로 유속의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = \frac{8}{3\pi} \overline{u_2} \quad (3.4.7)$$

여기서 $\overline{u_2}$ 는 u_2 의 진폭(amplitude)을 나타낸다.

식 (3.4.4)와 선형화된 식(3.4.5)를 속도 포텐셜로, Φ 를 이용하여 정리하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_2}{\partial n} \quad (3.4.8)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial n} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\left(1 + \frac{i\alpha}{2\omega}\right)} \quad (3.4.9)$$

여기서, $\partial/\partial n$ 은 경계면에서의 외향법선 방향의 미분을 의미한다.

방파제로부터 반사된 파는 외부로 진행해 나가고 다시 반사되어 돌아오지 않는다는 다음의 방사경계조건을 만족해야 한다.

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \Phi^S}{\partial r} - ik_0 \Phi^S \right) = 0 \quad \text{on } S_r \quad (3.4.10)$$

여기서, Φ^S 는 반사된 파의 포텐셜을 의미하며, S_r 은 방파제로부터 아주 멀리 떨어진 경계면을 나타낸다.

3. 유한요소 모형

가. 영역의 분할

외해로부터 내습하는 파랑을 유한요소기법으로 적절히 모형화하기 위하여 파동장을 Fig. 3.4.2와 같이 두 영역으로 분리하였다. 즉, 방파제를 포함한 내부영역(주 관심 영역)과 입사파가 내습하는 쪽의 외부영역으로 나누어, 외부영역에서는 수심이 일정한 것으로 가정하였다. 따라서, 파가 입사하는 쪽의 외부영역에서는 파동장 유체입자의 거동은 기지의 입사파에 의한 거동성분과 미지의 반사파에 의한 거동성분의 합으로 나타낼 수 있다. 결국, 내·외부 영역의 경계면에서는 다음과 같은 정합조건을 만족해야 한다.

$$\phi = \phi^S + \phi^I \quad \text{on } S_I \quad (3.4.11)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = - \frac{\partial(\phi^S + \phi^I)}{\partial n} \quad \text{on } S_I \quad (3.4.12)$$

여기서, ϕ^I 는 주어진 입사파 속도 포텐셜을 나타낸다.

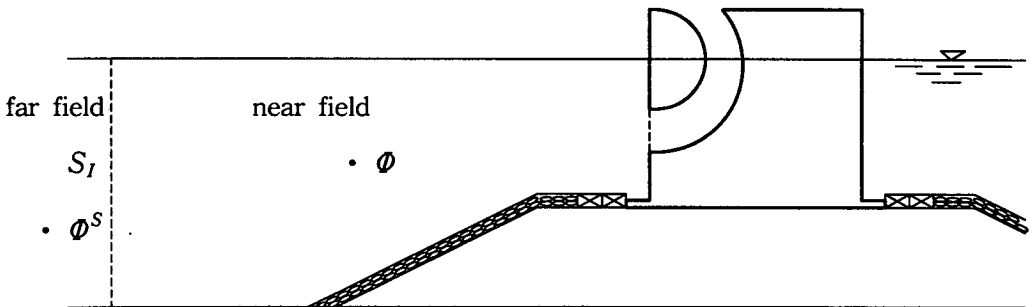


Fig. 3.4.2 Division of an analyzed region and field variables.

나. 유한요소 근사

상기의 경계치 문제를 유한요소기법으로 근사하기 위해서 Galerkin 기법을 이용하였다. 즉, 파동장의 수입자의 거동을 나타내는 변수, Φ 를 다음과 같이 보간하고,

$$\Phi = N^T \bar{\Phi}_e \quad (3.4.13)$$

보간함수를 가중함수로 사용하는 Galerkin 기법을 적용하면 미분방정식으로 표시된 이 경계치 문제는 다음과 같은 연립방정식으로 변환된다.

$$\sum_e K^e \bar{\Phi}_e = \sum_e f_{S_i}^e \quad (3.4.14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} K^e &= \int_{\Omega^e} (N_{,x} N_{,x}^T + N_{,z} N_{,z}^T) d\Omega \\ &\quad - \int_{S_i^e} \frac{\omega^2}{g} N N^T dS_i \\ &\quad - \int_{S_j^e} \frac{1}{\left(l + \frac{i\alpha}{2\omega}\right)} N N^T dS_j \end{aligned} \quad (3.4.15)$$

$$f_{S_i}^e = \int_{S_i^e} N \frac{\partial \Phi^I}{\partial n} dS_i \quad (3.4.16)$$

여기서 하첨자 $,x$ 와 $,z$ 는 x 및 z 방향의 미분을 의미한다.

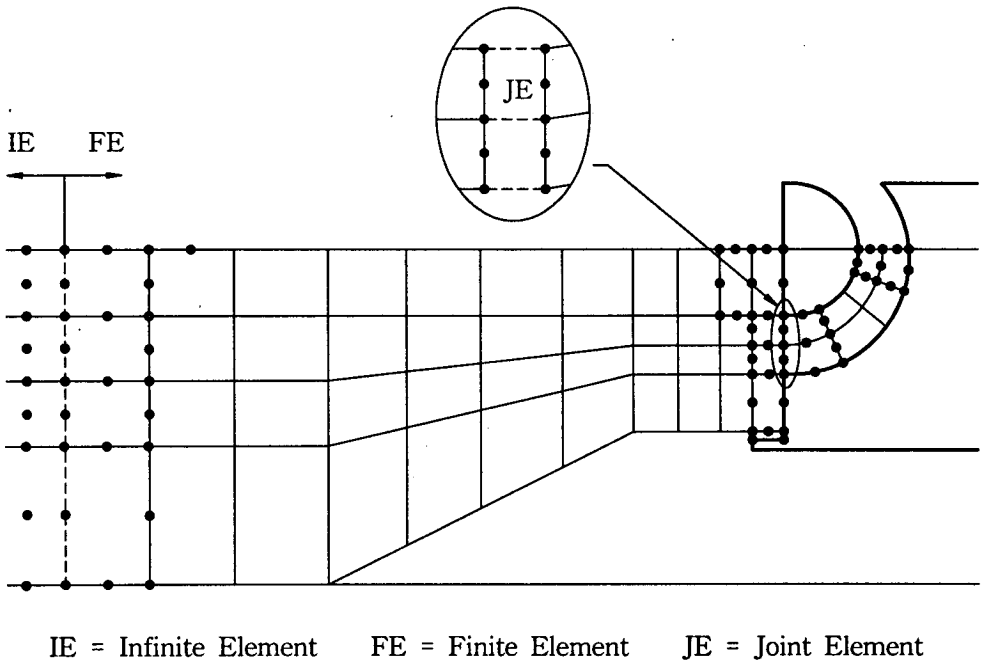


Fig. 3.4.3 Conceptual finite element mesh including IE's, FE's and JE's.

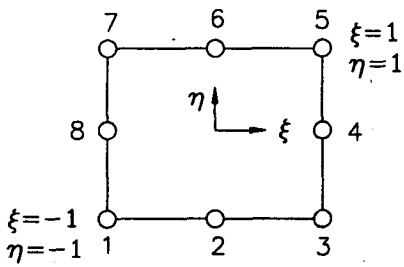
다. 유한, 무한 및 접합요소

해석영역의 내부영역은 8절점 등매개변수 유한요소로 모형화하였으나, 외부영역은 효율적인 해석을 수행하기 위하여 무한요소로 분할하였다. Fig. 3.4.3에 개념적인 유한요소망도를 제시하였다. 영역분할에 사용된 8절점 유한요소의 형상과 6절점 무한요소의 형상 및 6절점 접합요소를 Fig. 3.4.4에 나타내었다.

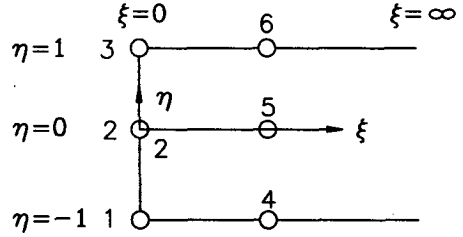
유한요소의 보간함수는 다음과 같이 주어지며,

$$N = N(\xi, \eta) \tag{3.4.17}$$

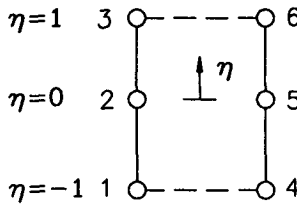
무한요소의 보간함수는 진행파와 첫 번째 소멸파의 거동을 사용하여 결정된 다음과 같은 식을 사용하였다(박, 1991).



(a) 8-noded FE



(b) 6-noded IE



(c) 6-noded JE

Fig. 3.4.4 Definition of element coordinate systems.

$$\mathbf{N} = \begin{Bmatrix} M_i(\xi) \mathbf{N}(\eta) \\ M_o(\xi) \mathbf{N}(\eta) \end{Bmatrix} \quad (3.4.18)$$

여기서, $\mathbf{N}(\eta)$ 와 $\mathbf{N}(\xi, \eta)$ 는 2차 함수로 된 보간함수벡터로 Fig. 3.4.4와 같이 좌표계가 정의된 경우 벡터의 각 요소는 다음과 나타내진다.

$$\mathbf{N}(\eta) = \begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\eta}{2}(\eta-1) \\ -(\eta+1)(\eta-1) \\ \frac{\eta}{2}(\eta+1) \end{Bmatrix} \quad (3.4.19)$$

$$N(\xi, \eta) = \begin{Bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \\ N_5 \\ N_6 \\ N_7 \\ N_8 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(1+\xi+\eta) \\ \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta) \\ \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1) \\ \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2) \\ \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) \\ \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \\ -\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(\xi-\eta+1) \\ \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2) \end{Bmatrix} \quad (3.4.20)$$

그리고, 무한요소의 보간함수의 $M_i(\xi)$ 와 $M_o(\xi)$ 는 다음과 같이 진행파와 첫 번째 소멸파의 거동의 함수로 표시된다.

$$\begin{Bmatrix} M_i(\xi) \\ M_o(\xi) \end{Bmatrix} = \mathbf{F}^T \begin{Bmatrix} f_0(\xi) \\ f_1(\xi) \end{Bmatrix} \quad (3.4.21)$$

여기서,

$$f_0(\xi) = e^{ik_0(\xi+r_i) - \varepsilon r_i} \quad (3.4.22)$$

$$f_1(\xi) = e^{-k_1(\xi+r_i)} \quad (3.4.23)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} e^{ik_0 r_i} & e^{-k_1 r_i} \\ e^{ik_0 r_o} & e^{-k_1 r_o} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.4.24)$$

ε = 인위적으로 도입된 감쇠계수 ($0 < \varepsilon \ll k_0$); k_1 = 첫 번째 소멸파의 파수; r_i 와 r_o = 각각 원점으로부터 무한요소 내측절점과 외측절점까지의 거리를 나타낸다. 추가적인 감쇠계수, ε 을 도입한 이유는 무한요소의 시스템 행렬구성시 변경

방향으로의 적분치를 존재하게 하기 위한 것이다. 실제의 문제에서 유체의 점성과 해저면과의 마찰에 의한 손실이 예상되는 만큼 타당한 것으로 판단된다.

식 (3.4.21)의 $M_i(\xi)$ 와 $M_o(\xi)$ 는 다음과 같이 외부영역의 산란파 속도포텐셜의 r 방향 거동을 진행파와 첫 번째 소멸파 성분으로 표시하여 구한 것이다.

$$\Phi_s \approx a e^{ik_0 r} + b e^{-k_1 r} \quad (3.4.25)$$

이와 같이 표시된 산란파의 거동은 무한경계면에서 방사경계조건을 만족하게 된다.

원호수로 입구에서 주워지는 두 개의 정합조건은 식(3.4.15)의 세 번째 항으로 표시되고 이는 다음과 같은 수로 외부와 내부를 연결해 주는 접합요소로 나타낼 수 있다.

$$N = \begin{Bmatrix} -N(\eta) \\ N(\eta) \end{Bmatrix} \quad (3.4.26)$$

여기서, 위에 나타난 보간함수 벡터는 입구의 외부에 위치(좌측)한 절점에 관한 것이고 아래는 수로 내부 절점(우측)에 관련된 보간함수벡터이다(Fig. 3.4.4 참조).

4. 수치모델의 검증

가. 마운드가 없는 원호수로 방파제

모델의 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 3.4.5에 보인 바와 같은 마운드가 없이 원호수로형 케이스 만이 존재하는 경우에 대한 기존의 수리실험 결과와 비교하였다(과학기술처, 1994). 수리실험용 파랑으로는 월파가 발생하지 않는 조건에서 파고 3cm급(WC1)과 5cm (WC2)급 두 조건이 사용되어졌다.

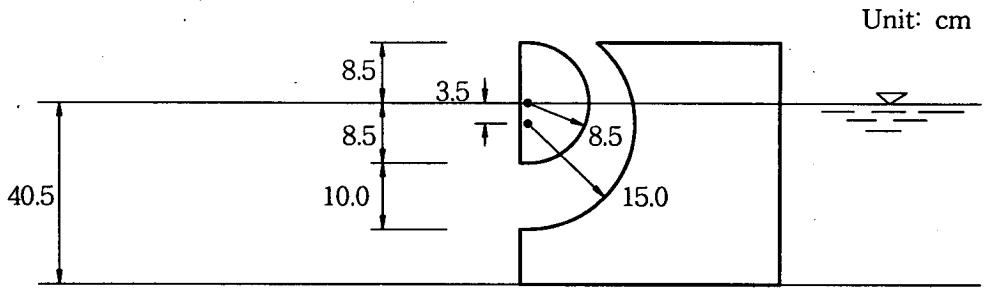


Fig. 3.4.5 An example structure of CCB w/o the rubble mound.

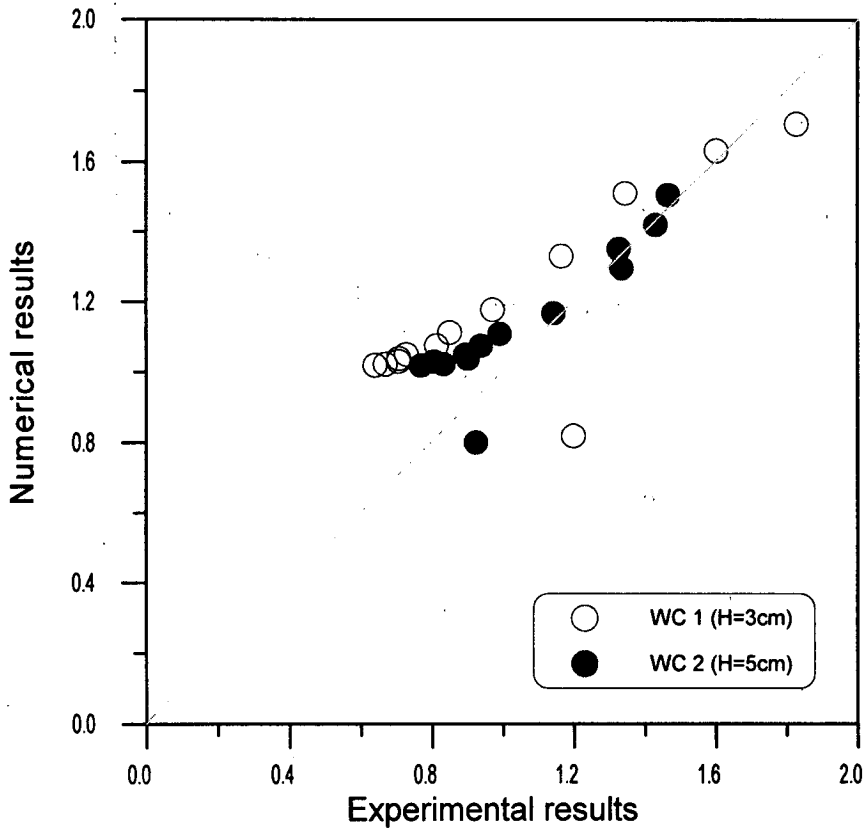


Fig. 3.4.6 Comparison of numerical and experimental results for wave runup in the circular channel.

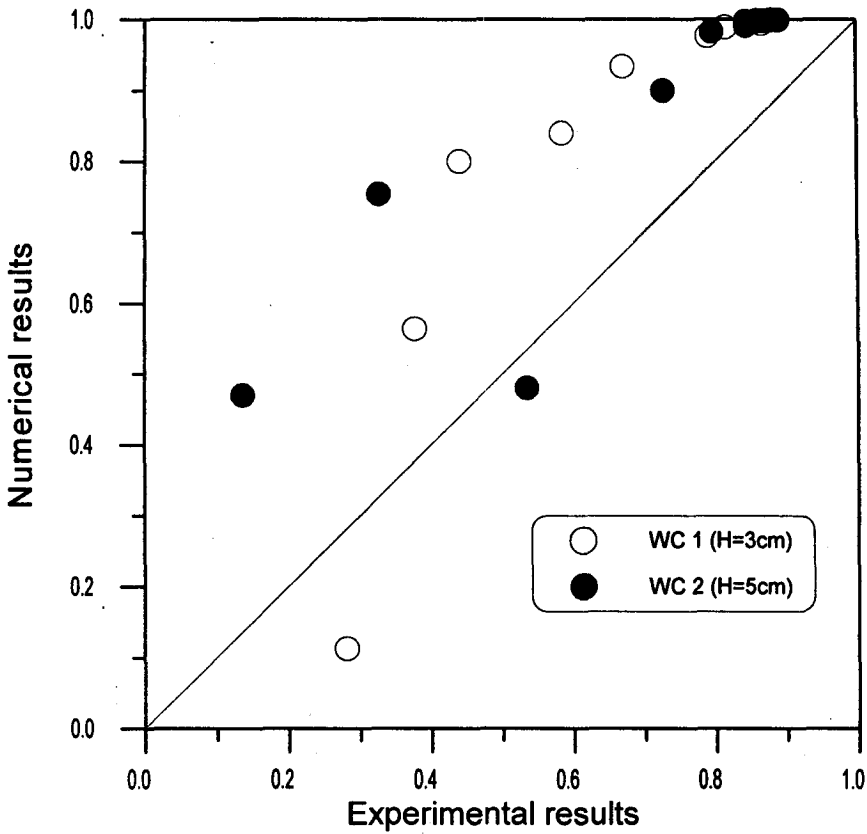


Fig. 3.4.7 Comparison of numerical and experimental results for reflection coefficients.

Fig. 3.4.6과 3.4.7에 보인 것은 실험과 수치계산으로부터 얻어진 원호수로내 처울림 높이와 반사율을 각각 수평 및 수직축으로하여 도시한 것으로 두 결과가 정확히 일치하면 대각선 상에 위치하게 되며, 수치실험결과가 크면 대각선의 상단에 위치하게 된다. 그림에 보인 바와 같이 원호수로 내의 처울림 높이에 대한 비교결과는 대각선 상에 잘 모여 있으나 반사율의 경우는 많은 경우가 대각선 위쪽에 놓여 있음을 알 수 있다. 이 결과는 본 모델이 원호수로 내의 수위 증폭현상은 비교적 잘 나타내고 있으나 방파제의 소파성능은 과소평가하고 있다는 것을 나타내는 것이다. 그러나, 이 두 결과를 무차원 주파수를 수평축으로 하여 다시 도시화한 Fig. 3.4.8과 Fig. 3.4.9를 보면, 본 모델에 의해 예측된 반사율이 수치실험 결

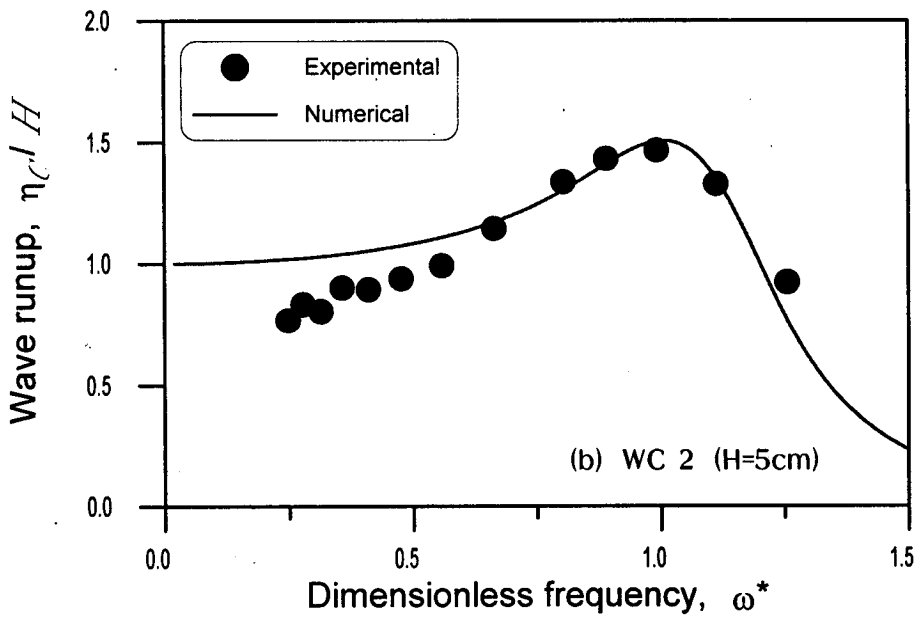
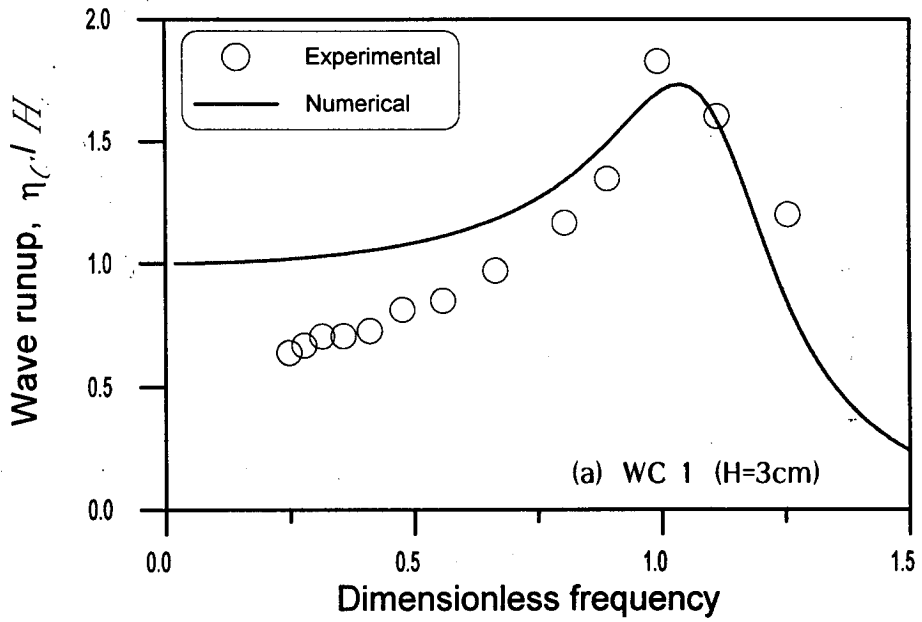


Fig. 3.4.8 Variation of wave runups in the circular channel.

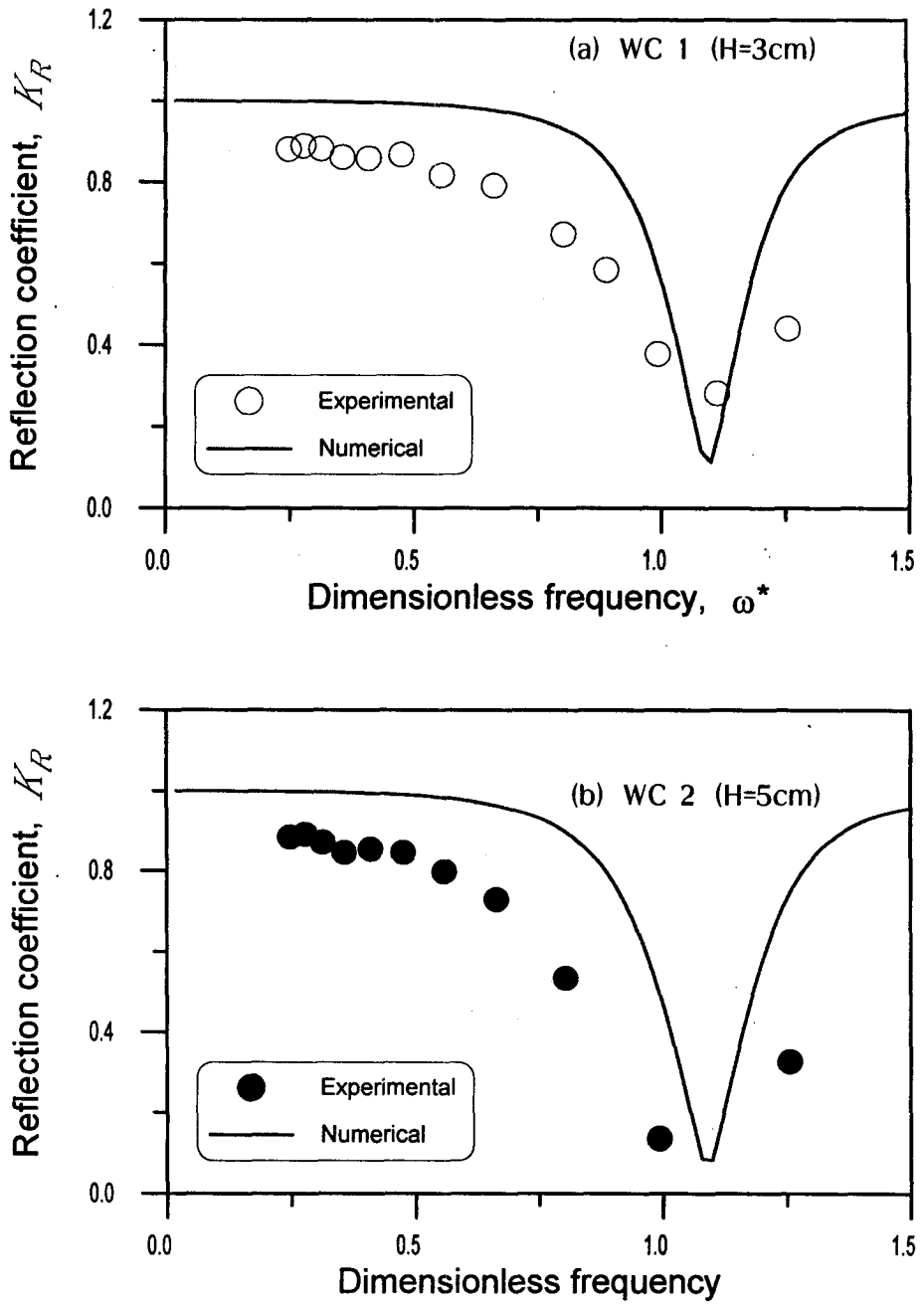


Fig. 3.4.9 Variation of reflection coefficients in the circular channel.

과와 크게 다르지 않다는 것을 알 수 있다. 값에서는 차이가 있지만 공진조건 부근에서 반사율이 최저가 되고 양쪽으로 갈수록 증가되는 경향이 수치실험의 경우와 완전히 일치한다. 또한, 수치실험시 예상되는 각종 에너지 손실을 생각한다면 수치실험의 결과는 상당히 타당한 것으로 판단된다.

나. 마운드가 있는 원호수로 방파제

보다 실제의 경우에 가까운 경우에 대한 적용성의 검토를 위하여 본 장의 제2절에서 언급한 바 있는 마운드가 있는 경우에 대한 수치실험을 실시하였다 (Fig. 3.4.10 참조).

Fig. 3.4.11 - 3.4.15에 실험파고 조건에 따라서 원호수로내 최대 처울림 및 반사율을 비교하여 나타내었다. 월파가 발생하지 않는 파고가 작은 조건에서는 마운드가 없는 경우와 같이 수치실험과 수치모델의 결과가 양호하게 일치함을 볼 수 있으며, 월파가 발생하는 파고가 큰 경우(파고 9cm 급 이상: H09, H12)에도 잘 맞는다고는 할 수 없으나 반사율은 크게 틀리지 않게 예측하고 있음을 볼 수 있다. 원호수로내 파고의 증폭율에 대한 실험치가 계산치가 보다 작은 이유는 앞서서도 언급한 바 있지만 원호수로의 유출구가 천단고로 제한되어 있기 때문이다. 다시 말하면 수치실험시 계측된 결과는 수로내 최대증폭고는 천단고로 제한된다고 할 수 있다. 수치모델에서는 선형모델인 관계로 이의 영향을 고려하지 못하고, 다만 이를 넘는 것은 절삭해 버리는 방식을 취하여 아주 간단하게 고려할 수도 있다.

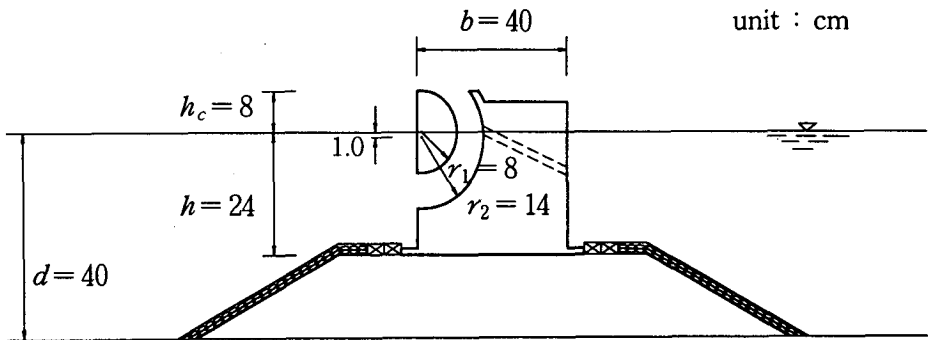


Fig. 3.4.10 An example structure of CCB with the rubble mound.

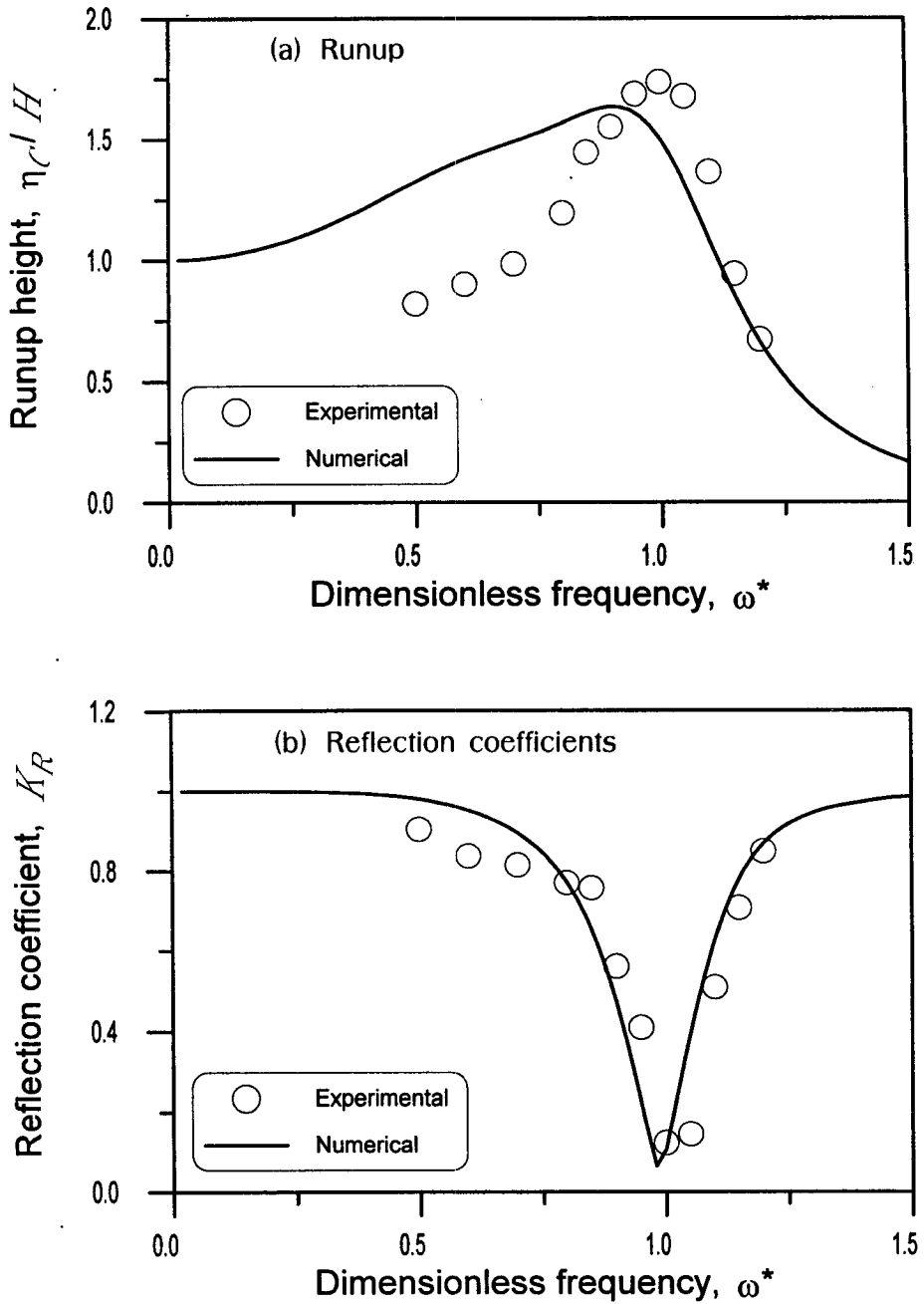


Fig. 3.4.11 Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H03 ($H = 3\text{cm}$).

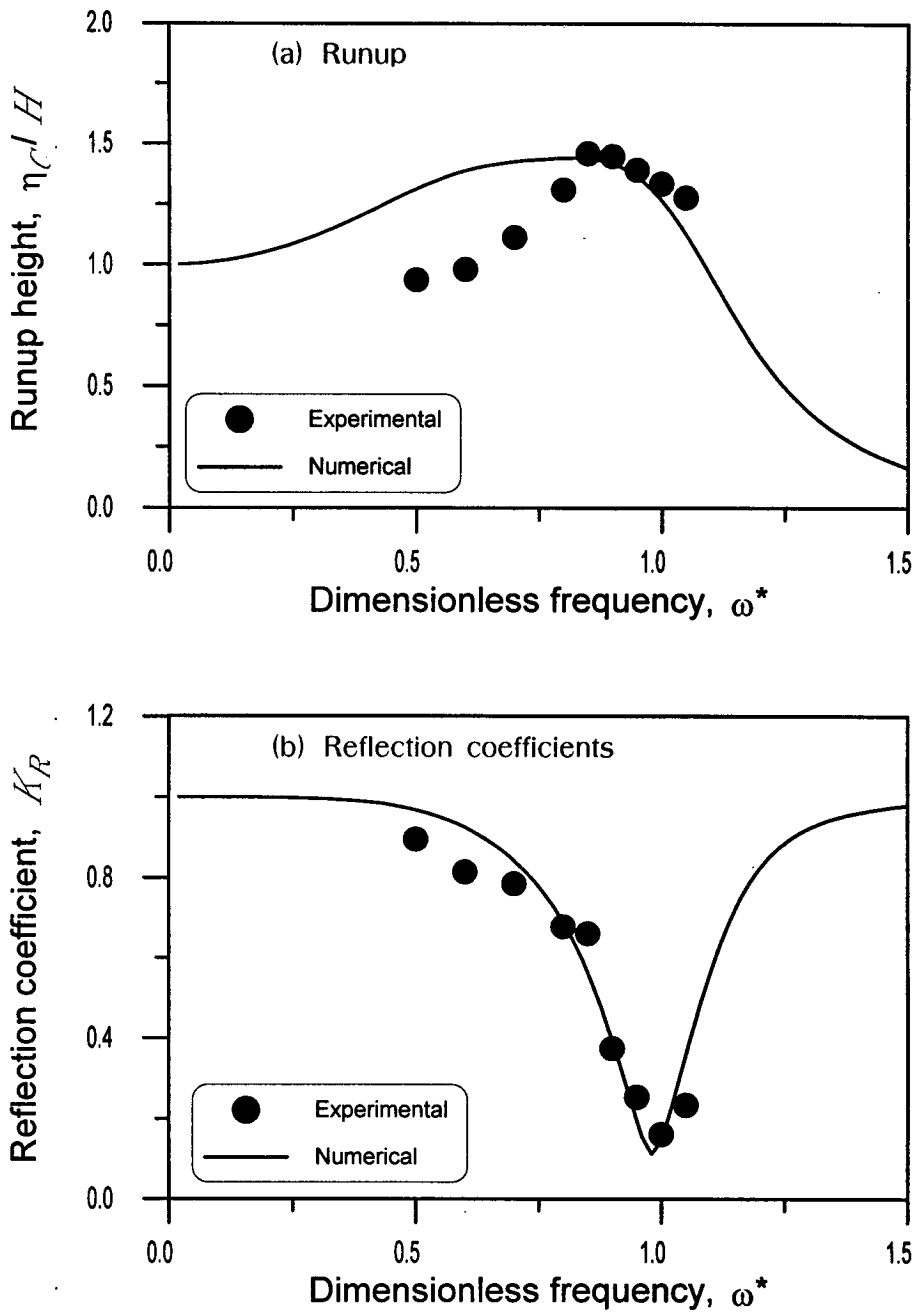


Fig. 3.4.12 Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H05 ($H = 5\text{cm}$).

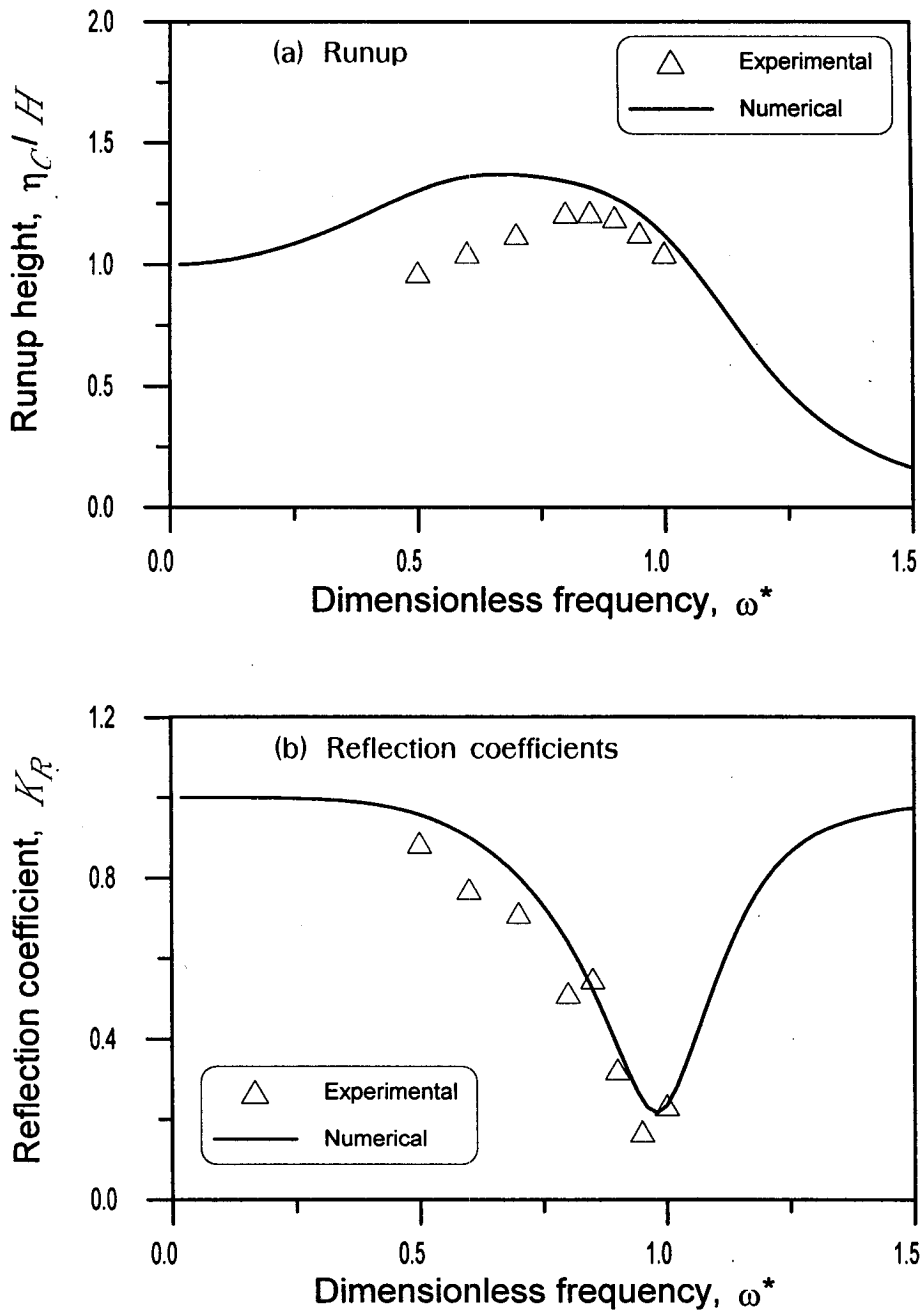


Fig. 3.4.13 Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H07 ($H = 7\text{cm}$).

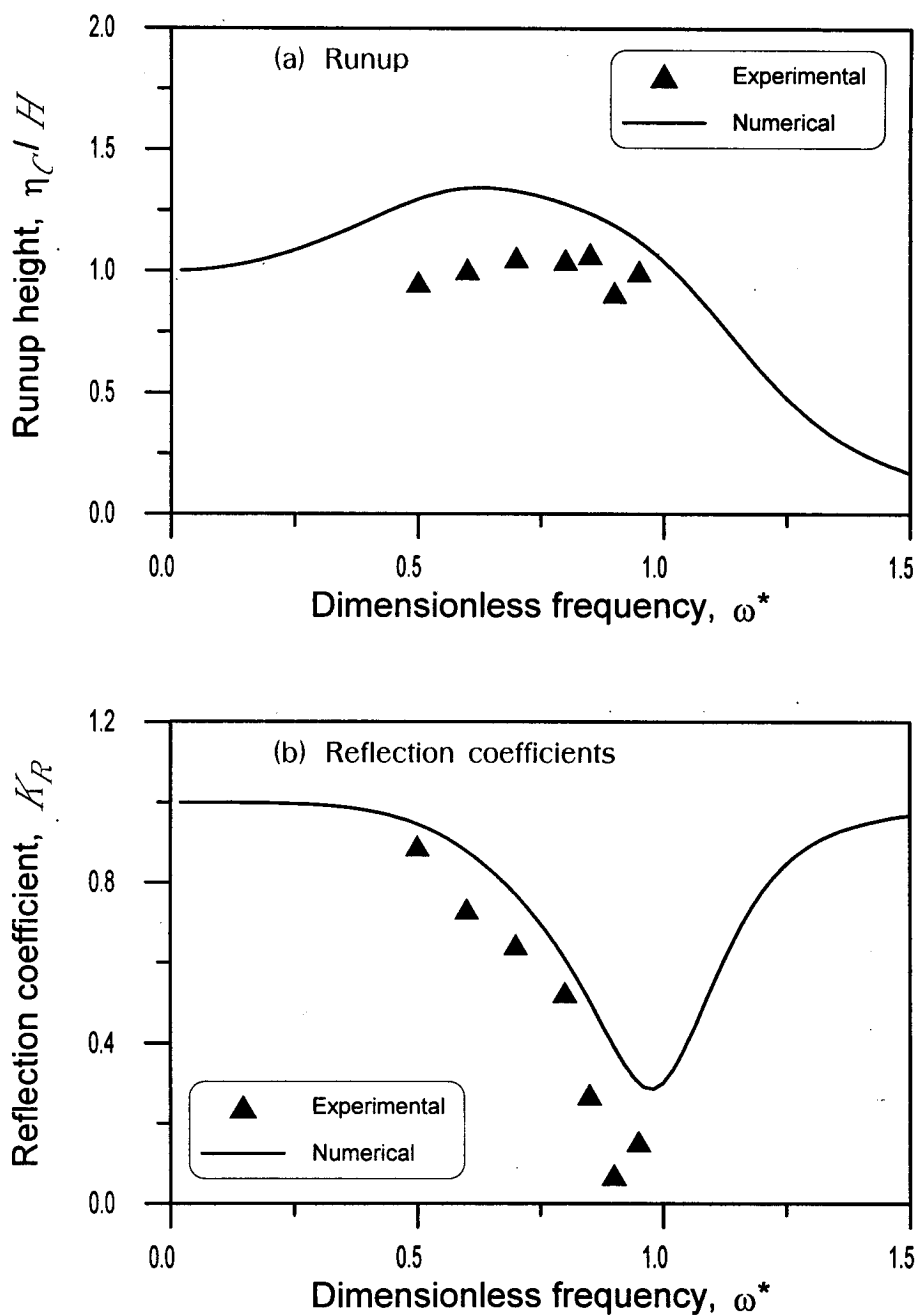


Fig. 3.4.14 Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H09 ($H = 9\text{cm}$).

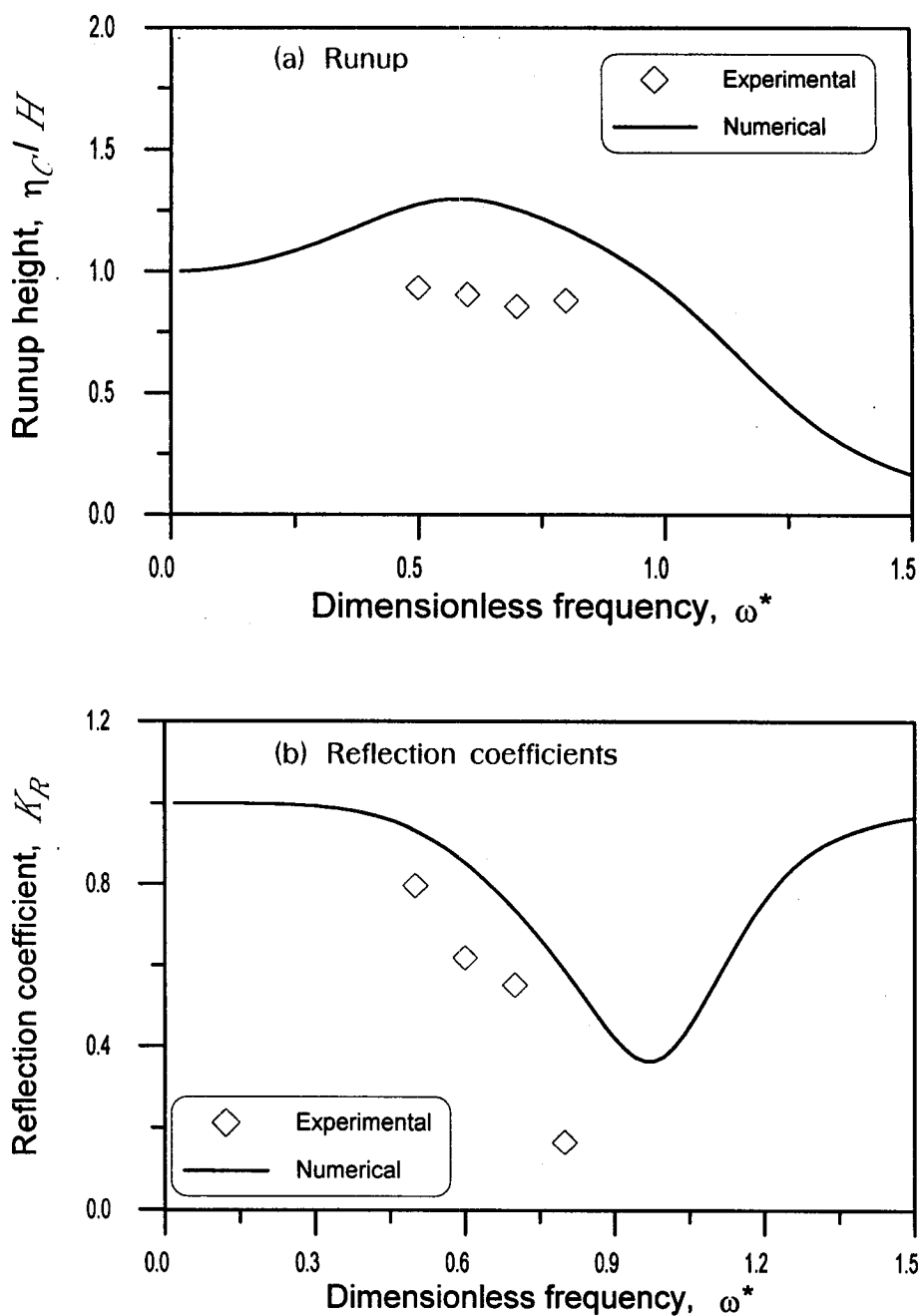


Fig. 3.4.15 Wave runups and reflection coefficients for the test condition, H12 ($H = 12\text{cm}$).

제5절 지반의 간극수압 및 응력분포

1. 개요

지반에 설치된 모든 구조물은 지반과 상호작용을 일으키게 된다. 특히, 방파제, 호안 등의 연안구조물들은 추가적으로 파랑과 상호작용을 일으켜 더욱 복잡하게 된다. 구조물이 지반에 단단히 고정되어 있는 경우에는 움직임에 관계된 상호작용은 그다지 중요하지 않으나 연약한 지반에 설치된 경우나 부유식 구조물이 위치한 경우는 상호작용을 고려하지 않으면 좋은 결과를 예측할 수 없다.

본 절에서는 앞선 연구에서 개발된 유한요소 모델(과학기술처, 1996)을 이용하여 계산된 원호수로형 방파제 주변의 간극수압 및 응력분포 변화에 대해서 언급하였다. 해저지반 토질의 변화, 입사파 주기의 변화에 따른 지반의 거동변화에 대해서 분석을 실시하였다.

2. 수학적 모형

전년도에 개발된 Galerkin 유한요소 수치모델의 수학적 모델을 다시 한번 살펴보면 다음과 같다.

다공질의 탄성 해저 지반위를 전파해 나가는 파랑은 Fig. 3.5.1에 보인 바와 같이 수심의 변화뿐만 아니라 지반의 움직임에 의해서 변형을 하게 된다. 또한 구조물에 의해 추가적으로 반사 또는 회절현상 등이 발생하게 된다. 해저지반과 구조물의 표면에는 이렇게 변형된 파랑에 의한 동수압이 작용되어 상호작용을 일으키게 된다. 이러한, 파랑-지반-구조물의 상호작용을 해석하기 위한 수학적 모형을 수립하기 위하여 대상영역을 크게 유체영역과 지반과 구조물을 포함하는 고체영역으로 분리하였다. 해석을 효율성을 위해 선형이론을 사용하여 각 영역을 모형화하였다. 즉, 유체영역은 통상의 Laplace 방정식을 만족하는 속도 포텐셜로 나타내었으며, 고체영역은 Biot (1941, 1962)의 이상탄성이론으로 모형화하였다.

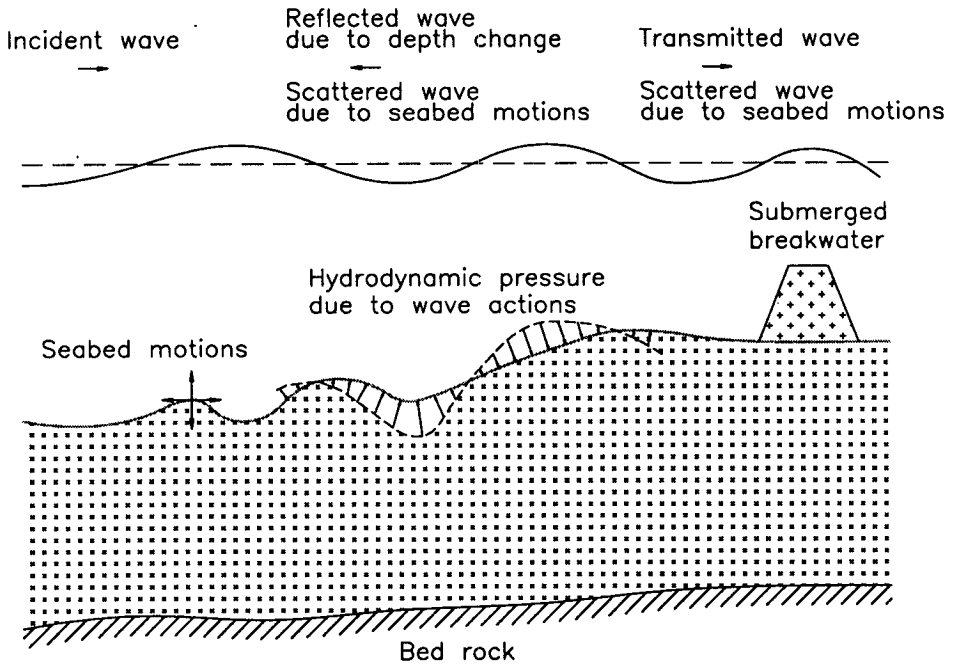


Fig. 3.5.1 Definition sketch for the Wave-seabed-structure interaction problem.

가. 파동장의 유체입자의 거동

파동장의 유체입자의 거동은 일반적으로 Navier-Stokes의 방정식으로 나타낼 수 있으나, 이를 사용하여 흙의 거동의 영향을 고려한 유체입자의 거동을 모의한다는 것은 대부분의 경우에 있어서 매우 비경제적이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 유체를 비압축성, 비점성으로 가정하고 비회전류를 가정하는 포텐셜이론을 사용하여 유체입자의 거동을 모형화하였다. 또한, 입사파랑의 파고가 작다는 가정 하에 자유수면에서의 경계조건을 단순화한 선형이론을 사용하였다. 이 이론에 의하면 파동장은 다음의 Laplace 방정식으로 나타낼 수 있으며,

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3.5.1)$$

해석영역의 각 경계면에서는, 즉, 자유수면(S_f), 무한거리에 위치한 방사경계(S_r) 및 해저면(또는 구조물 표면)(S_j)에서 다음과 같은 경계조건이 주어진다 (Fig. 3.5.2 참조).

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\omega^2}{g} \Phi \quad \text{on } S_f \quad (3.5.2)$$

$$\lim_{|x| \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial r} - ik_0 \Phi \right) = 0 \quad \text{on } S_r \quad (3.5.3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \dot{u}_n + \dot{w}_n \quad \text{on } S_j \quad (3.5.4)$$

여기서, $(\dot{u}_n + \dot{w}_n)$ 는 지반 간극수의 유체영역과의 경계면 법선방향에 대한 유속으로 불투과 고체 구조물의 표면에서는 구조물의 운동 속도와 같다.

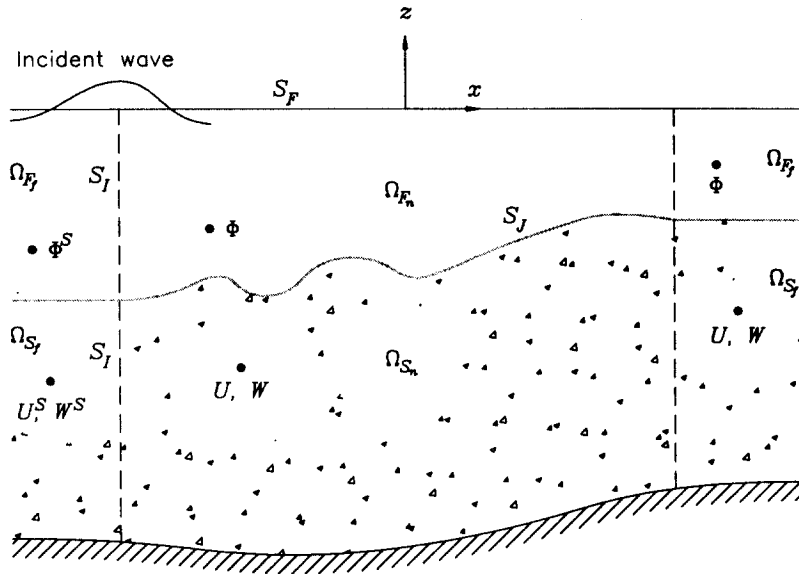


Fig. 3.5.2 Definition of analyzed regions, boundaries and field variables

나. 흙 골조와 간극수의 거동

해저면 또는 해안의 매립토 등의 거동을 정확히 나타내는 이론은 만드는 것은 매우 어렵고 또 만들었다고 해도 무수히 많은 입력자료가 요구될 것이며, 그 중 많은 자료는 불확정적인 특성을 보이게 될 것이기 때문에 이를 이용하여 수치모의를 한다는 것은 더욱 어렵다고 할 수 있다. 따라서, 복잡한 이론을 이용하기 보다는 단순하기는 하나 흙의 골조와 간극수의 기본적인 거동특성을 비교적 잘 모의할 수 있는 이론을 사용하는 것이 보다 유용할 수 있다. 본 연구에서는 압축성 유체로 포화된 다공질 지반의 거동을 Biot의 이상탄성이론을 이용하여 나타내었다(Biot, 1941, 1962).

지반 흙 골조의 변위와 간극수의 골조변위에 대한 상대변위의 복소진폭을 각각 U 와 W 벡터로 정의하였을 경우, Biot 방정식은 흙 구조전체의 동적 평형방정식과 일반화된 Darcy의 법칙 등 두 식으로 나타낼 수 있는데 이를 주파수영역에서 표시하면 다음과 같다.

$$\{\omega^2 \rho + L^T(D + \alpha^2 Q m m^T) L\} U + \{\omega^2 \rho_f + \alpha Q \nabla^2\} W = 0 \quad (3.5.5)$$

$$\{\omega^2 \rho_f + \alpha Q \nabla^2\} U + \left\{ \omega^2 \frac{\rho_f}{n} + i \omega \frac{n}{\chi} Q \nabla^2 \right\} W = 0 \quad (3.5.6)$$

여기서, ρ = 흙 전체의 밀도; ρ_f = 유체의 밀도; χ = 흙의 투수계수; n = 흙의 공극율을 나타내며, α 와 Q 는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = 1 - \frac{2\lambda + 2G}{3k_s} \quad (3.5.7)$$

$$\frac{1}{Q} = \frac{n}{k_f} + \frac{\alpha - n}{k_s} \quad (3.5.8)$$

또, 행렬 L , D , m 은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.5.9)$$

$$D = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (3.5.10)$$

$$m^T = \langle 1, 1, 0 \rangle \quad (3.5.11)$$

여기서, G = 흙의 전단계수; K_f 와 K_s = 유체와 흙의 체적탄성계수; λ = Lamé의 정수로 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{2\nu G}{1 - 2\nu} \quad (3.5.12)$$

여기서, ν 는 Poisson의 비이다.

해석영역의 각 경계면에서의 경계조건은 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉, 불투과 고정 압반과의 경계면에서는 다음과 같은 흙 골조의 거동의 구속조건과 경계면의 법선방향으로의 간극수 거동의 구속조건을 생각할 수 있으며,

$$U = 0 \quad (3.5.13)$$

$$W_n = 0 \quad (3.5.14)$$

파동장과의 접합면에서는 파동에 의해 발생하는 동수압이 다음과 같은 간극수압 및 법선방향의 총응력과 같다는 조건을 생각할 수 있다.

$$\Pi = P \quad \text{on } S_f \quad (3.5.15)$$

$$\Sigma_n = P \quad \text{on } S_f \quad (3.5.16)$$

여기서, 동수압, P 는 다음의 선형 Bernoulli 방정식으로 부터 구할 수 있다.

$$P = -i\omega\rho_f\Phi \quad (3.5.17)$$

여기서, Φ 는 고체경계면에서의 속도 포텐셜을 나타낸다.

3. 지반내의 간극수압 및 응력분포

상기의 수학적 모형을 Galerkin 유한요소 기법을 이용하여 이산화한 수치모델을 이용하여 파랑-지반-구조물의 상호작용을 고려한 해석을 실시하였다. 대상 방파제로는 Fig. 3.2.1의 방파제를 1/20 모형으로 가정했을 때의 실물로 하였다 (Fig. 3.5.3 참조).

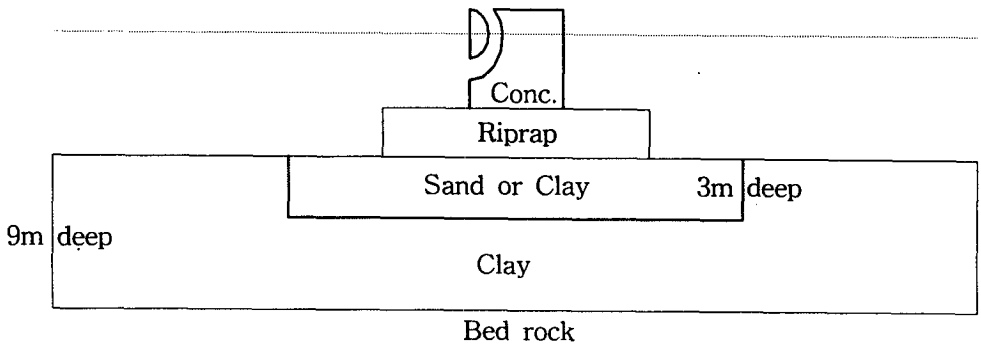


Fig. 3.5.3 An example structure of the prototype CCB.

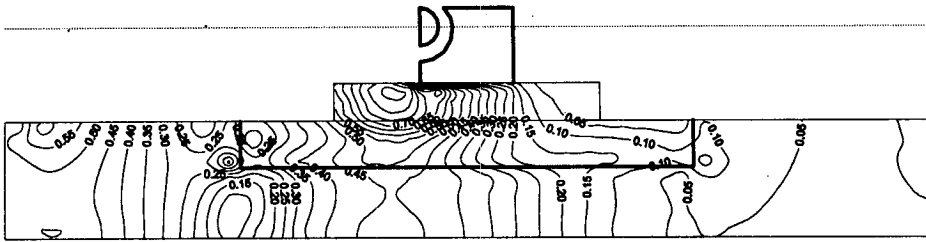
Table 3.5.1 Material properties of the prototype CCB.

	Clay (seabed)	Sand	Riprap	Conc. (Caisson)	Remarks
G (ton/m ²)	70	1300	1500	900000	
ν	0.333	0.333	0.333	0.167	
n	0.445	0.445	0.529	-	
α (m/sec)	0.000001	0.001	1.0	-	
ρ (ton/m ³)	1.9	1.9	1.74	2.0	
ρ_f (ton/m ³)	1.0	1.0	1.0	-	
K_s (ton/m ²)	3600000	3600000	3600000	-	
K_f (ton/m ²)	210000	210000	210000	-	

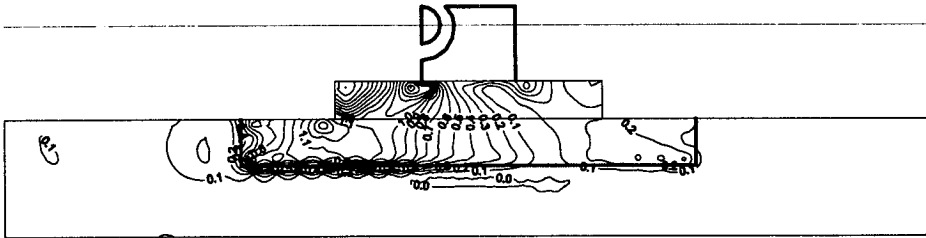
연약점토층 위에 바로 사석을 쌓고 방파제를 설치하는 경우와 일부를 모래로 치환한 후 방파제를 설치하는 경우를 예로 들어 해석을 실시하였다. 각 경우의 사석, 모래 및 해저토의 물성치는 Table 3.5.1에 보인 바와 같다. 실험파랑으로는 주기 10초, 파고 3m인 경우와 주기 8초 파고 2m인 경우를 택하였다.

Fig. 3.5.4 - 3.5.7에 지반내에 작용되는 간극수압, 수평 및 연직 방향 유효응력과 전단응력, 최대응력을 w_0H 로 무차원화하여 나타내었다. 이 응력 분포도는 동시성을 나타내는 것이 아니라 각 지점에 작용되는 최대 값에 대한 결과이다. 그림을 살펴보면 케이슨 앞 하단부에 높은 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 결과는 만약 지반이 파랑에 의해서 손상을 입는다면 전면 하단부가 제일 가능성이 높다는 것을 의미하는 것으로 볼 수 있다.

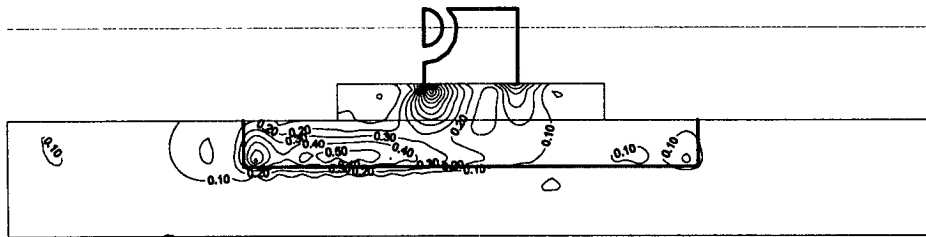
연약 해저지반을 모래로 치환한 경우(Fig. 3.5.4, 3.4.5)와 치환하지 않은 경우(Fig. 3.5.6, 3.4.6)의 결과에서는 어떤 큰 차이점을 찾아보기는 어렵고, 다만 치환하지 않은 경우가 응력 집중도가 더 높은 것으로 보여진다. 일반적으로 연약토를 모래로 치환하는 것은 자중에 의한 방파제의 장기적 침하를 방지(부등침하는 포함)하기 위한 것이므로 본 연구에서 다루는 파동에 의한 동적응력 변동문제와는 거리



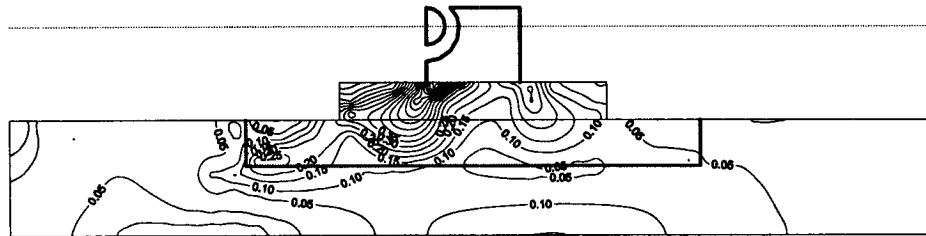
(a) Pore water pressure



(b) Effective horizontal stress

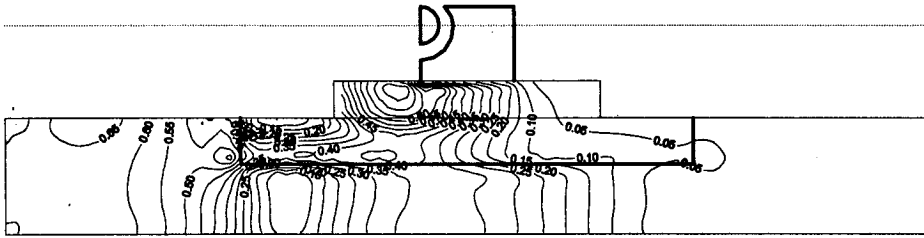


(c) Effective vertical stress

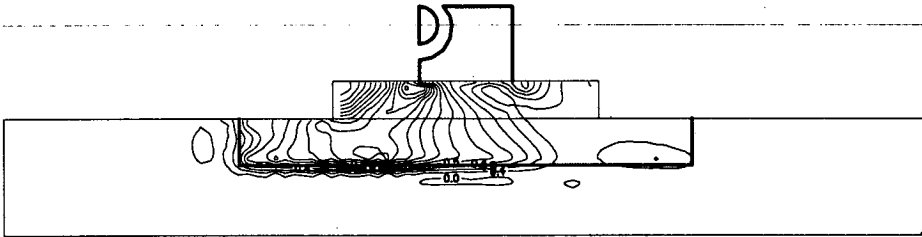


(d) Shear stress

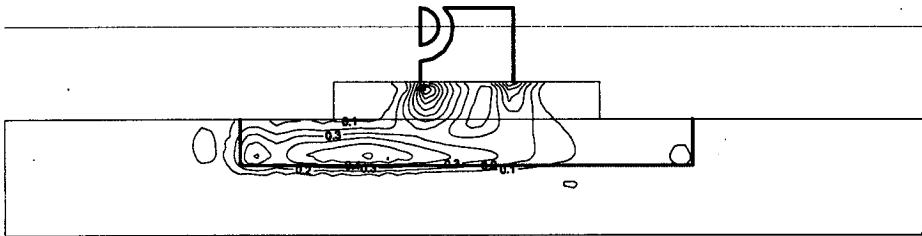
Fig. 3.5.4 Contour diagrams for normalized maximum responses in the seabed with sand layer: $T = 10$ sec, $H = 3$ m.



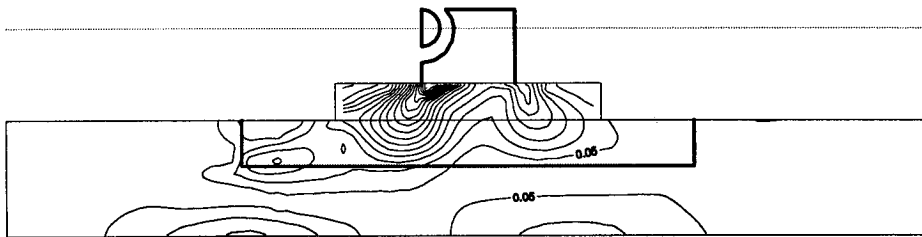
(a) Pore water pressure



(b) Effective horizontal stress

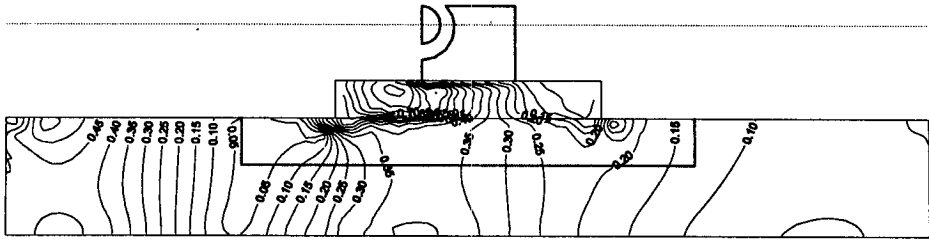


(c) Effective vertical stress

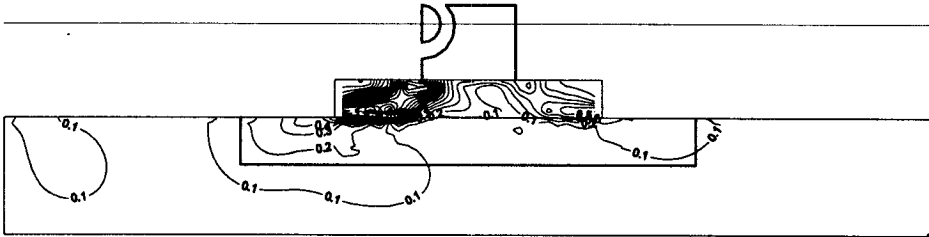


(d) Shear stress

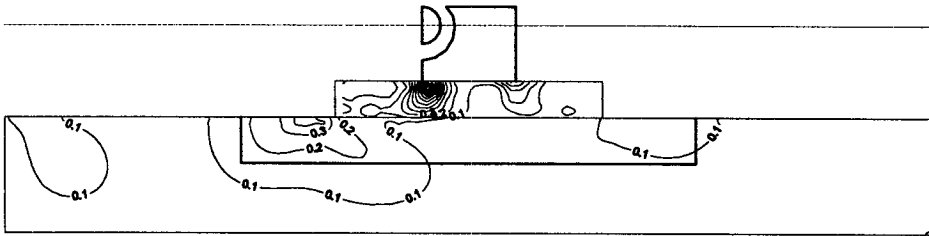
Fig. 3.5.5 Contour diagrams for normalized maximum responses in the seabed with sand layer: $T = 8$ sec, $H = 2$ m.



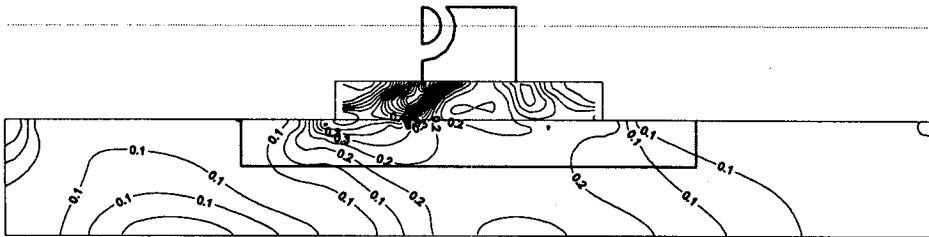
(a) Pore water pressure



(b) Effective horizontal stress

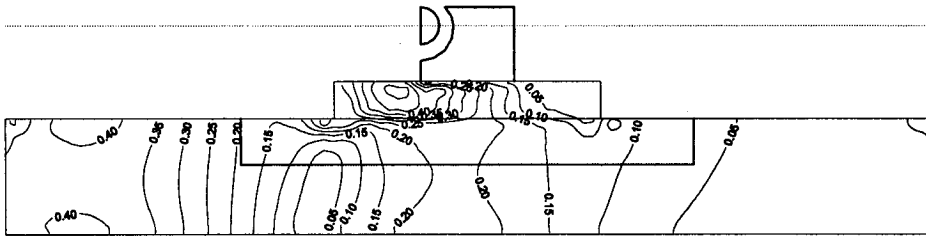


(c) Effective vertical stress

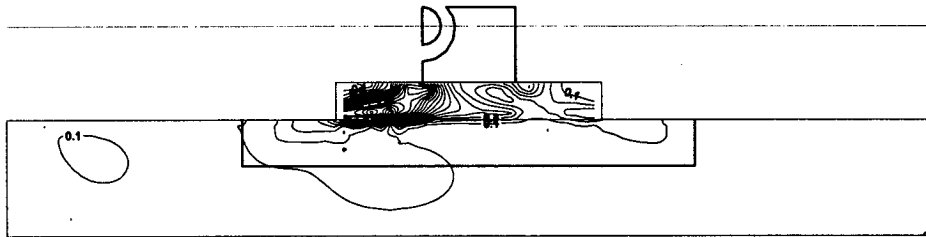


(d) Shear stress

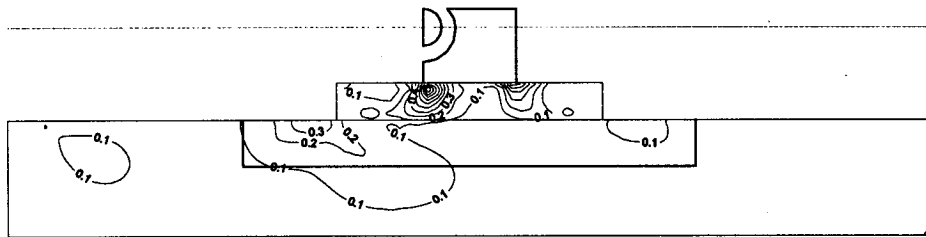
Fig. 3.5.6 Contour diagrams for normalized maximum responses in the seabed w/o sand layer: $T = 10$ sec, $H = 3$ m.



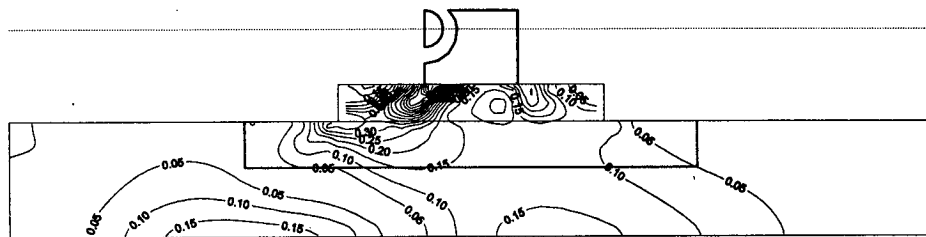
(a) Pore water pressure



(b) Effective horizontal stress



(c) Effective vertical stress



(d) Shear stress

Fig. 3.5.7 Contour diagrams for normalized maximum responses in the seabed w/o sand layer: $T = 8$ sec, $H = 2$ m.

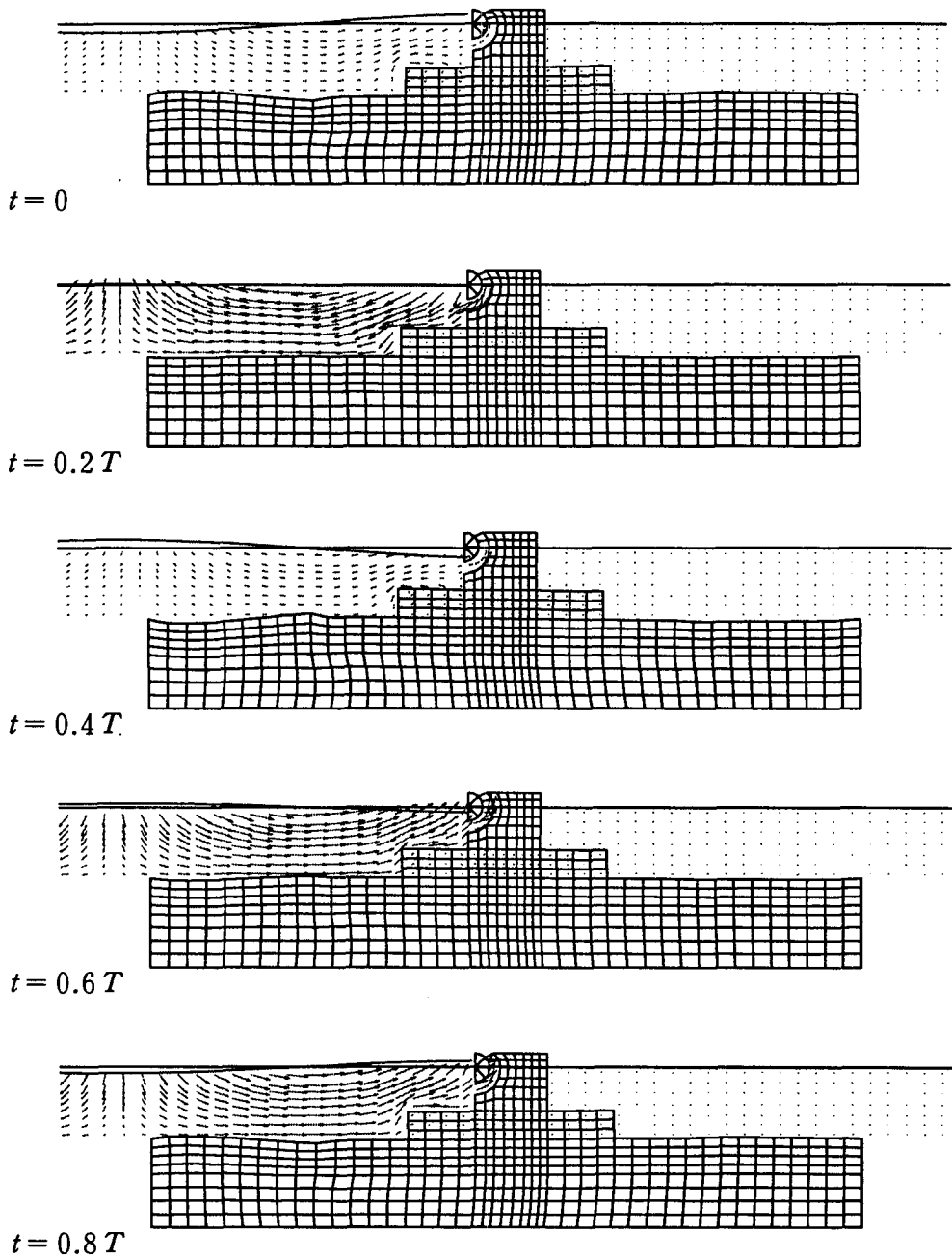


Fig. 3.5.8 Sequential vector plots for water particle motions and deformation of the CCB with seabed: $T = 10$ sec, $H = 3$ m.

가 있는 것으로 판단된다.

해석결과의 타당성을 간접적으로 살펴보고 파랑-지반-구조물 간의 상호작용 문제에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 3.5.8에 방파제 케이슨과 해저지반이 파랑에 의해 거동하는 모습과 수입자의 운동에 대한 벡터도를 시간변화에 따라 연속적으로 나타내었다. 그림에 해저지반 및 구조물의 변위는 실제보다 20배를 증폭하여 나타내었으며, 수면 변위는 1/3로 축소하여 나타내었다.

연속 그림을 살펴보면, 전면 수위가 정수면 아래로 내려가면 해저면은 위로 올라오고, 반대로 수면이 위로 올라가면 밑으로 처지는 아주 정상적인 거동을 보임을 알 수 있다. 지반이 극히 연약한 경우에는 위상차가 180 보다 작아질 수도 있으나, 통상의 해저지반 조건에서는 거의 180 위상차를 보인다(Takahashi 등, 1994). 아주 특별한 경우로 해저지반이 액상화를 일으켜 강성을 거의 잃은 경우에는 수면 변위와 동위상으로 거동하기도 하나, 통상 이와 같은 현상은 발생하기 거의 불가능하다.

본 연구를 통해서 개발된 본 모델은 지반이 아주 연약한 경우에도 적용이 가능하며, 선형이론에 근거를 두고 있어 빠른 시간내에 계산이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 또한, 파랑, 지반 및 구조물간의 상호작용을 고려하여 해석하도록 구성되어 있어 보다 면밀한 구조물 주변지반의 안정성평가에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 다시 말하면, 지반내의 모든 응력상태에 대한 정보를 얻을 수 있으므로 지반 내부의 전단파괴, 원호활동파괴 등의 발생 가능성을 진단할 수 있을 것으로 판단된다.

제6절 결론 및 토의

본 연구에서는 외해의 신선한 해수를 항내로 지속적으로 유입시킬 수 있도록 개발된 원호수로형 해수교환 방파제에 단면 최적화에 필요한 연구를 수행하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론을 항목별로 요약하면 다음과 같다.

- 외해수의 항내 깊숙한 정체 구역으로의 투입가능성: 수리실험을 통하여 원호수로 내의 공진에 의해 유입된 신선한 해수를 파이프를 이용하여 항내의 깊숙한 구역까지의 유입이 가능함을 입증하였다. 도수 파이프의 길이가 증가함에 따라 유입유량은 다소 감소하기는 우려할 만한 양은 아니었다.
- 케이슨에 작용하는 전파력의 측정: 3분력 검출기를 이용해서 무공케이슨과 원호수로 케이슨에 작용되는 수평, 연직 및 회전방향의 전파력을 계측하였다. 수평파력의 작용특성 차이를 규명하기 위해서는 보다 정밀한 실험이 수행되어야 하나, 연직파력은 실험조건내에서 원호수로 케이슨의 경우가 무공케이슨에 비해 23%~35% 작게 작용되고 있음이 확인되었다.
- 원호수로내의 수위증폭과 반사특성변화를 모의: 원호수로내의 공진현상과 이로 인한 수로내 수위 증폭현상과 반사율 저감현상 등을 예측할 수 있는 수치모델을 개발하였다. 이 모델은 선형 포텐셜이론에 근거하고 있으며, Galerkin 유한요소기법을 이용한 모델로 지반 및 구조물의 거동과의 상호작용을 고려할 수 있도록 확장이 가능하다.
- 방파제 주변의 동적 간극수압 및 응력분포 변화: 파랑조건 및 지반토성의 변화에 따른 케이슨의 동적 거동양상과 지반내의 간극수압 및 응력변화에 대해서 분석하였다. 지반의 전단파괴, 원호파괴 등의 가능성 예측과 연계하여 연구가 가능할 것으로 판단된다.

제4장 해안 모니터링 기술 고찰

제1절 서론

최근 해안에서의 경제적, 군사적 활동 및 레크리에이션의 증가로 인하여 연안 및 해안에서 일어나는 여러 현상들에 대한 다각적인 연구와 함께 좀 더 정량적인 이해를 얻기 위한 실험 및 관측 분야에 많은 노력을 기울이게 되었다. 연안 해역은 파랑이 우세한 환경으로서 파랑 뿐만 아니라 연안류 등 수력학적 현상과 그로 인하여 발생하는 퇴적물 이동, 그리고 해안선 변화 등 복잡한 현상들이 복합적으로 일어나는 곳이다. 이러한 해역을 연구하기 위하여 역사적으로 다양한 관측기기를 현장에 계류하여 그 자료들을 분석하는 기술들이 발달되어 왔으나, 이들은 그 정확성에도 불구하고 국부관측(point measurement)이라는 한계점을 갖고 있고, 더욱이 큰 에너지가 발생하는 태풍시나 폭풍시에는 망실의 위험이 크며 또한 설치 및 유지 비용이 크다. 특히 이들로부터 얻어지는 자료는 그 설치 장소에 많은 영향을 받게 됨으로써 쇄파대와 같이 넓은 구역을 연구하기 위해서는 많은 장비들의 계류가 필요하다. 이러한 연안 역학 현상 연구에 있어서 특히 중요한 것은 자연 그대로인 상태에서 물리적 관측을 수행하는 것이다. 이와 같은 현장관측은 매우 어려운 작업으로 소요 비용이나 기술적인 면에서 많은 부담을 주지만 그 결과는 매우 값진 것으로 해안에서의 여러 현상을 이해하는데 많은 도움을 주어왔다. 하지만 이러한 현장관측도 한편으로는 자연적인 연안 시스템에서 일어나는 현상 중에서 시간적·공간적으로 그 일부분만을 보여 줄 뿐이다. 최근 들어서 저가의 비디오 장비들의 구입이 용이해지고, 영상 처리 기술의 발달로 영상 기록들로부터의 필요한 정보의 추출이 가능해짐에 따라 연안의 현상을 연구하는 데 이러한 비디오 모니터링 방법이 간단하면서도 경제적인 방법으로 제시 및 사용되어 왔다.

본 장에서는 유체 운동들의 가시적 현상이나 그 결과로 발생하는 해안선 반응 등을 관측하기 위한 비디오 모니터링 기술에 대해서 설명하고 아울러 지금까지 이

기술을 이용한 연구들과 또한 앞으로 이 기술이 이용될 수 있는 연구 분야에 대해서 고찰하였다.

제2절 비디오 모니터링 기술

과거 십여년간의 비디오 하드웨어와 영상 처리 기법의 발달은 비디오 영상으로부터 값진 자료와 정보의 추출을 가능하게 하였으며, 비디오 모니터링 기술은 연안 현상 연구의 좋은 도구로 사용될 수 있게 되었다. 비록 이 기술이 정밀도면에서 떨어지고 육지와 해수 표면의 정보만을 제공한다는 약점이 있지만 적은 비용으로 장기간에 걸친 관측이 가능하다는 장점이 있다. 특히 기존의 아날로그 영상을 쉽게 디지털 영상으로 변환할 수 있게 됨에 따라 각 픽셀의 강도 자료로부터 연안에서 발생하는 여러 물리적인 현상을 유추하고 측정할 수 있게 되었다. 예를 들어 비디오 기술을 이용하여 해안에서의 파의 쳐올림(wave runup) 현상이나 쇄파대에 대한 시간·공간적인 관측 및 분석이 가능하다. 비디오 기술을 이용한 연구는 다음과 같은 세 가지 요소의 이해를 필요로 한다: 1) 비디오 영상 자료 취득의 시간적인 이해, 2) 공간적인 이해 및 영상과 실제 자연에서의 좌표계의 관계, 3) 영상 자료와 지구물리학적 신호와의 관계. 이러한 이해를 바탕으로 비디오를 이용하여 해안선 변화나 연안 형상 변화와 같은 장기적 현상은 물론 해상 상태, 스위쉬(swash) 운동, 연안사주의 형태 변화와 같은 단기적 현상의 변화를 적은 비용으로 큰 위험 부담 없이 관측할 수 있다. 이 외에 해안에서의 탁도 변화, 영상에 기록된 파의 속도를 이용한 수심관측, 쇄파대의 변화 및 파랑 에너지의 감쇠 과정 등도 비디오 영상을 통하여 연구가 가능하며, 부분적으로 그 동안 연구가 수행되어져 왔다. Maresca and Seivel (1976)은 처음으로 35 mm 카메라를 이용하여 연안에서 쇄파와 연안류등을 관측하였다. Holman and Sallenger (1984)는 미소촬영(time-lapse photography: 식물의 성장 따위의 완만한 변화 과정을 압축 기록하기 위하여 일정한 시간 간격을 두고 촬영하기)을 통하여 파의 쳐올림을 측정하였으며

Holman and Guza (1984)도 자연 해안에서 해안선을 따른 파의 쳐올림 현상을 연구하기 위한 미소촬영 기법을 소개하였다. Holman and Lippmann (1987)은 연안 사주의 3차원 형태를 관측하기 위한 기술을 개발하였으며 또한 원격 관측 기술을 이용하여 입사 쇄파의 형태에 기초한 자연 상태의 연안사주의 지형이나 규모등을 측정하는 기술을 발전 시켰으며 그 시범을 보였다(Lippmann and Holman, 1989; Lippmann and Holman, 1989). Holman et al. (1990)는 영상 분석에 있어서 자동화된 디지털 시스템을 이용하여 기존의 분석법을 향상 시켰다. Holland et al. (1991)은 비디오 기술을 이용하여 몇 개의 연안 수직 단면에서의 보어(bore)의 속도를 정량화하였다. Lippmann and Holman (1991)은 쇄파대에서의 표면 중력파의 속도와 입사각을 비디오 영상 기술을 이용하여 측정하였다. Lippmann and Holman (1992)는 쇄파대 영역에서의 쇄파의 시간적 변화를 정확히 정량화할수 있는 기술을 제시하였으며 Holman et al. (1993)은 비디오를 이용하여 장기간 적은 비용으로 할수 있는 해안 수심 측정의 예를 보여 주었다. Sloop (1995)은 미국 플로리다 해안에서 커슝(cusp) 및 해안선 변화를 연구하였고 Lippmann and Thornton (1996)은 스테레오 비디오 분석법을 이용하여 해수면의 상승이나 경사, 명시도등을 측정하였다. Chen (1996)은 해안선 근처의 자연초 및 인공초 위에서의 파에너지의 감소를 계산하였고, Konicki and Holman (1996)은 해안선에 대해서 일정한 각을 갖거나 직각인 해안 사주의 크기를 정량화 하기 위한 방법을 제시하였다.

1. 비디오 카메라 설치 및 운용

비디오 모니터링의 핵심 기술 중의 하나는 기기에 대한 원격 제어 가능하게 함으로써 적은 비용으로 장기간의 무인관측을 용이하게 하는 것이다. 최근의 정보·통신 기술의 발달로 인하여 세계 어느 곳에 위치한 기기라도 전화를 통하여 원격 제어가 가능하게 되었으며, 또한 기기를 통하여 수집된 자료의 실시간 이용은 물론 인터넷을 통한 일반 사용자와의 자료의 공유도 가능하게 되었다. Fig. 4.2.1은 해안을 모니터링하고 있는 비디오 카메라의 모습을 보여주고 있는데, 카메라를

고정하여 정해진 구역만을 일정한 시간 간격으로 계속 촬영할 수도 있지만, 팬/틸트(pan/tilt) 제어기를 사용하면 카메라의 상하·좌우로의 이동이 가능하고, 또한 카메라의 줌(zoom) 기능을 이용하여 영상을 확대 또는 축소할 수도 있다. 이러한 기능들은 전화를 통하여 모두 실시간으로 제어할 수 있으며, 또한 필요한 기능을 프로그래밍하여 자동화함으로써 무인 제어도 가능하다. 팬/틸트 제어기를 사용할 경우 한 대의 카메라로써 필요한 여러 방향과 구역을 원하는 시간에 원하는 형태로 자동적으로 찍을 수 있으므로 마치 여러 대의 카메라를 동시에 운용하는 효과를 낼 수 있다.

Fig. 4.2.2는 비디오 모니터링 운용 방식을 그림으로 보여주고 있다. 일단 비디오 카메라에 찍힌 아날로그 영상은 컴퓨터를 통하여 디지털 영상으로 변환된 후 전화선을 통하여 원거리에 있는 연구실의 컴퓨터로 전송, 보관된다. 이 때 영상 자료의 양은 상당히 크므로 자료의 전송은 전화 사용자가 적은 야간에 하는 것이



Fig. 4.2.1 A video camera installed at a beach for video monitoring (Reproduced by courtesy of Dr. Rusty Erdman).

바람직하며 아울러 계속 전송되는 막대한 양의 자료를 보관하기 위하여 시디롬(CD Rom)과 같은 저장 매체가 필요하다. 이 과정에서 일반 사용자가 필요로 하는 자료는 인터넷 상에 실음으로써 일반 사용자와 공유할 수 있다. 카메라를 설치, 운용함에 있어서 주의하여야 할 점은 카메라 자체를 외부 환경으로부터 보호하기 위하여 하우징(housing)과 같은 특수한 덮개를 마련하여 주어야 하며 원하는 영상을 정확히 포착할 수 있는 곳에 카메라를 설치하여야 한다는 것이다. 또한 좌표조정(Rectification)을 통한 영상 처리과정을 위해서는 카메라가 위치한 곳을 정점으로 하는 지상 좌표를 정확히 설정하고 영상에 나타난 일정 지점에 대한 실제 지상에서의 거리를 정확히 알아야 한다. 이를 알기 위해서는 정밀한 지상관측이 필요하나 여기에는 카메라부터의 거리에 비례하여 증가하는 픽셀간의 실제 지상거리로 인한 수평 측정 정확도의 한계가 있다. 이를 해결하기 위해서는 분해도가 높은 장비를 되도록 관측장소에 가까이 놓는 것이 중요하다.

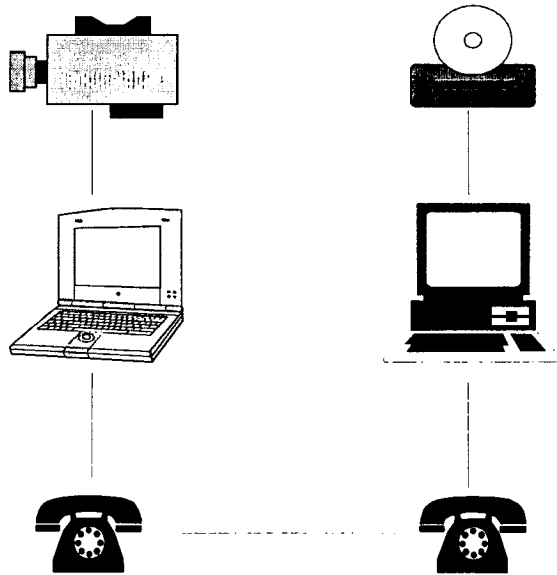


Fig. 4.2.2 Video monitoring procedure.

2. 영상 처리과정

비디오 기술의 학술적 이용은 기존의 아날로그 영상을 디지털 영상으로 변환하는 것이 가능해짐에 따라 본격화 되었으며, 또한 정보·통신 기술의 발달로 영상의 전송 및 분석이 용이하게 되었다. 디지털 영상이란 아날로그 영상 자료를 픽셀(pixel)이라고 부르는 단위로 공간적으로 조각내어서 표현하는 것을 의미하며, 각각의 픽셀은 영상의 강도(intensity level)와 색깔에 대한 정보를 포함하고 있다. 즉, 비디오 영상 처리과정의 기초는 영상으로 나타나는 강약의 변수를 2차원적인 픽셀의 배열로 나타내는 것으로서, 관심의 대상이 되는 현상에 따라 흑백 또는 천연색으로 촬영하여 활용할 수 있으며 적외선과 같은 不可視 밴드가 사용되기도 한다. 이와 같은 강도 자료로부터 지구물리학적 현상이 유추, 측정된다. 영상의 강도 자료는 각각의 픽셀 또는 픽셀 연속에서 구할 수 있으며 그것은 곧 물 속에 설치한 관측장비들과 상응하게 된다. 이러한 관점에서 볼 때, 각 픽셀들은 각각의 장비들과 유사하며 비디오 영상 강도의 시계열 자료는 물속에 설치된 고정 센서로부터의 시계열 자료와 같은 양상을 갖는다. 다시 말해서 비디오를 이용해 연속 촬영한 결과는 각 픽셀마다 하나씩 즉 픽셀의 개수 만큼의 기기를 계류하여 얻은 관측 결과와 동일하다고 볼 수 있다. 대부분의 영상 처리과정은 색깔을 더함에 따르는 번거로움을 피하기 위하여 gray scale로 표현하는데 이 때 256 gray scale은 8 비트(bit) 이미지(2^8)를 의미한다.

영상 자료를 이용하는 데 있어서 가장 중요한 것은 관심의 대상이 되는 현상에 대해서 영상에서의 좌표와 실제 현장에서의 좌표와의 관계를 알아내는 것이다. 어떠한 특별한 객체에 대하여 3차원적 좌표에 위치한 것을 그와 관련된 2차원적 영상 좌표로 옮기는 것은 변형 알고리즘을 통하여 하나의 해로 계산해 낼 수 있으므로 가능하다. 그러나 그 반대로 2차원 영상 자료로부터 3차원 좌표상에서의 위치를 결정하는 것은 불가능하며 더 많은 보조 자료를 필요로 한다. 전통적인 사진 방법으로는 스테레오 방식을 사용하는 것으로 둘 혹은 그 이상의 카메라를 동시에 이용함으로써 객체의 현장 위치를 알아낼 수 있다. 또한 현상 자체가 자연적으로 이

미 구속되어 일어나는 현상을 생각해 볼 수 있다. 예를 들어 파의 경우 항상 해수면이라는 평면에서 일어난다는 것을 가정함으로써 여러 복잡한 변환 과정이 생략될 수 있다. 비디오 영상과 같이 빗각촬영된(oblique) 영상에 대한 그 동안의 정성적인 분석은 영상 자체를 좌표조정(rectification)이라는 변환과정을 통해서 실제 지상 좌표계와 동일한 좌표를 갖는 영상으로의 변환이 가능하게 됨으로써 정량적인 분석이 가능하게 되었다. 이러한 좌표조정은 새로운 개념은 아니나 빗각촬영된 영상을 해석하고 분석하는 데 있어서 없어서는 안될 필수 과정이다. 이 때 이 변환을 위해서는 여러 매개변수들이 필요하며 또한 이러한 매개변수들이 정확히 조사되어야 하는데, 그 정밀도가 영상 분석의 정밀도에 있어서 매우 중요하다. 이러한 지형적 영상 매개변수들을 구하기 위해서는 현장에서의 관측 위치들과 관측 가능한 영상 위치들 간의 관계를 least-squared inverse 알고리즘을 이용하여 구하는 것이 바람직하다.

영상에 대한 해석 과정은 사진측량법의 원리에 기초한 기하학을 바탕으로 한다. 즉, 영상속의 어떠한 좌표의 위치는 실제 지상에서의 그에 상응하는 위치, 초점거리(focal length), 카메라 기울기(tilt), 카메라 돌기(swing), 카메라 각도(azimuth), 카메라 높이(elevation) 등의 함수로 나타낼 수 있다. 이것을 수식으로 표현하면

$$(x, y) = f(X, Y, Z_c, f_c, \tau, \phi, s, H) \quad (4.2.1)$$

여기서 (x, y) 는 사진 영상에서의 좌표를 의미하며, X, Y, Z_c 는 사진 영상의 (x, y) 에 상응하는 실제 지상에서의 위치 좌표, f_c 는 카메라의 초점거리, τ 는 카메라의 기울기(tilt, 수평축으로부터 윗방향으로), ϕ 는 카메라 각도(azimuth, 반시계 방향), s 는 카메라 돌기(swing or roll angle), H 는 원점으로부터의 카메라의 높이를 의미한다. 카메라의 초점거리는 카메라 렌즈의 광학 중심으로부터 카메라의 영상 표면(imaging surface)까지의 수직거리(mm)를 말하는데, 일반 카메라의 경우 영상 표면은 필름이 되며 비디오 카메라의 경우는 CCD(Charge-Coupled

Device)로 이루어져 있다. Lippmann and Holman(1989)은 영상 좌표로부터 지상 좌표로 변환하는 기하학적 변환식을 아래와 같이 제안하였다. 간단한 예로 지상 좌표 $P(X, Y, Z_c)$ 에 상응하는 영상 좌표 $p(x, y)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있으며

$$y = f_c \tan \left[\tan^{-1} \left(\frac{Y}{Z_c} \right) - \tau \right] \quad (4.2.2)$$

$$x = \left(\frac{y^2 + f_c^2}{Z_c^2 + Y^2} \right)^{1/2} X \quad (4.2.3)$$

이것을 그림으로 표시하면 Fig. 4.2.3과 같다. 이러한 좌표 변환 전에 먼저 영상의 x 축이 영상의 수평선과 평행이 되도록 만들어 주어야 한다. 즉 카메라의 스윙으로 인한 각은 카메라 자체가 수평면에 대해서 좌우로 회전함으로써 생기는 각으로 수평선에 대해서 기울어진 영상은 이 카메라 돌기(swing)로 인해서 생긴 것이다. 좌표조정(rectification)을 위해서는 영상 자체의 기준 좌표계 (x, y) 를 수평선에 각각 평행하고 수직적인 임시의 좌표계 (x', y') 로 다음과 같이 변환하여야 한다.

$$x' = x \cos \theta - y \sin \theta \quad (4.2.4)$$

$$y' = x \sin \theta + y \cos \theta \quad (4.2.5)$$

이때 θ 는 카메라의 돌기로 인한 영상자체의 x 축과 수평선 사이의 각을 의미한다. 임시 좌표계 상에서 좌표조정된 영상은 분석을 위해서 다시 원래의 (x, y) 좌표계로 변환되어야 한다. Fig. 4.2.4는 좌표조정(rectification)의 한 예를 보여주는 것으로, (a)는 단순히 카메라로 빛각촬영된 영상을 보여주며, (b)는 이 영상을 좌표조정이라는 변환 과정을 통하여 마치 비행기에서 수직으로 내려다 본 것과 같은 영상으로 변화시킨 것으로서 보통의 영상이 갖고 있는 화면의 휨이나 굴절 혹은 원근 효과가 제거되고 각 픽셀의 간격은 지상에서의 실제 거리와 비례하여 나타내어질 수 있게 됨으로써 정량적인 영상 분석이 가능하게 된다.

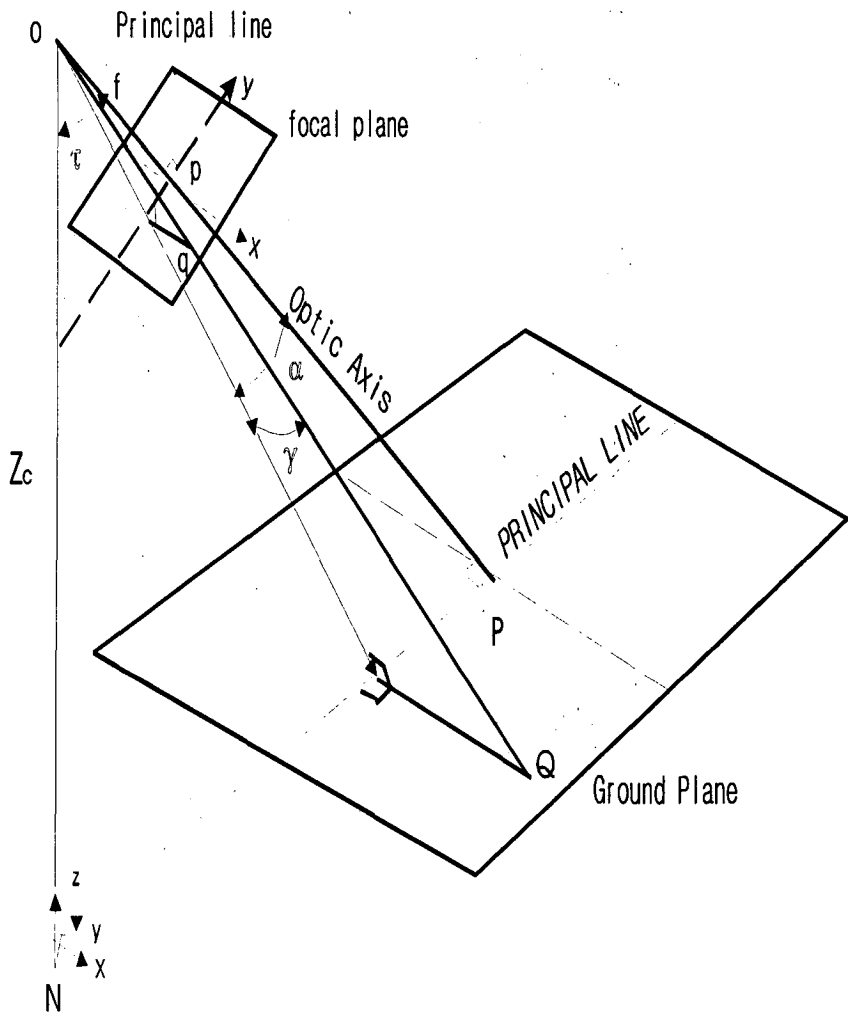
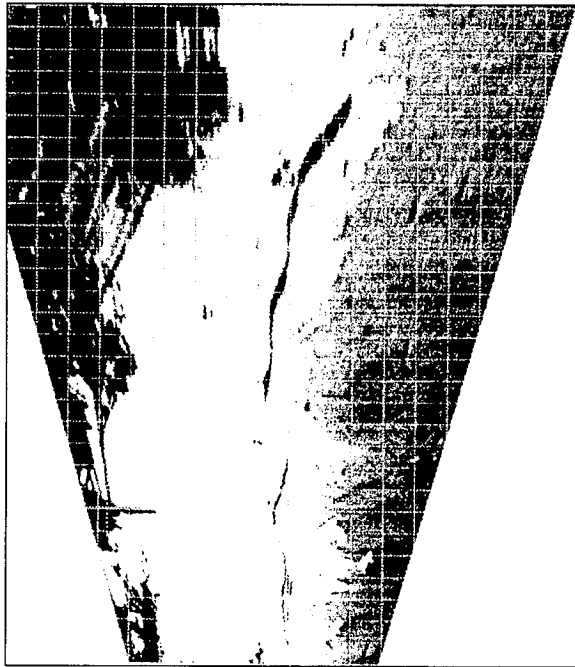


Fig. 4.2.3 The geometry and leveling conventions used in the rectification process (modified from Lippmann and Holman, 1989).



(a)



(b)

Fig. 4.2.4 An example of the oblique image taken from a beach in Florida (a) and its rectified image (b) (Reproduced by courtesy of Dr. Rusty Erdman).

제3절 비디오 모니터링의 해안 응용

연안 현상은 크게 두 가지의 요소로 분리할 수 있는데, 하나는 해안의 얕은 수심에서의 파랑장의 변화와 역학, 그리고 다른 하나는 파랑에 의한 퇴적물 이동에 의한 해안 지형 변화이다. 연안 현상 연구의 목적은 이 두 요소의 상호 작용으로 인한 비선형 효과를 관측하여 이들에 대한 이해 및 예측을 가능하게 하는 것이다. 시간 규모로 볼 때 연안에서의 관심 시간 규모는 1초 정도의 유체 유동에서부터 길게는 몇 년간에 걸친 해안 지형 변화에 이르기까지 다양하며, 이 두 요소는 크게 두 개의 주파수대로 나눌 수 있다. 해안에서 유체 유동을 관측할 경우 유체 유동의 시간 규모에서는 주변의 지형이 변화가 없다고 가정할 수 있지만 하루 정도의 시간 규모에서는 무시할 수 없을 정도의 지형 변화가 발생할 수 있으므로, 이론적으로는 지형 관측을 매일 실시하여야 한다. 이러한 가정 외에도 국부 관측(point measurement)에 따르는 몇 개의 관측 제약 조건들이 있는데 먼저 공간적 비균등성을 들 수 있다. 즉 해안에 대하여 수직 방향으로 진행되어 들어오는 입사파의 파장에 대해서 강한 비균등성이 있을 수 있고, 또한 연안 방향으로의 cusp과 같이 짧게는 10 m에서 길게는 연안 사주와 같이 100 m 내지 1000 m에 이르는 규모의 비균등성이 있을 수 있다. 유체 유동에 대한 과거의 연안 관측 방법은 일정한 배열(array) 상태로서 압력계나 유속 센서를 고정하여 사용하는 것으로서 연안에 대해서 수직 혹은 평행 방향으로 관심 해역을 커버하였는데 이러한 관측 방법은 앞에서 설명한 현장에서의 공간적 비균등성으로 인한 몇 가지의 한계점들을 갖고 있고 대부분의 경우 해안선 방향으로는 파랑장이 균일하다는 가정하에 사용되었다. 또한 파랑장에 대한 공간적 설명은 관측장비의 규모와 성능에 크게 의존하고 있으며 파고가 높은 연안 환경에서 고가의 장비를 계속시켜 사용하는 것은 손실 또는 망실을 고려할 때 위험한 일이다. 이러한 제약점들을 보완하기 위하여 연안 현상을 관측하는 데 비디오 기술을 사용하게 되었다. 이러한 비디오 기술은 많은 연안 현상들이 시각적으로 분명히 확인할 수 있는 것들이고 또한 수심이 매우 얕으므로 해향반류(undertow)를 제외하고는 시각적으로 나타나는 표층현상이 전체 수층을



Fig. 4.3.1 Photo examples showing shoreline changes during a storm using video monitoring techniques (Reproduced by courtesy of Dr. Rusty Erdman).

대표한다고 볼 수 있다는 점을 고려할 때 그 효용성이 매우 크며, 또한 고가의 장비들을 위험한 환경에 노출시키지 않는다는 큰 잇점이 있다.

비디오 모니터링을 해안 현상 관측에 응용한 예로서 가장 대표적인 것으로 해안선 변화 관측을 들 수 있다. 해안선은 계절적으로 침식과 퇴적이 반복되는 변화를 보이며 특히 태풍과 같은 큰 외부의 에너지에 노출될 때는 일시적으로 상당한 해안선의 후퇴를 보이기도 한다. Fig. 4.3.1는 폭풍을 전후로 연속하여 모니터링된 영상으로서 각각 폭풍에 의하여 해안선이 얼마나 많이 침식 되었는가를 잘 보여 주고 있다. 무인의 자동화된 비디오 모니터링 기술은 태풍과 같은 단기간의 해안선 변화의 관측은 물론이고 장기간의 계절적 변화 또는 인공 구조물에 의한 주변 해안선의 변화, 양빈(beach nourishment)에 의한 효과 등을 관측하는 데 매우 효과적이다(Mason, 1993; Plant and Holman, 1996). 또한 연안으로 진행되어 오는 파를 육안으로 알아볼 수 있는 것처럼 영상화면에 나타난 각 픽셀의 강도를 시계열로 나타내면 이 또한 파랑과 같은 변화를 보인다. 따라서 해안에 평행한 방향으로 시간에 따른 픽셀 강도의 변화를 분석함으로써 압력계를 해안에 평행하게 배치하는 방법과 마찬가지로 파의 입사각을 구할 수 있다. 각각의 파봉과 관련된 신호의 강도는 파가 부수지는지 아닌지에 밀접한 관계가 있다. Lippman and Holman(1991)은 이것을 이용하여 해안에서의 쇄파의 통계와 쇄파 변조의 특성을 알아내었다. 파의 에너지 감소는 평균 혹은 장주기를 갖는 연안류를 발생시키는 잉여응력(radiation stress)의 기울기와 관계가 있으므로 비디오를 통한 파랑에너지 감소에 대한 연구 기여도 기대된다.

파고와 같은 3차원 현상들은 2차원 영상자료로부터 구할 수 없지만 쇄파된 파가 쳐올림(runup) 혹은 스위쉬(swash) 형태로 2차원적인 형태를 보일 때는 그 형태의 변화를 통한 연구가 가능하다. 이와 같이 연안에서 발생하는 2차원적인 현상들은 비디오를 통하여 쉽게 연구되어질 수 있다(Holman et al., 1993). Fig. 4.3.2 은 해안에서 관측한 영상 자료 중에서 해안선에 수직방향의 기준선에 분포하는 픽셀들을 시간에 따라서 재배열한 것이다. 이 그림을 통하여 수동 혹은 자동으로 파의 쳐올림에 대한 특성이 잘 파악될 수 있다. 또한 그림을 자세히 보면 거품

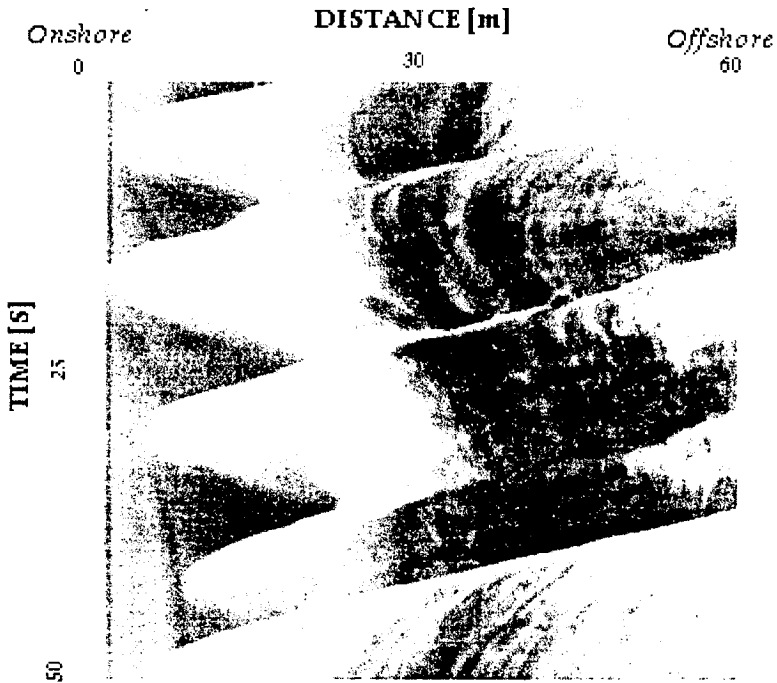


Fig. 4.3.2 Temporal variation of pixel intensity levels along a line perpendicular to the shoreline (from Holland and Holnam, 1993)

형태의 자국이 앞뒤로 움직이는 것을 볼 수 있는데 이를 통하여 유체 속도의 정량적인 분석이 가능하며 이와 유사한 연구는 앞으로도 많은 가능성을 가지고 있다.

2차원으로 나타낸 영상 자료를 통하여 3차원 정보를 얻는 것은 거의 불가능하다. 이를 보완하기 위하여 스테레오 형태의 모니터링이 이루어지기도 하지만 아직 많은 어려움이 있다. 하지만 유체의 운동학적인 관계를 이용하여 3차원적인 정보를 끌어낼 수도 있다. 예를 들어 천해에서 $c = \sqrt{gh}$ (c 는 파의 진행 속도, g 는 중력가속도, h 는 수심)라는 식을 이용하여 연속적인 2차원 영상 사진에서 나타나는 파의 진행 속도로부터 수심을 추정할 수 있다(Lippmann and Holman, 1991).

또한 장기 노출 영상 방식을 통하여 시간 평균 기법을 사용함으로써 고주파수의 신호들을 제거하고 준 정지(quasi-static) 상태의 자연 현상인 해안선 위치나 연안 사주의 위치 등에 대한 분석을 강화시킬 수 있다(Holman and Guza, 1984). 그러나 이러한 기술은 주간에 날씨가 좋아서 관측 목표인 해안 현상을 충분히 볼 수 있는 시기에만 가능하며, 전천후 관측을 위해서는 고가의 특수 장비가 동원 되어야 한다. 또한 이러한 기법은 관측 초기에 일정 기간 동안 파랑과 해안의 현장 자료 획득이 동시에 이루어져야 한다는 단점이 있다. 시각적인 신호와 지구물리학적인 변수들과의 불확실한 관계를 규명하기 위하여 인공위성을 이용한 자료분석법과 마찬가지로 여러 영상 자료에 대한 ground truth 테스트에 대한 연구가 진행중이다. 그러나 일단 기본적인 지상 좌표계가 설정되면 공간적인 자료 채취 배열이나 시간은 필요에 따라 얼마든지 조절이 가능하다. 또한 좁은 관심해역에 대해서는 높은 분해도를 갖고 넓은 해역에 대해서는 낮은 분해도를 갖도록 하는 것이 카메라 위치를 조정함으로써 가능하고, 만약 좀 더 높은 분해도를 필요로 한다면 부가적으로 더 많은 픽셀을 채취하거나 파의 쳐올림 한계 등을 따로 채취함으로써 가능하다. 또한 비용면이나 전략면에서 다른 장비들처럼 분실되거나 망실될 위험이 적고 비용이 저렴하다.

제4절 연구 가능성 및 계획

비디오 모니터링 기술은 앞에 열거한 해안 현상에 대한 응용 외에도 다른 해양학 분야에서도 효과적으로 응용될 수 있다. 특히 최근의 디지털 카메라의 등장과 발달, 그리고 정보 통신망의 발달은 그 응용성과 효과를 더욱 높여 줄 것이다. 조간대와 같이 광범위한 갯벌 해안은 지형 변화의 관측이 매우 어려우며 또한 위험하다. 그러나 비디오 모니터링 기술을 이용할 경우 조간대에 해수가 차오르는 과정을 연속 촬영하고 좌표조정(rectification) 과정을 거치게 되면 각 시간마다 해수와 육지간에 그려지는 경계선은 결국 등수심선을 나타내며 이는 영상 분석을 통

하여 자동적으로 얻을 수 있다. 시각적인 효과를 이용한 비디오 모니터링 외에 적외선 카메라 등을 이용하여 발전소 부근의 온배수 분포 등을 관측할 수 있다는 것도 앞으로 비디오 기술을 이용한 중요한 가능 응용예에 포함될 것이다. 비록 이 기술이 관측기기를 직접 계류하는 방법에 비해 정밀도는 상대적으로 낮고 육지 및 해수 표면에 대한 정보만을 간접적으로 제공하지만, 장기간의 관측과 넓은 구역의 동시 관측이 저렴한 비용으로 가능하다는 점에서는 우월하다. 특히 해안선 변화와 같이 장기간의 관측을 요구하는 경우에는 이 영상 기술을 이용한 방법이 가장 바람직하다고 본다. 하지만 영상으로 나타난 현상과 지구물리화학적 현상들간의 관계는 앞으로 지속적으로 연구되어야 한다. 아울러 이러한 비디오 모니터링을 통한 연구는 방대한 자료의 처리를 요구하며 이를 자동적으로 처리할 수 있는 소프트웨어의 개발이 시급하다.

제5장 3차원 연안역 해수유동

제1절 서론

연안역에는 기인력이 서로 다른 해류, 조류, 취송류, 파랑류 등 다양한 흐름이 존재한다. 또한 이 해역은 복잡한 과정을 거치면서 생성, 전파, 변형된 파랑이 쇄파라는 마지막 변형과정을 거치면서 소멸되는 해역으로서, 다양한 흐름과 파랑변형 현상의 복합적 상호작용에 의한 결과로 연안역 해수순환 현상이 나타나며, 이 가운데 파랑의 잉여응력(radiation stress)이 그 기인력인 흐름을 일반적으로 파랑류(wave induced current)라 한다.

단순화된 자연해빈 주변의 파랑류를 재현하고자 하는 연구가 지난 20년 동안 광범위하게 진행되었으며, 이에 대한 관련 문헌조사 및 평가가 Basco(1983) 및 Battjes(1988)에 의해 수행된 바 있다. 그러나 대부분의 기존연구들은 수심적분 혹은 수심평균된 형태의 방정식에 기초하며, 때로는 파랑류의 수심에 따른 유속분포가 개수로 정상류의 경우에 적용되는 로그함수적 분포를 갖는다는 가정하에 수행되기도 하였다.

최근 좀 더 이론적으로 접근한, 그리고 수리모형실험을 통한 연구결과, 연안역에서의 향안류 또는 이안류에 대한 구조 및 해석방법에 많은 발전이 이루어졌다. 즉, 수면 부근에서는 해안을 향해 흐르나 해저면에서는 반대 방향(외해방향)으로 흐르는 흐름, 저층이안류(undertow)의 생성이유 및 발달과정 등을 이해할 수 있게 되었다(Fig. 5.1.1). 이에 따라 연안역 해저퇴적물이동 분석시 수심평균된 이안류 등을 이용하는 것은 큰 오류를 범할 수 있으며, 3차원적 해석을 통하여 파랑류의 유속분포를 보다 정확하게 파악하는 것이 중요하다는 것이 입증되었다(De Vriend,

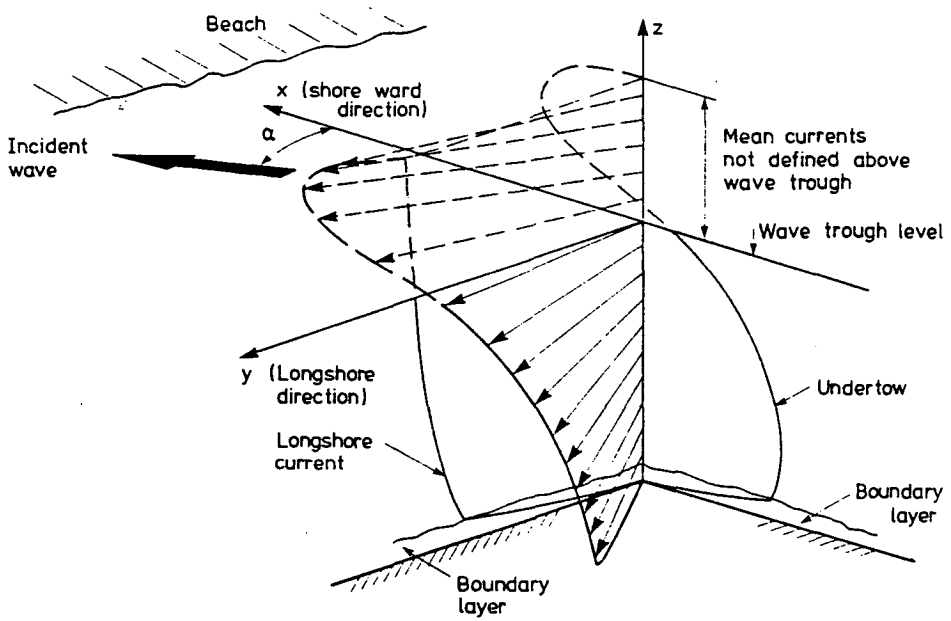


Fig. 5.1.1 Three-dimensional resultant mean velocities in the surf zone (from Svendsen and Lorenz, 1989).

1986).

이와 같은 중요성으로 인해 현재 파랑류를 3차원적으로 해석, 재현하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Stive and De Vriend(1987)는 흐름을 1차성분과 2차성분으로 나누어 해석하는 유사 3차원 수치모형(quasi-3D model)을 제시하였으며, Svendsen and Lorenz(1989)는 향안류 또는 이안류가 연안류에 의해 크게 영향을 받지 않는다는 가정하에 perturbation 전개법을 사용하여 연안류의 연직분포 등에 대한 식을 제시하였다. 그 후 De Vriend and Kitou(1990)는 3차원 정수역학적 평균류 수치모형에 파랑의 영향을 고려하는 수치모형을 수립하였다.

과학기술처(1992)는 3차원 해저퇴적물 수치모형의 입력자료 제공 및 파랑류의 3차원적 구조파악을 위해 De Vriend and Kitou(1990)와 비슷한 방법을 이용하여 파랑우세역에서 범용성을 갖고 적용할 수 있는 3차원 파랑류 수치모형을 수립하고자 파랑변형 및 파랑류 수치모형의 기본형을 수립하였고, 과학기술처(1993)는 파랑류와 난류마감 모형을 수립하였으며, 이를 근간으로 과학기술처(1994)는 관련 비선형항을 모두 포함하면서 각각이 독립성을 갖 파랑변형 수치모형, 파랑류 발생 및 순환 수치모형, 그리고 난류마감 수치모형을 유기적으로 결합하는 3차원 파랑류 수치모형(3-dimensional Wave-Induced Nearshore Circulation Model, WINC3D)을 수립하였으나 수리실험과의 비교·검토가 부족하여 충분한 적용성을 확보하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 과학기술처(1994) 이후에 발표된 최신이론을 추가하여 모형의 경계조건 등을 세련화하고, 기존의 수리모형 실험결과와 WINC3D를 충분히 비교·분석하여 WINC3D의 적용성을 확장하고자 한다.

제2절 3차원 파랑류 수치모형

1. 기본방정식

가. 운동량방정식

먼저 WINC3D의 파랑변형 수치모형 부분의 기본방정식은 Yoo(1986)가 수립한 파랑평균된 파수 보존 방정식과 파랑 에너지 보존식을 채용한다.

특정 시각의 i -방향의 유속 u_i 와 압력 p , 그리고 해수위 ζ 를 다음과 같이 일정 시간 동안의 평균치와 변동치로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} u_i &= U_i + \tilde{u}_i + u_i', \\ p &= P + \tilde{p} + p', \\ \zeta &= \eta + \tilde{\zeta} + \zeta'. \end{aligned} \tag{5.2.1a,b,c}$$

여기서 U_i, P 및 $\eta(=\langle \bar{\zeta} \rangle)$ 는 파랑평균 및 난류평균치, \tilde{u}_i, \tilde{p} 및 $\tilde{\zeta}$ 는 파랑에 의해 유발되는 주기성분, 그리고 u_i', p' 및 ζ' 는 난류변동성분이다.

만일 파랑장과 흐름장이 파장과 파주기에 비해 훨씬 큰 규모의 시공간상에서 변한다면, 제물리특성의 국부적인 보존방정식을, 파주기보다는 크지만 여전히 시간변화 특성을 나타낼 수 있는 일정 시간에 걸쳐 평균하여 나타낼 수 있다. 파주기에 걸친 평균화 연산자를 $\langle \rangle$ 로, 난류평균 연산자를 overbar로 나타내면 유속에 관한 다음 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \langle \overline{U_i} \rangle &= \langle U_i \rangle = U_i, \\ \overline{\tilde{u}_i} &= \tilde{u}_i, \quad \langle \overline{\tilde{u}_i} \rangle = \langle \tilde{u}_i \rangle = 0, \\ \overline{u_i'} &= 0, \quad \langle u_i' \rangle = 0. \end{aligned} \tag{5.2.2a,b,c}$$

그러나 각 성분의 물리적 특성과 특성시간규모가 상이하므로 각 성분들은 다음과 같이 상호무상관(uncorrelated)인 관계를 갖는다고 가정할 수 있다.

$$\langle U_i \tilde{u}_i \rangle = 0, \quad \overline{U_i u_i'} = 0, \quad \overline{\tilde{u}_i u_i'} = 0. \tag{5.2.2d}$$

압력과 수위에 대해서도 유사한 관계를 정의할 수 있다.

파랑류 수치모형 부분의 기본방정식으로는 파랑평균 및 난류평균된 연속방정식 및 운동방정식을 사용한다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0. \quad (5.2.3)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \langle -\tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{\langle u_i u_j \rangle}. \quad (5.2.4)$$

여기서 ρ 는 해수밀도, g_i 는 중력가속도 벡터성분으로서 연직방향을 $i=3$ 라 할 때, $g_1 = g_2 = 0, g_3 = g$ 이다.

다음과 같은 시간평균 압력방정식을 치환하면

$$P(z) = \rho g(\eta - z) - \rho \langle \tilde{w}^2 \rangle - \rho \langle \overline{w^2} \rangle \quad (5.2.5)$$

식 (5.2.4)로부터 운동량방정식의 다음과 같은 수평방향 성분을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} \\ &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \langle \tilde{u}^2 - \tilde{w}^2 \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \tilde{u} \tilde{v} \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle}{\partial z} \\ & \quad - \frac{\partial \langle \overline{u^2 - w^2} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \overline{u v} \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle \overline{u w} \rangle}{\partial z}, \end{aligned} \quad (5.2.6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} + \frac{\partial VW}{\partial z} \\ &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \langle \tilde{u} \tilde{v} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \tilde{v}^2 - \tilde{w}^2 \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle \tilde{v} \tilde{w} \rangle}{\partial z} \\ & \quad - \frac{\partial \langle \overline{u v} \rangle}{\partial x} - \frac{\partial \langle \overline{v^2 - w^2} \rangle}{\partial y} - \frac{\partial \langle \overline{v w} \rangle}{\partial z}. \end{aligned} \quad (5.2.7)$$

이제 연속방정식 (5.2.3)과 Reynolds 응력에 Boussinesq의 가정을 도입하면 식 (5.2.6)과 (5.2.7)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial R_{xz}}{\partial z} \\ & = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_v \frac{\partial U}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (5.2.8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial R_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial R_{yz}}{\partial z} \\ & = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(N_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(N_v \frac{\partial V}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (5.2.9)$$

여기서 N_h, N_v 는 각각 수평방향 및 연직방향 난류확산계수이고, R_{ij} 는 파랑에 의한 응력항으로서 다음과 같다.

$$R_{ij} = \left. \frac{p_w}{\rho} \right|_{z=\eta} \delta_{ij} + \langle \tilde{u}_i \tilde{u}_j \rangle - \langle \tilde{w}^2 \rangle \delta_{ij}. \quad (5.2.10)$$

여기서 $p_w = \left\langle \int_{\eta}^{\zeta} \rho g (\zeta - z) dz \right\rangle = 0.5E$. E 는 파랑에너지이다. δ_{ij} 는 Kronecker delta로서 $i=j$ 일 때 1, $i \neq j$ 일 때는 0이다.

식 (5.2.10)을 수심적분하면 다음과 같이 평면2차원 수치모형에서의 파랑잉여응력(wave-induced radiation stress)을 얻는다(Fig. 5.2.1 참조).

$$S_{ij} = \frac{E}{2} \left\{ \frac{K_i K_j}{k^2} \frac{2C_g}{C} + \left(\frac{2C_g}{C} - 1 \right) \delta_{ij} \right\}. \quad (5.2.8a,b,c)$$

여기서 i, j 는 평면좌표계를 나타내며, K_i, K_j 는 파수벡터의 $i-, j-$ 방향성분이고 $k^2 = K_i^2 + K_j^2$. 그리고 C_g 와 C 는 각각 파랑의 군속도와 위상속도이다.

식 (5.2.8)과 (5.2.9)가 영안역 흐름에 대한 파랑평균 및 난류평균된 운동량보존식이다. WINC3D는 연직방향으로 쇄파대를 포함한 천해역을 잘 표현하기 위하여 시그마 변환(Freeman et al., 1972)을 택하여 식 (5.2.8)과 (5.2.9)를 변환한다(Lee, 1998).

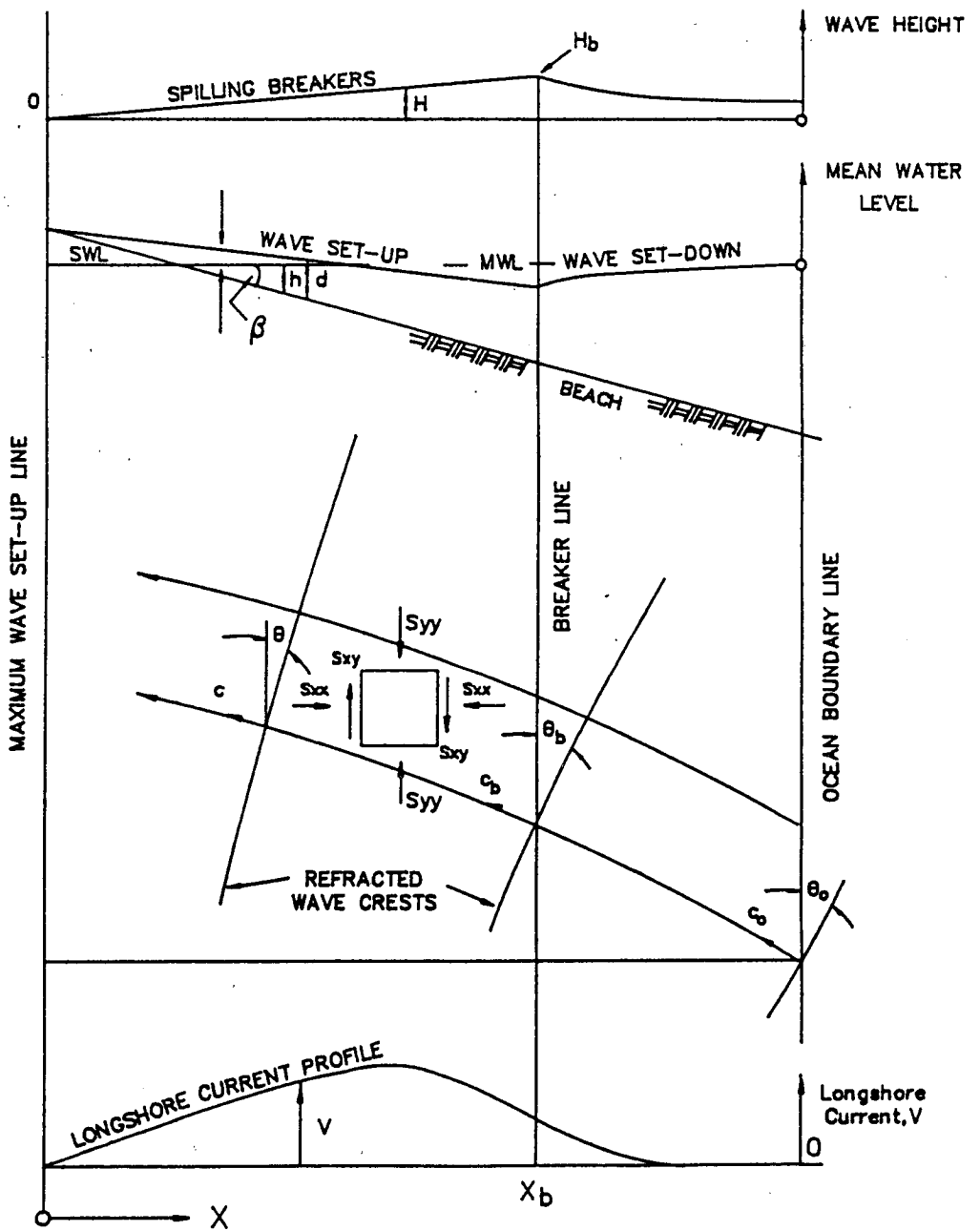


Fig. 5.2.1 Schematics of the longshore current on a plane beach (after Basco, 1982).

나. 전단응력 연직분포

연속방정식 (5.2.3)과 함께 식 (5.2.8)과 (5.2.9)의 수치해를 구하기 위해서는 육지 및 개방경계조건과 아울러 수면 및 해저면 경계조건이 필요하다. 해수면 및 해저면의 경우, 일반적으로 취급하기가 용이한 난류전단응력조건을 사용하여 파랑-흐름 경계층을 해석한다(Davies, 1980).

본 항에서는 평균해면 근방에서의 경계조건을 설정하고, 파랑으로부터 기인된 흐름의 연직구조 파악을 위하여 Stive and De Vriend(1994)의 결과를 중심으로 파랑에 의한 전단응력의 연직분포를 살펴본다.

시간평균흐름의 이류가속도 효과를 무시하고, 난류응력에 대한 Boussinesq 가설을 도입하면, 저층이안류(undertow)를 해석에 가장 일반적으로 사용되는 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial z} N \frac{\partial U}{\partial z} = g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \langle \tilde{u}^2 - \tilde{w}^2 \rangle + \frac{\partial}{\partial z} \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle. \quad (5.2.9)$$

여기서 N 은 eddy viscosity이다. 만일 전수심에 걸쳐 N 이 일정하다고 가정하고 2회 적분하면

$$NU = \frac{g}{2} \frac{\partial \eta}{\partial x} z^2 + \int_0^z \int_0^z \frac{\partial}{\partial x} \langle \tilde{u}^2 - \tilde{w}^2 \rangle dz dz + \int_0^z \frac{\partial}{\partial z} \langle \tilde{u} \tilde{w} \rangle dz + C_1 z + C_2. \quad (5.2.10)$$

이 식에서 두 개의 적분상수와 쳐올림경사(set-up gradient), $\partial \eta / \partial x$ 가 미지수이므로 3개의 경계조건이 필요하다. C_2 와 C_1 은 저면에서의 no-slip 조건 ($U=0$)과 중층으로부터 표층 사이의 전이역에서의 전단응력조건으로부터 구할 수 있다(Stive and De Vriend, 1994). 쳐올림경사는 질량보존조건으로부터 구한다.

경사저면상에서 공간적으로 변하는 파랑의 경우에 천수가정과 연속방정식을 사용하면 식 (5.2.10)의 피적분함수 중의 파랑관련항을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\langle \tilde{u}^2 \rangle &= \frac{A_w^2}{2} + O\left(A_w^2 \frac{\lambda^2}{L^2}\right), \\
\langle \tilde{w}^2 \rangle &= O\left(A_w^2 \frac{\lambda^2}{L^2}\right), \\
\langle \tilde{u}\tilde{w} \rangle &= \frac{A_w^2}{2} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{4} \frac{\partial A_w^2}{\partial x} z.
\end{aligned} \tag{5.2.11a,b,c}$$

여기서 수심(still water depth), $A_w = (a/\sigma)/\sinh(kh)$, a 는 진폭, σ 는 Doppler 변이된 각주파수, λ 는 파장이며 L 은 수평변이의 특성거리이다. 식 (5.2.11)을 식 (5.2.10)에 치환하면 다음과 같은 전단응력의 연직분포식을 얻는다.

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = N \frac{\partial U}{\partial z} = gz \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{z}{4} \frac{\partial A_w^2}{\partial x} + \frac{A_w^2}{2} \frac{\partial h}{\partial x} + C_1. \tag{5.2.12}$$

경사저면에서 저면분산의 경우, 표층에서의 분산은 거의 없으므로 평균수면에서의 전단응력이 없다. 즉,

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = g(z-d) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{(z-d)}{4} \frac{\partial A_w^2}{\partial x}. \tag{5.2.13}$$

또한 중층에서는 비회전성 흐름이 존재로 인해 전단응력이 유지될 수 없으므로

$$\rho g d \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{1}{4} \rho d \frac{\partial A_w^2}{\partial x} = -\frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial x}. \tag{5.2.14}$$

응력이 경사저면에서 분산됨과 아울러 쇄파에 의해서도 분산되는 경우에는

$$\frac{\tau(z)}{\rho} = g(z-d) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{(z-d)}{4} \frac{\partial A_w^2}{\partial x} + \tau_s. \tag{5.2.15}$$

여기서 τ_s 는 surface roller effect(Deigaard and Fredsøe, 1989)에 의한 평균수면에서의 전단응력이다. 식 (5.2.15)로부터 저면전단응력을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_b = -\rho g d \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{4} \rho d \frac{\partial A_w^2}{\partial x} + \tau_s. \quad (5.2.16)$$

Deigaard and Fredsøe(1989)는 surface roller effect를 포함한 수심적분된 잉여응력을 천수근사(shallow water approximation)를 사용하여 다음과 같이 제시하였다.

$$S_{xx} = \frac{3}{2} E + \rho \frac{AC}{T}. \quad (5.2.17)$$

A 는 roller area로서 근사치는 $A=0.9H^2$ (H 는 파고)이며(Svendsen, 1984a), T 는 파주기이다. 이상의 식들과 수심평균 운동량방정식을 사용하면 전단응력 τ_s 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \rho g d \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} &= \frac{3}{2} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\rho}{T} \frac{\partial(AC)}{\partial x}. \end{aligned} \quad (5.2.18a,b)$$

파랑류장 계산에서는 쇄파에 의한 응력분산만을 고려하므로 평균저면응력을 무시하면 식 (5.2.14), (5.2.16)으로부터

$$\tau_b = -\rho g d \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial E}{\partial x} + \tau_s = 0. \quad (5.2.19)$$

따라서 식 (5.2.18)과 (5.2.19)로부터 평균해면에서의 전단응력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_s = -\frac{\partial E}{\partial x} - \frac{\rho}{T} \frac{\partial(AC)}{\partial x}. \quad (5.2.20)$$

이 식이 해수면에서의 경계조건이다.

다. 난류마감 모형

식 (5.2.8)과 (5.2.9)의 수피해를 구하기 위해서는 난류확산계수 N_h, N_v 를 결정하여야 한다. 이와 같은 수평 및 연직확산계수는 수치모의 결과에 상당한 영향을 미치며, 특히 연직확산계수는 3차원 수치모형에서 매우 중요하게 취급되며, 이를 산정하기 위한 0-, 1-, 2-방정식 모형이 있다. WINC3D에서는 2-방정식 모형인 $k-\epsilon$ 모형을 채용한다.

다음과 같이 정의되는 난류운동에너지의 변화율을

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

운동량방정식으로부터 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + W \frac{\partial k}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{N_v}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + N_v \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 - \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\} - \epsilon. \end{aligned} \quad (5.2.21)$$

여기서 σ_k 는 Prandtl-Schmidt number로서 경험상수이고, ϵ 은 난류운동에너지의 감쇠율이다. 난류확산계수 N_v 는 k 및 ϵ 과 다음과 같은 관계를 가지며,

$$N_v = C_1 \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (5.2.22)$$

ϵ 은 Kolmogorov-Prandtl 이론에 의하여 k 및 난류 특성길이가 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\epsilon = C_1 \frac{k^{3/2}}{l}. \quad (5.2.23)$$

일반적으로 사용하는 난류 특성길이는 다음과 같다.

$$l = \kappa (C_1 z)^{1/4} \dots \quad (5.2.24)$$

식 (5.2.21)-(5.2.24)를 이용하여 난류확산계수를 구하는 경우를 1-방정식 모형이라 한다.

2-방정식 모형은 식 (5.2.21) 외에 난류에너지 감쇠율 혹은 특성길이에 관한 식 등의 두 식을 풀어 난류확산계수를 두 식에서 계산된 값으로 산출하는 것으로서 WINC3D에서는 난류에너지 감쇠율에 관한 식을 대상으로 하였다, 난류에너지 감쇠율의 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + W \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{N_v}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} N_v \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right\} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5.2.25)$$

식 (5.2.21)과 (5.2.25)에서의 상수 값은 다음과 같다.

$$\sigma_k = 1.00, \quad \sigma_\epsilon = 1.30, \quad C_1 = 0.09, \quad C_{\epsilon 1} = 1.44, \quad C_{\epsilon 2} = 1.92. \quad (5.2.26)$$

2. 수치기법

먼저 이상에서 언급한 모든 기본방정식은 전술한 바와 같은 이유로 σ -좌표계로 변환한다.

과랑류장에 관한 식 (5.2.8)과 (5.2.9) 및 연속방정식 (5.2.3)은 수심평균된 부분 (external mode)와 연직방향 변화 부분(internal mode)로 나누어 계산하며, 수치기법으로는 fractional method를 사용한다. 먼저 제1단계인 연직이류항은 2nd order의 정확도를 갖는 음해법인 Crank-Nicolson scheme을 사용하며, 2단계인 수평이류항 계산에는 Angled derivative method를, 마지막으로 3단계인 수평확산항은 2nd order 정확도를 갖는 양해법을 사용하였다.

난류확산계수 계산을 위한 k - 및 ϵ -방정식은 staggered 격자상에서

Crank-Nicolson scheme으로 계산한다.

수치계산 흐름도는 Fig. 5.2.2와 같으며, 기본방정식의 차분식 및 경계조건등은 과학기술처(1994) 및 Lee(1998)에 상술되 있으므로 생략한다.

3. 모형검증

일반적으로 파랑우세 사질퇴적환경의 해변의 등심선은 일정한 형태로 휘어 있는 형태이다(plan-shaped curved beach). 최근, 많은 수치모형실험 결과를, 이와 같은 형태의 해변에 대해 실시한 Da Silva Lima(1981)의 수리모형실험 결과와 비교하였다. 본 연구에서도 그 적용성 확보를 위하여 WINC3D의 실험결과를 Da Silva Lima의 실험결과와 비교하였다.

수리실험은 길이 7.6m, 폭 3.0m, 그리고 깊이 0.5m인 수조에서 실시하였으며, 수심은 다음 식으로 주어진다(Fig.5.2.3).

$$h(x, y) = \begin{cases} 0.05x & -0.7m \leq x \leq 0, \\ 0.05 \left[x - 0.75 \sin\left(\frac{\pi x}{4.36}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{3}\right) \right] & 0 \leq x \leq 4.36m. \end{cases}$$

총 9회의 수리실험을 실시하였으며 실험조건은 Table 5.2.1과 같다. 표에서 H , T 그리고 L 은 각각 파고, 주기 및 파장이며, 첨자 h 와 o 는 각각 수조내 수평단면 상에서의 값과 그에 해당하는 offshore에서의 값이다. 수치실험과의 비교는 실험이 가장 잘 수행된 'run2'와 cross-shore current에 대한 정보가 가장 많은 'run5'에 대해 실시한다.

수치모형의 수평격자망은 $\Delta x = 0.2m$, $\Delta y = 0.375m$ 크기인 격자 36×8 개로 구성되며(Fig. 5.2.4), 연직격자수는 20개이다. 난류확산계수 산정을 위해서는 2-방정식 모형과 0-방정식 모형을 병행하였으며(Lee, 1998), 난류마감모형의 계산간격은 0.001초이다. 파랑과 흐름의 상호작용은 무시하였다.

Fig. 5.2.5와 5.2.6은 각각 0-방정식 마감과 2-방정식 마감을 사용하여 구한 수심평균흐름의 계산치와 측정치를 비교한 것이다(파고 비교는 Lee(1998) 참조).

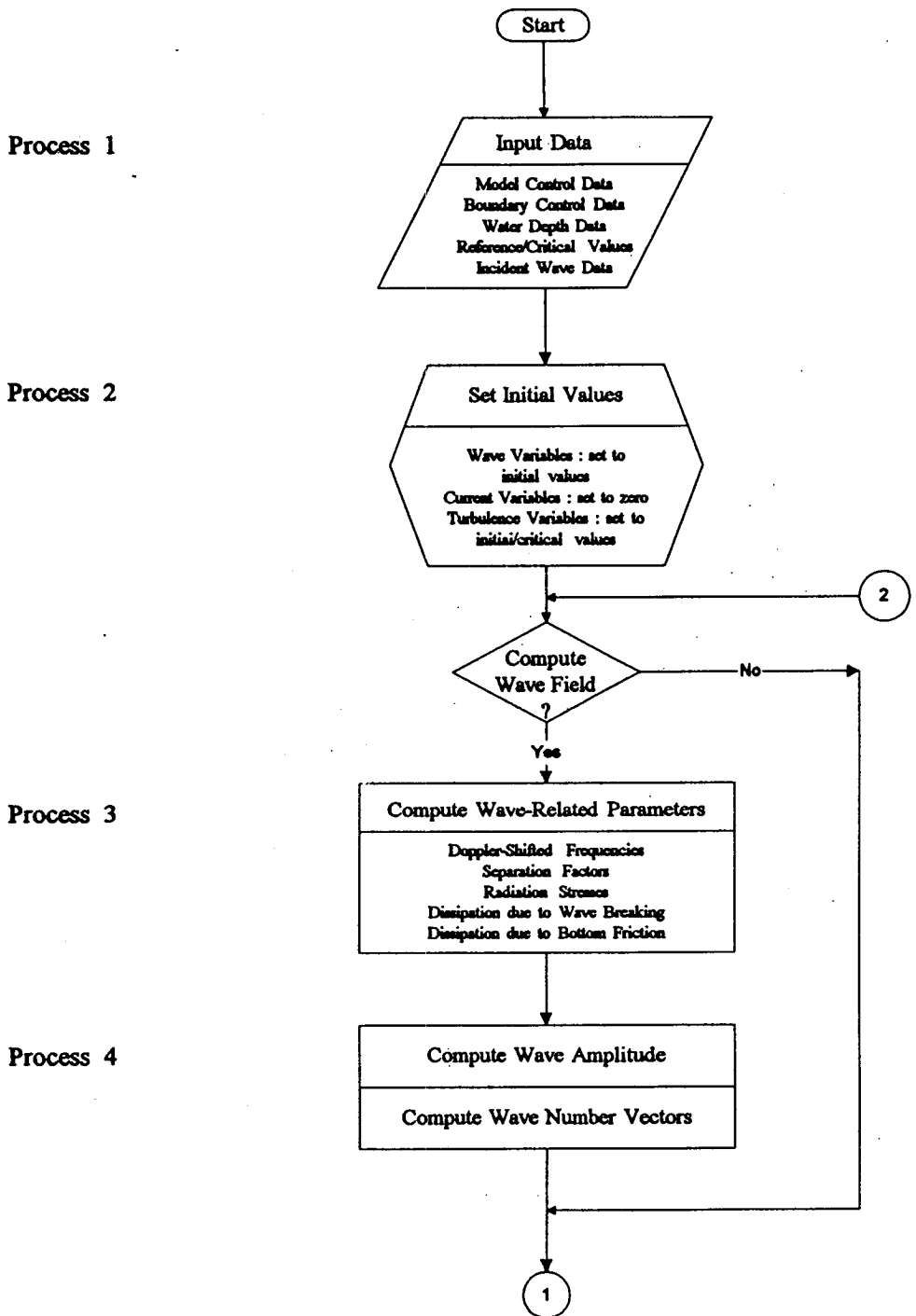


Fig. 5.2.2 Flow chart of the computer program.

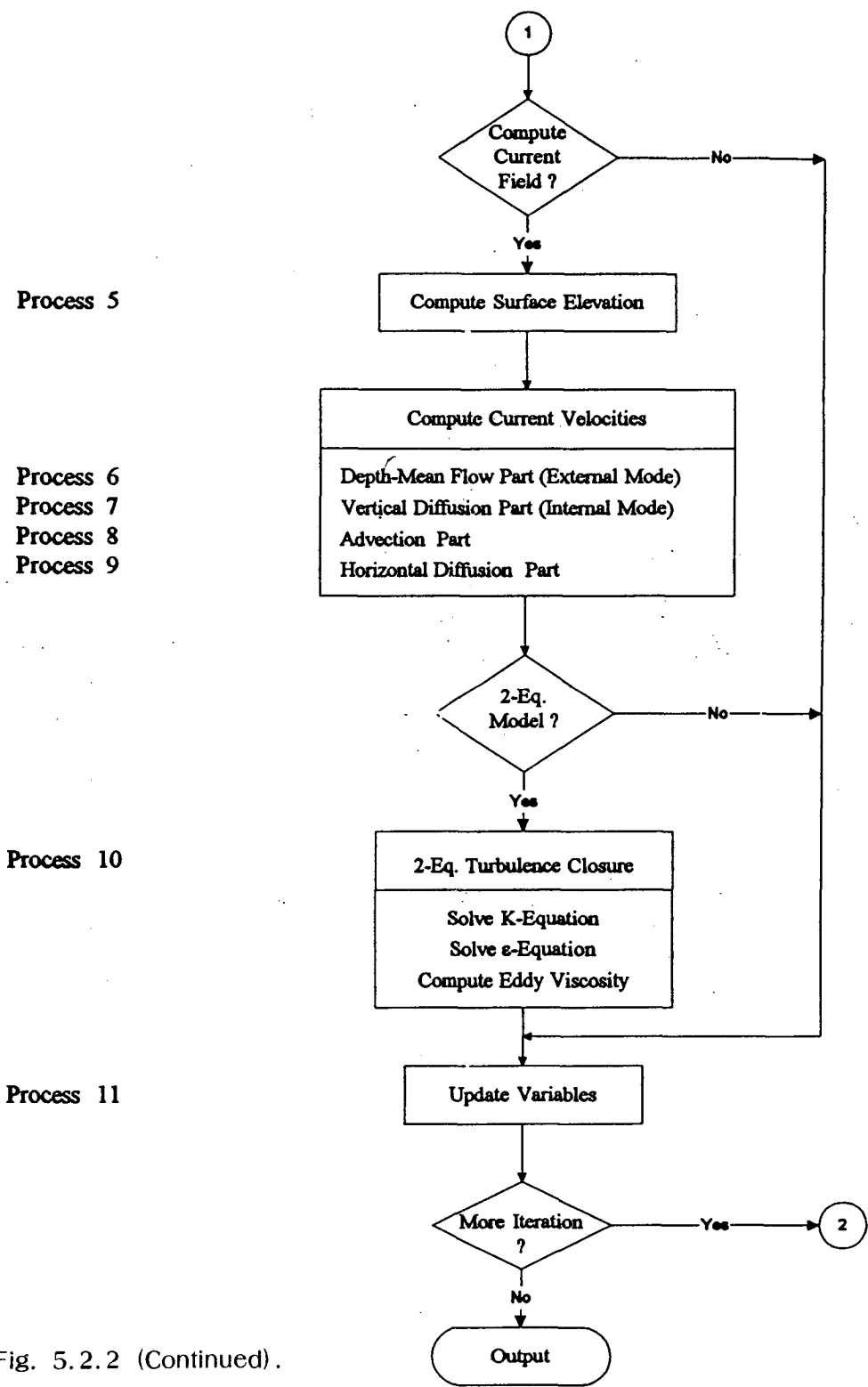


Fig. 5.2.2 (Continued).

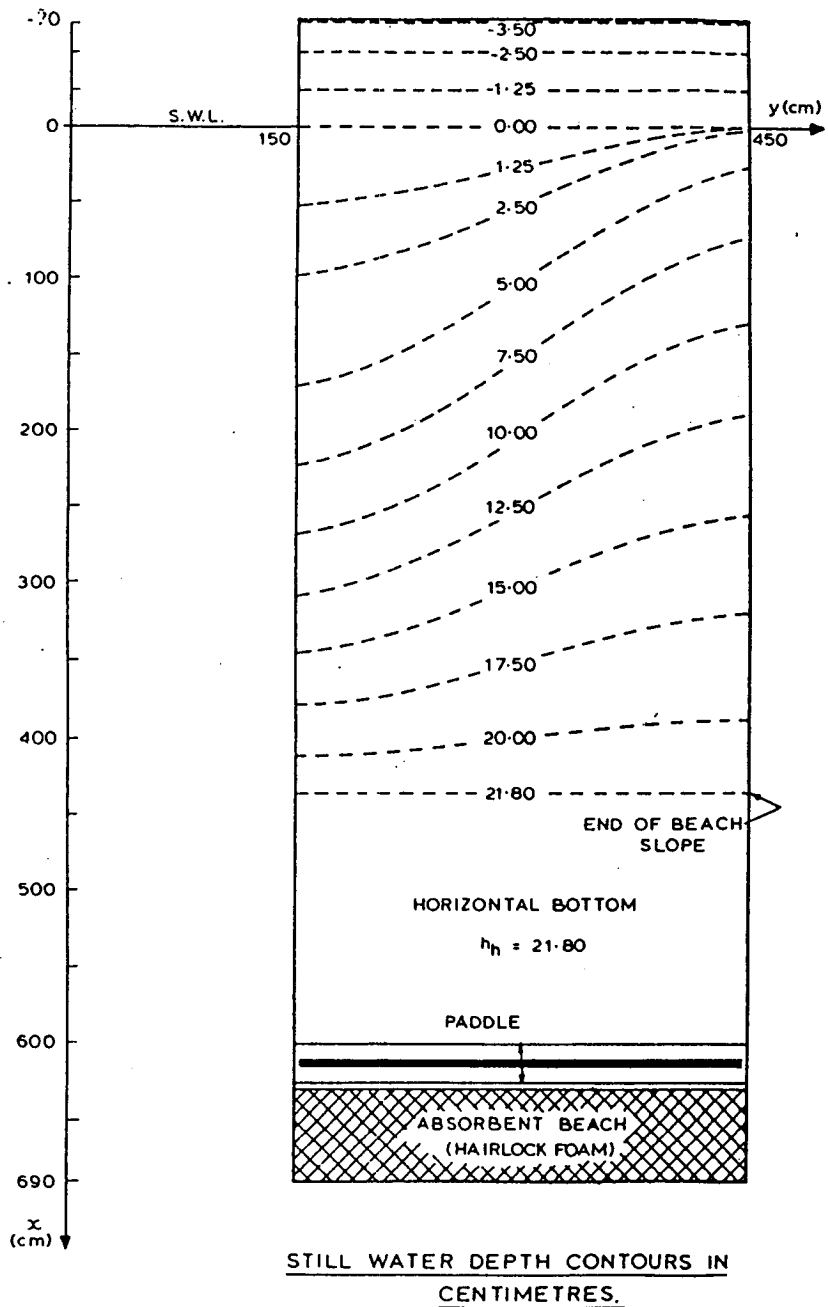


Fig. 5.2.3 Da Silva Lima's experimental set-up and water depth contour.

● : Comparison point with experimental data

* : Vertical velocity profile plotting points

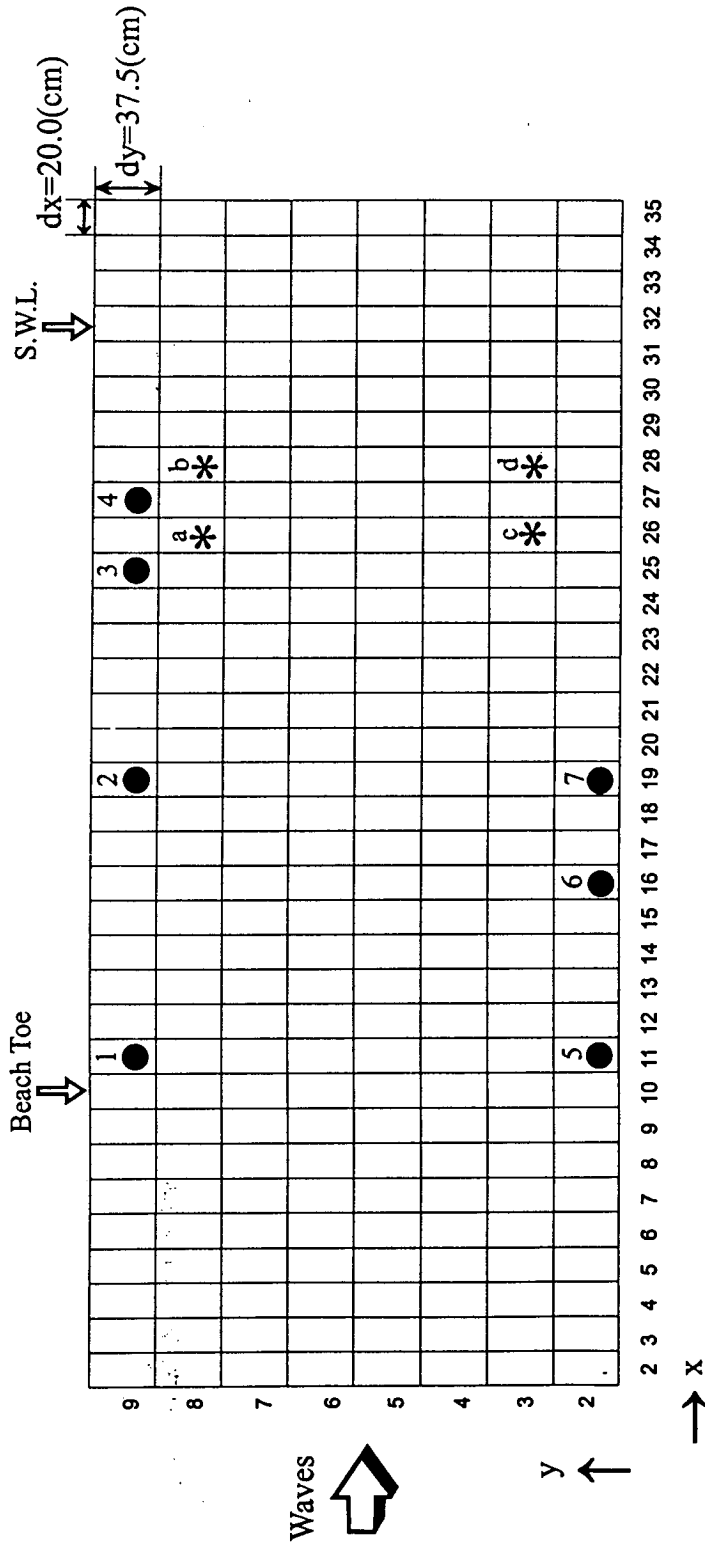


Fig. 5.2.4 Map showing the model grid system and the reference points.

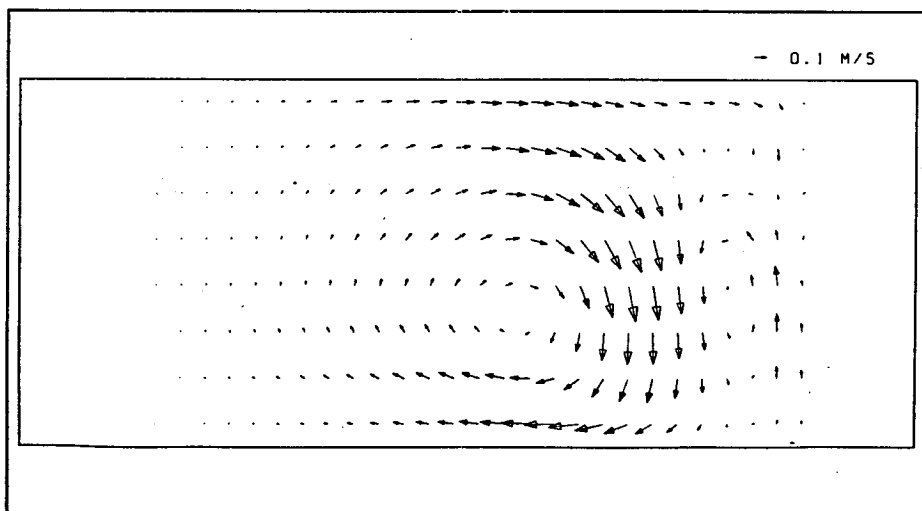
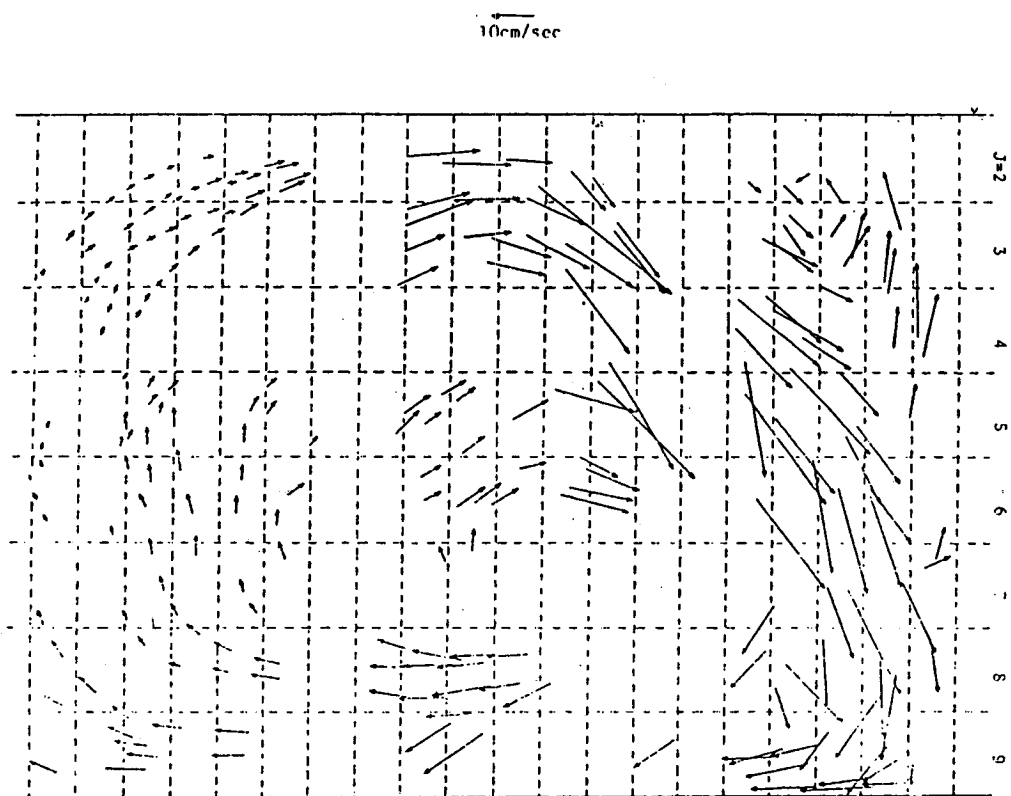


Fig. 5.2.5 Vector plots of the measured depth-mean current velocity (top) and the computed depth-mean velocity with the 0-Eq. closure (bottom) (run2).

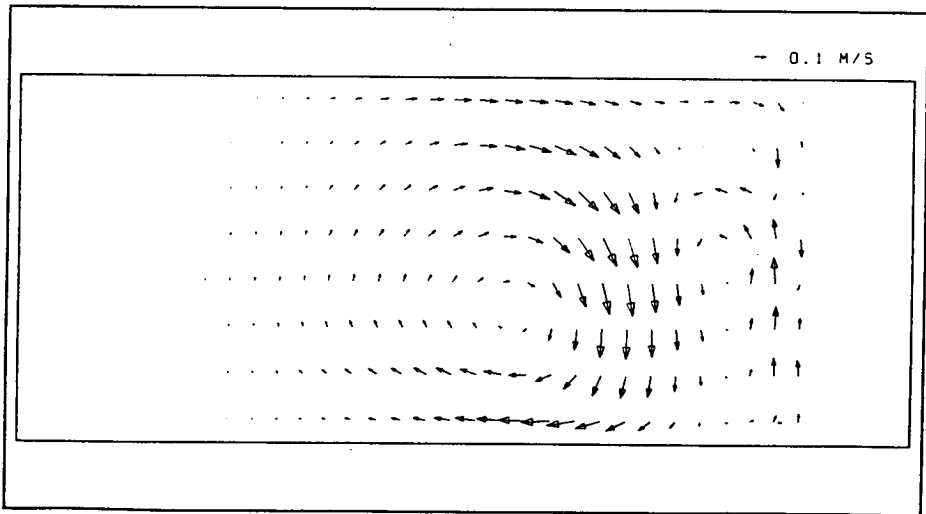
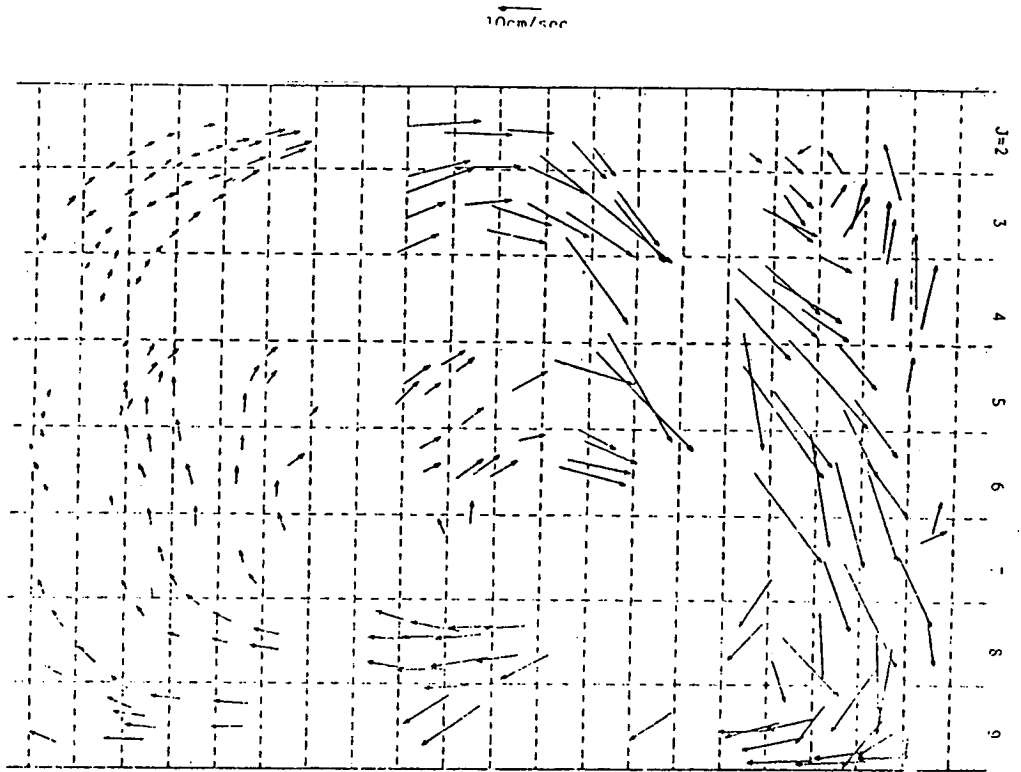


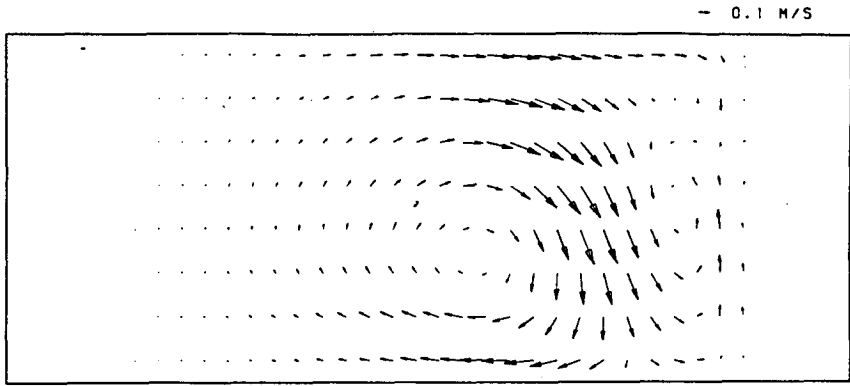
Fig. 5.2.6 Vector plots of the measured depth-mean current velocity (top) and the computed depth-mean velocity with the 2-Eq. closure (bottom) (run2).

Table 5.2.1 Da Silva Lima's experimental wave conditions
(Da Silva Lima, 1981).

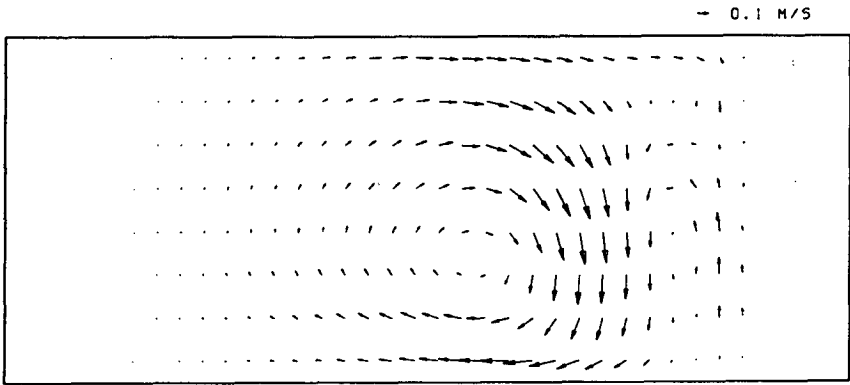
Run No.	$H_h(cm)$	$H_o(cm)$	$T(s)$	$L_h(cm)$	$L_o(cm)$	H_h/L_h	H_h/L_o
1	6.60	6.82	0.62	58.76	59.97	0.371	0.364
2	5.75	6.18	0.76	83.52	90.11	0.261	0.242
3	7.32	8.47	0.88	104.81	120.81	0.208	0.180
4	5.47	5.95	0.82	93.97	104.89	0.232	0.208
5	6.73	7.37	0.92	111.22	132.04	0.196	0.165
6	6.38	6.98	0.98	121.11	149.82	0.180	0.146
7	4.93	5.39	0.87	102.11	118.08	0.213	0.185
8	5.15	5.55	1.14	150.34	202.74	0.145	0.108
9	4.17	4.55	1.04	131.33	168.73	0.166	0.129

전체적인 흐름양상과 와류가 발생하는 위치가 유사함을 알 수 있다. 0-방정식 마감과 2-방정식 마감을 사용하여 구한 층별유속분포(표층: $\sigma=0.975$, 중층: $\sigma=0$, 저층: $\sigma=-0.975$)를 각각 Fig.5.2.7과 5.2.8에 제시하였다. 비록 두 경우 모두 흐름 형태가 수심평균류와 유사하지만 주와류의 해안측에서 파랑류의 3차원적 구조를 잘 재현하고 있다. 즉, 표층에서는 해안을 향하지만 저층에서는 offshore 방향으로 향한다. 이와 같은 양상은 Fig. 5.2.9와 5.2.10에서 알 수 있는 바와 같이 4개 비교점(Fig. 5.2.4의 a-d)에서의 유속 연직분포에서도 나타난다. 특히 (a)와 (c)에서 cross-shore current의 연직변화가 크지만 연안류 변화는 비교적 작다. 매우 수심이 낮은 영역에서의 차이는 2-방정식 마감으로 계산한 흐름이 0-방정식 마감의 경우보다 약간 크고, 연직변화의 경우는 0-방정식 마감의 경우가 2-방정식 마감의 경우보다 일반적으로 크다는 것이다. 이는 주로 2-방정식 마감으로 계산된 eddy viscosity가 0-방정식의 경우보다 크기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

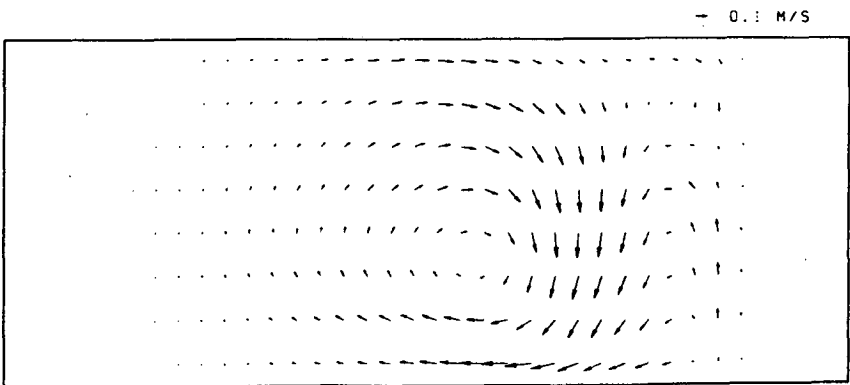
'Run5'의 경우에 대해 계산된 수심평균 흐름장을 Fig. 5.2.11에, 0-방정식 및 2-방정식 마감을 사용하여 구한 층별 유속분포를 Fig. 5.2.12와 5.2.13에 제시하였으며, 전체적인 양상이 실험치와 유사한 것으로 나타났다.



(a). Near - Surface

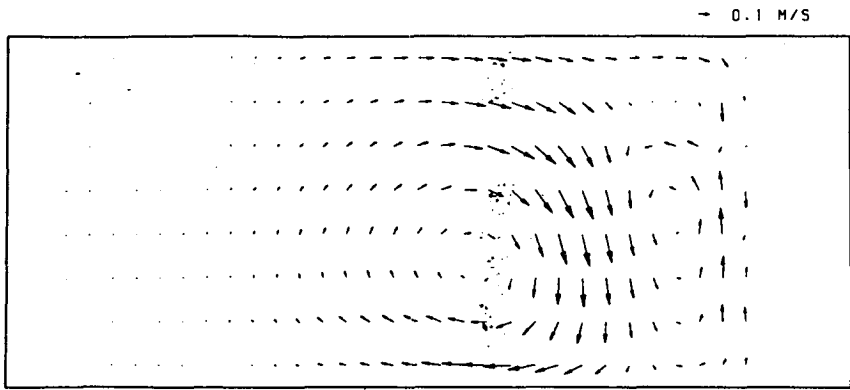


(b). Mid - Depth

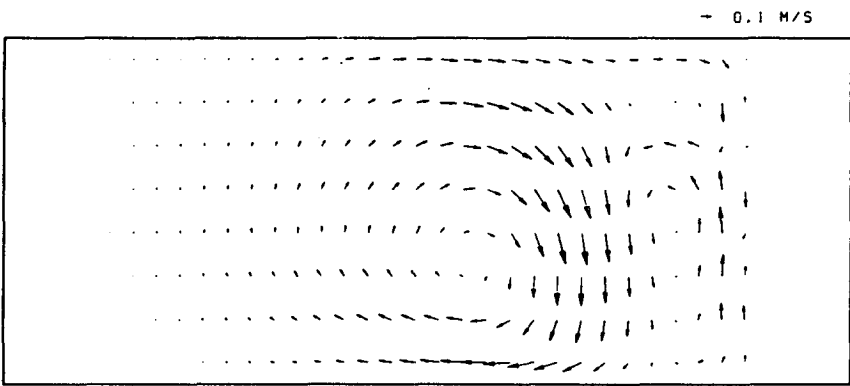


(c). Near - Bed

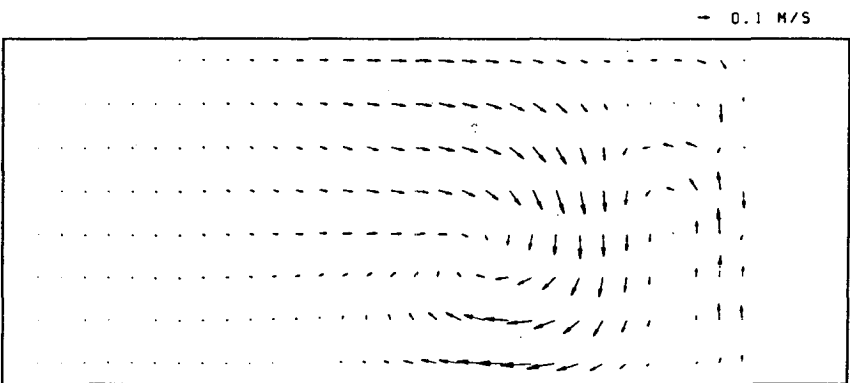
Fig. 5.2.7 Vector plots of the computed velocities with the 0-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed (run2).



(a). Near - Surface



(b). Mid - Depth



(c). Near - Bed

Fig. 5.2.8 Vector plots of the computed velocities with the 2-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed (run2).

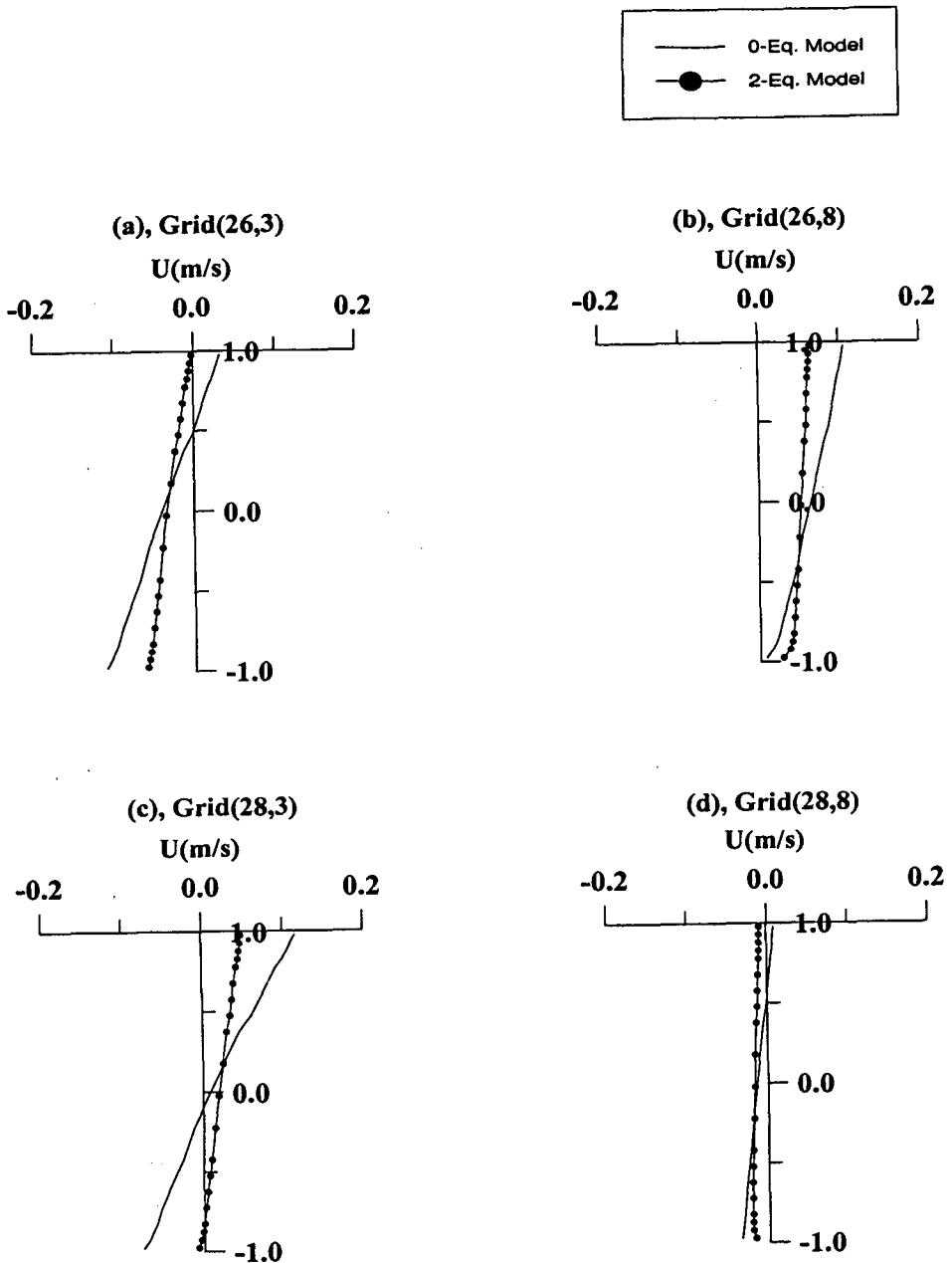


Fig. 5.2.9 Comparison of the computed U-velocities at 4 selected points between with the 0-Eq. closure and with the 2-Eq. closure (run2).

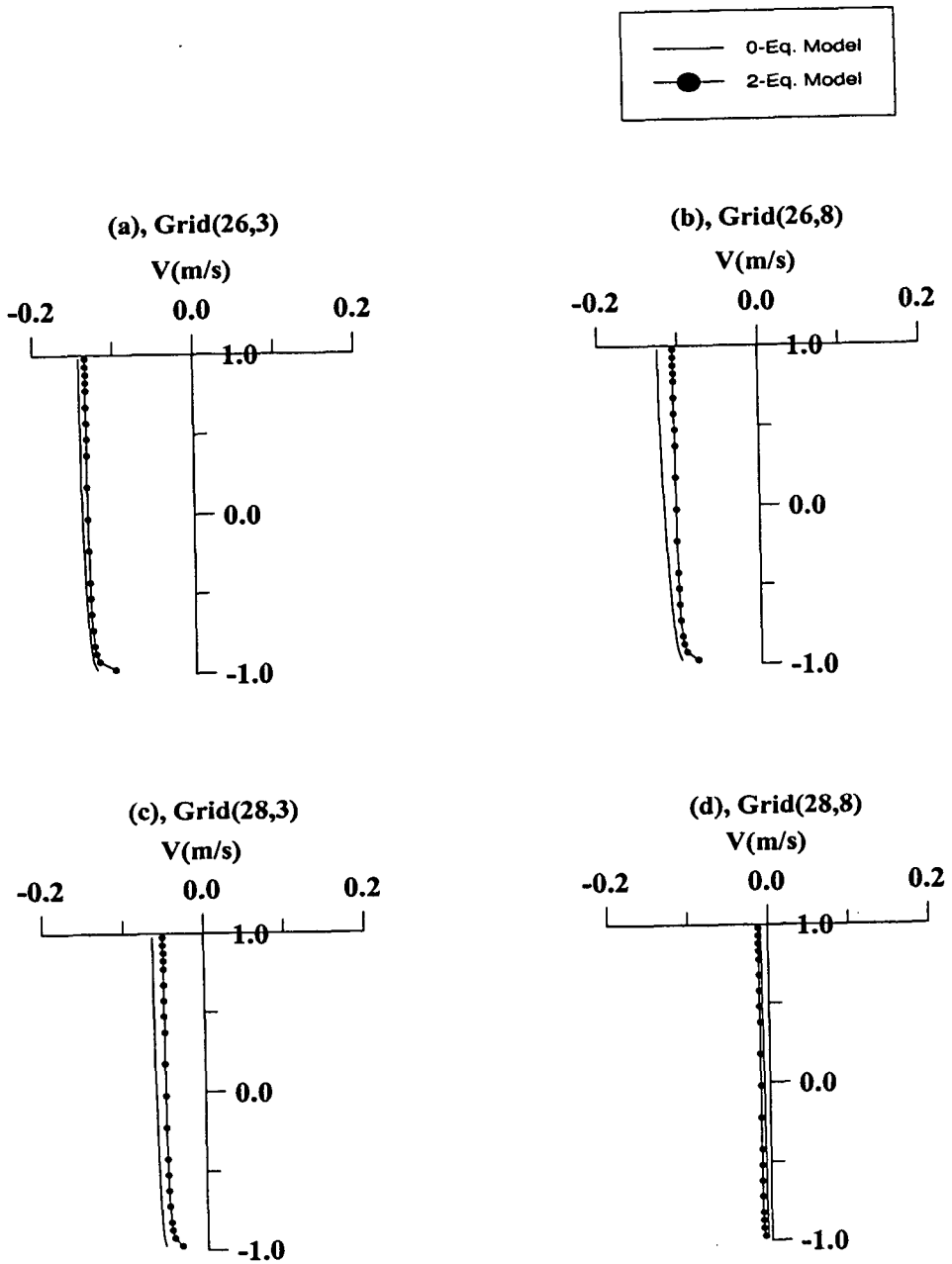


Fig. 5.2.10 Comparison of the computed V -velocities at 4 selected points between with the 0-Eq. closure and with the 2-Eq. closure (run2).

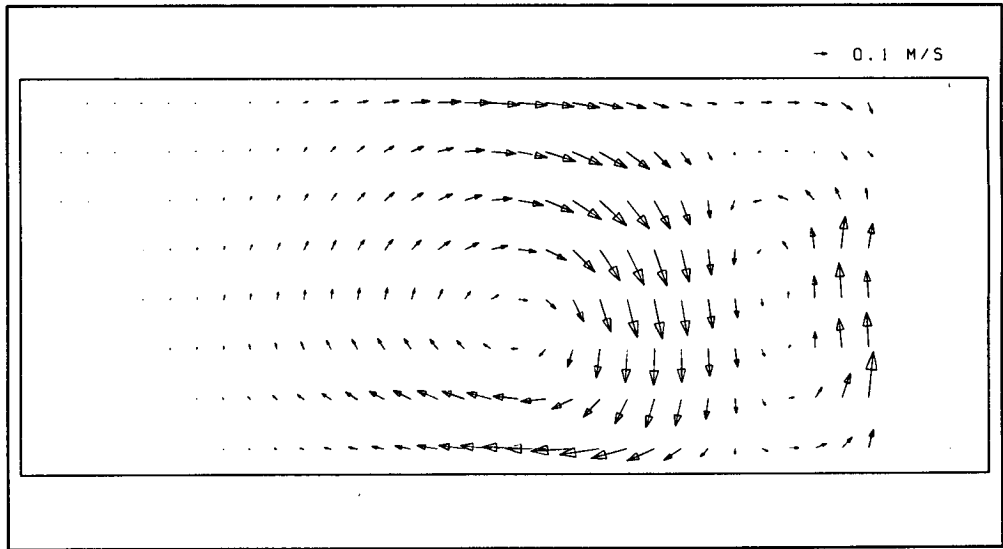
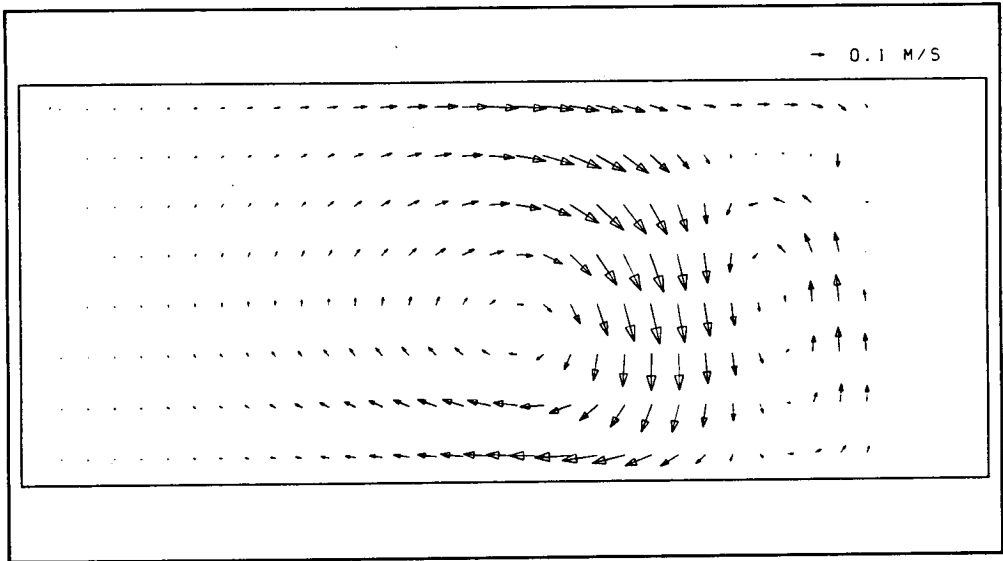
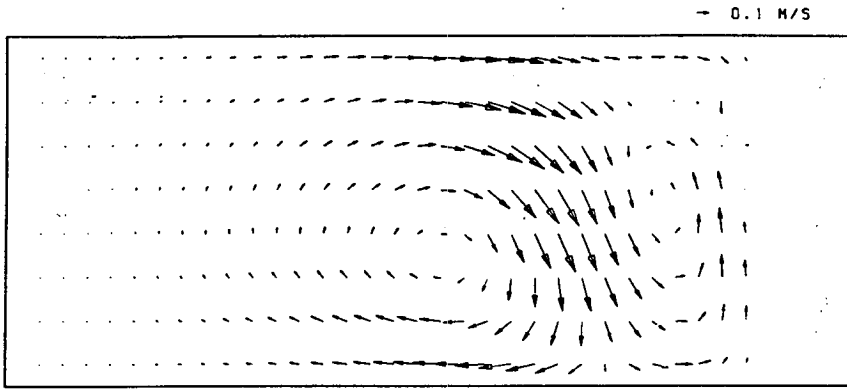
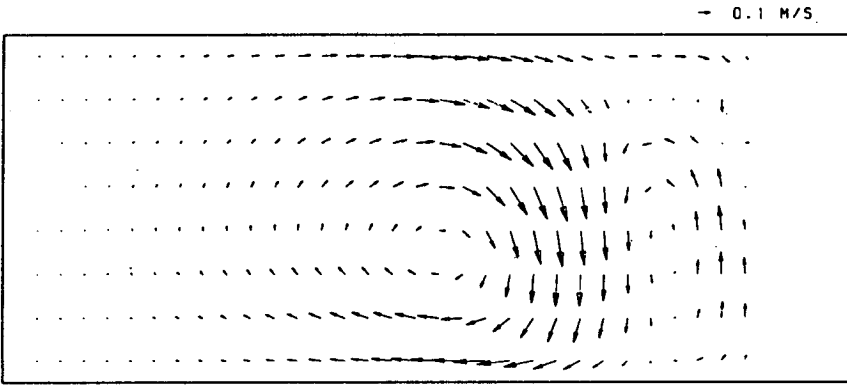


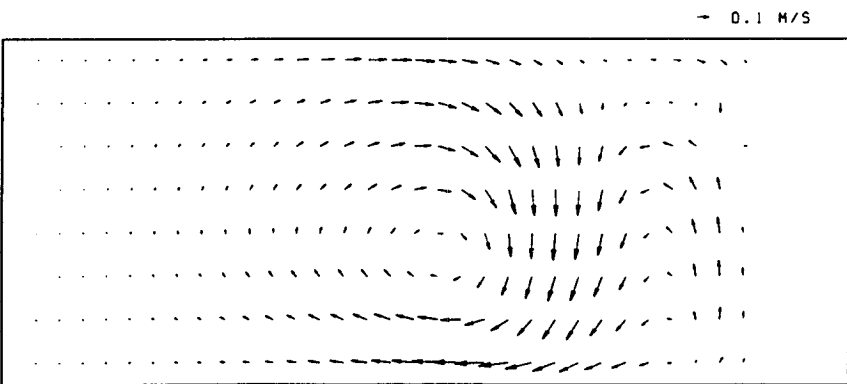
Fig. 5.2.11 Vector plots of the computed depth-mean velocity with the 0-Eq. closure (top) and with the 2-Eq. closure (run5).



(a). Near - Surface

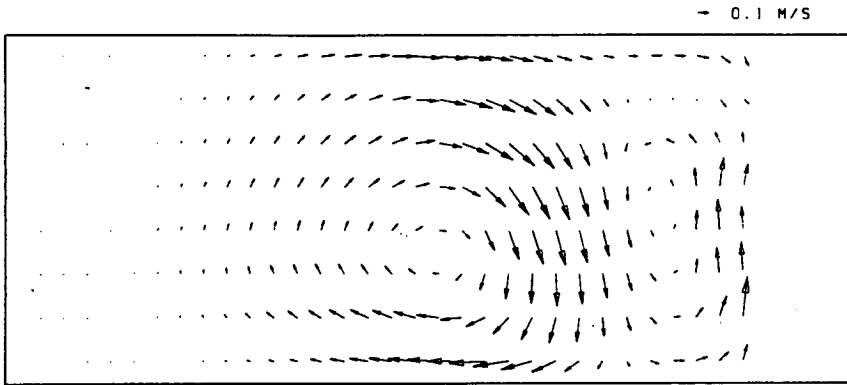


(b). Mid - Depth

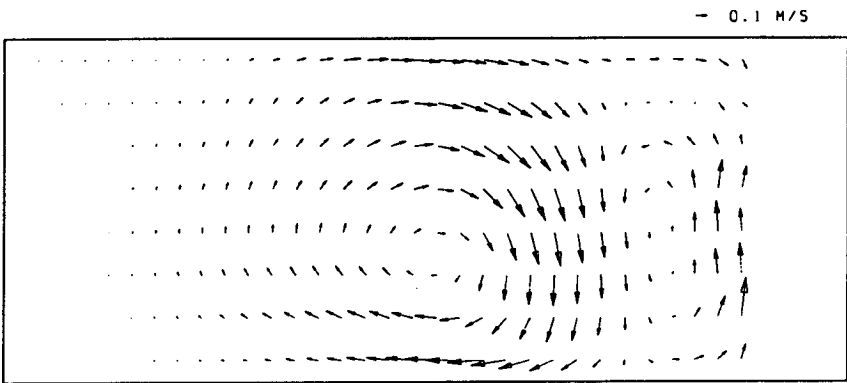


(c). Near - Bed

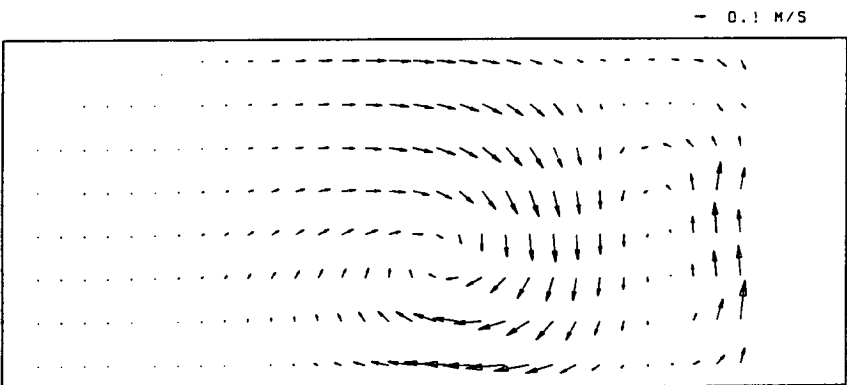
Fig. 5.2.12 Vector plots of the computed velocities with the 0-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed (run5).



(a). Near - Surface



(b). Mid - Depth



(c). Near - Bed

Fig. 5.2.13 Vector plots of the computed velocities with the 2-Eq. closure at different points in the vertical ; (a) near-surface, (b) mid-depth, and (c) near-bed (run5).

Fig. 5.2.4에 나타낸 7점에서 cross-shore current의 계산치와 측정치를 Fig. 5.2.14에 비교하였다. 그림에서 음의 유속이 해안 방향이다. 수리실험시 측정상의 불확실성이 포함되어 있을 것임을 감안하더라도 측정치와 계산치간의 차이를 보인다. 쇄파대 밖으로서 흐름이 약할 것으로 기대되는 점 (1)과 (5)에서도 측정유속의 연직변화가 매우 컸다. 그러 쇄파대로 접근함에 따라 측정유속의 연직변화는 감소한다. 이와 같은 차이의 원인은 현재까지 밝혀지지 않았지만, 실험시 포함된 오차와, 실험수조가 3차원 파랑류를 재현하기에는 너무 작은 것이 그 원인일 가능성이 있다.

4. 결론 및 토의

과학기술처(1994)가 수립한 3차원 파랑류 수치모형 WINC3D를 세련화하여 그 적용성을 확보하고자 수리실험결과 비교하였다. 비교결과, 쇄파대 부근에서의 이안류 등 계산된 흐름의 전체적인 양상은 실험치와 유사하였으나, 특정점에서의 cross-shore current의 경우, 계산치와 실험치가 차이를 보였다. 비교점의 위치와 측정된 유속으로 미루어, 이와 같은 불일치는 실험오차일 가능성이 높은 것으로 판단된다. 파랑류를 3차원적으로 규명하고자 하는 연구가 시작된지 오래지 않은 관계로 모형결과를 검증할 수리실험결과가 극히 부족한 실정이다. 따라서 차후 본 모형의 적용성 확보를 위해서는 가능한 수리실험자료의 확보와 현장관측이 요구된다.

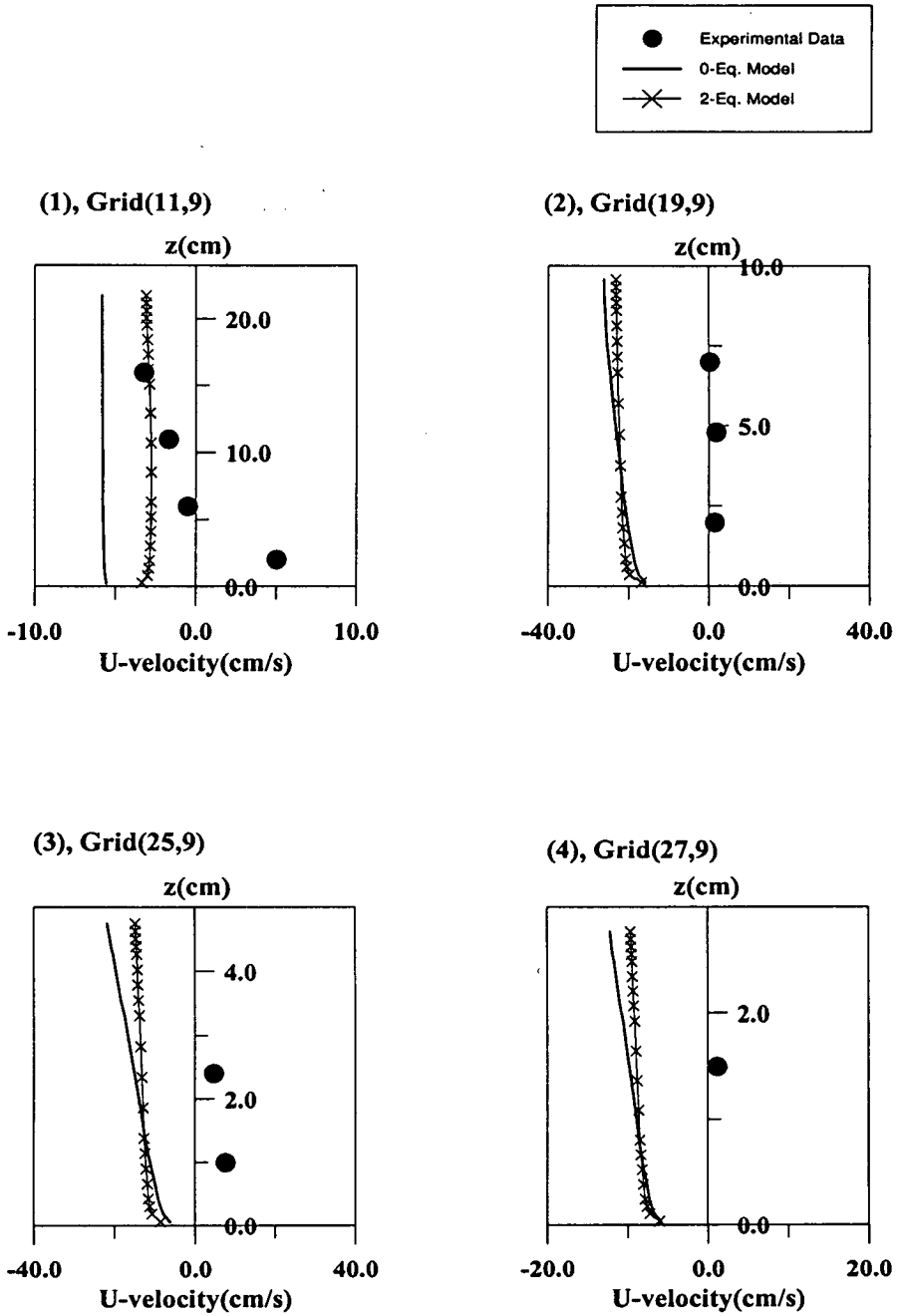


Fig. 5.2.14 Comparison of the vertical distributions of the cross-shore component of nearshore currents between the calculated values and the measured values (run5).

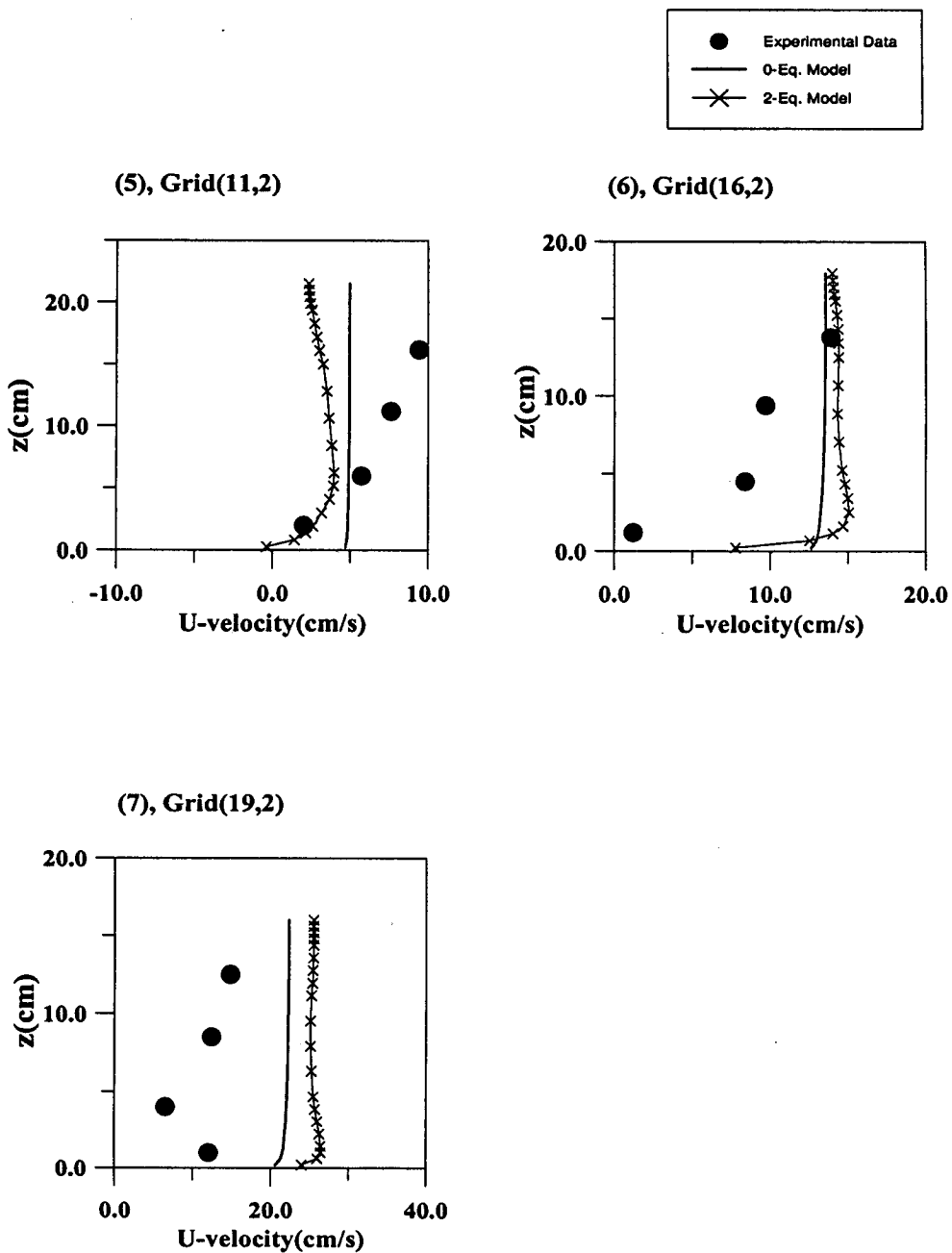


Fig. 5.2.14 (Continued)

제6장 저면경계층 수리·퇴적현상 관측시스템

제1절 서론

연안구조물의 안정성 확보에 중요한 역할을 담당하는 현상이 구조물 주변의 침식 및 퇴적이다. 즉, 연안에 축조된 교각, 잔교, 호안 등의 구조물은 주변의 흐름장 및 파랑장의 변화를 유발하고, 이는 다시 퇴적물 이동양상 및 저면고 변화를 야기한다. 이와 같은 변화와 함께 구조물 주변의 수리·퇴적환경은 궁극적으로 새로운 평형상태로 진행한다. 따라서, 건설 초기에는 해저지반을 고려하여 구조물의 안정성을 확보하였더라도 수리환경의 변화정도에 따라 그 안정성에 심각한 문제를 야기할 수도 있다.

건설 후의 장기적인 구조물 안정성을 사전에 확보하기 위해서는 건설 후의 수리 및 퇴적환경변화의 신뢰성 있는 예측이 선결과제이며, 그 동안 수치모형실험을 예측방법으로 많이 이용하였다. 그러나 수치모형실험 결과의 신뢰성은 수치계산방법과 아울러 입력 및 검증자료의 정확성에 의존한다. 즉 해수유동 수치모형실험의 경우, 경계면에서의 정확한 수위 혹은 유속입력으로 시작하여, 그 결과가 적용영역 내 특정 점들에서 관측한 수위, 층별 유속 및 유향을 얼마나 잘 재현하느냐가 실험의 성패를 좌우하며, 해수유동실험의 성공여부는 이를 입력자료로 이용하는 퇴적물 이동 수치모형실험의 신뢰성 여부에 지대한 영향을 미친다. 그러나 비록 해수유동 실험이 만족할만한 결과를 생산하였더라도 퇴적물 이동실험의 신뢰성이 확보되는 것은 아니며, 단지 성공적인 해수유동 수치모형실험은 성공적인 퇴적물 이동 수치모형실험을 위한 최소한의 전제조건일 뿐이다.

퇴적물 이동 수치모형실험을 위한 입력 및 검증자료는 해수유동 수치모형실험

보다 훨씬 다양하다. 특히 미세퇴적물의 경우에는 물리적 변수들 뿐 아니라 생물학적, 지화학적 및 지질공학적 제변수들이 그 거동에 영향을 미치므로 우세변수의 선정부터 어려움이 따른다. 제변수의 이러한 다양성으로 말미암아 가능한 변수들의 영향을 정량적으로 만족할 만큼 파악되지 않은 상태이며, 현재는 주로 mud의 기계적인 거동파악에 주력하고 있는 실정이다(Berlamont et al., 1993). 이와 같은 mud의 기계적 거동에는 응집체(flocs)의 종합적인 정보를 제공하는 침강속도, 투수성(permeability)과 유효응력(effective stress)에 의해 제어되는 해저면의 압밀(consolidation), fluid mud의 유동학적 거동(rheological behaviour), 그리고 침식과 퇴적기작을 들 수 있다.

이와 같은 기계적 거동을 다시 수층내 거동, 경계면 거동, 그리고 퇴적층내 거동으로 나누면, 침강은 수층내 거동, fluid mud의 유동학적 거동과 침식 및 퇴적기작은 경계면 거동, 그리고 해저면의 압밀은 퇴적층내 거동에 속한다. 이 가운데 경계면 거동은 이동상에서 정지상으로의 전이적 거동이며, 퇴적물이동현상의 궁극적인 결과인 침식과 퇴적량 산정에 가장 중요함에도 현상의 복잡함으로 인해 이론적 규명이 가장 부족한 상태이다.

해저경계면 근방에서의 퇴적물 거동을 효과적으로 파악하기 위해서는 퇴적물 자체의 제변수 뿐 아니라 유속, 조위 및 파고 등의 수리정보를 동시에 파악하여야 하며, 특히 난류거동을 파악함이 중요하다.

French and Clifford(1992), Kawanisi and Yokoshi(1993) 등은 하구역의 저면 근방에 전자기 유속계(EMCM)로 측정된 난류변동성분의 상관(correlation, 통계학적 용어로는 공분산)을 계산하여 저면의 Reynolds stress를 직접 구하였으며, Green (1992), Xu et al.(1994) 등은 EMCM의 측정치에 Kolmogorov spectrum에 근거한 관성분산법(inertial dissipation method)을 적용하여, Sanford et al.(1991) 등은 역시 EMCM의 측정치에 이론적인 연직유속분포식을 사용하여 저면전단응력을 계산하였다.

Diserens et al.(1993)은, 저면으로부터 0.1m, 0.5m, 1.0m 높이에 impellor 유속계를, 각각 수평면 유속과 연직평면 유속을 측정하기 0.1m와 0.5m 높이에 EMCM

을, 0.1m, 0.5m, 1.0m 높이에 탁도계를, 그리고 저면으로부터 0.8m 높이에 수압계를 장착한 저면경계층 관측시스템으로 관측한 자료를 퇴적물이동 수치모형실험에 이용하였다. Darbyshire and West(1993)는 저면으로부터 0.25m, 0.55m 높이에 흐름방향과 연직방향의 난류를 측정하기 위해 EMCM을 장착하고, 0.18m와 0.48m 높이에 탁도계를 설치한 관측시스템을 대조차 미세퇴적물 환경인 영국 Parrett 하구역에 설치·관측하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 1) 높은 농도의 부유퇴적물과 유속장과의 상호작용으로 인하여 유속과 부유퇴적물 농도의 연직분포가 복잡해진다. 2) 난류변동은 아니면서 상대적으로 주기가 긴 유속변동이 흐름방향 유속에 나타나지만, 그 효과는 ensemble averaging 과정에서 크게 제거된다. 이와 같은 변동은 낙조시보다 창조시에 우세하며, 창낙조 공히 연직성분에서는 관측되지 않았다. 이 변동은 내부파의 작용 때문으로 판단되며, 난류응력에 대한 기여도는 작다. 3) 창낙조 동안에 흐름방향 난류성분의 상대적 세기는 영국 Tamar estuary에서의 기존 관측치(West and Oduyemi, 1989)와 유사하다. 4) 창조와 낙조시의 난류응력 연직분포는 매우 상이하며, 이는 부유퇴적물의 연직분포가 창조시에는 운동량의 자유로운 교환을 허용하지만 낙조시에는 이를 방해하기 때문으로 판단된다. 5) Fluid mud 층의 침식은 난류생성을 일시적으로 감소시키고, 그 부유과정 동안에는 운동에너지의 손실로 말미암아 흐름이 감속된다. 6) 낙조시 퇴적물의 재부유는 돌발적으로 발생하며, 저면 근방에서의 난류응력이 0.2Nm^{-2} 정도일 때 발생한다. 이 값은 같은 지역의 mud를 이용하여 실내침식실험에서 구한 값보다 상당히 높은 값이다.

Williams and Tochko(1977)는 acoustic travel time을 이용한 초음파 유속계(BASS : Benthic Acoustic Stress Sensor)를 개발하였으며, 이를 이용하여 Grant et al.(1984), Gross et al.(1986, 1992, 1994), Williams et al.(1987) 등이 저면경계층에서의 난류, 그리고 파랑과 흐름의 상호작용 등을 연구하였다.

Stacey(1996), Cheng et al.(1997) 등은 broad-band Acoustic Doppler Current Profiler(ADCP)를 이용하여 저면 근방에서의 흐름구조를 연구하였다. 같은 음파와 Doppler 효과를 이용하지만 한 점에서의 3차원 유속을 측정할 수 있는 Acoustic Doppler Velocimeter(ADV)를 Kraus et al.(1994)이 개발하였다. Kim et al.(1996)은

ADV를 이용하여 저면으로부터 14cm와 44cm에서의 난류를 5Hz로 관측하였으며, 4 가지 방법, 즉 난류성분간의 상관을 직접 이용하는 방법(COV), 난류운동에너지(TKE)를 이용하는 방법, Kolmogorov spectrum에 근거하는 관성분산(ID)을 이용하는 방법, 그리고 유속의 log 분포식을 이용하는 방법(LP)을 사용하여 저면전단응력을 추정하여 각각을 비교하였다. 추정결과에 따르면, TKE 방법과 ID 방법을 이용한 추정치가 가장 작은 오차를 보였으며, COV 방법은 TKE와 ID 방법보다 작은 추정치를 나타냈다. 또한 COV와 LP 방법은 분산이 컸다.

본 연구의 목적은 저면의 수리·퇴적현상을 난류규모로 신뢰성있게 관측할 수 있는 시스템을 구축함에 있다. 우선 기존연구에 따르면 우선 저면경계층에서 난류를 관측하기 위한 유속계가 다양함을 알 수 있으며, EMC를 제외한 유속계는 아직 퇴적물 이동과 연계하여 이용함이 부족한 실정임을 알 수 있다. 따라서, 효율적인 저면경계층 관측시스템을 구성하기 위하여 먼저 현장에서 난류를 보다 신뢰성있게 측정할 수 있는 유속 센서를 선정한다. 다음으로 수리현상 뿐 아니라 퇴적현상도 효과적으로 관측하기 위하여 탁도계의 결과를 실제 농도로 환산하는 과정이 신뢰성과 정확성을 확보할 수 있는 방안을 고찰한다. 이와 같은 검토를 토대로 최적의 유속 센서를 선정하였고, 탁도계 보정을 위한 자동채수기를 개발하였다. 또한 자동채수기가 유속계의 상류측에 위치하면 이로 인해 인위적인 난류가 발생하므로 자동채수기 array는 어떠한 흐름 조건하에서도 항상 유속계의 하류측에 위치하도록 하는 삼각설치대를 개발하였다. 아울러 수리·퇴적현상을 난류적 시간규모로 측정하기 위해서는 유속계와 탁도계를 동시에 제어하는 time-synchronization을 만족시켜야 하므로, 이를 위하여 두 센서를 함께 제어하는 data logger를 개발하였으며, 이들을 근간으로 해저경계면 부근에서 수리 및 퇴적물의 난류적 거동(turbulent behaviour)을 보다 신뢰성 있게 파악하기 위한 저면경계층 수리·퇴적현상 관측시스템인 Benthic SPHINX(Sedimentary Processes and Hydraulic Information Xeroxing system)를 구축하였다.

제2절 유속센서 특성분석

수중 혹은 공기중의 흐름을 측정하기 위하여 현재까지 개발된 유속계의 측정 방법은 5 가지로 나뉜다. 즉, 모든 유속계는 1) 기계적 회전, 2) hot-wire 혹은 hot-film의 냉각, 3) 전자기장 변동, 4) 레이저 혹은 초음파의 Doppler 효과, 그리고 5) 초음파 이동시간 가운데 한 가지를 측정하여 유속으로 환산하는 것이다. 따라서 저면경계층에서 가장 효율적이고 신뢰성 있는 자료를 획득하기 위해서는 각 방식의 이론적 배경과 장·단점을 파악하는 것이 필요하다.

1. 기계적 회전 센서

가장 일반적인 유속측정방식이 흐름에 의해 유발되는 기계바퀴(impellor)의 회전을 감지하는 것이다. 유체역학적으로만 고려하면 기계바퀴의 반응을 예측하는 것은 어려우며, 세심한 보정이 필요하다. 비교적 큰 기계바퀴를 사용할 경우, 보정 과정에서 물의 온도를 측정가능할 정도로 변화시킬 수도 있지만, 일단 보정만 되면 이러한 방식의 유속계는 비교적 정확하고 견고하며, 특히 저렴하다. 그러나, 일정시간에 걸친 기계바퀴의 회전을 평균하고, 또한 기계바퀴의 관성으로 인해 유속이 감소하여도 이전 유속효과가 일정시간 지속되므로 난류변수 측정에는 제한이 따른다. 이와 같은 방식을 사용하는 몇 가지 소형유속계가 상업적으로 출시되었다. 예를 들어 Nixon Instruments Ltd.의 제품(모델명:Streamflow)의 경우, PVC 회전익(rotor)의 직경은 1.2cm에 불과하고, 낮은 관성을 갖고 2.5cm/s까지 측정할 수 있으며, 측정주파수는 유속 1.5m/s에서 1Hz까지 가능하다. 이와 같은 정확도이면 비교적 대규모의 와류구조(large-scale eddy structure)를 개략적으로 파악할 수는 있지만 저면 근방에서의 난류운동을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 보다 정밀한 유속계가 필요하다.

2. Hot-wire 및 hot-film probes

1950년대 이후 공기중의 난류 측정을 위하여 가열된 저항탐침(heated resister probe)을 사용하는 것이 일반화되었다. 이는 가열된 특정한 측정소자(sensing element) 주위를 흐르는 열적인 전도체(thermally conductive medium)에 의한 측정원소의 냉각효과를 이용하는 것이다(King, 1914). 측정원소로는 wire filament 혹은 금속 film을 이용하며, 이를 세라믹 탐침 위에 덮는다. 또한 측정소자는 feedback 전기회로판에 연결되며, 이 회로판에서는 측정소자를 통하여 일정한 전류를 유지하거나 측정소자가 일정한 온도를 유지하도록 전류를 조절한다. 유속변동이를 경우에는 후자의 방법을 이용하는 회로판이 일반적이다. Hot-wire 유속계가 대기중의 사질퇴적물 이동과 관련한 변수 측정에 이용되기도 하였지만(Lee, 1987 등), 유체 내에서는 측정소자를 전기적으로 절연시키기 위해 측정소자에 입힌 석영막(quartz coating) 등에 의한 전기분해 효과를 감소시키기 위한 보완이 요구된다(Richardson and McQuivey, 1968). 이와 같은 유속계는 다수의 매우 작은 측정소자를 하나 이상의 축방향으로 배열할 수 있고, 반응주파수도 약 100Hz까지 가능하므로 난류측정에는 이상적이다. 그러나, 이를 현장관측에 이용하는 것은 다음과 같은 여러 가지 이유로 인해 아직 제한이 따른다. 첫째, 측정소자가 견고하지 못하다. 저주파 관측을 보장하기 위해서는 두께가 1-2 μm 이내이어야 하는 절연석영막이 취급부주의, 퇴적물 입자의 충격에 의해 혹은 자체적으로 쉽게 쪼개질 수가 있다. 둘째, 유체내의 퇴적물 입자 혹은 오염물질들이 점차 성장하여 측정소자의 불규칙한 열손실을 유발시키거나 이를 제어할 수 없다. 마지막으로 유속계가 진동하면 가능한 측정 주파수를 제한시킬 수 있다. 따라서 실내에서 유체의 난류거동 연구에는 매우 효과적이거나 현장관측에 이용하기는 아직 어렵다.

3. 전자기 유속계

전자기 유속계(EMCM : Electromagnetic Current Meter)의 측정원리는 전도

체가 자기장을 통과하면 자기장과 전도체 진행방향에 직각인 방향으로 유도전압이 발생하며, 이 유도전압은 자기장, 전도체의 기하학적 형상 및 속도의 함수라는 Faraday 법칙을 이용하는 것이다(Fig. 6.2.1a). 즉 이를 유속계에 응용할 경우, 전도체는 유체이고, 자기장은 coil로 형성되며, 그리고 유도전압은 물과 접촉하고 있는 두 전극 사이에서 발생한다(Fig. 6.2.1b). 전극이 감지하는 것은 전류가 아니라 전압이므로 일반적으로 측정은 유체의 전도도에는 영향을 받지 않는다. 또한 이론적으로는 유속과 전압은 선형관계를 갖는다.

한 쌍의 전극으로 감지되는 흐름은 coil의 축과 두 전극의 연결선에 직교하는 흐름이다. 평면 2차원, 즉 직교하는 두 방향의 흐름을 측정하기 위해서는 두 개의 전극쌍이 하나의 coil을 공유하도록 한다. 3차원적 흐름구조 파악을 위해서는 하나의 coil 안쪽에 직교하는 또 하나의 coil을 넣고 두 개의 전극쌍을 이용하지만, 일반적으로는 두 개의 2차원 EMCM을 직교방향으로 설치하여 관측한다.

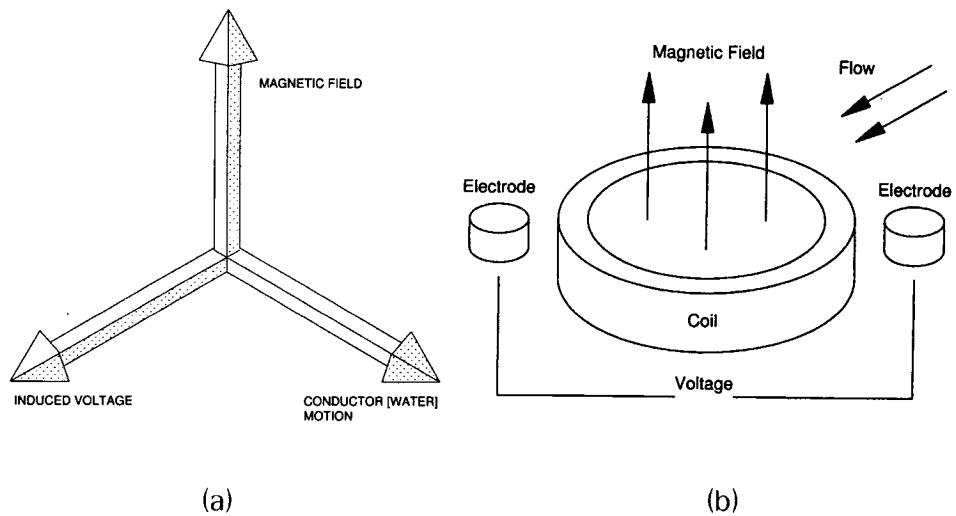


Fig. 6.2.1 Schematic diagrams of the measurement principle of electromagnetic current meters.

EMCM은 coil과 전극의 배열에 따라 Fig. 6.2.2와 같이 크게 6 가지로 대별된다. 먼저 활대형(spar type)은 1 방향 유속측정에 적합하며, 많은 군함이 이 방식을 사용한다. 이론적으로는 원통활대형을 사용하여 2 방향 유속을 측정할 수는 있지만 실제적으로는 활대 자체가 난류와 노이즈를 발생시킨다. 탐침형(Probe type) 역시 한 방향의 흐름을 측정하는 데 적합하다. 원반형(Discus type)의 경우, 방위각 반응(azimuth response)이 뛰어나고 유체역학적으로 발생하는 노이즈가 매우 작고 유속과 전압의 선형성이 뛰어나지만, 경사진 흐름에 대한 반응한계(tilt response)가 약 25° 정도이므로 흐름이 거의 2차원적일 때 적합하다. 구형(Spherical type)은 방위각 및 경사반응이 좋아 3차원 흐름이 예상되는 곳에서도 2차원 흐름을 잘 측정하지만, 유체역학적으로 발생하는 노이즈가 원형(annular type) 보다 심하다. 원형은 도우넛 형태를 가지며 경사반응이 탁월하며, 방위각 반응도 좋고, 유체역학적 노이즈가 작으며 유속과 전압의 선형성도 뛰어나다. 포장형(Flush mounted type)은 특정 물체에 장착하기 위한 것이다.

EMCM의 주된 장점은 impellor 유속계의 견고함에 일반적으로 5-10Hz의 높은 측정 주파수를 결합시킨다는 것이다. 따라서 유속이 비교적 크고 퇴적물 이동이 활

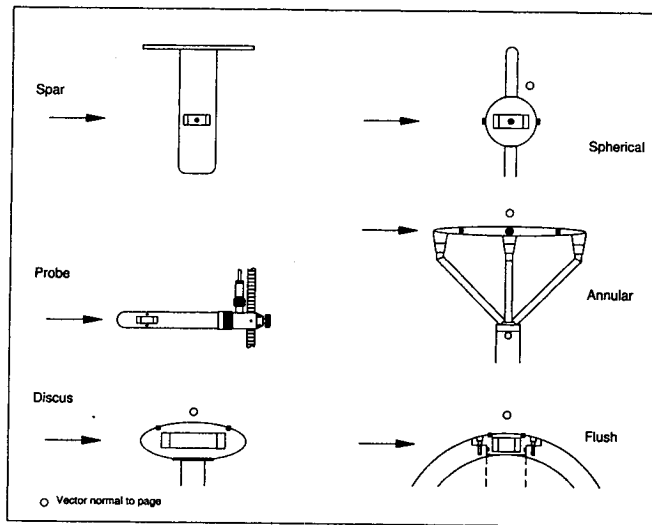


Fig. 6.2.2 Sensor configurations of EMCM and velocity vectors.

발한 해역에 설치할 수 있으며, 해저경계층 내의 난류전단응력에 관한 기존 연구에서 이 유속계를 많이 이용되었다(Bowden and Fairbairn, 1956; Gordon, 1974; Heathershaw and Thorne, 1985; West et al., 1986).

그러나 이와 같은 간단한 측정원리와 장점에도 불구하고 자기장을 발생하는 coil을 작게 만들고 전기적 신호 중에서 노이즈의 비율을 감소시켜 측정유속의 신뢰성을 높이기 위하여 비교적 복잡한 전기회로가 필요하다. 이에 따라 비록 이 유속계가 해양연구에 처음으로 이용되기 시작한 1950년과 1960년대 이후 많은 발전이 있었지만, 아직도 장비의 접지 문제, 교류 전선으로부터의 교란 등의 문제가 있으며, 관측시 장비설치대의 진동에 의해 유발되는 유속변동을 방지하기 위한 세심한 주의가 필요하다(West et al., 1986; Guza et al., 1988). 전극(Electrode)의 분극작용(polarization)을 방지하기 위하여 자기장을 교류 전류를 사용하여 발생시키며, 이 신호의 주파수가 센서 크기와 연계하여 유속계 민감도의 이론적인 상한을 결정한다.

EMCMs의 또 다른 단점은 sensor head에 의해 난류가 발생한다는 것이다. West et al.(1986)에 따르면, 비록 고주파 관측시에는 head 크기로 인해 측정손실이 발생하지만, 하구역에서 난류를 측정하기 위해서는 5.5cm 직경의 센서가 바람직하다. 그러나, 직경 3cm head를 이용한 실험에 따르면 주파수를 향상시키는 이점을 상쇄할 만큼 노이즈 문제가 심각하였다. 또한 흐름이 항상 head와 수평을 이루지 않음에 따라 문제가 발생한다. King(1977)이 원판형 EMCM을 이용한 실험에 따르면, 흐름이 head 평면과 이루는 각도가 30° 이내일 경우만 신뢰할 만한 결과를 보였으며, 이 범위를 벗어나면 head 주변에서 흐름분리현상이 발생하였다(Lane et al., 1993).

EMCMs의 일반적인 측정체적은 coil 외경의 3배 정도로서(영국 Valeport사의 Briefing Document 0800803A), 수중 특정점에서의 난류를 정확히 측정하기에는 측정체적이 비교적 크다. EMCMs는 zero-offset drift 문제가 심각하므로, 자료의 신뢰도를 높이기 위해서 설치 전후에 towing tank에서의 교정(calibration)이 필수적이다.

4. Doppler 유속계

가. Doppler 효과

오스트리아의 Christian Johann Doppler(1803-1853)는 1842년에 발광체의 색이 소리에서와 같이 그 물체와 관찰자의 상대적인 운동에 따라 변한다는 사실을 발표하였으며, 이를 doppler 효과라 한다.

일정한 거리를 유지하는 음원과 관찰자가 모두 정지하고 있으며, 음파의 속도를 c , 파장을 L 이라 하면, 관찰자가 시간 t 동안에 받는 파동의 수는 ct/L 이다. 그러나 관찰자가 음원을 향해 v_o 의 속도로 진행된다면 시간 t 동안에 $v_o t/L$ 의 파를 더 받게 된다. 따라서 단위시간 동안에 관찰자가 듣는 파동의 수, 즉 진동수 f_o 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_o = \frac{ct/L + v_o t/L}{t} = \frac{c + v_o}{L} = \frac{c + v_o}{c/f} = f \left(1 + \frac{v_o}{c} \right). \quad (6.2.1)$$

여기서 f 는 관찰자가 정지하고 있을 때 듣는 음파의 고유진동수이다. 관찰자의 운동에 의해 발생하는 주파수 변이성분 $(fv_o)/c$ 를 Doppler shift라 한다. 즉, 이 변이를 f_D 로 나타내면 다음과 같다.

$$f_D = f \cdot \frac{v_o}{c}. \quad (6.2.2)$$

Doppler 효과를 이용하는 유속계의 측정원리는, 1) 고정된 주파수의 파동을 발사하고, 2) 이 파동은 수중의 퇴적물 혹은 부유생물에 의해 산란되며, 3) 유속계가 그 반향을 감지하여 주파수 변이를 계산하고 이를 유속으로 환산하는 것이다. 따라서 유속계가 감지한 것은 산란물질(scatterers)에 의해 반사된 것이므로, 발생한 주파수 변이는 식 (6.2.2)의 2배이다. 즉,

$$f_D = 2f \cdot \frac{v_o}{c}. \quad (6.2.3)$$

또한 Doppler 효과는 오직 파동의 진행방향에 대한 효과만을 나타낸다. 만일 관찰자가 혹은 음원이 서로 직각을 이루며 이동한다면 Doppler 변이는 존재하지 않는다. 따라서 파동의 산란을 이용하는 경우에 도플러 주파수 변이를 정확히 표현하면 다음과 같다.

$$f_D = 2f \cdot \frac{v_o}{c} \cdot \cos \alpha. \quad (6.2.4)$$

여기서 α 는 파동의 진행방향과 관찰자 혹은 산란물질의 진행방향(유향)과의 사잇각이다.

나. 레이저 Doppler 유속계

위의 Doppler 효과 이론에서 음파 대신에 광파(laser beam)를 사용하여 만든 유속계가 극히 작은 측정체적(measuring volume)을 갖는 레이저 유속계(laser velocimetry)이다. Nezu and Rodi(1986) 등에 따르면, 일반적으로 실내실험시 전술한 산란물질을 뿌려야 하며, 그 크기는 규모가 작은 난류유속변동에 반응할 정도로 작아야 함과 동시에 주파수 역변조 회로가 노이즈를 감지하지 않아 입사광을 충분히 산란시킬 정도로 커야 한다. 가장 일반적인 산란물질의 직경은 5-50mm 정도이다.

레이저 유속계의 주된 장점은 주위 조건에 방해받지 않으면서 시공간적으로 높은 해상도를 가지며, 2차원 및 3차원 유속측정이 가능하다는 것이다. 그러나 복잡한 광섬유(fibre optics)를 채택하고, 센서로부터 이격된 유체 덩어리의 유속을 측정하기 때문에 흐름이 센서의 받지 않음에도 불구하고 산란물질의 크기를 제어할 수 없는 문제 때문에 현장관측에는 제한이 따른다. 특히 기포와 비교적 큰 퇴적물 입자들은 주파수 역변조(demodulation) 과정에서 노이즈를 발생시킨다.

다. 초음파 Doppler 유속계

위의 Doppler 주파수 변이와 초음파 성질을 이용하여 수중 일정 체적에서의 3차원 유속을 난류규모로 측정하는 것이 초음파 Doppler 유속계이다. Kraus et al.(1994)이 개발한 후 현재 상용화된 대표적인 모델은 노르웨이의 Nortek사와 미국의 SonTek사의 ADV(Acoustic Doppler Velocimeter)로서 최대 측정주파수는 25Hz이며, 음파의 송수신부를 포함한 작동 모식도는 Fig. 6.2.3과 같다. 송신부에서 발사된 10MHz의 초음파는 서로 120° 떨어진 3개의 수신부에서 수신된다. 수신부는 송신된 음파가 송신부로부터 5-10cm 하부에서 산란된 음파를 수신하도록 하며, 송신부로부터 이 4개의 음파가 교차되는 거리와 송신 펄스(pulse) 폭에 의해 결정되는 감지체적(sensing volume)의 길이는 3-9mm, 직경은 약 6mm이다.

전술한 바와 같이 Doppler 효과를 이용하기 위해서는 수중에 산란물질이 있어야 한다. ADV의 경우, 현장관측시에는 자연상태의 산란물질의 충분하므로 큰 문제가 없지만, 실내실험, 특히 물이 정지하고 있는 towing tank나 wave flume에서는 밀도가 약 1이고 직경이 8-10mm 정도인 산란물질이 농도 약 10mg/l 정도로 포함되어 있어야 한다(SonTek's Catalogue).

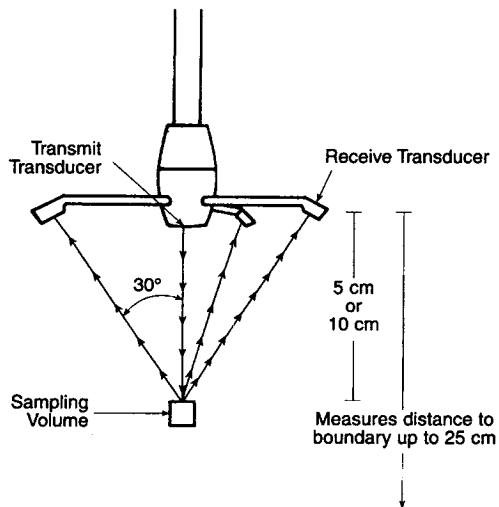


Fig. 6.2.3 Schematic diagram of the probe part of ADV.

만일 송신부에서 초음파를 발생시킨 후, 일정시간 간격으로 수신하면 3차원 유속의 연직분포를 측정할 수 있으며, 그 대표적인 제품이 미국 RDI 사의 ADCP (Acoustic Doppler Currents Profiler)와 미국의 SonTek 사와 노르웨이 Nortek 사의 ADP(Acoustic Doppler Profiler)이다.

5. 초음파 유속계

Doppler 효과가 아닌 음파 진행시간의 차이(difference of acoustic travel time)를 응용한 유속계를 일반적으로 초음파 유속계라 한다. 1차원상에서 음파의 송신부와 수신부의 위치를 각각 x_1, x_2 라 하고 그 이격거리를 R 이라 하자. 또한 유속이 U 인 흐름이 송신부에서 수신부로 흐른다고 하면, 송신된 음파가 수신되는 데 소요되는 시간 t_1 은 다음과 같다.

$$t_1 = \frac{R}{c+U}. \quad (6.2.5)$$

이제 만일 송수신부의 위치가 바뀐다면 소요시간 t_2 는 다음과 같다.

$$t_2 = \frac{R}{c-U}. \quad (6.2.6)$$

따라서 그 시간차이는

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{R}{c-U} - \frac{R}{c+U} = \frac{2RU}{c^2 - u^2}.$$

그러나 $c \gg U$ 이므로 유속 U 를 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$U \approx c^2 \frac{\Delta t}{2R}. \quad (6.2.7)$$

Williams and Tochko(1977)는 위의 성질을 이용하는 유속계 BASS(Benthic Acoustic Stress Sensor)를 개발하였으며(Fig.6.2.4). 그 측정순서는 다음과 같다.

- ① 한 쌍을 구성하는 2개의 transducer가 동시에 초음파를 발생하고 각각이 상대 transducer로부터 송신된 음파를 수신한다.
- ② 수신한 두 transducer는 전류를 발생시켜 각각의 축전기에 저장한다.
- ③ 일정시간 후, 두 축전지의 전압을 비교한다.

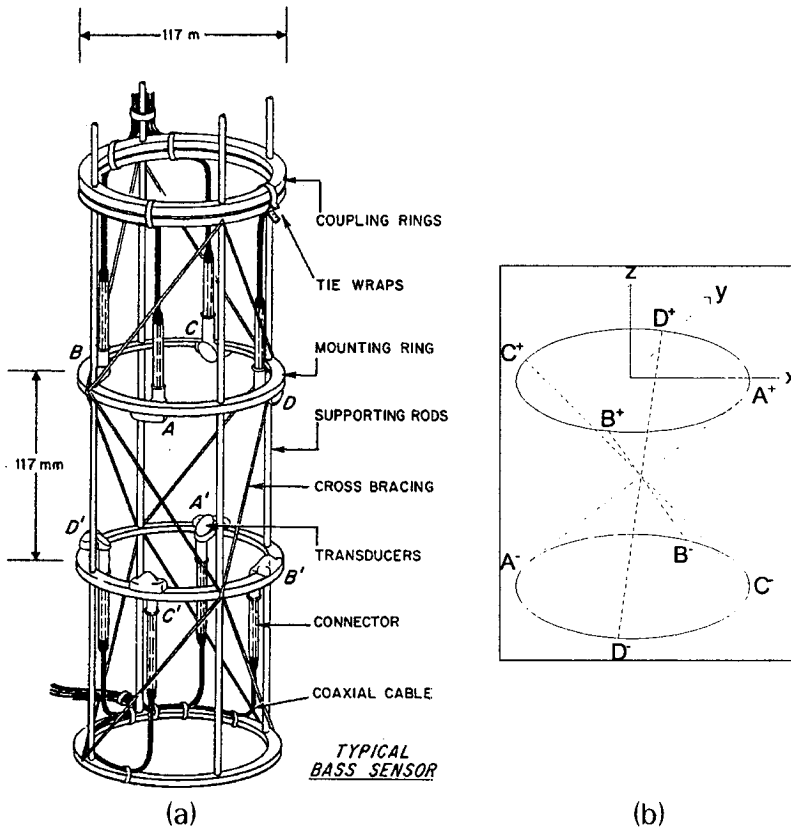


Fig. 6.2.4 Schematic diagram of the BASS(a), the positions of acoustic transducers and the acoustic paths(b) (after Thwaites and Williams, 1997).

두 축전지의 전압차는 한 경로를 따른 양방향으로의 초음파 진행시간의 차이에 비례하고, 진행시간의 차이는 유속의 그 경로방향 성분에 비례한다.

BASS는 4 쌍의 transducer로 구성되며, 각각의 음파경로는 15cm이다. 이 4쌍으로 3차원 유속을 측정한다. 사실 3차원 유속을 결정하기 위해서는 3쌍이면 되지만 여분의 1쌍을 포함하는 것은 발생할지 모를 wake-shaded path에 걸리는 경로를 제외하기 위해서이다.

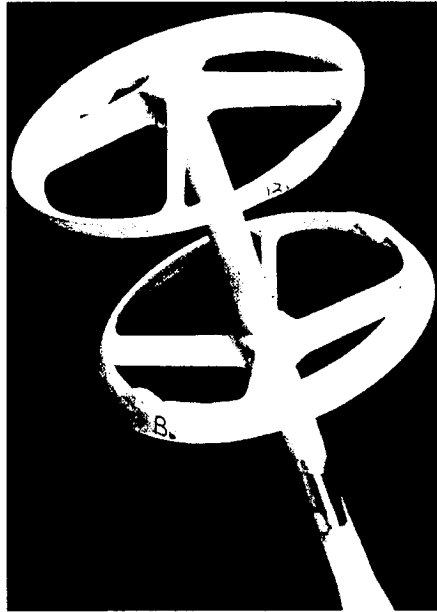
비록 서론에서 언급한 바와 같이 그 동안 BASS를 이용한 연구가 활발하였지만, 몇 가지 이유로 인해 그리 광범위하게 이용되지는 못하였다. 그 첫 번째 이유는 transducer 제작상의 어려움으로 인해 가격이 비싸며, 두 번째는 cable의 유동성으로 말미암아 0.5cm/s까지의 0점 편의(zero drift)가 발생한다는 것이다. 또한 마지막으로 수평유속에 대해서는 여현반응이 뛰어나지만 연직유속이 클 경우(steep flow)에는 그 반응효율이 낮다.

여현반응(Cosine response)이란 음파경로측을 벗어나는 유속(off-axis velocity)과 흐름에 대한 센서의 상대위치 변동에 대한 민감도를 측정하는 것이다. “여현반응”이란 용어는, 센서의 이상적인 결과는 경로측과 흐름방향이 이루는 각의 여현함수로 결정된다는 것으로부터 유래한 것이다. BASS의 경우, ring들이 steep flow를 부분적으로 방해하여 흐름과 수평면 사잇각이 30° 이상이면 실제 유속보다 낮은 값을 보였다.

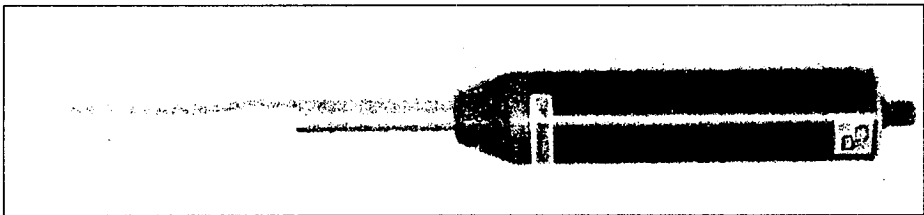
초음파 전송시간을 이용하는 유속계에서 오차가 발생할 수 있는 근원은 다음 6 가지이다 :

- ① 여현반응으로 표현되는 wake에 의한 시간평균 흐름의 방해
- ② Vortex shading에 의해 발생하며, 시간함수인 흐름교란
- ③ Potential flow 교란
- ④ 0점 편의(Zero offset bias)
- ⑤ 전기적인 비선형성
- ⑥ 전기적 노이즈

BASS의 3 가지 단점과 위의 6 가지 오차발생 원인을 개선하여 Thwaites and Williams(1997)가 새로운 모델, MAVS(Modula Acoustic Velocity Sensor)를 개발하였고, 미국 G.O. MAVS 사가 상용화하였으며(Fig.6.2.5), 그 제원은 Table 6.2.1과 같다.



(a)



(b)

Fig. 6.2.5 Sensor head of the MAVS prototype(a), and model MAVS-1 of G.O. MAVS Inc(b).

Table 6.2.1 Specifications of MAVS-1 of G.O. MAVS Inc.

Parameter	Accuracy	Resolution	Range
Speed (cm/s)	0.3	0.03	300
Dir. (3axis, deg)	±2	1	360
Temperature(℃)	0.25	0.015	-5~45
Conductivity(mS/cm)	2.5	1	0~75
Pressure (% F.S.)	0.5	0.1	1,500 m
Tilt (deg)	2	0.1	30

제3절 탁도센서 특성분석

본절에서는 Benthic SPHINX의 탁도계를 선정하기 위하여 D&A Instrument Company(1991)의 OBS 사용설명서를 중심으로 탁도계의 특성을 분석한다.

1. 탁도의 정의와 단위

탁도(Turbidity)는 부유입자, 콜로이드 물질, 그리고 다른 불순물에 의해 발생하는 빛의 산란으로 야기되는 수중의 운도(cloudiness)로서, 산란물질의 특성과 외부의 광조건, 그리고 측정기기에 따라 변하는 광의 견보기 특성이다. 일반적으로 탁도는 후술하게 될 90°-scatterance nephelometer로 측정한다.

탁도의 측정은 탁도표준액(turbidity standard)을 기준으로 하며, 산란을 유발하는 물질에 관한 정보가 필수적인 것이 아니다. 일반적으로 사용하고 있는 탁도표준액은 formazin과 AMCO-AEPA-1이다. Formazin을 이용하여 탁도계를 교정

(calibration)하였을 경우, 그 탁도계의 단위는 FTU(Formazin Turbidity Units)이며, AEPA-1의 경우는 NTU(Nephelometric Turbidity Units)이다.

2. Transmissometer와 Nephelometer

대부분의 탁도계 특성을 파악하는 데 광학이론이 그 시작이지만, 특수한 사용 목적에 따라 각 탁도계는 광학이론과 실제적인 특징이 혼재되어 있다. 그러나 비록 많은 탁도계가 고유한 목적에 따라 설계되었지만, 그 이론을 파악하는 것이 해당 탁도계가 무엇을 측정하는 지를 이해하는 근간이 될 것이다.

탁도계 작동원리의 단순한 예가 빛이 수중을 통과하는 것으로서, 이를 계수로 나타내면 $a+b=c$ 이다. 이는 빛의 감쇠계수 c 를 흡수계수 a 와 산란계수 b 로 나타내는 것이다. 다시 말해 이 식은 수중에서 진행되는 빛은 물분자와 부유물질 등에 의해 산란되고 흡수되면서 감쇠된다는 것이다. 감쇠, 흡수 및 산란은 불순물에 의해서만 영향받는 물의 고유한 특성들이며, 수학적으로 정확한 정의를 갖는다. 불순물 물질이 전혀 없어 광학적으로 순수한 물을 상용화할 수는 없으며, 단지 폐쇄된 실험실에서만 가능하다. 대부분의 실제적인 목적을 위해서는 $2\mu\text{m}$ 필터를 통과시킨 탈이온수이면 충분하다.

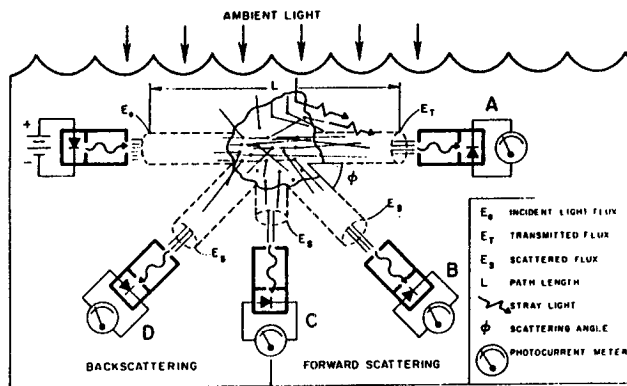


Fig. 6.3.1 Optical particle detectors.

대부분의 탁도계는 Fig. 6.3.1에 나타난 바와 같이 A) transmissometer, B) 전산란 탁도계(forward-scatterance nephelometer), C) 측산란(90° -scatterance) 탁도계, 혹은 D) 후산란(backscatterance) 탁도계 중의 하나이며, 몇 가지는 두 가지 이상의 방식을 채용하기도 한다.

가. Transmissometer

이 기기는 길이 L 인 광빔 경로 한 쪽 끝으로부터의 入射光束(incident light flux) E_0 에 대한 반대 쪽 끝에서의 도달광속 E_T 의 비 $T = E_T/E_0$ 를 측정한다. 감쇠비는 $1 - T$ 이며, 이는 기기를 사용하여 유일하게 쉽게 측정할 수 있는 광의 특성이다. 이상적인 transmissometer는 광원으로부터 출발한 것만을 측정하여야 하지만 대부분의 경우는 그 외의 광(stray light)이 포함되어 전달되는 광량을 과대평가한다.

나. Nephelometer

Nephelometer는 산란된 광을 측정하며, 주로 입자크기와 농도의 1st order 영향을 받는다. 예를 들어 10ppm의 미세점성입자들이 부유되어 있는 물은 10ppm의 사질입자가 부유되어 있는 물보다 더 많은 광을 산란시킨다. 두 경우 모두 농도가 증가할수록 더 많은 광이 산란된다. 실험실에서 사용하는 것은 대부분 측산란(90° -scatterance) 탁도계이며, 후산란(OBS) 센서는 Fig. 6.3.1의 D 방식으로 작동한다.

3. OBS 센서

OBS 센서는 $140^\circ \sim 165^\circ$ 의 각도로 산란되는 적외선 복사량(infrared radiation)을 감지하는 소형 nephelometer이다. 적외선 복사를 사용하는 이유는 적외선이 물에서 크게 감쇠되기 때문이다. 즉, 적외선은 맑은 물에서 매 5cm마다 63% 이상의 광량이 감소한다. 따라서 OBS로부터 발광한 적외선 빔은 수중에서 멀리 진행하

지 못하여, 태양광으로부터의 적외선은 수중에서 크게 감쇠된다. 기존의 관측자료와 모델로부터 유추한 산란각도에 따른 산란의 변화를 나타내는 Fig. 6.3.2로부터 OBS의 또 다른 장점을 알 수 있다.

Fig. 6.3.2는 전체적으로 다양한 크기의 부유입자를 갖는 연안 및 외양에서의 빛의 산란특성을 나타낸다. x -축은 90° 에서 전산란과 후산란영역으로 나뉘며, y -축은 산란신호의 상대적인 세기를 나타낸다. 그림으로부터 3 가지 사항을 알 수 있다. 첫째, 산란각도가 증가함에 따라 산란신호는 지수적으로 감소한다. 둘째, 산란각도가 증가함에 따라 clear water 경계로부터 muddy water 상부경계까지의 신호 폭이 증가한다. 마지막으로 입자 크기에 독립적인 신호의 범위는 높은 산란각에서 최대이다. 따라서 신호의 범위가 넓은 후산란 영역의 산란각을 이용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있으며, 높은 산란각에 대한 반응을 최적화하면 신호의 세기를 농도와 입경의 변화에 보다 민감하게 만들 수 있다.

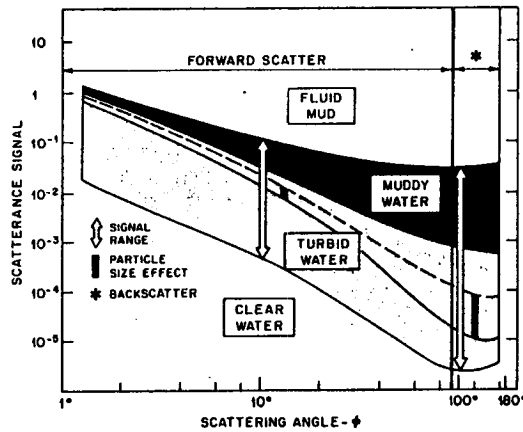


Fig. 6.3.2 Volume scattering functions.

4. OBS 센서와 Transmissometer의 비교

Transmissometer의 주된 장점은 고유한 광학특성인 입사광의 감쇠량을 측정한다는 것이다. OBS 센서는 농도가 높은 물에서 농도와 센서 측정치 사이의 탁월한 선형성을 갖는다.

Fig. 6.3.3은 Amazon 강의 mud로 path length 5cm인 transmissometer와 OBS 센서를 교정한 결과이다. 이에 따르면 낮은 농도에서는 transmissometer가 OBS 센서보다 민감하게 반응함을 알 수 있다. 그러나 농도가 50mg/l 이상일 경우, transmissometer는 농도증가에 비해 탁도의 증가 폭이 작아지는 반면, OBS 센서는 전체 농도에 걸쳐 선형으로 반응함을 알 수 있다.

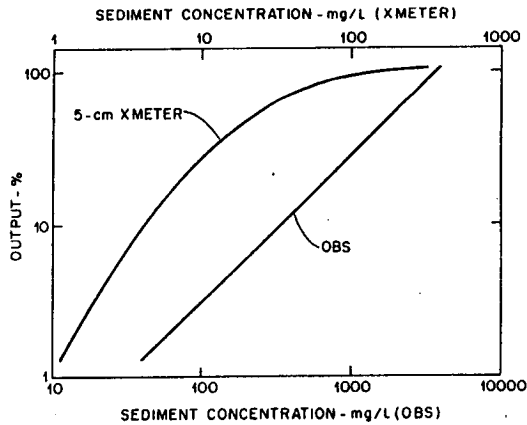


Fig. 6.3.3 OBS sensor and transmissometer calibrations with Amazon River mud.

Path length(Fig. 6.3.1에서의 L)를 짧게 하면 transmissometer의 선형반응 상한을 높일 수는 있다. L 은 대략 감쇠계수의 역수이다. 따라서 10NTU의 탁도에서는 감쇠계수가 5m^{-1} 이므로 20cm가 적절한 L 값이다. Amazon 강의 경우, 농도가 100mg/l일 때의 감쇠계수는 약 10m^{-1} 이므로 적절한 L 값은 10cm이다. 따라서 탁도가 매우 높을 경우에는 광원과 감지부와의 거리가 너무 가까워져 자연 흐름을

교란하므로 L 값을 조절한다는 것은 비현실적이다. 특히, 퇴적물의 농도가 큰 폭으로 변동하는 경우에는 multiple-path transmissometer가 요구되지만, 이는 가격이 높을 뿐 아니라 그 유용성이 떨어진다.

이로부터 농도가 낮은 영역에서는 transmissometer를 사용하고, 농도의 변동 폭이 클 경우에는 OBS를 사용하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

5. OBS 센서의 측정오차

OBS 자료에서 오차가 발생하는 가장 일반적인 원인은 센서 교정상의 오류이지만, 1) power-up transient, 2) 급격한 수온변화, 그리고 3) hydrodynamic noise 등에 의해서도 오차가 발생한다.

가. Power-up transient (Self-heating 효과)

OBS 센서의 스위치가 켜지고 발광하면 그 열로 인해 내부온도가 상승한다. 이 내부온도가 안정화되는 데는 약 1-10초가 소요된다. 이러한 내부온도 상승은 burst mode로 측정할 경우에 큰 오차를 야기한다. 예를 들어 D&A 사의 OBS-1과 OBS-3에 대한 burst mode 실험결과(Fig. 6.3.4)에 따르면, OBS-1은 스위치를

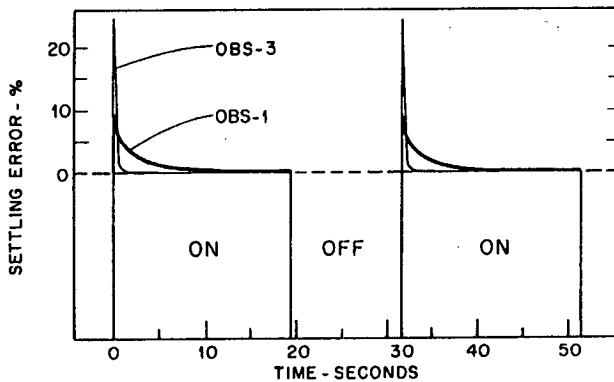


Fig. 6.3.4 Power-up errors.

켜는 순간의 오차가 +6%이며, 약 8초 후에는 1%로 떨어지고, 약 10초 후에 안정한 값을 나타낸다. OBS-3는 초기오차가 OBS-1 보다 훨씬 크지만 1초 이내에 안정한 값을 보인다.

나. 수온효과

호수, 하천 및 하구역에서의 수온은 시간당 수 °C가 변할 수 있다. OBS 센서를 이용하여 성층화된 호수나 하천 수온의 연직분포를 측정할 경우에는 분당 수 °C씩 변하는 온도변이를 탐지하여야 한다. Fig. 6.3.5는 30초 간격으로 수온이

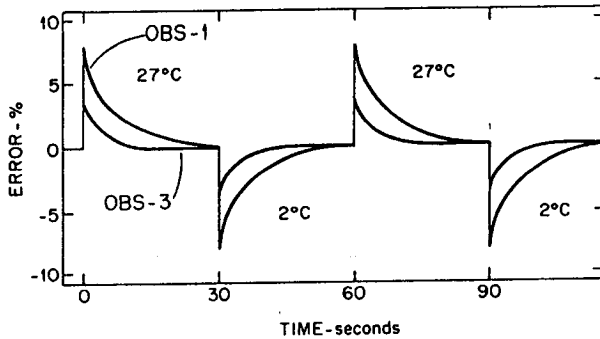


Fig. 6.3.5 Water temperature effects.

25°C씩 변할 때 OBS 센서의 반응을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 OBS-1이 안정화되는 데는 약 30초가 소요되지만 OBS-3는 15초 정도면 충분하다. 외양에서는 일반적으로 수온변동이 작으므로 탁도오차가 큰 문제가 안되지만, 연안에서는 수온변동 폭이 크므로 아울러 탁도오차도 클 것이며, 특히 임해발전소와 같은 온수공급원이 있는 대조차 천해역에서의 결과해석에는 주의가 필요할 것이다.

다. 기타 오차원인

센서 주변의 난류는 자연상태의 입자분포를 재배열하여 퇴적물 농도의 변동을

유발한다. OBS 센서의 감지체적(sampling volume)은 적외선 빔이 수중으로 얼마나 많이 투과하느냐에 달려 있으며, 이는 퇴적물의 농도가 증가할수록 감소한다. 즉, 감지체적이 계속 변함에 따라 오차가 발생할 수 있으며, 이를 sampling error라 한다. 그러나 이와 같은 hydrodynamic noise와 sampling error 각각의 독립적인 영향정도를 결정하는 것은 사실 불가능하며, 이들은 상호연관되어 있을 뿐 아니라 유속과도 상관이 있다. 특히 조립퇴적물과 hydrodynamic noise, 그리고 sampling error가 중첩되어 있을 경우, 관측된 탁도의 불확실성이 상당히 높아진다. 신호분산(Signal variance) 중에서 오차에 의한 것이 어느 부분이고 실제 농도 분산에 의한 것은 어느 정도인지는 실내실험을 통하여 결정되어야 한다.

퇴적물의 입경에 따른 센서의 교정문제도 존재한다. Fig.6.3.6은 입자를 활발하게 교반시키는 수조에서 sand, silt, 그리고 formazin을 사용한 실험결과이다. Formazin은 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 매우 미세한 입자로 구성되어 있으며, 이로 인해 발생하는 노이즈는 매우 낮다. Sand와 silt의 노이즈 곡선으로부터 평균농도와 입경 사이에 강한 상관관계가 있음을 알 수 있다. 예를 들어 5g/l의 농도인 silt의 경우, 1000mV의 mean signal 세기상에서 80mV의 노이즈가 존재한다. sand의 경우는 같은 mean signal 세기상에서의 노이즈가 320mV 정도이다.

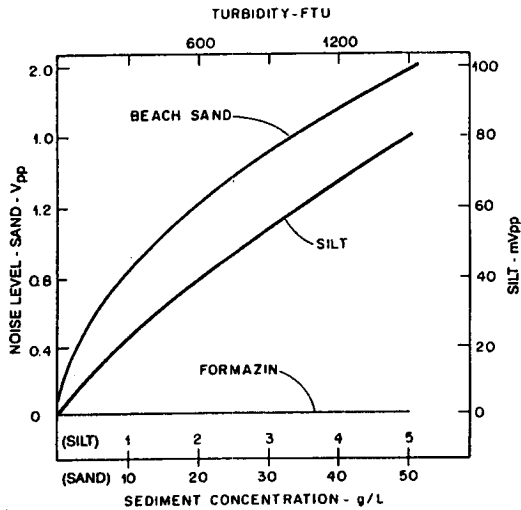


Fig. 6.3.6 Particle size and concentration effects.

비록 제한적이지만 위와 같은 실험으로부터 농도가 높은 조립퇴적물의 경우, 노이즈가 mean signal의 30%는 넘지 않는 것으로 나타났다. Sand 농도에 따른 노이즈 증가를 나타내는 Fig. 6.3.7에는 hydrodynamic noise와 sampling error도 포함되어 있는 것이다.

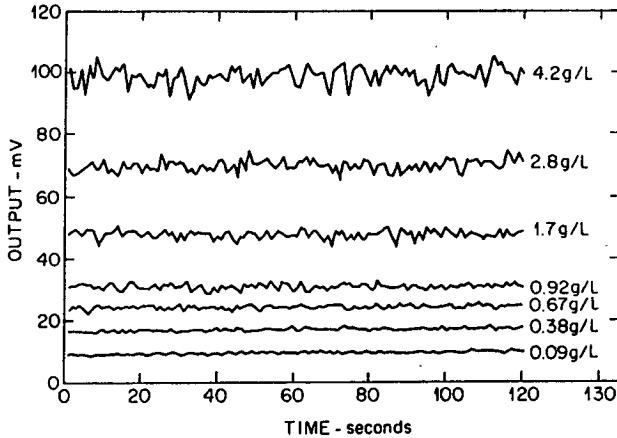


Fig. 6.3.7 Noise versus sand concentration.

OBS 센서를 제어하는 회로판에서도 전기적인 노이즈가 발생한다. 그러나 D&A사 제품의 경우, 이와 같은 전기적 노이즈의 주파수는 10-100Hz 정도이며 그 세기는 OBS-1이 $100\mu V$ 정도, OBS-3가 $50\mu V$ 정도이므로 실제적으로는 거의 문제가 되지 않는다.

그밖에 유속은 큰 변동이 없음에도 탁도는 spike 형태로 급격하게 증가하는 경우가 있으며, 이는 주로 생물의 부착, 기기 주변의 불규칙한 세굴, 계류선, 혹은 센서 전면에서 어류 등에 의해 발생한다.

부착생물과 어류를 제외한 나머지 환경에 의한 오차는 관측시스템 설계에 따라 피할 수 있는 것들이다. 또한 생물부착을 완전하게 방지할 수는 없지만, antifoulant를 센서에 입히면 광량은 약간 감소하지만 부착생물 문제를 어느 정도는 완화시킬 수 있다.

6. OBS 센서의 교정

가. 탁도표준액을 이용한 교정

준비물 : 4000-FTU formazin, Class A 100-ml TD volumetric pipet, 25-ml measuring pipet, 1 gallon filtered & distilled water, 등

교정과정

1. OBS 센서를 비롯한 모든 실험도구를 세제로 씻고, 증류수로 2회 이상 행군다.
2. 교정은 형광등 아래서 실시한다.
3. 센서가 연직인 용기벽을 향하도록 용기에 설치하고, 용기에 filtering을 거친 증류수를 채워 센서가 최소한 5cm 잠기도록 한다.
4. 수온이 실온과 같게 되고, 용기벽의 기포가 완전히 제거되도록 약 1시간 동안 기다린다.
5. 1분 동안 출력을 기록한다. 만일 출력이 수 mV 이상 변동하면 교정전에 센서의 설치방법과 전기적 연결부위를 점검한다.
6. Table 6.3.1의 순서대로 교정한다. 필요하다면 초기체적이나 탁도범위를 수정한다.
7. 이 과정 동안에 용기를 계속 흔들여 준다. 표준용액을 추가하면서 그 추가체적과 그에 따른 출력을 기록한다. 추가하는 시간 간격은 1분으로 하며, Table 1에 따라 탁도값을 결정하거나 다음 식을 이용한다.

$$T_s = T_{std} \left[\frac{V_{tot}}{V_{dw} + V_{tot}} \right]. \quad (6.3.1)$$

여기서, T_s 는 용액의 탁도, T_{std} 는 탁도표준액 원액의 탁도, V_{tot} 는 각 교정점까지 추가된 표준원액의 누적체적, 그리고 V_{dw} 는 초기체적이다.

8. 매우 정확한 측정을 위해서는 출력된 전압으로부터 탁도를 구하기 위한 다항식을 이용한다.

Table 6.3.1 Solution volumes for formazin calibrations (D&A Instrument Company, 1991.)

Volume to Add (ml)	Cumulative Vol. V_{tot} (ml)	Solution Turbidity T_s (FTU)
0.25	0.25	1
2.30	2.50	10
23.1	25.6	100
27.0	52.6	200
58.5	111.1	400
65.4	176.5	600
73.5	250.0	800
83.3	333.3	1000
266.7	600.0	1500
400.0	1000.0	2000
$V_{dw} = 1.0$ and $T_{std} = 4,000$ FTU		

나. 퇴적물을 이용한 교정

준비물 : 아날로그 기록계 혹은 data logger (범위:150g, 해상도:±0.001g), 250cc 플라스틱 주사기 등

교정과정

1. OBS 센서를 비롯한 모든 실험도구를 세제로 씻고, 증류수로 2회 이상 헹군다.
2. 교정은 형광등 아래서 실시한다.
3. 센서가 연직인 용기벽을 향하도록 용기에 설치하고, 용기에 filtering을 거친 증류수를 채워 센서가 최소한 5cm 잠기도록 한다.
4. 수온이 실온과 같게 되고, 용기벽의 기포가 완전히 제거되도록 약 1시간 동안

기다린다.

5. 1분 동안 출력을 기록한다. 만일 출력이 수 mV 이상 변동하면 교정전에 센서의 설치방법과 전기적 연결부위를 점검한다.
6. 물과 퇴적물이 혼합되어 있는 현장퇴적물(bulk sediment)을 완전히 섞고, 필요하다면 물을 추가한다. 그 혼합체에서 total solid의 무게를 잰다. 연구대상 현장에서 예상되는 최대농도에 도달할 때까지 일정량을 추가하면서 교정한다.
7. 이 과정에서 OBS 센서의 출력을 기록한다. 또한 퇴적물을 추가할 때 교반기를 약 3분간 가동한다.
8. 각 추가단계마다 주사기로 부유퇴적물 시료를 채취하여 분석한다.
9. 출력된 전압과 농도를 이용하여 점함곡선을 만들며, 이 곡선을 이용하여 출력되는 전압을 농도로 환산한다.

제4절 자동채수기 개발

1. 개발의 필요성

먼저 전절에서 살펴 본 바와 따르면 우리나라 서해안과 같이 조차가 크고 한 조석 주기 동안 부유퇴적물 농도의 변화 폭이 큰 해역에서는 transmissometer 보다 OBS 센서가 탁도관측에 유리하다.

OBS 센서 역시 최종출력은 전압이므로, 이를 부유퇴적물의 농도로 환산하는 과정이 필요하며, 전절 5항에서 퇴적물을 이용한 OBS 센서의 교정과정을 살펴보았다. 그러나 부유퇴적물의 특성은 지역에 따라 다르므로 교정을 통하여 구한 환산식을 모든 지역에 동일하게 적용할 수는 없다. 이와 같이 지역에 따라 환산식 차이를 보임을 Fig. 6.4.1이 나타내었다.

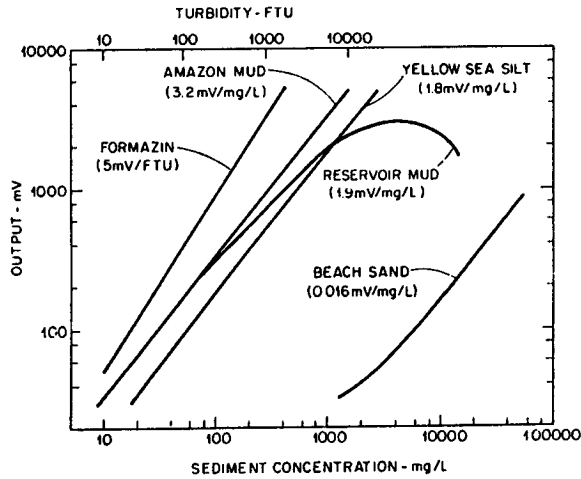


Fig. 6.4.1 Formazin and sediment calibration curves.

따라서 OBS 센서 교정과정에서 대상해역의 퇴적물을 이용하여야 함이 필수적이다. 또한 필요한 현장퇴적물을 현장에서 부유퇴적물을 채취하여 확보하기는 어려우므로 해저퇴적물을 이용하여야 할 것이다. 그러나 미세퇴적물의 경우, 해저퇴적물을 이용하는 실험조건을 현장조건과 같게 만든다는 것은 거의 불가능하며, 이는 실내실험시와 현장관측시 부유응집체 크기가 다르다는 것을 의미하고, 결국 전절에서 언급한 바와 같이 부유입자의 크기에 따라 다르게 반응하는 OBS 센서의 특성에 따라 실내실험에서 구한 환산식의 신뢰도는 높지 않을 것이다.

부유퇴적물의 농도가 높을 때, 특히 미세점성입자의 함유비가 높을 경우에는 광원으로부터 방사된 적외선이 부분적으로 차단되어 특정한 임계치 이상의 농도에서는 농도가 증가함에 따라 후산관되는 광량이 감소할 수 있다. River mud의 경우, 이와 같은 현상이 Fig. 6.4.2에 나타난 바와 같이 5,000mg/l 이상에서 발생하므로 응집작용이 하천에 비해 활발한 하구역 및 연안에서는 그 보다 낮은 농도에서 같은 현상이 발생할 것이다. Fig. 6.4.2에서 알 수 있는 바와 같이 환산곡선의 경사는 낮은 농도에서 양의 값을 갖지만 임계농도에서 0이 된 이후에는 음의 값을 나타낸다. 따라서 만일 OBS 센서를 그림에서 선형범위 내에서만 교정하였지만 현

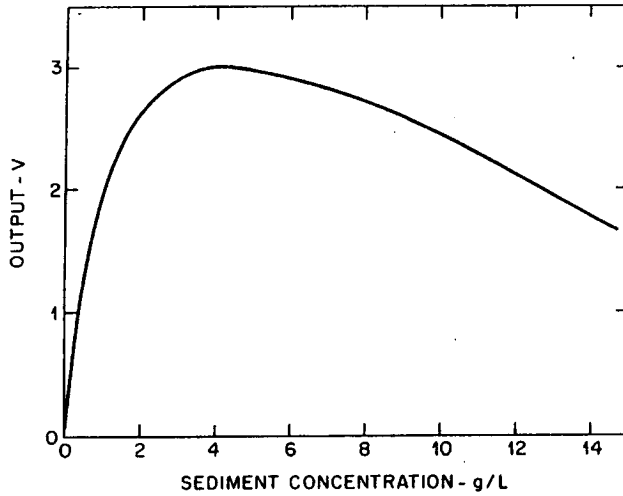


Fig. 6.4.2 Response of OBS sensor at high concentration.

장에서 그 범위를 초과하는 농도가 발생한다면 환산과정에서 문제가 발생된다. 이와 같은 상황에서 출력전압은 앞의 신호에 따라 두 가지 농도를 나타낼 수 있다. 예를 들어 농도가 임계치에 도달하였을 때, 계속되는 이후의 출력감소는 퇴적물 농도가 감소하는 경우와 증가하는 경우 모두에 해당하는 것이다. 어느 경우가 실제 상황인지는 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다.

Fig. 6.4.1에서 알 수 있는 바와 같이 입경이 작을수록 OBS 센서의 출력전압은 커지며, 이는 입경이 작을수록 많은 빛을 산란시킨다는 것을 의미한다. 입력전압에 대한 출력전압의 비인 이득율은 대체로 약 $10\mu\text{m}$ 이하인 mud의 경우는 1.0, $10\sim 62\mu\text{m}$ 사이의 silt의 경우는 0.3이며, 약 $200\mu\text{m}$ 이상인 sand는 0.08이다. 이와 같은 특성에 의해 OBS 센서의 민감도는 입경에 따라 1 order 이상 변하며, 입경이 시간에 따라 변할 경우에는 환산의 심각한 어려움을 초래한다. 예를 들어 사니질 (sandy mud) 퇴적물이 storm 동안에 재부유와 퇴적을 반복한다면 부유퇴적물 중에서 mud에 대한 sand의 비가 변할 것이므로, 그 비가 일정한 경우에 대해 교정한 OBS 센서를 사용하면 전체 시간 중에서 단지 일부분만 타당한 농도를 얻을 수 있을 것이다. 또한 전절에서 언급한 센서교정은, sampling error와 노이즈에 관한

통계치도 입경분포에 따라 변할 수 있음을 나타낸다. 따라서, 교정곡선의 경사에 내재되어 있는 미지의 분산으로부터 유발되는 퇴적물 평균농도에 관한 불확실성에 추가하여 농도의 자연적인 분산에 관한 불확실성도 존재하는 것이다. 그러나, 이에 대한 간단한 대응책이 없다. 취할 수 있는 가장 확실한 방법은 현장에서 많은 시료를 채수하여 실험실에서 분석하는 것이지만, 이것도 오차가 가장 심할 것으로 예상되는 storm 시에는 불가능한 일이다.

이상에서 논한 바와 같이 OBS 센서를 이용하여 관측한 현장의 탁도를 부유 퇴적물의 농도로 환산하는 과정에는 다양한 불확실성이 존재한다. 이와 같은 문제를 해소하기 위한 가장 확실한 방법은 OBS 센서를 이용한 관측과 동시에 부유 퇴적물을 채취하는 것이지만, 이는 채수를 대신하는 OBS 센서의 본래 목적에 위배되는 것이다. 그럼에도 불구하고 문제를 해결할 방법이 없으므로, OBS 센서가 관측하는 기간 동안에 한정된 회수에 한하여 채수한다면, 특히 sand와 mud가 혼재할 경우와 storm 시에 OBS 센서의 결과를 농도로 환산하는 데 크게 도움이 될 것이다.

저면경계층 관측시스템에서의 무인채수를 위하여 U.S. Geological Survey의 tripod인 Geoprobe와 같이 펌프를 사용하기도 한다(Sternberg, 1989). 그러나 펌프를 사용할 경우, 자연상태의 sand와 mud 비율대로 채수된다는 것을 확증할 수가 없다. 이를 위해서는 해수가 유입되는 속도가 자연상태의 유속과 같아야 하지만 이는 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 Van Dorn 채수기를 응용하여 원하는 시간에 채수할 수 있는 time-selectable automatic bottle(AUTTLE)을 개발하였다.

2. AUTTLE의 개발

AUTTLE로 명명한 자동채수기는 Van Dorn 채수기와 solenoid 원리, 그리고 clock으로 구성된다. 즉, 원하는 수심에서의 채수를 위해 선상에서 낙하시킨

message의 충격으로 채수기 양단의 개폐 door가 닫히는 Von Dorn 채수기의 구동방식 대신에 solenoid 구동방식을 채용하고, 그 구동시각을 제어할 수 있도록 하였다. 현재 그 prototype이 완성되어 성공적인 시험을 마친 AUTTLE의 형태와 작동 block diagram는 각각 Fig. 6.4.3과 Fig. 6.4.4와 같으며, 그 제원은 Table 6.4.1과 같다.

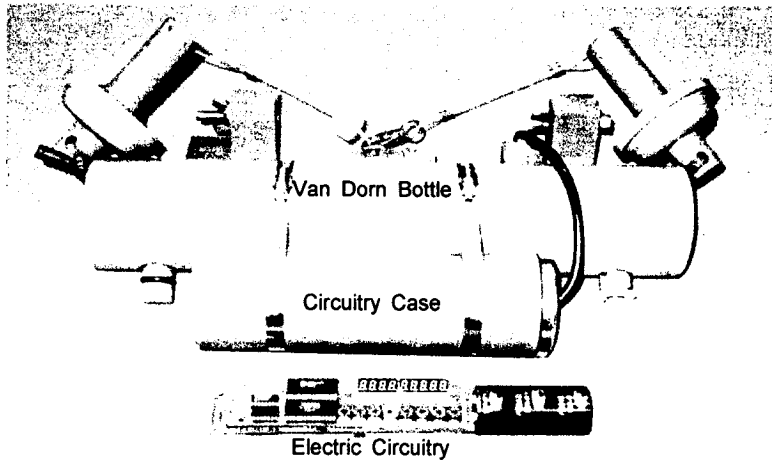


Fig. 6.4.3 Prototype of AUTTLE.

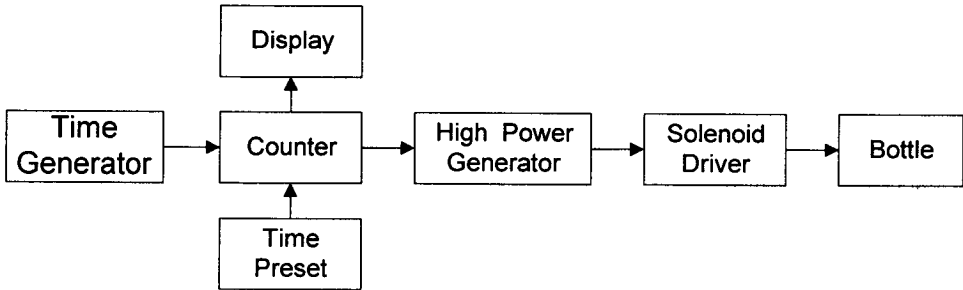


Fig. 6.4.4 Block diagram of AUTTLE operation.

Table 6.4.1 Specification of AUTTLE.

Capacity	1 liter
Power	Alkarine 9V Battery
Power consumption	< 1mA
Time preset	1sec ~ 10,000hrs (step : 1sec)
Trigger method	Solenoid type

제5절 Benthic SPHINX 구축

1. 유속센서 선정

본장의 목적인 우리나라 서해안에서 저면경계층 수리·퇴적현상을 신뢰성 있게 관측하기 위한 시스템 구축을 위하여, 상기 고찰을 토대로 관련되는 센서를 선정하였다.

먼저, Benthic SPHINX의 유속계로는 1개의 Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)와 3개의 Modular Acoustic Travel-time Velocity Sensor(MAVS)로 구성하였다. 선정과정에서 기계식 유속계와 hot-wire 유속계, 그리고 laser doppler 유속계는 현재 현장관측시 전술한 바와 같은 여러 문제를 포함하고 있으므로 일차적으로 고려대상에서 제외하였다. 또한 EMCM도 측정주파수의 한계가 있으며, 관측시마다 0점교정(zero calibration)을 실시하여야 하고, 특히 3차원 유속을 측정할 수 없는 관계로 대상에서 제외하였다.

ADV를 1개, MAVS를 3개로 구성한 이유는, ADV는 센서로부터 5-10cm 이격된 작은 sensing volume의 유속을 측정하기 때문에 센서가 흐름을 교란하는 문제가 타센서에 비해 월등히, 작아 유체만의 난류적 거동 파악에 유리하지만, 이것이 저면 경계층에서의 흐름구조 파악에는 불리하게 작용할 수 있다고 판단되었기 때

문이다. 즉, ADV 수신부 센서의 각도가, 송신된 음파가 송신센서 5-10cm 아래의 산란물질에 의해 반사되는 음파를 감지하도록 설계되어, ADV가 저면에 근접하게 되면 해저면으로부터 반사된 음파도 수신할 수 있기 때문이다. 사실 이와 같이 저면으로부터 반사되는 음파를 이용하면 ADV를 저면고 측정기(altimeter)로도 이용할 수 있다(Kim, 1997). 또한 퇴적물의 난류거동 및 이동속(flux)을 파악하고 수치 모형실험의 입력자료 확보에도 ADV가 MAVS에 비해 불리할 수 있다. 즉, 부유 퇴적물 농도의 수평공간적 차이는 심할 수 있으므로 sensing volume이 너무 작으면 한 층에서 부유퇴적물의 연직이동속 산정시 통계적 대표성이 결여될 수 있을 것이다. 물론 MAVS가 ADV에 비해 구조상 sensing point에서의 흐름을 교란시키는 정도는 높지만, 이를 최소화할 수 있는 새로운 모델을 현재 개발중(Thwaites and Williams, 1997)이므로 추후 센서만 교체할 수 있을 것이다. 또한 1997년 9월 현재, 가격면에서 MAVS(7,490US\$)가 ADV(17,100US\$)에 비해 월등히 저렴하다.

그러나 G.O. MAVS 사의 상용모델(Fig. 6.2.5b 참조)은 연직으로 수 개층에서 관측하기에는 적절하지 않다. 즉, 외형이 직선형이어서 저면경계층 부근에서 센서 간격이 좁을 시에 센서부와 본체간의 연결봉과 본체가 발생시키는 난류가 클 것으로 판단된다. 이에 따라 SPHINX에 설치할 MAVS의 본체와 센서부 연결봉의 총 길이를 125cm로 연장하였으며, 100cm 위치에서 직각으로 구부려 본체를 SPHINX frame 다리에 고정하도록 하였다.

2. 탁도계 선정

3절에서 살펴본 바와 같이 부유입자의 크기가 시간에 따라 변할 경우 OBS 센서가 유리하고, 우리나라 서해안이 이에 해당하며, 특히 황천시 농도가 높다는 점을 감안하여 SPHINX의 탁도계로 D&A 사의 탁도센서 OBS-3를 선택하였다.

3. Data Logger

SPHINX에서 수리·퇴적현상을 난류 시간규모로 측정하는 센서는 1개의 ADV와 3개의 MAVS, 그리고 3개의 OBS-3이다. 이와 같이 여러 개의 센서로부터 획득하는 난류규모의 자료가 신뢰성을 확보하기 위해 우선적으로 필요한 것이 측정시간의 동시성(time-synchronization)이다. 따라서 모든 센서를 동시에 제어할 수 있는 data logger가 필요하며, 이를 MAVS 개발자인 미국 Woods Hole 해양연구소의 Williams 박사에게 의뢰하여 제작하였다.

ADV와 MAVS의 1회 측정당 자료의 크기는 각각 18bytes와 8bytes, 그리고 OBS-3는 2bytes이다. 따라서 1회 측정당 총 48bytes의 자료크기를 가지며, 10분 동안 5Hz로 측정하는 burst mode 채용시의 자료크기는 $144,000(=5 \times 48 \times 10 \times 60)$ bytes/burst, 매시간 1회 burst로 30일간 측정하면 $10,368(=144 \times 24 \times 30)$ KB/month의 자료크기를 갖는다. 또한 만일 25Hz로 측정할 시에는 51,840KB, 즉 약 52MB의 저장용량이 필요하다. 이를 위해 SPHINX의 자료저장장치로 1GB hard disk를 채용하였으며, 측정방법 및 자료의 dump 등은 Tattletale BASIC으로 제어한다.

원래의 MAVS는 항상 수평을 유지하는 compass를 내장하여 측정된 유속을 지구좌표계로 환산할 수 있도록 한다. 그러나 관측시스템의 설치시에는 해저면이 편평하였으나, 시간이 경과함에 따라 저면이 국부적으로 침식되어 시스템이 기울어질 경우에는 이 경사각도 함께 포함하여 유속을 지구좌표계로 환산하여야 한다. 이를 위하여 data logger에 Precision Navigation 3-axis compass를 포함하였으며, 이 결과와 각 MAVS로부터 입력된 2-axis 결과를 이용하여 MAVS로 관측된 유속을 최종적으로 east, north, 그리고 연직방향으로 분해하여 기록하도록 하였다.

4. 삼각설치대 설계와 AUTTLE Array

본 사업을 통하여 수립하는 저면경계층 수리·퇴적현상 관측시스템 Benthic SPHINX가 기존의 관측시스템과 다른 점은 OBS sensor 측정치의 교정을 위해 자

동채수기 AUTTLE을 포함한다는 것이다. 이를 장착하는 가장 간단한 방법은 삼각설치대에서 OBS 센서 높이에 고정하는 것이다. 그러나 본 시스템은 수리·퇴적 현상을 난류규모로 관측하는 것이 목적이므로 AUTTLE의 위치를 고정하면 흐름 방향에 따라 유속계 및 탁도계 주위의 흐름이 교란될 것이다. 따라서 AUTTLE array가 항상 흐름의 하류측에 위치하도록 AUTTLE array 설치봉이 흐름에 따라 회전할 수 있도록 하였다.

또한 AUTTLE array는 우선 상층과 중층에만 설치한다. 하층에서의 채수도 고려하였으나 AUTTLE이 저면과 너무 가까우면 저면의 요철이 회전을 방해하여 최악의 경우에 모든 자료를 오염시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 각 층에는 4개의 AUTTLE을 수평배열하여 조석 한 주기당 4회의 채수가 가능하도록 하였으며, 이는 차후 확장할 수 있을 것이다.

삼각설치대의 크기는 높이가 170cm이고, 상하면은 변의 길이가 200cm인 개방된 정삼각형 형태이다.

5. Prototype Benthic SPHINX

유속과 함께 중요한 수리정보가 수위 및 파랑자료이다. 또한 mud의 응집현상 연구를 위해서는 수온자료도 필수적이다. 비록 난류 시간규모는 아니지만 이 3가지 자료를 동시에 얻기 위하여 노르웨이 Aanderaa 사의 파고·조위계 WTR9을 부착하였다.

이상과 같이 4개의 유속센서와 3개의 탁도센서, data logger, 그리고 AUTTLE array, 수온·조위·파고계를 장착한 Benthic SPHINX의 prototype은 Fig. 6.5.1과 같다. 현재 data logger를 제외한 모든 준비가 완료된 상태이며, 미국 Woods Hole 해양연구소에서 제작하고 있는 data logger 역시 완료단계이다.

Benthic SPHINX

(Sedimentary Process & Hydraulic Information Xeroxing System)

J.-Y. JIN¹, K.D. YUM¹, S.-C. KIM², A.J. WILLIAMS III³,
J.S. PARK¹, K.C. HWANG¹ and Y.K. KIM¹

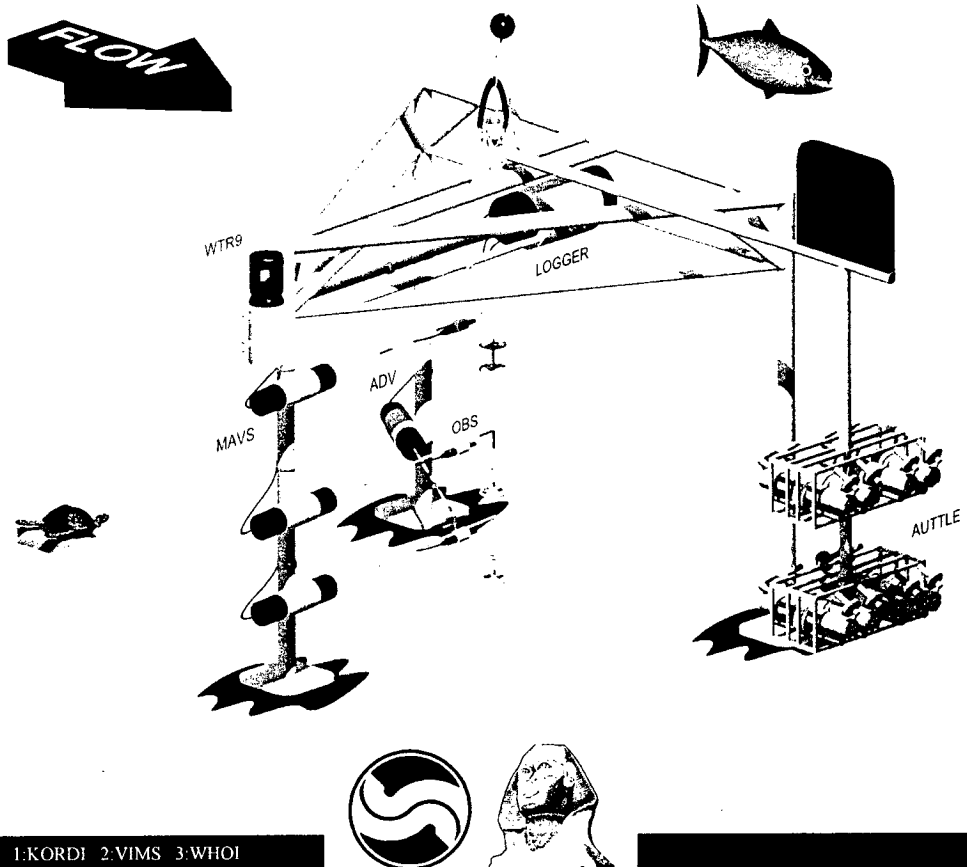
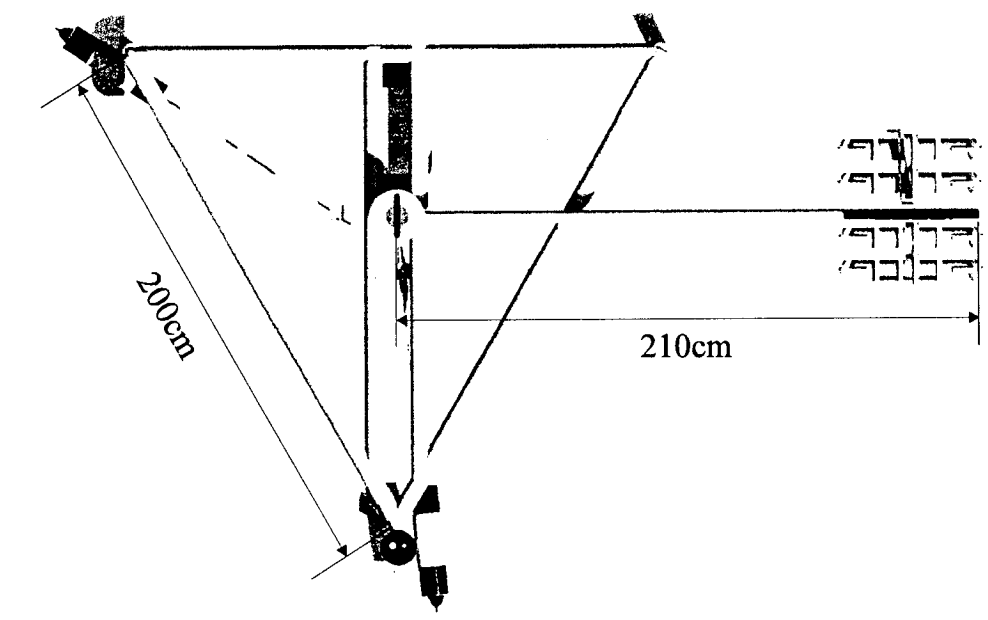
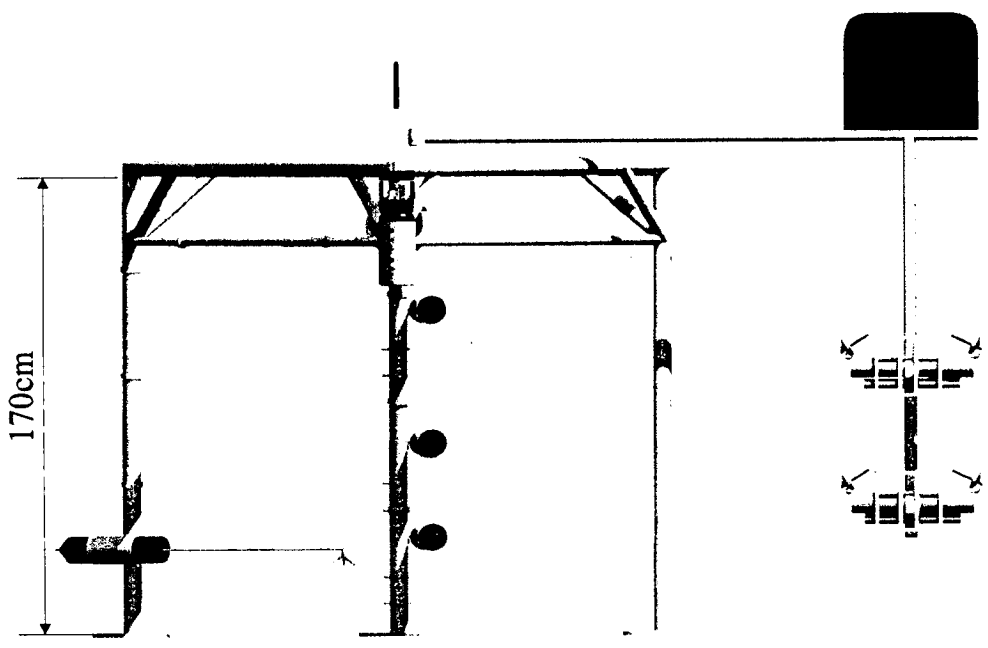


Fig. 6.5.1 Prototype of Benthic SPHINX.

Dimension of Benthic SPHINX



Plan View



Side View

Fig. 6.5.1 (Continued).

제7장 결론 및 토의

이상에서 논한 바와 같이 1) 항내 정온도가 문제시 되는 항만에 대하여 현장 관측 및 수치모형을 이용하여 원인을 규명하고 그 대책을 제시함과 아울러 새로운 형태의 수치모형을 개발하며, 2) 항만 수질을 개선하기 위한 신형식의 방파제를 개발하며, 3) 사질퇴적환경에서 연안구조물 시공에 따라 발생할 수 있는 해안선 변화를 효율적으로 파악하기 위하여 해안모니터링 기법을 개선하며, 4) 사질퇴적환경에서 구조물 건설에 따른 지형변화를 효율적으로 예측하기 위한 3차원 파랑류 모형을 개발하며, 5) 마지막으로 점성 혹은 점성 및 사질퇴적물 혼합퇴적상의 저면경계층에서 수리·퇴적작용을 난류규모로 관측할 수 있는 시스템을 수립함을 목적으로 한 본 사업의 결론과 차후연구 과제 등을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 동해항의 항내·외에서 파향·파고계와 수압식 파고계를 사용한 장·단주기파 현장관측 결과 E~ESE 계열의 파랑 또는 유의파고 2 m 이상의 폭풍과 내습시 항내정온도 불량이 예측되었다. 자료 분석의 경우 수압식 파고계에 의한 단주기파 자료를 지금까지의 스펙트럼 분석과 transfer function을 사용하는 분석 방법 외에 Nielsen(1986)의 국부근사법과 스펙트럼 분석을 사용하는 방법도 같이 사용하여 양자를 비교·검토하였다. 또한, 장주기 부진동도 수압 자료의 스펙트럼 분석 대신 Nielsen의 방법으로 해수위 변동으로 변환시킨 자료를 사용하여 분석하였으며, 설치수심이 깊은 경우에는 후자의 적용이 요구되었다.

완경사방정식을 지배방정식으로 사용하는 복합요소 수치모형 대신 확장형 완경사방정식과 무한 요소를 사용하는 부진동 수치모형을 수립하고 동해항에 적용하였으며 그 차이는 아주 미소한 것으로 나타났다. 천해역의 정밀한 파랑 변형 및 부진동 해석을 위해 일본의 항만기술연구소에서 개발한 2차원 Boussinesq 모형을 사용하여 일정 경사를 가진 사면에서의 전파·변형과 부분 개방된 정사각형 모형

항만에서의 중복파 재현에 대한 수치실험을 실시하여 적용성을 확인하였다. 앞으로 측면 투과 경계의 처리에 문제점이 노출된 Boussinesq 모형을 개선하고 장주기파 스펙트럼을 입사파 조건으로 사용할 수 있도록 모형을 확장함으로써 주기가 수분 이하인 국부적 부진동의 보다 정확한 예측을 가능하게 할 예정이다. 또한, 단주기파의 항내 침입·변형에 대한 보다 정밀한 현장관측을 실시하여 Boussinesq 모형을 검증하고 실제 항만에 대한 적용도 실시할 예정이다.

둘째, 원호수로 내의 파이프를 통하여 유입된 신선한 해수를 항내의 깊은 곳까지 투입함으로써 원호수로 방파제의 적용 범위를 확장시켰다. 또한, 유한요소법을 이용한 파랑-지반-구조물 상호작용해석 모델과 원호수로 방파제의 수리현상을 모의할 수 있는 수치모형을 개발하였다. 이 모델들은 원호수로 방파제의 해수교환 성능 극대화 및 방파제 안전성 확보에 사용되어질 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 비디오 모니터링 기술 및 이의 해안에서의 적용에 대하여 검토하였다. 최근에 비디오 하드웨어 및 영상 처리 기술의 발달로 인하여 비디오 카메라를 이용한 해안선 변화, 연안 사주의 형태, 파의 쳐올림 및 swash 운동 등에 대한 관측이 가능해졌다. 특히 영상의 디지털화, 좌표수정 및 처리과정을 통하여 비디오 영상으로부터 정량적인 정보를 얻을 수 있게 되었다. 비디오 모니터링 기술은, 비록 정밀도가 낮고 육지 및 해수 표면에 대한 정보만을 간접적으로 제공하지만, 기존의 관측 기술에 비해 훨씬 적은 비용으로 장기간의 관측을 가능하게 해 준다.

넷째, 기수립된 3차원 파랑류 수치모형, WINC3D (3-dimensional Wave Induced Nearshore Circulation model)의 난류확산계수 산정을 $k-\epsilon$ 모형을 도입하여 신뢰성을 높였다. 또한 Da Silva Lima(1981)의 수리실험결과와의 비교, 검토를 통하여 어느 정도의 적용성은 확보하였으나 아직은 부족한 상태이며, 추후 비교, 검토할 실험자료의 확보와 현장관측이 요구되었다.

마지막으로 해저면 경계층 주변의 수리·퇴적현상 관측시스템 구축을 위하여 기존 연구 및 각 센서의 특성을 분석한 결과, 난류관측을 위해서는 Acoustic Doppler Velocimeter(ADV)와 Modular Acoustic Velocity Sensor(MAVS)가 가장 효율적인 것으로 판단되었다. 탁도계는 우리나라 서·남해안의 경우에 여러 가지

측면에서 transmissometer 보다는 OBS 센서가 유리하였다. 그러나 OBS 센서는 현장탁도를 농도로 환산하는 과정에서 신뢰성이 요구되므로, 이를 위하여 원하는 시간에 자동으로 채수할 수 있는 자동채수기(AUTTLE)를 개발하였다. 또한 센서 설치삼각대를 개선하여 자동채수기가 현장의 수리·퇴적환경을 교란하지 않도록 하였으며, 자료저장장치도 개선하였다. Benthic SPHINX(Sedimentary and Hydraulic INformation Xeroxing system)라 명명한 본 관측시스템은 난류를 측정할 수 있는 초음파 유속계 4개와 3개의 탁도계, 8개의 AUTTLE, 그리고 수온·파고·조위계와 data logger로 구성된다. 차기년도에는 SPHINX를 이용한 심도있는 관측이 수행될 예정이다.

참 고 문 헌 (References)

제2장

- 과학기술처. 1996. 연안재해 방지 기술 개발(II). 연구기관 한국해양연구소, BSPN 00323-939-2, 472 pp.
- 정원무, 오세범, 채장원, 김상익. 1997. 포항신항 내 파랑에 의한 Downtime 분석. 한국해안·해양공학회지, 제9권, 제1호, pp. 24~34.
- 한국과학기술원 부설 해양연구소. 1988. 연안 파랑관측 최적화 연구. BSPE 00116-188-2, 113 pp.
- Berkhoff, J. C. W. 1972. Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th Conf. on Coastal Engrg., ASCE, pp. 471~490.
- Massel, S. R. 1993. Extended refraction-diffraction equation for surface waves. Coastal Eng., 19, pp. 97~126.
- Nielsen, P. 1986. Local approximations : A new way of dealing with irregular waves. Proc. 20th Conf. on Coastal Engrg., ASCE, pp. 633~646.
- Park, W. S., I. S. Chun and W. M. Jeong. 1994. Infinite element for the analysis of harbor resonances. J. of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 6, No. 2, pp. 139~149.
- Suh, K. D. and W. S. Park, 1995. Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters. Coastal Engrg., 26, pp. 177~193.
- 橋本典明, 永井紀彦, 菅原一晃, 淺井正, 朴慶壽. 1993. 波浪의 多方向性與弱非線形性을考慮した水壓波から表面波への換算法について, 港灣技術研究所報告, 第32卷, 第1号, pp. 27~51.
- 運輸省港灣技術研究所, 新日本氣象海洋株式會社. 1996. 高精度波浪變形解析 프로그램改良業務 : 프로그램說明書. 258 pp.
- 山裕之, 佐藤慎司. 1993. Boussinesq方程式を用いた不規則波의淺水·碎波變形의計算法. 海岸工學論文集, 第40卷, pp. 16~20.

제3장

- 科學技術處, 1994. 항만수질개선을 위한 방파시설의 개발연구(III). BSPN00232-76 7-2, 한국해양연구소
- 科學技術處, 1996. 연안재해 방지 기술개발(II). BSPN00323-939-2, 한국해양연구소
- 朴佑善, 李達秀, 吳榮敏, 鄭遠武, 1991. 鉛直 2次元 回折 및 放射問題 解析을 위한 無限要素. 韓國海岸 · 海洋工學會誌, 3(4), pp. 235-243.
- 朴佑善, 全仁植, 吳榮敏, 最小自乘法에 의한 入·反射波 分離技法, 한국해안·해양공학회지, 4(3), pp. 135-144.
- 한국해양연구소, 1993. 혼성방파제의 케이슨에 작용하는 파압분포특성(II), BSPE 00335-549-2.
- Biot, M.A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. Jour. of Applied Physics. 12, pp.155-164.
- Biot, M.A., 1962. Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media. Jour. of Applied Physics. 33(4), pp. 1482-1498.
- Goda, Y., 1985. Random seas and design of maritime structures. Univ. of Tokyo Press.
- Takahashi, S., Yamamoto, S., and Miuraa, H., 1994. Fundamental characteristics of a new wave absorbing system using sand liquefaction. Ch. 195, Proc. 24th ICCE, Kobe, Japan, pp. 2698-2711.

제4장

- Chen, R., 1996. Estimated wave energy dissipation by natural and artificial reefs via video imaging techniques, M.S. Thesis, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Holland, K.T., Holman, R.A. and Sallenger, A.H., 1991. Estimation of overwash bore velocities using video techniques, Proc. Coastal Sediments '91, ASCE, New York, pp. 489-497.
- Holland, K.T., Holman, R.A., 1993. The statistical distribution of swash

- maxima on natural beaches. *J. Geophys. Res.*, 98(C6), pp. 10271-10278.
- Holman, R.A. and Guza, R.T., 1984. Measuring run-up in a natural beach, *Coastal Engrg.*, 8, pp. 129-140.
- Holman, R.A., Howd, P., Oltman-Shay, J. and Komar, P., 1990. Observations of the swash expression of far infragravity wave motions, *Proc. 22th Coastal Engrg. Conf., ASCE*, pp. 1242-1253.
- Holman, R.A. and Lippmann, T.C., 1987. Remote sensing of nearshore bar systems - Making morphology visible, *Proc. Coastal Sediments '87, ASCE*, New York, pp. 929-944.
- Holman, R.A. and Sallenger, A.H., 1984. Longshore variability of wave run-up on natural beaches, *Proc. 19th Coastal Engrg. Conf., ASCE*, Houston, pp. 1896-1912.
- Holman, R.A., Sallenger, A.H., Lippmann, T.C. and Haines, J.W., 1993. The application of video image processing to the study of nearshore processes, *Oceanography*, 6(3), pp. 78-85.
- Konicki, K.M. and Holman, R.A., 1996. Transverse bars in Duck, North Carolina, *Proc. 25th Coastal Engrg. Conf., ASCE*, Orlando, pp. 3600-3613.
- Lippmann, T.C. and Holman, R.A., 1989. Wave dissipation in a barred beach: A method for determining sand bar morphology, Rep. No. CERC-89-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Lippmann, T.C. and Holman, R.A., 1991. Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques, *Proc. Coastal Sediments '91, ASCE*, New York, pp. 542-556.
- Lippmann, T.C. and Holman, R.A., 1992. Wave group modulations in cross-shore breaking patterns, *Proc. 23rd Coastal Engrg. Conf., ASCE*, Venice, pp. 918-931.
- Lippmann, T.C. and Thornton, E.B., 1996. Observation of surfzone wave breaking during Duck 94, *Abstracts of the 25th Coastal Engrg. Conf., ASCE*, Orlando, pp. 720-721.
- Maresca, J.W. and Seivel, E., 1976. Terrestrial photogrammetric measurements of breaking waves and longshore currents in the nearshore zone, *Proc.*

15th Coastal Engrg. Conf., ASCE, New York, pp. 681-700.

Mason, T.P., 1993. Video monitoring techniques in the coastal environment, M.S. Thesis, Univ. of Florida, Gainesville, FL.

Sloop, R.V., 1995. Beach cusp analysis and the dry beach evolution of Longboat Key, Florida using video monitoring techniques, M.E. Thesis, Univ. of Florida, Gainesville, FL.

제5장

과학기술처. 1992. 동해안 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(I). 한국해양연구소.

과학기술처. 1993. 동해안 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(II). 한국해양연구소.

과학기술처. 1994. 동해안 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(III). 한국해양연구소.

Basco, D.R. 1983. Surfzone currents, Coastal Eng. , 7 ; 331-355.

Battjes, J.A. 1988. Surfzone dynamics, Ann. Rev. Fluid Mech., 20, 257-293.

Da Silva Lima, S.S.L. 1981. Wave-induced nearshore currents. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Liverpool.

Davies, A.M. 1980. On the formulation of a three dimensional hydrodynamic sea model with an arbitrary variation of vertical eddy viscosity. Comp. Meth. Appl. Mech. and Eng., 22:187-211.

De Vriend, H.J. 2DH computational of transient seabed evolutions ' , Proc. 20th Coastal Eng. Conf. , ASCE , 1689-1712 , 1986.

Deigaard, R., J. Fredsøe. 1989. Shear stress distribution in dissipative water waves. Coastal Eng., 13:357-378.

Freeman, N.G., A.M. Hale and M.B. Danard. 1972. A modified sigma equation approach to the mathematical modelling of great lake hydrodynamics. J. Geophysical Research, 77:1050-1060.

Lee, K.S. 1998. 3-D wave induced nearshore circulation model. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Liverpool, in printing.

- Stive, M.J.F. and H.J. De Vriend. 1987. Quasi-3D nearshore current modelling wave-induced secondary current. Proc. Conf. Coastal Hydrodynamics, Delaware , U.S.A.
- Stive, M.J.F. and H.J. De Vriend. 1994. Shear stress and mean flow in shoaling and breaking waves. Proc. 24th ICCE, ASCE, pp594-608.
- Svendsen, L.A. 1984. Wave heights and set-up in a surf zone. Coastal Eng., 8:303-329.
- Svendsen, I.A. and R.S. Lorenz. 1989. Velocities in combined undertow and longshore currents. Coastal Eng. 13. 55-79.
- Yoo, D. 1986. Mathematical modelling of wave-current interacted flow in shallow water. Ph.D. thesis, Dept. of Civil Eng., Univ. of Manchester.

제6장

- Berlamont, J., M. Ockenden, E. Toorman and J. Winterwerp. The characterisation of cohesive sediment properties. In H.J. de Vriend ed., Coastal Morphodynamics : Processes and Modelling, Coastal Engineering Special Issue, 21(1-3).
- Bowden, K.F. and L.A. Faiebairn. 1956. Measurements of turbulent fluctuations and Reynolds stresses in a tidal current. Proc. of the Royal Soc. of London, A237:422-438.
- Cheng, R.T., J.W. Gartner and R.E. Smith. 1997. Bottom boundary layer in south San Francisco Bay, California. In D.G. Aubrey ed., Sediment transport and bouyancy in estuaries. J. Coastal Research Special Issue 25.
- Guza, R.T., M.C. Clifton and F. Rezvani. 1988. Field intercomparisons of electromagnetic current meters. J. Geophysical Reseach, 93:9302-9314.
- D & A Instrument Company. 1991. Introduction manual OBS-1 & 3.
- Darbyshire, E.J. and J.R. West. 1993. Turbulence and cohesive sediment transport in the Parrett Estuary. In N.J. Clifford et al. ed., Turbulence : Perspectives on flow and sediment transport. John Wiley & Sons, pp216-247.

- Diserens, A.P., M.C. Ockenden and E.A. Delo. Application of a mathematical model to investigate sedimentation at eastham Dock, Mersey Estuary. Proc. of 3rd Int'l Conf. on the NEarshore and Estuarine Cohesive Transport, St. Petersburg, Florida, USA.
- French, J.R. and N.J. Clifford. 1992. Characteristics and event-structure of near-bed turbulence in a saltmarsh channel. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 34:49-69.
- Gordon, C.M. 1974. Intermittent momentum transportation in a geophysical boundary layer. *Nature*, 248: 392-394.
- Grant, W.D., A.J. Williams, 3rd and S.M. Glenn. 1984. Bottom stress estimates and their prediction on the Northern California Shelf during CODE-1 : The importance of wave-current interaction. *J. Physical Oceanography*, 14:506-527.
- Green, M.O. 1992. Spectral estimates of bed shear stress at subcritical Reynolds numbers in a tidal boundary layers. *J. Physical Oceanography*, 22:903-917.
- Gross, T.F., A.J. Williams 3rd and W.D. Grant. 1986. Long-term in situ calculations of kinetic energy and Reynolds stress in a deep sea boundary layer. *J Geophysical Research*, 91:8461-8469.
- Gross, T.F., A.E. Isley and C.R. Sherwood. 1992. Estimation of stress and bed roughness during storms on the Northern California Shelf. *Continental Shelf Research*, 12:389-413.
- Gross, T.F., A.J. Williams 3rd and E.A. Terray. 1994. Bottom boundary layer spectral dissipation estimates in the presence of wave motions. *Continental Shelf Research*, 14:1239-1256.
- Heathershaw, A.D. and P.D. Thorne. 1985. Sea-bed noises reveal role of turbulent bursting phenomenon in sediment transport by tidal currents. *Nature*, 316:339-342.
- Kawanisi, K. and S. Yokosi. 1994. Mean and turbulent characteristics in a tidal river. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 38:447-469.
- Kim, S.-C. 1997. Personal communication.

- Kim, S.-C., C.T. Friedrichs, J.P.-Y. Maa and L.D. Wright. 1996. Estimating bottom stress in a tidal boundary layer from Acoustic Doppler Velocimeter Data. 4th Int'l Conf. on Estuarine and Coastal Modelling, Alexandria, Virginia, USA.
- King, L.V. 1914. On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid - determination of the convection constants of small platinum wires with application to hot-wire anemometry. *Phil. Trans. of the Royal Soc. of London*, 214:373-432.
- King, C.R. 1977. Performance of an electromagnetic current meter in oscillating flow. Report No. INT 157 HRS, Institute of Hydrology, Wallingford, UK.
- Kraus, N.C., A. Lohrmann and R. Cabrera. 1994. New acoustic meter for measuring 3D laboratory flow. *J. Hydraulic Eng.*, 120:406-412.
- Lane, S.N., K.S. Richard and J. Warburton. 1993. Comparison between high frequency velocity records obtained with spherical and discoidal electromagnetic current meters. In N.J. Clifford et al. ed., *Turbulence : Perspectives on flow and sediment transport*. John Wiley & Sons, pp122-163.
- Lee, J.A. 1987. A field experiment on the role of small scale wind gustiness in aeolian sand transport. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12:331-335.
- Nezu, I and W. Rodi. 1986. Open-channel flow measurements with a laser doppler anemometer. Reply. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 112:335-355.
- Richardson, E.V. and R.S. McQuivey. 1968. Measurements of turbulence in water. *J. Hydraulics Division, ASCE*, 94:411-430.
- Sanford, L.P., W. Panageotou and J.P. Halka. 1991. Tidal resuspension of sediments in northern Chesapeake Bay. *Marine Geology*, 97:87-101.
- Stacey, M.T. 1996. Turbulent mixing and residual circulation in a partially stratified estuary. Ph.D. thesis, Stanford Univ., Palo Alto, CA, USA.
- Sternberg, R.W. 1989. Instrumentation for estuarine study. *J. Geophysical Research*, 94(C10):14,289-14,301.
- Thwaites, F.T. and A.J. Williams 3rd. 1997. New current meter development.

Sea Technology, April : 108-112.

- West, J.R., D.W. Knight and K. Shiono. 1986. Turbulence measurements in the Great Ouse Estuary. *J. Hydraulics Division, ASCE*, 112:167-180.
- West, J.R. and K.O.K Oduyemi. 1989. Turbulent measurements of suspended solids concentration in estuaries. *J. Hydraulic Eng., ASCE*, 115:457-474.
- Williams, A.J. 3rd and J.S. Tochko. 1977. An acoustic sensor of velocity for benthic boundary layer study. *Proc. 8th Int'l Liege Colloquium on Hydrodynamics, Elsevier*, pp83-97.
- Williams, A.J. 3rd, J.S. Tochko, R.L. Koehler, W.D. Grant, T.F. Gross and C.V. Dunn. 1987. Measurement of turbulence in the oceanic bottom boundary layer with acoustic current meter array. *J. Atmos. and Oceanic Tech.*, 4:312-327.
- Xu, J.P., L.D. Wright and J.D. Boon. 1994. Estimation of bottom stress and roughness in lower Chesapeake Bay by the inertial dissipation method. *J. Coastal Research*, 10:329-338.

부 록

(Appendix)

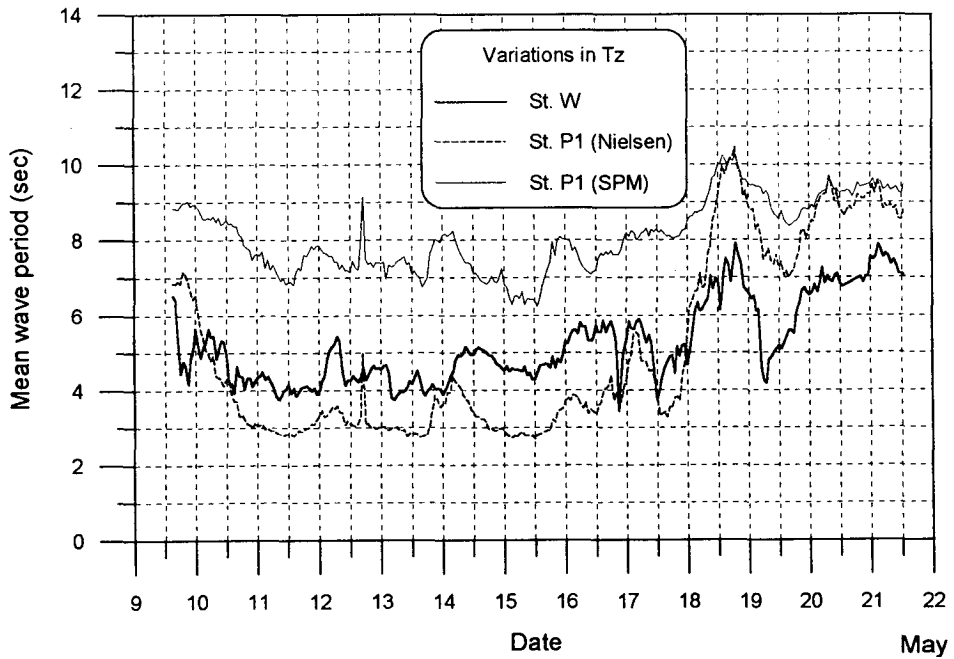
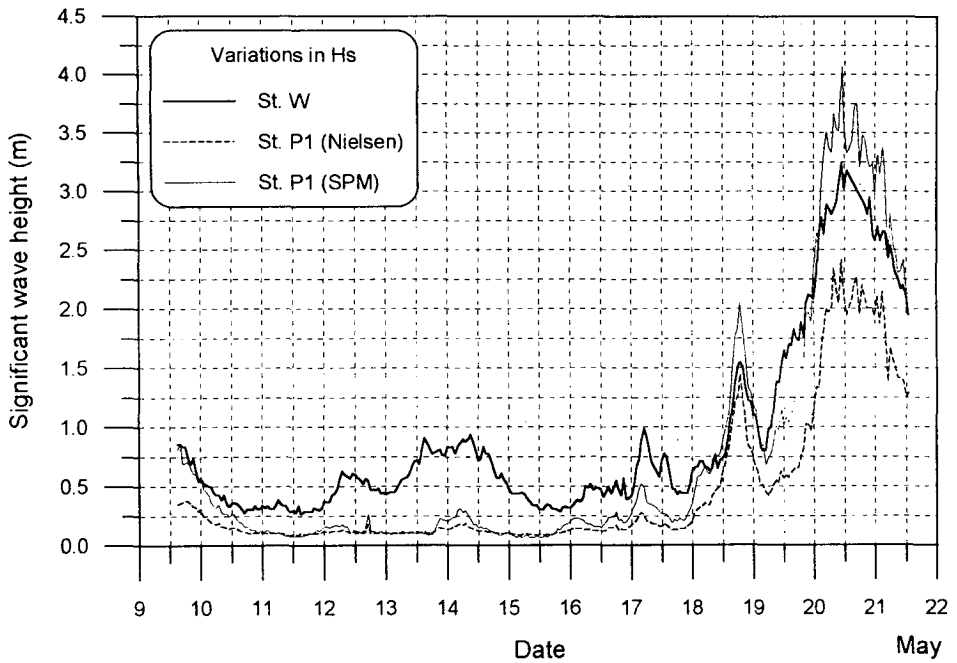


Fig. A1.1 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at stations W and P1 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 9~21, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

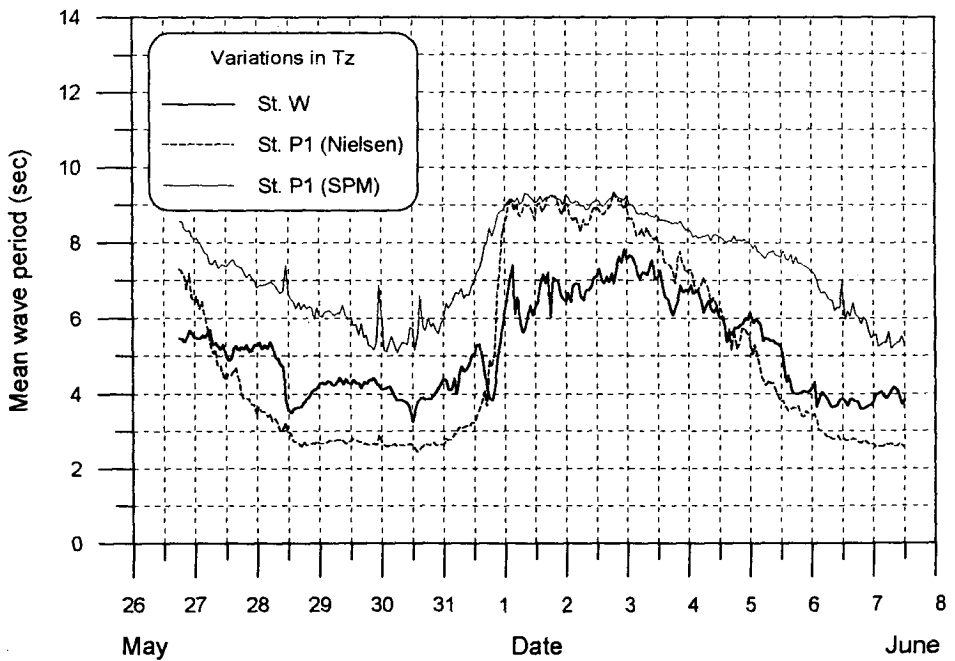
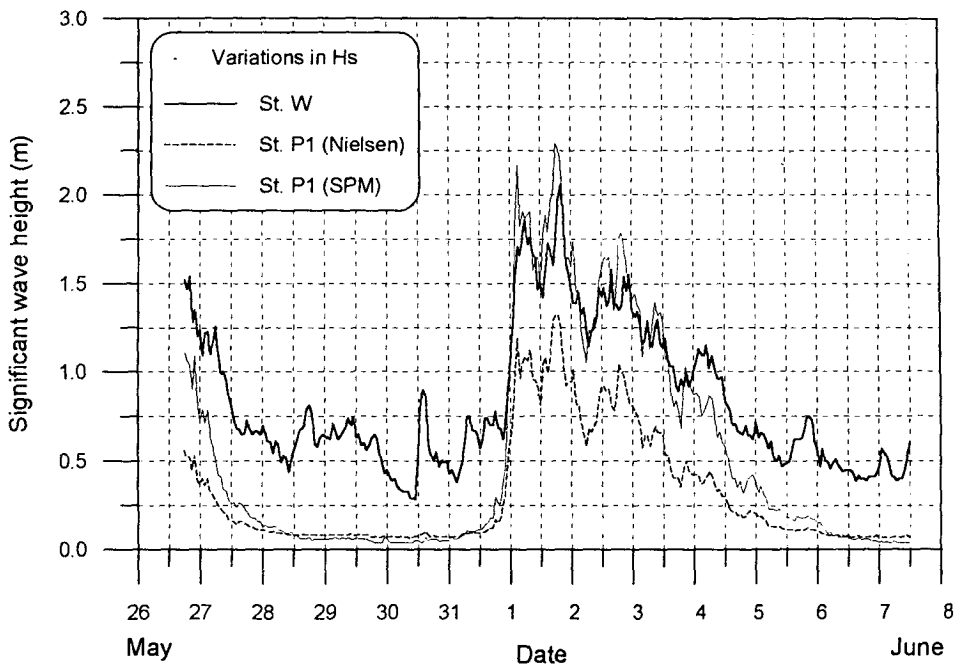


Fig. A1.2 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at stations W and P1 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~June 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

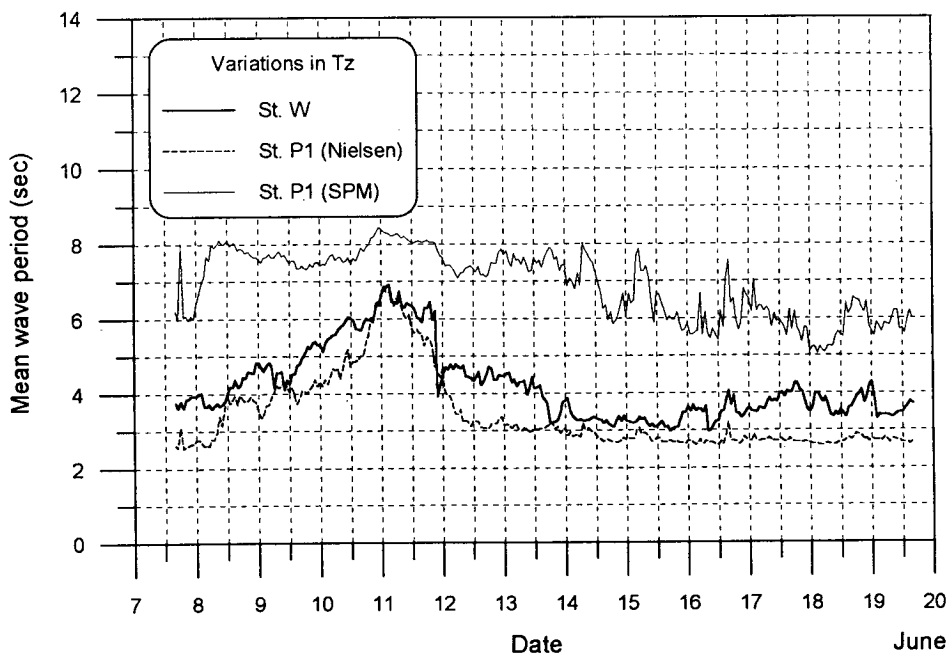
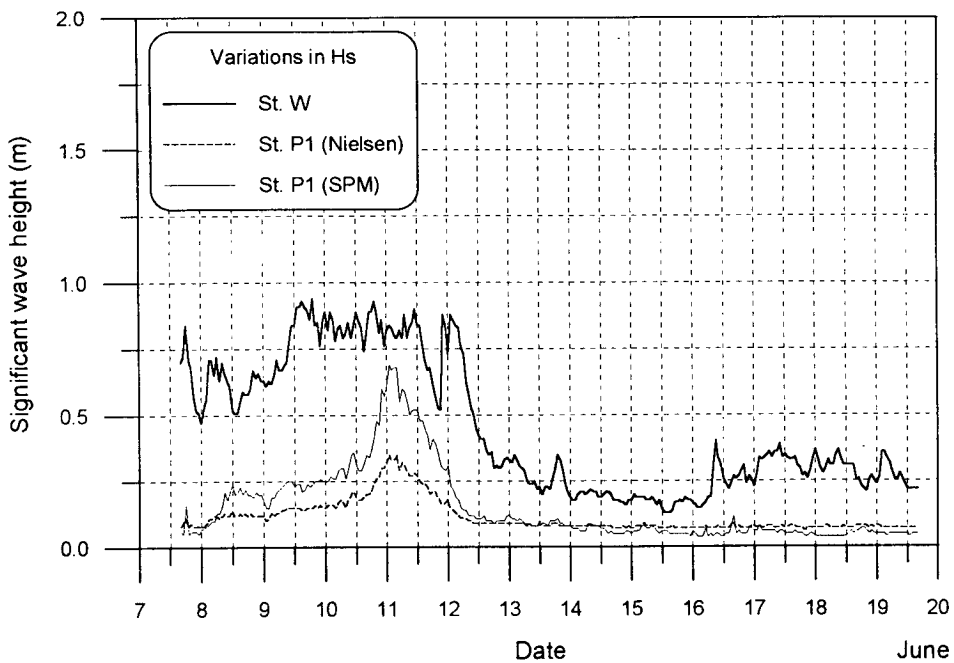


Fig. A1.3 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at stations W and P1 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

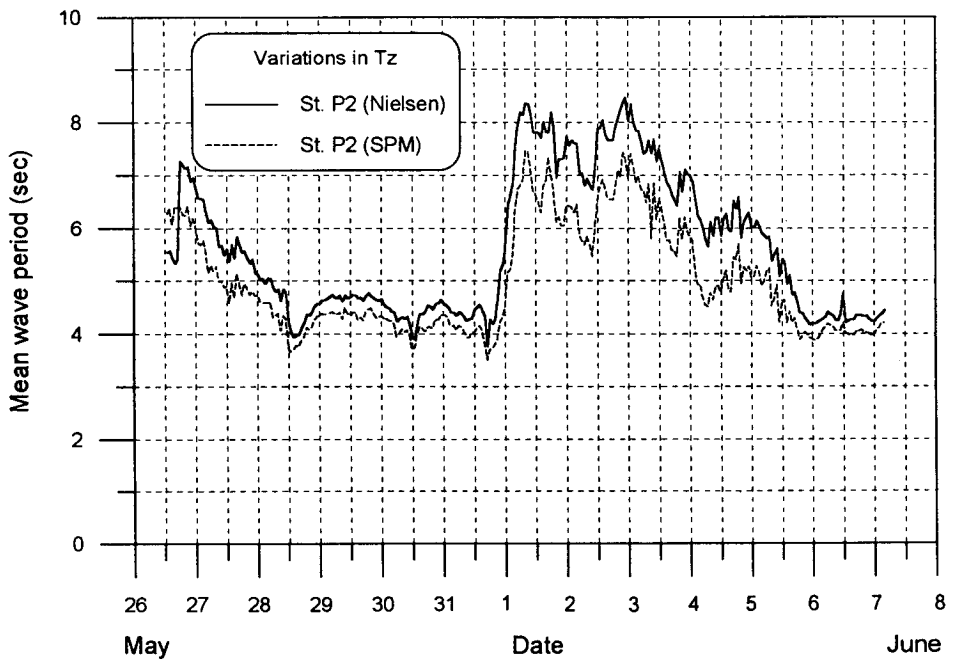
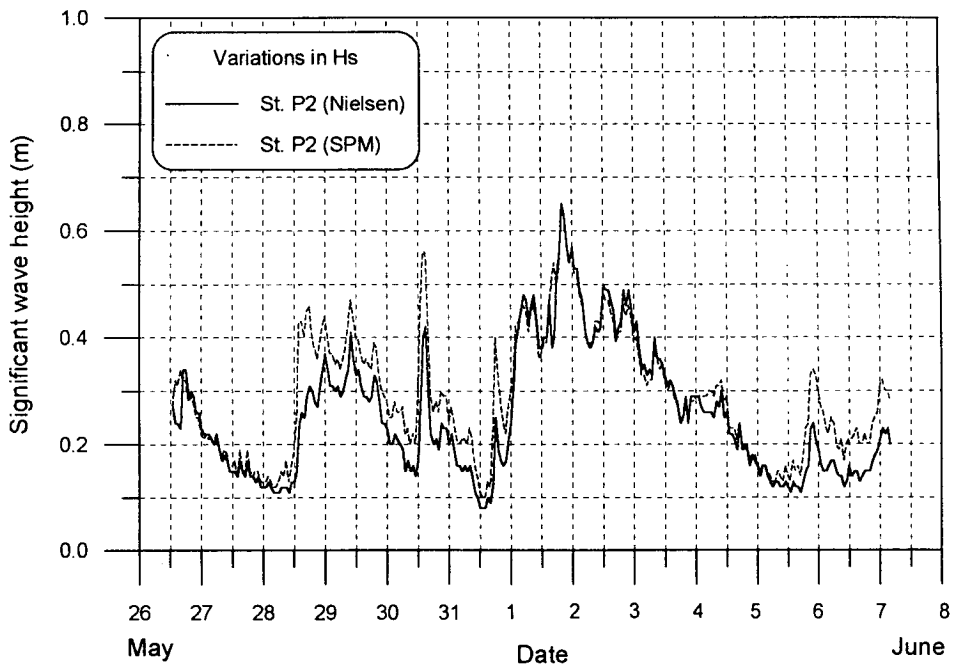


Fig. A1.4 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P2 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~Junr 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

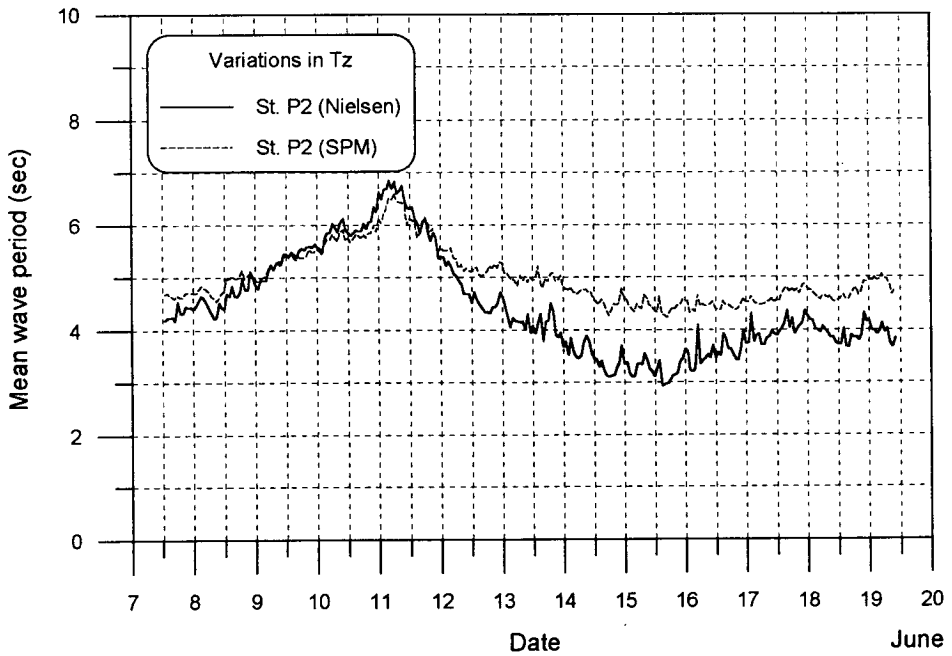
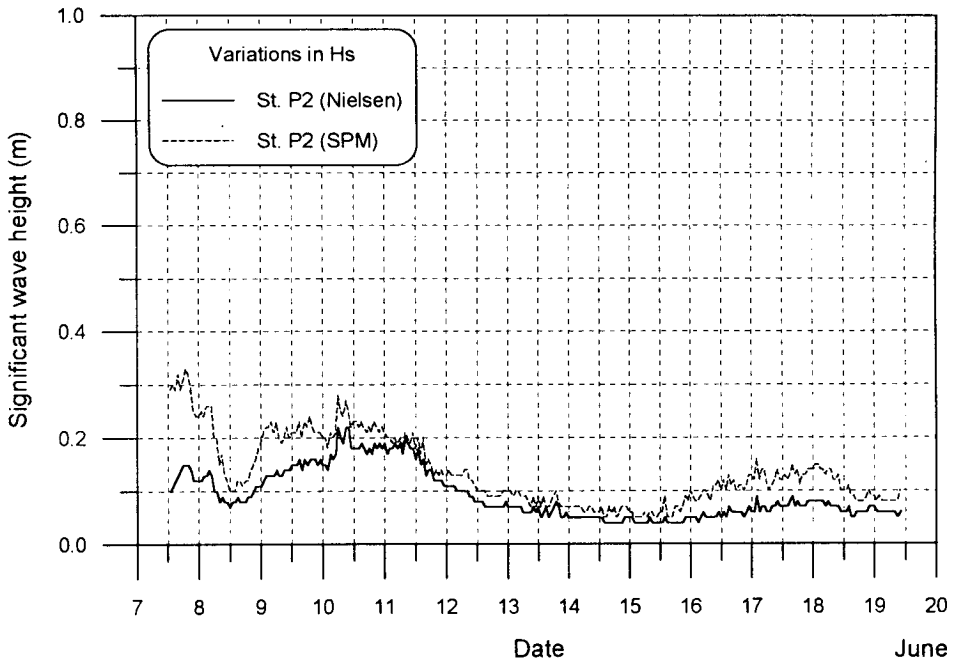


Fig. A1.5 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P2 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

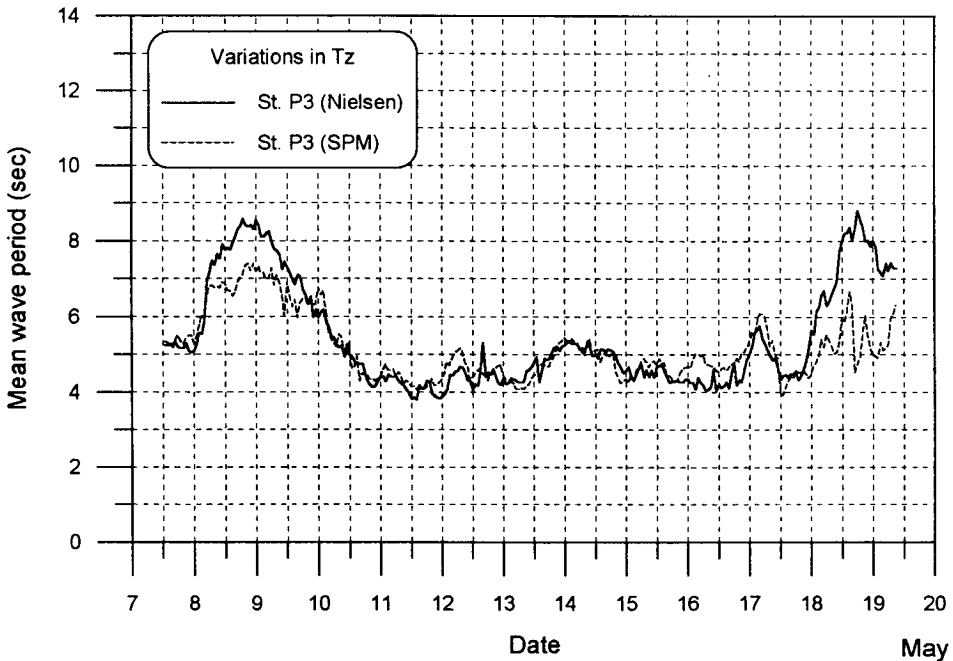
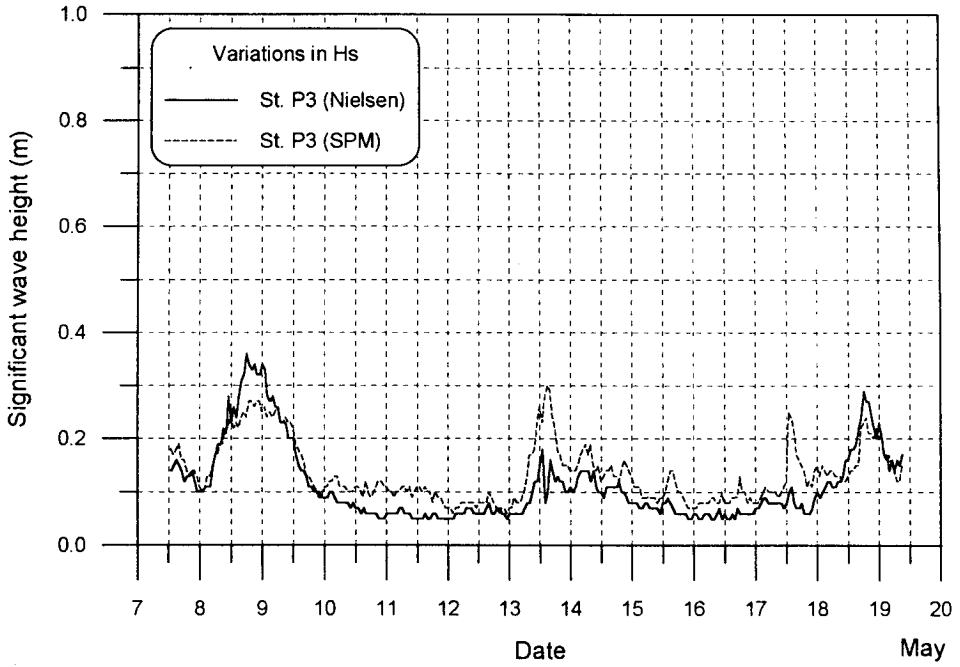


Fig. A1.6 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P3 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

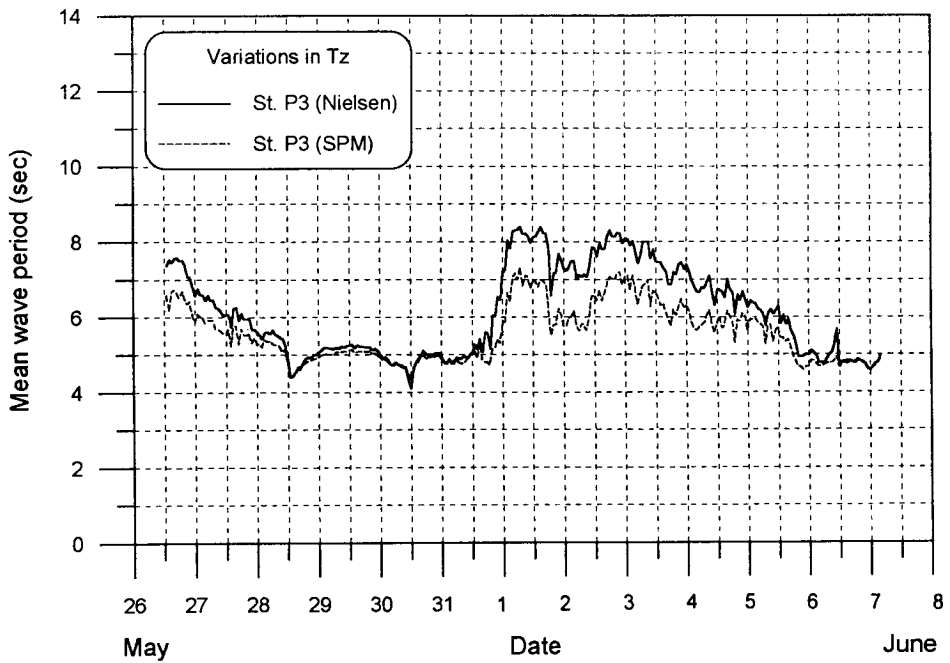
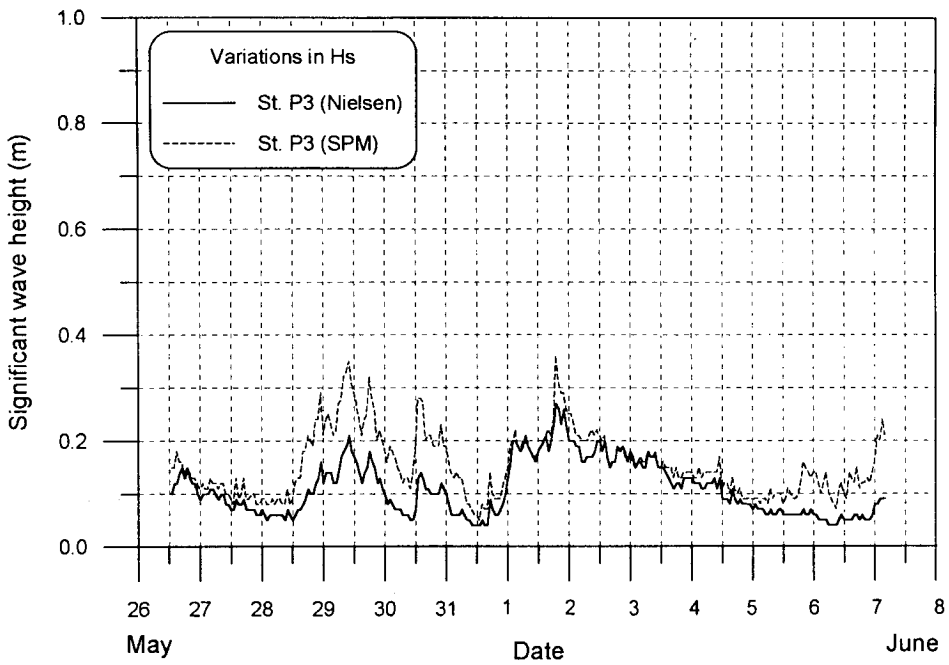


Fig. A1.7 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P3 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~June 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

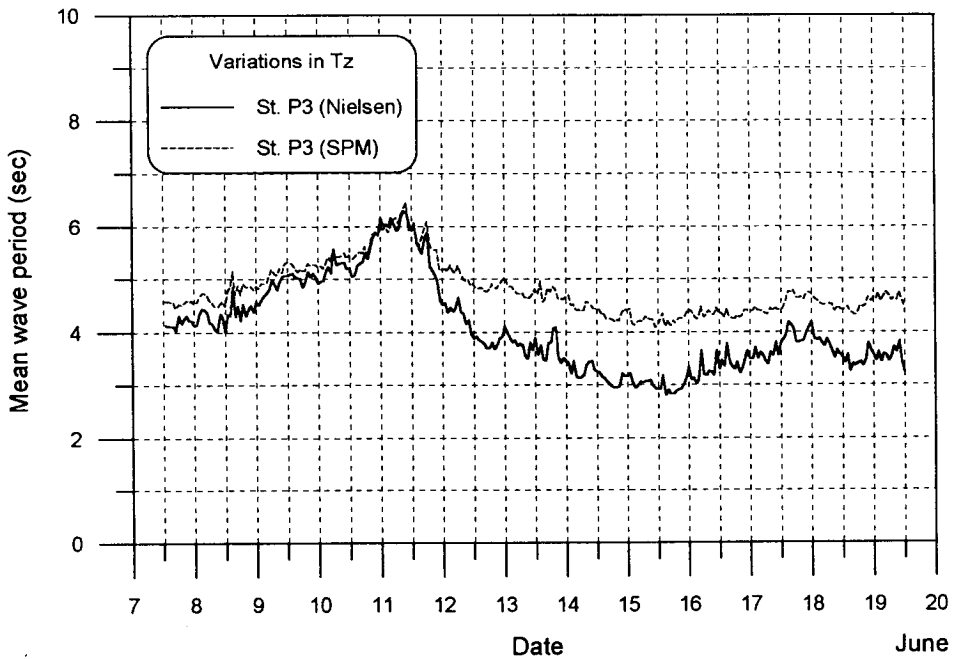
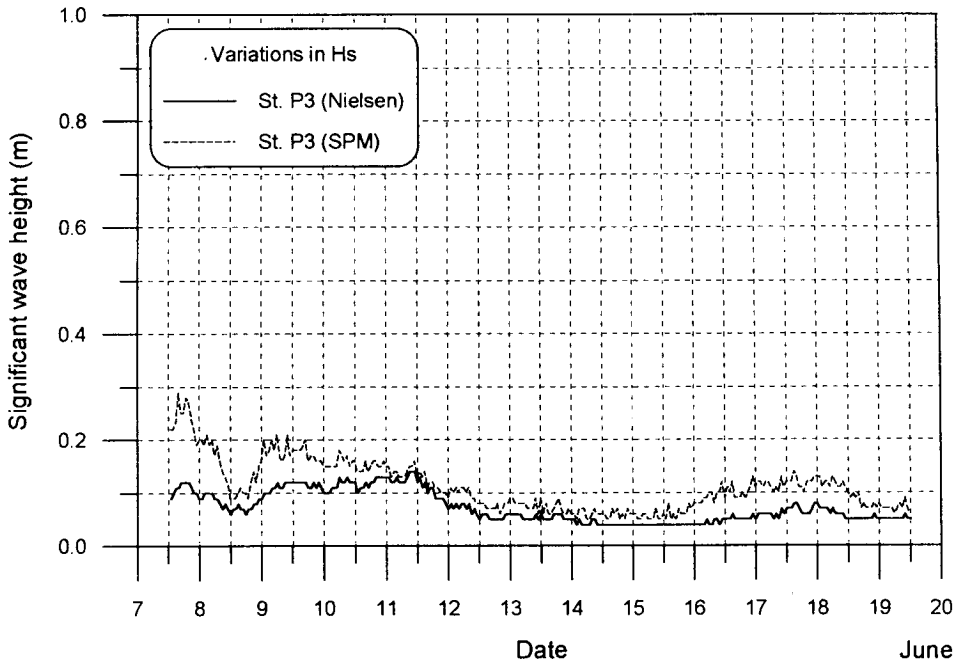


Fig. A1.8 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P3 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

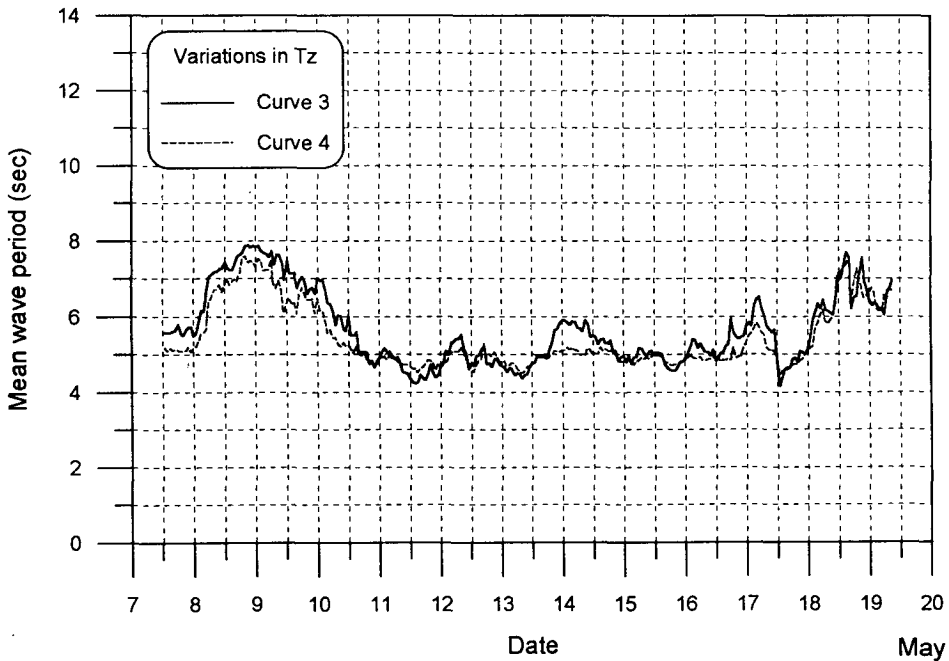
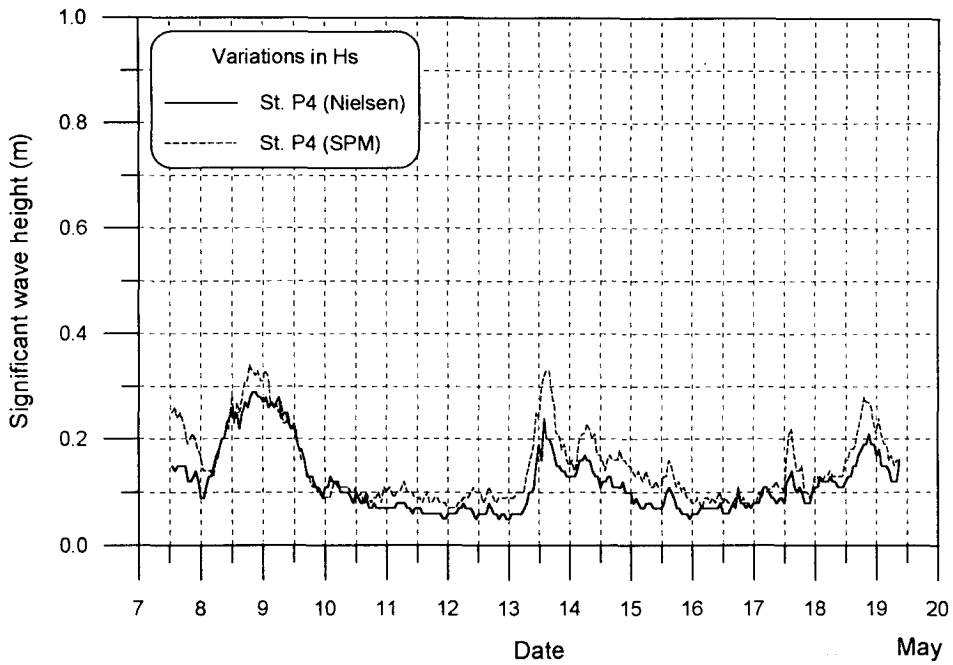


Fig. A1.9 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P4 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

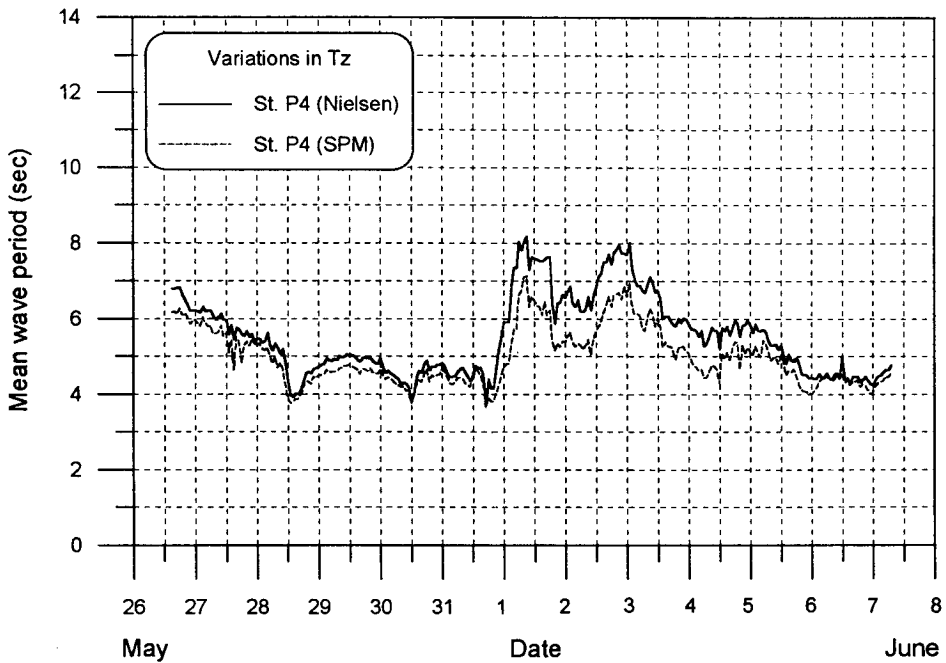
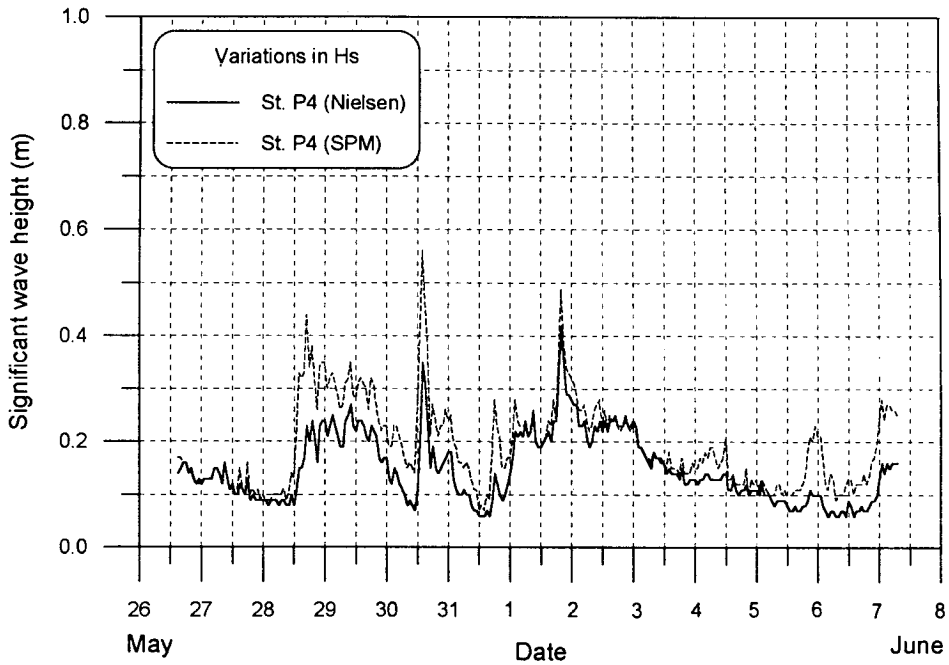


Fig. A1.10 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P4 analyzed by SPM and Nielsen's method (May 26~June 7, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

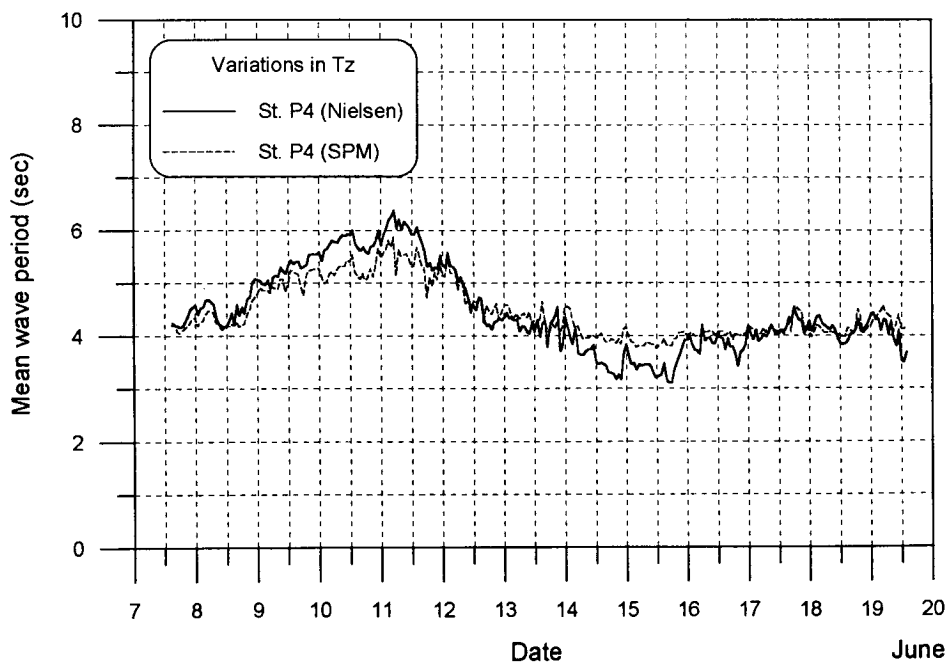
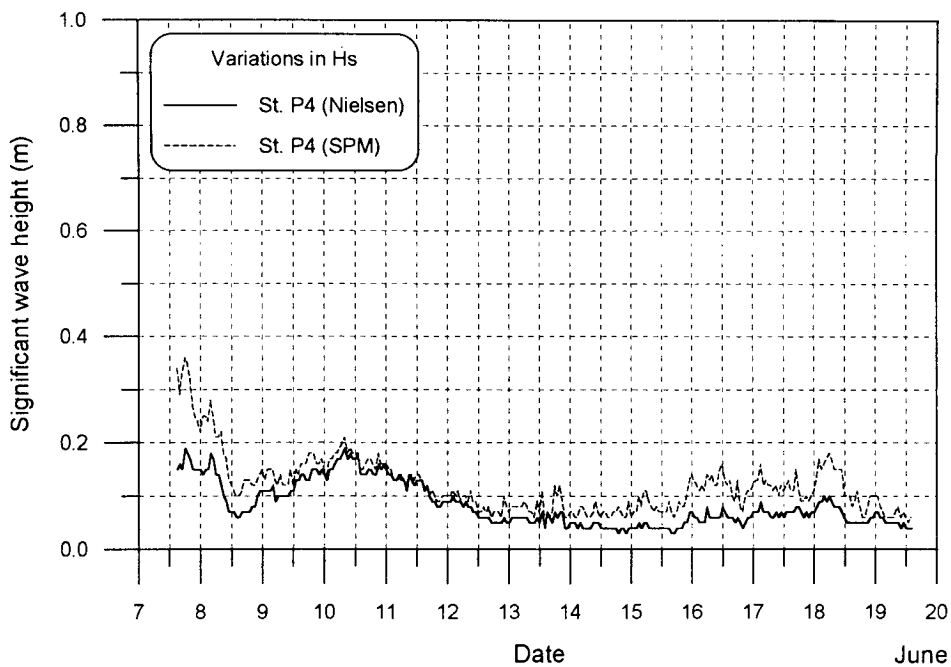


Fig. A1.11 Comparison of H_s and T_z for wave data measured at station P4 analyzed by SPM and Nielsen's method (June 7~19, 1997), upper : H_s , lower : T_z .

Time Series Plotting of Raw Data at St. P1, 6/9 14H, 1997, Donghae

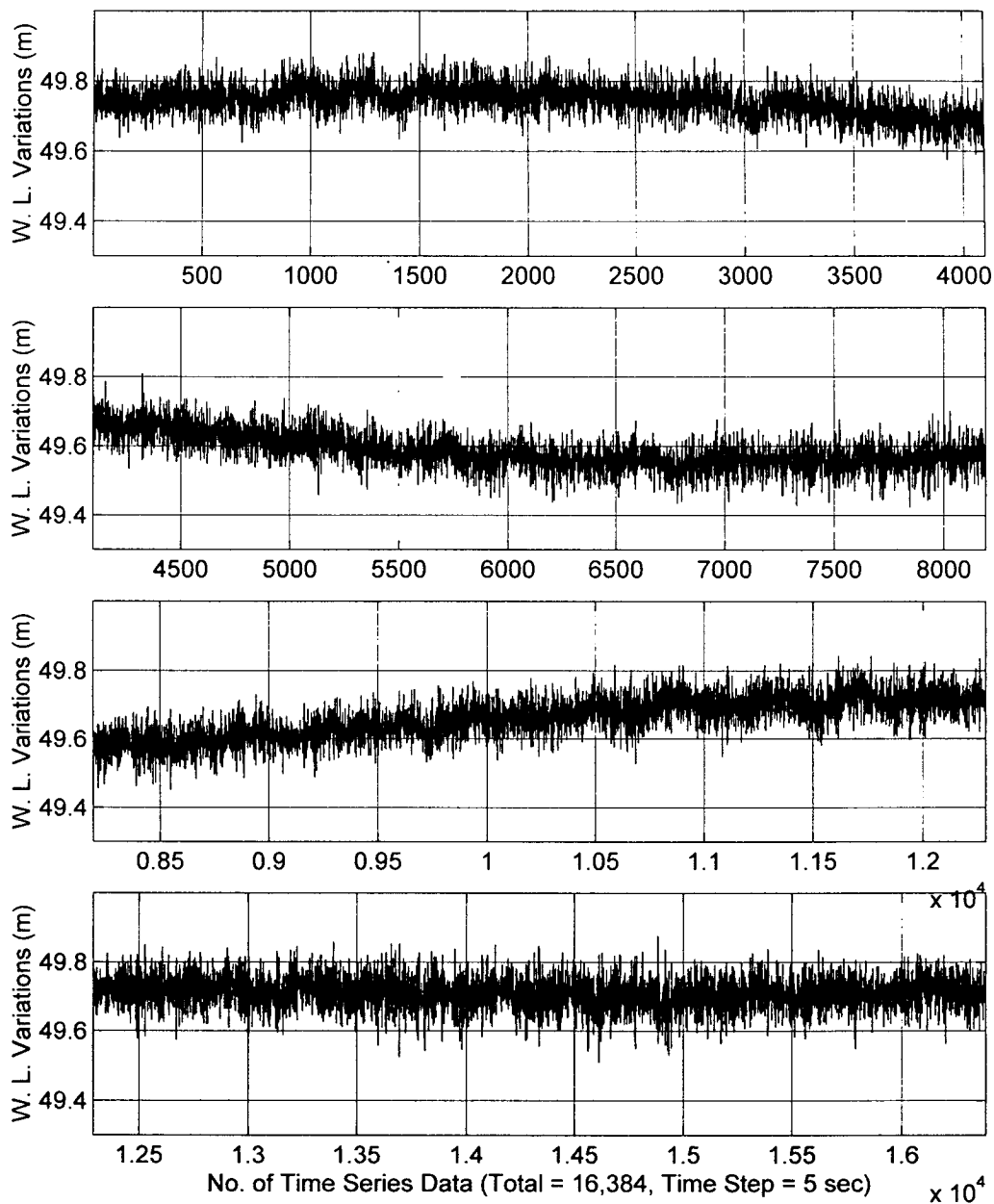


Fig. A2.1 Time series of raw sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P2, 6/9 14H, 1997, Donghae

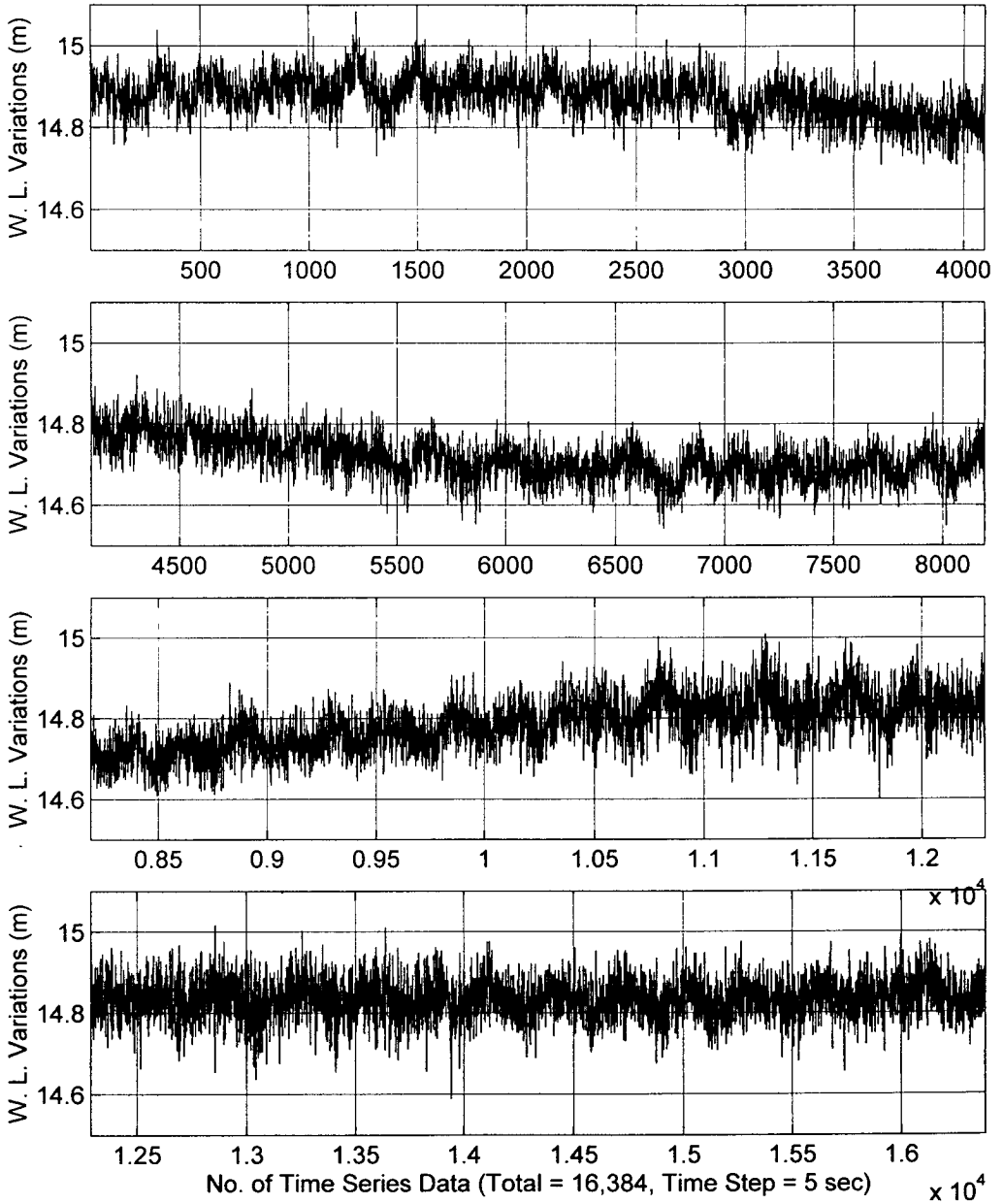


Fig. A2.2 Time series of raw sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

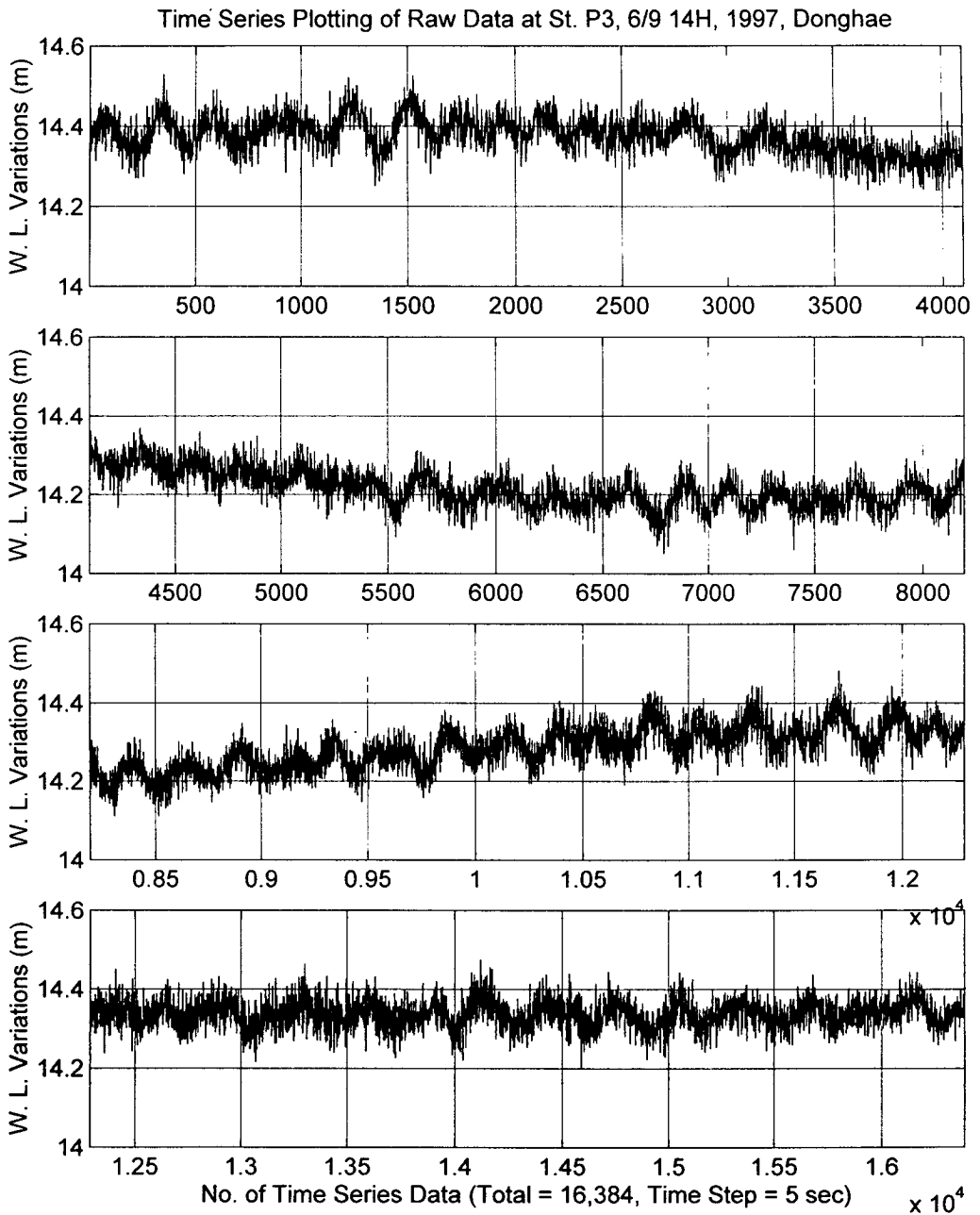


Fig. A2.3 Time series of raw sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P4, 6/9 14H, 1997, Donghae

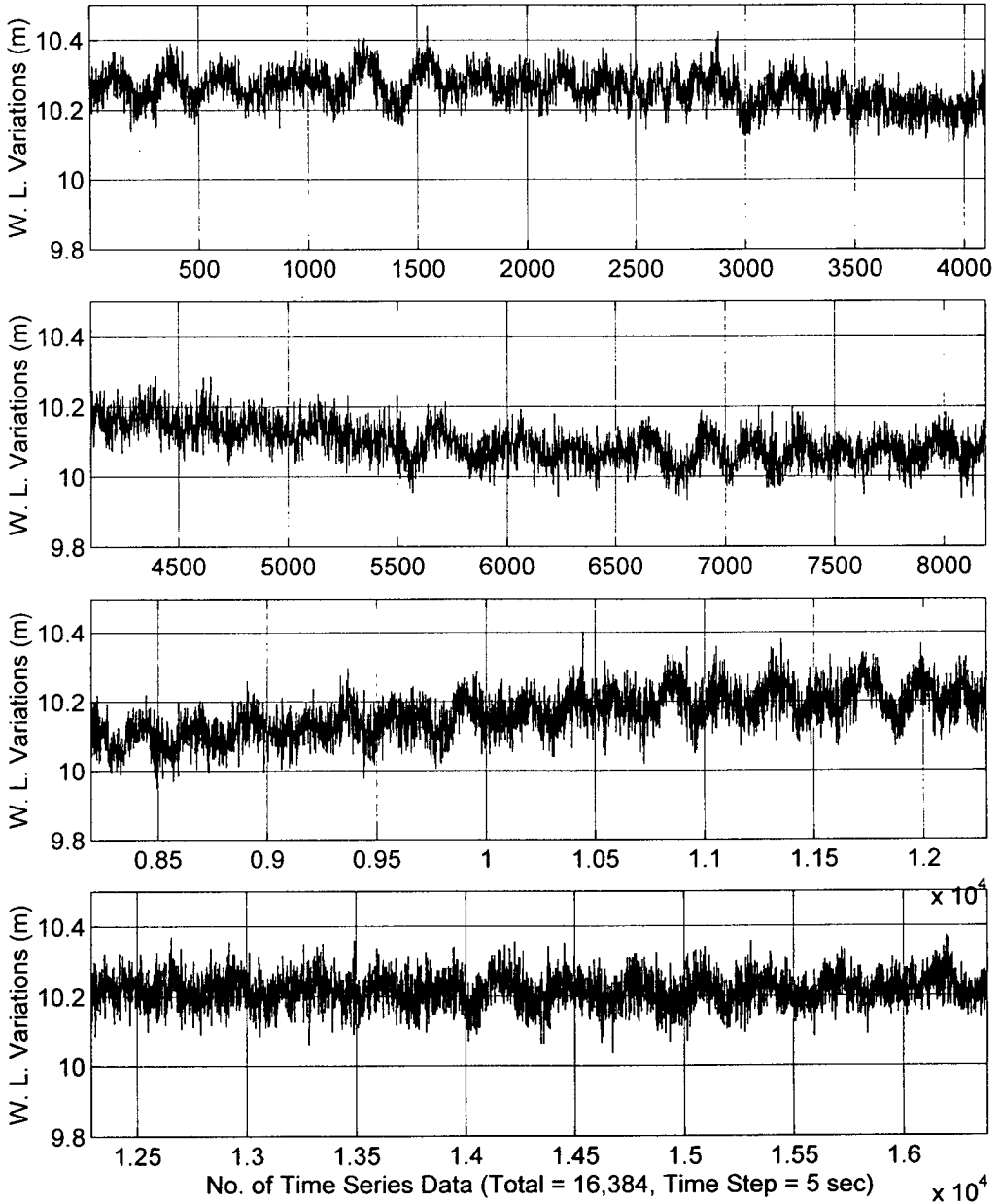


Fig. A2.4 Time series of raw sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

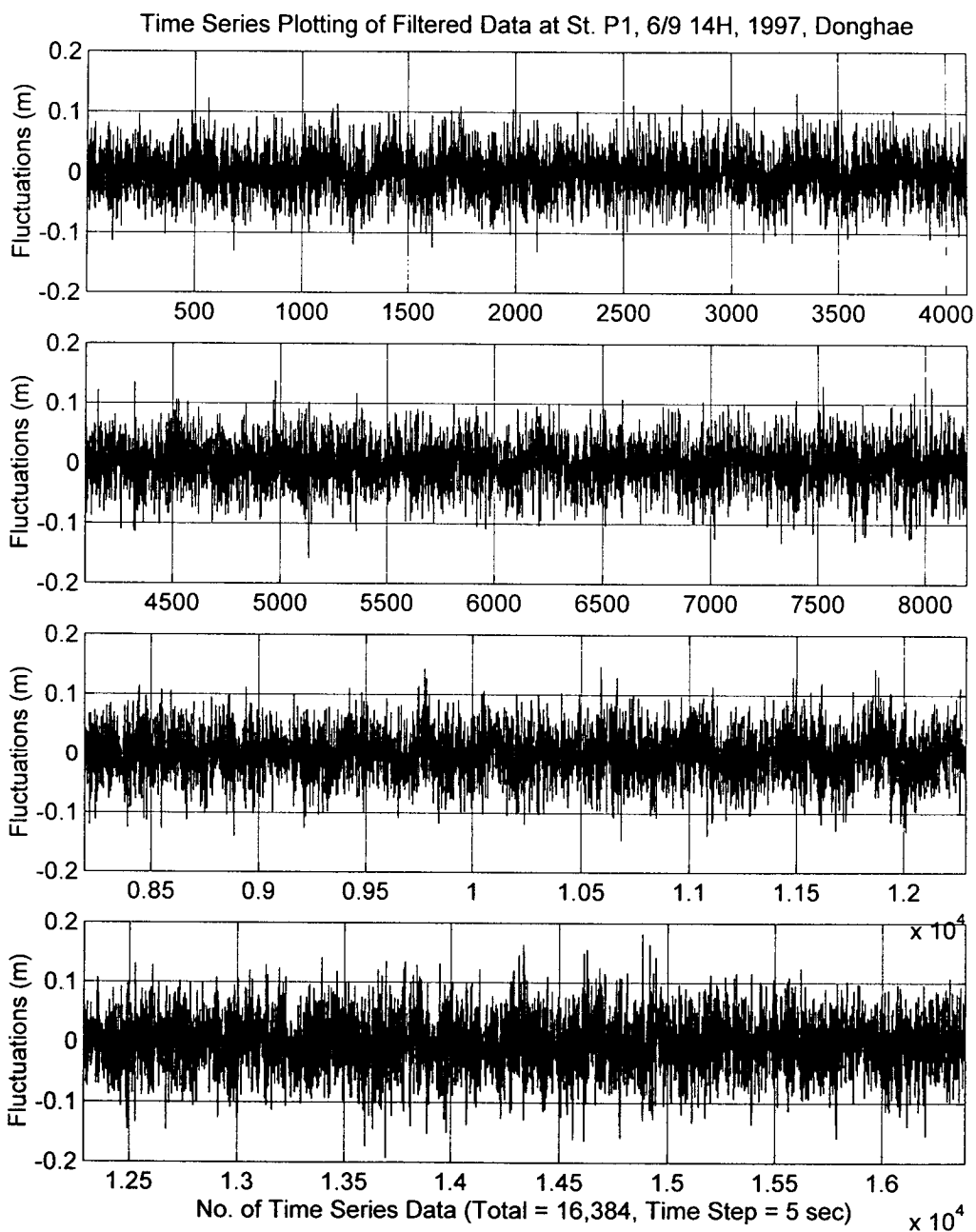


Fig. A2.5 Time series of filtered sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

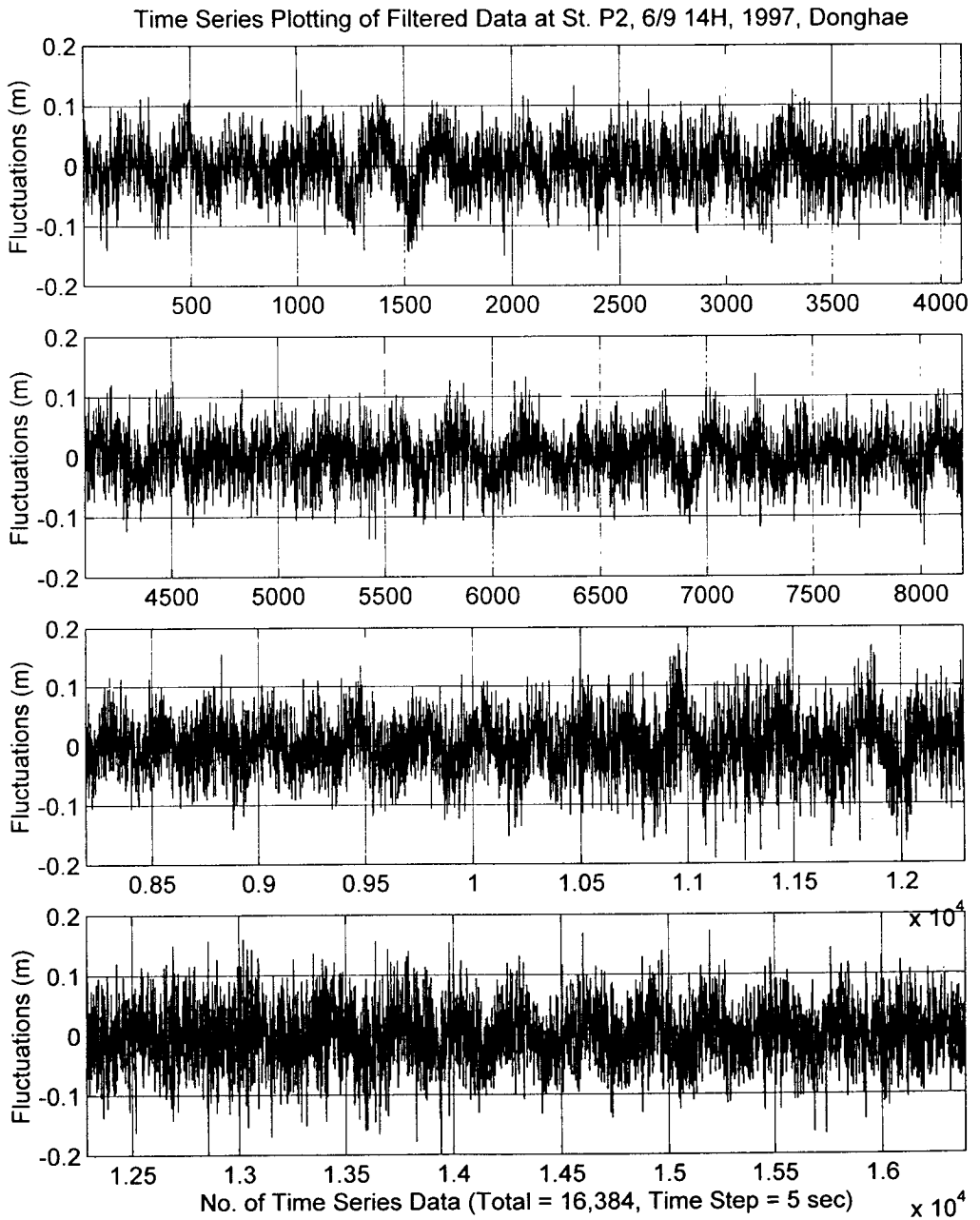


Fig. A2.6 Time series of filtered sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

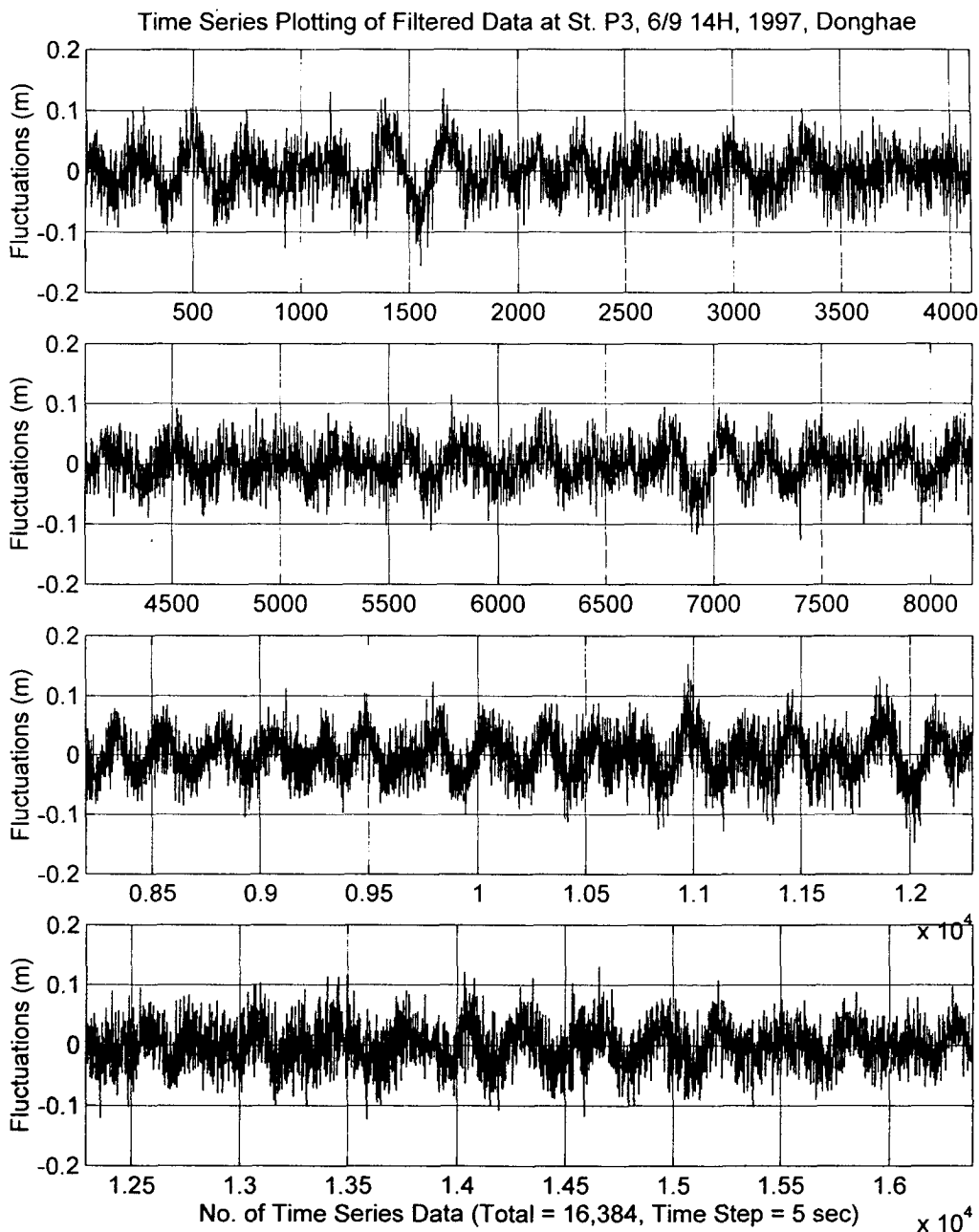


Fig. A2.7 Time series of filtered sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

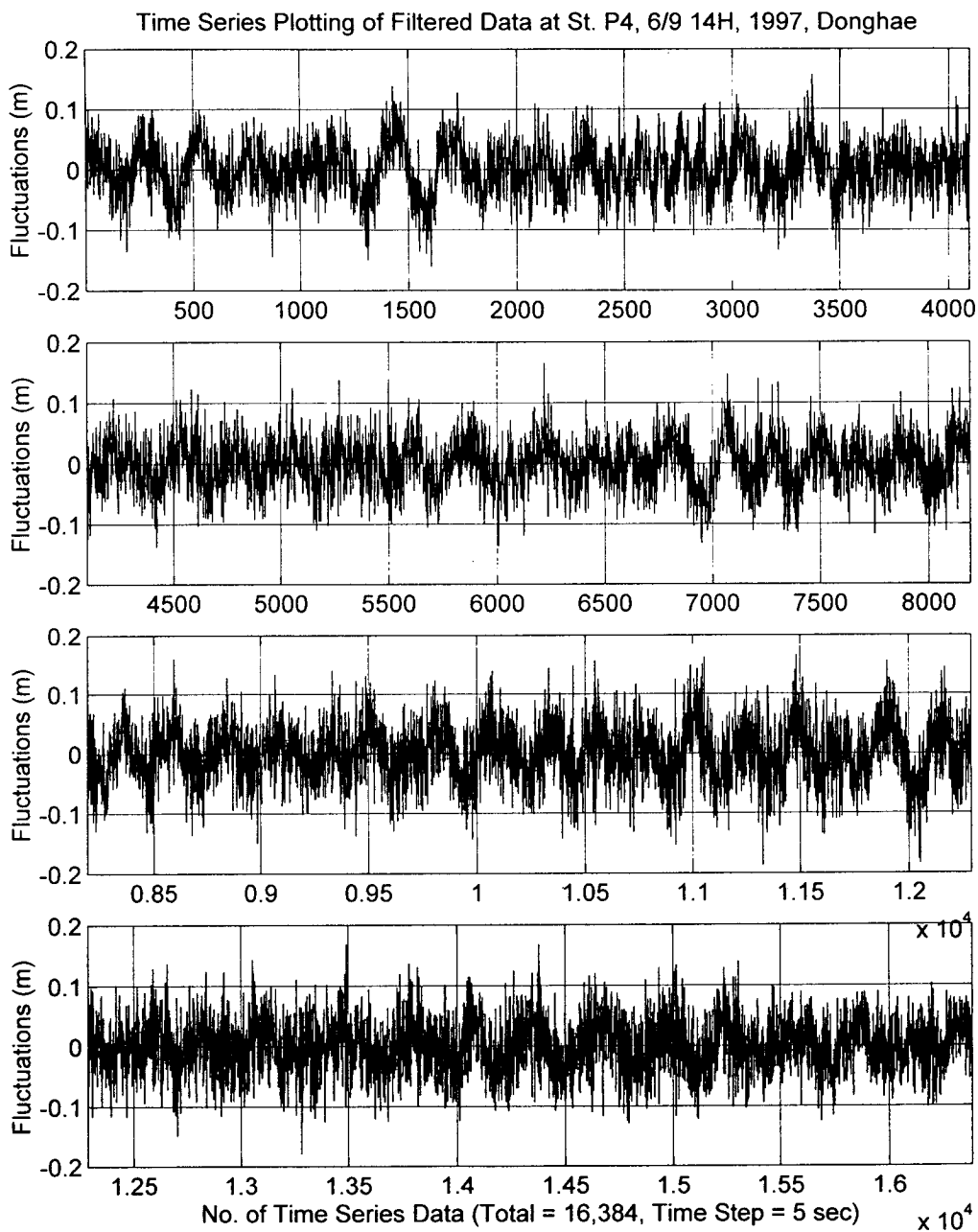


Fig. A2.8 Time series of filtered sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 9 14:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P1, 6/1 16H, 1997, Donghae

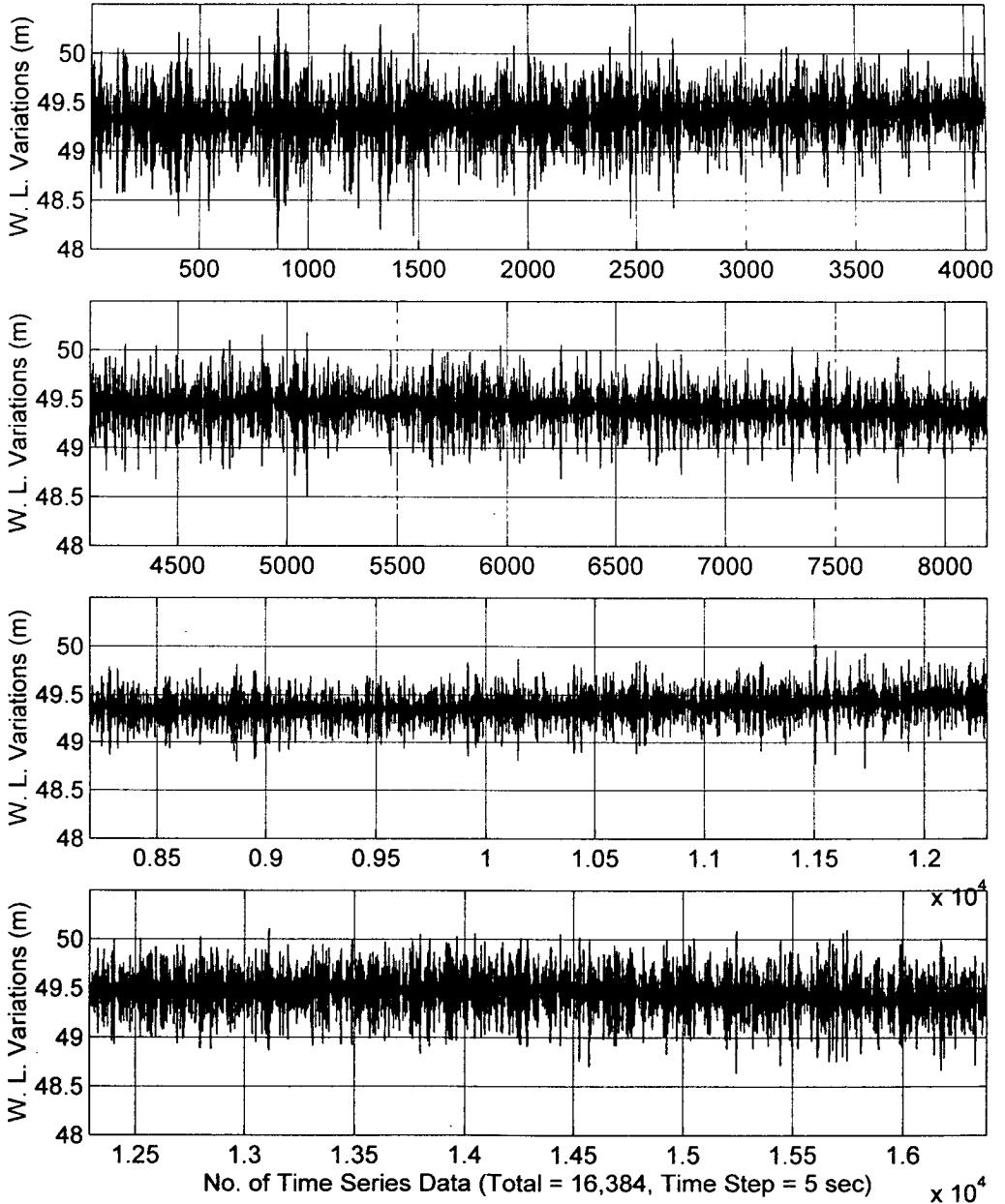


Fig. A2.9 Time series of raw sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P2, 6/1 16H, 1997, Donghae

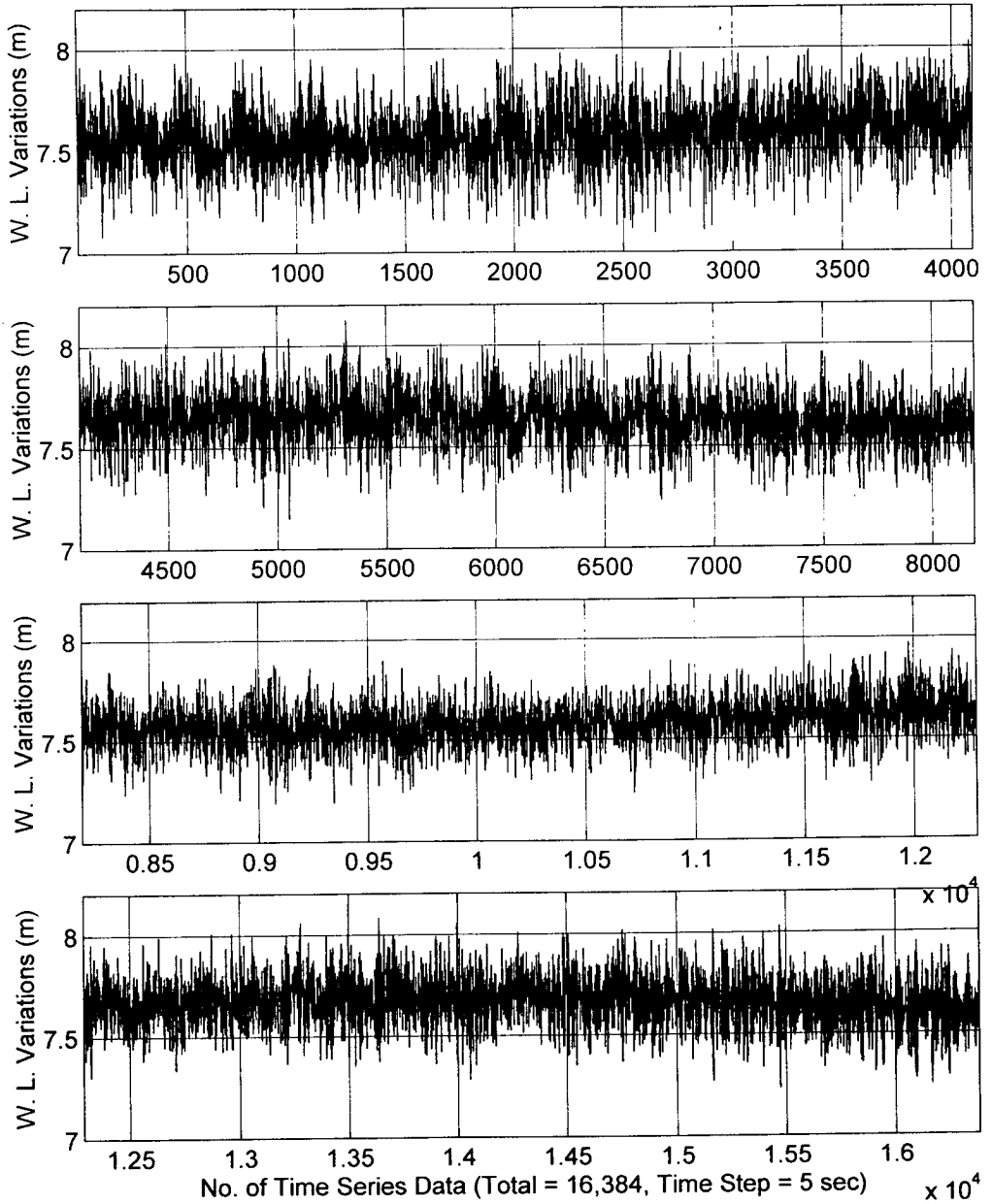


Fig. A2.10 Time series of raw sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

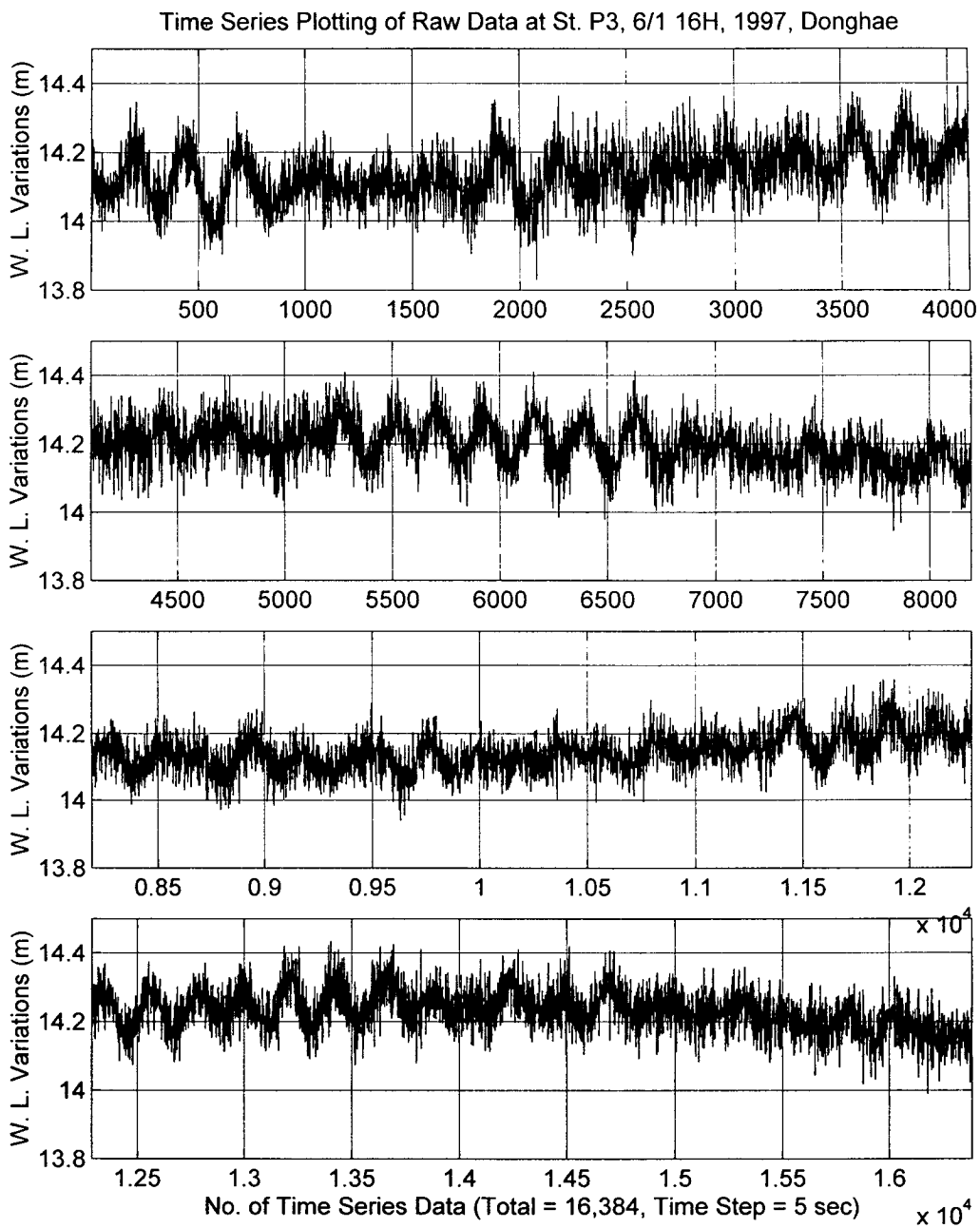


Fig. A2.11 Time series of raw sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P4, 6/1 16H, 1997, Donghae

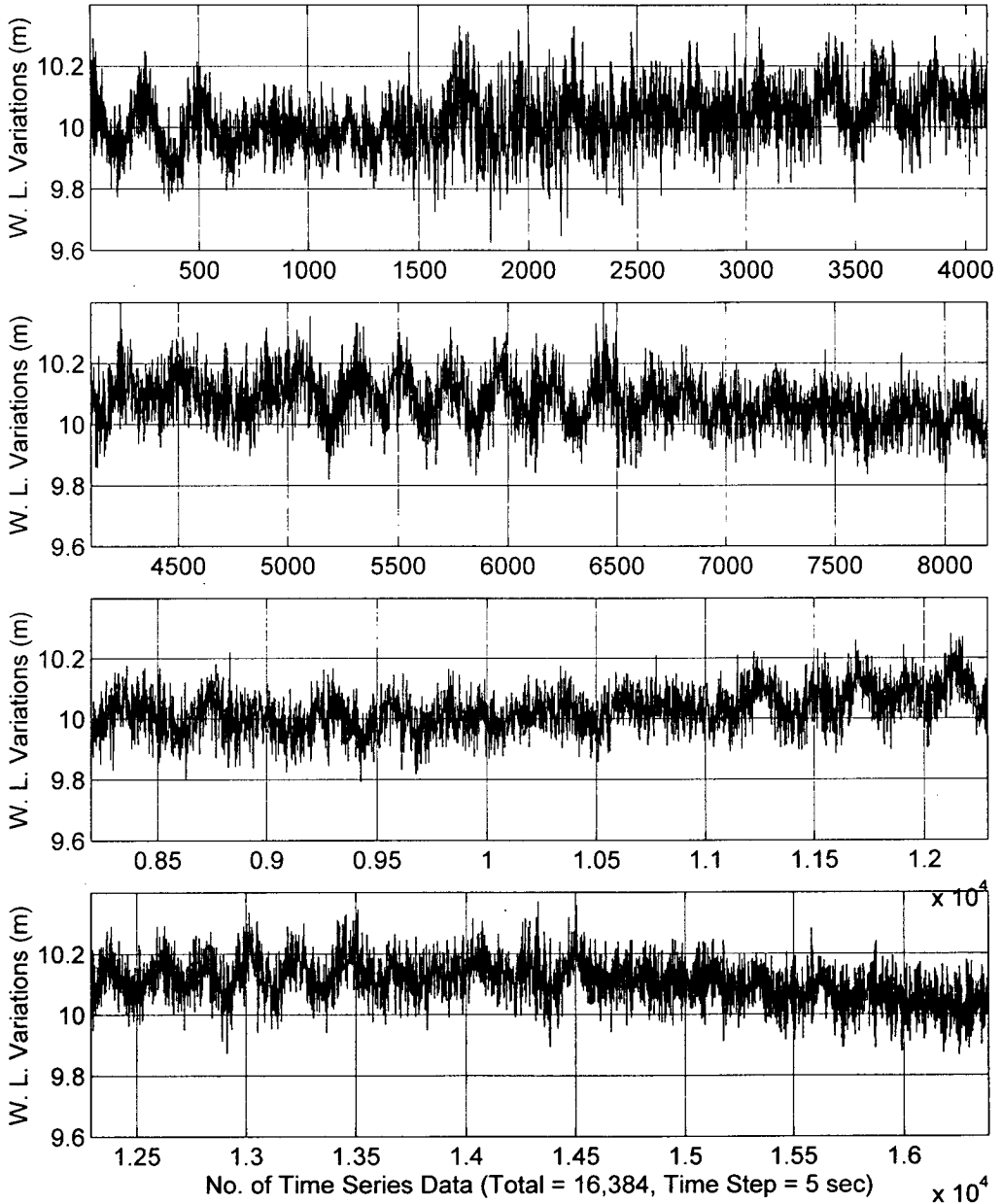


Fig. A2.12 Time series of raw sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

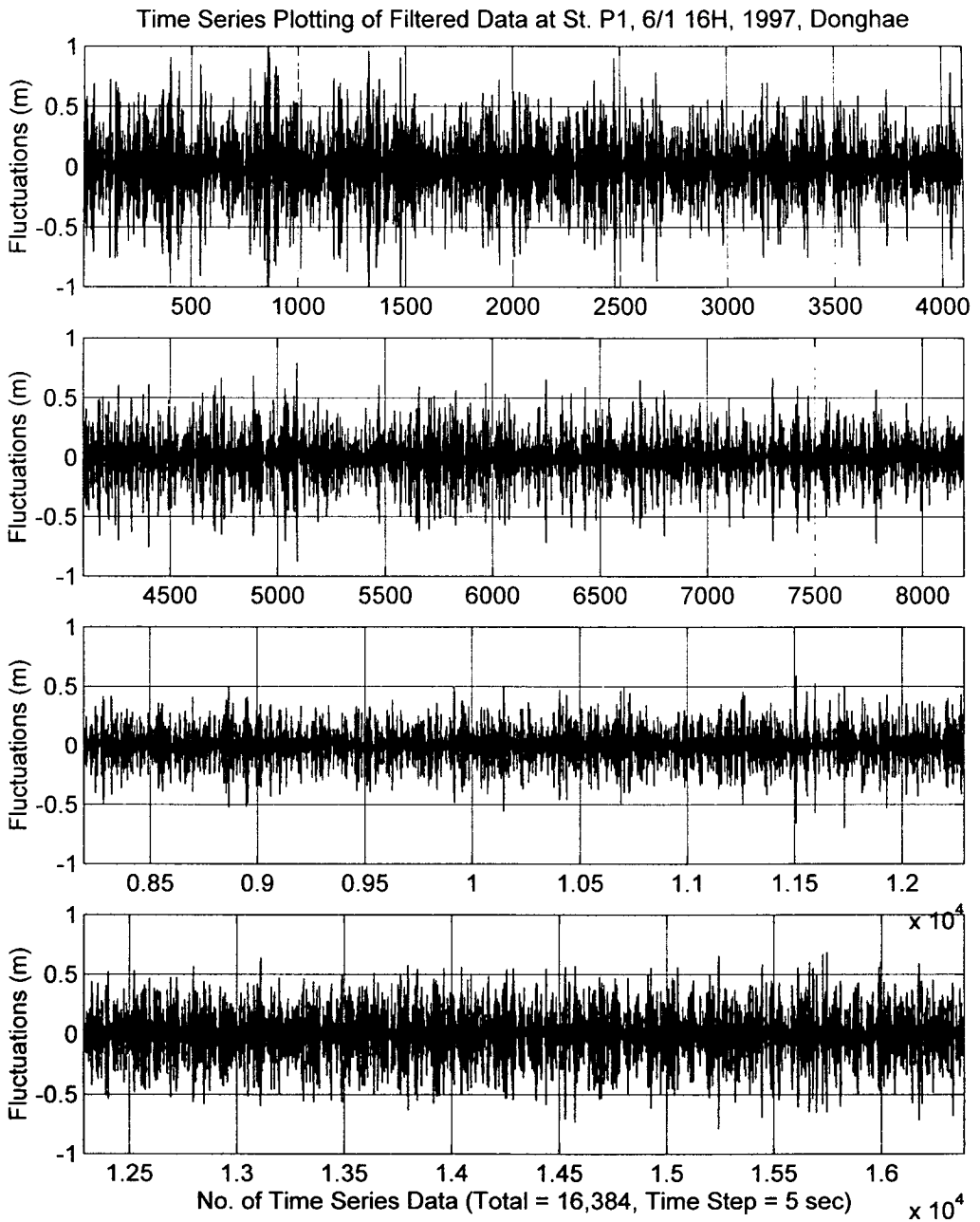


Fig. A2.13 Time series of filtered sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

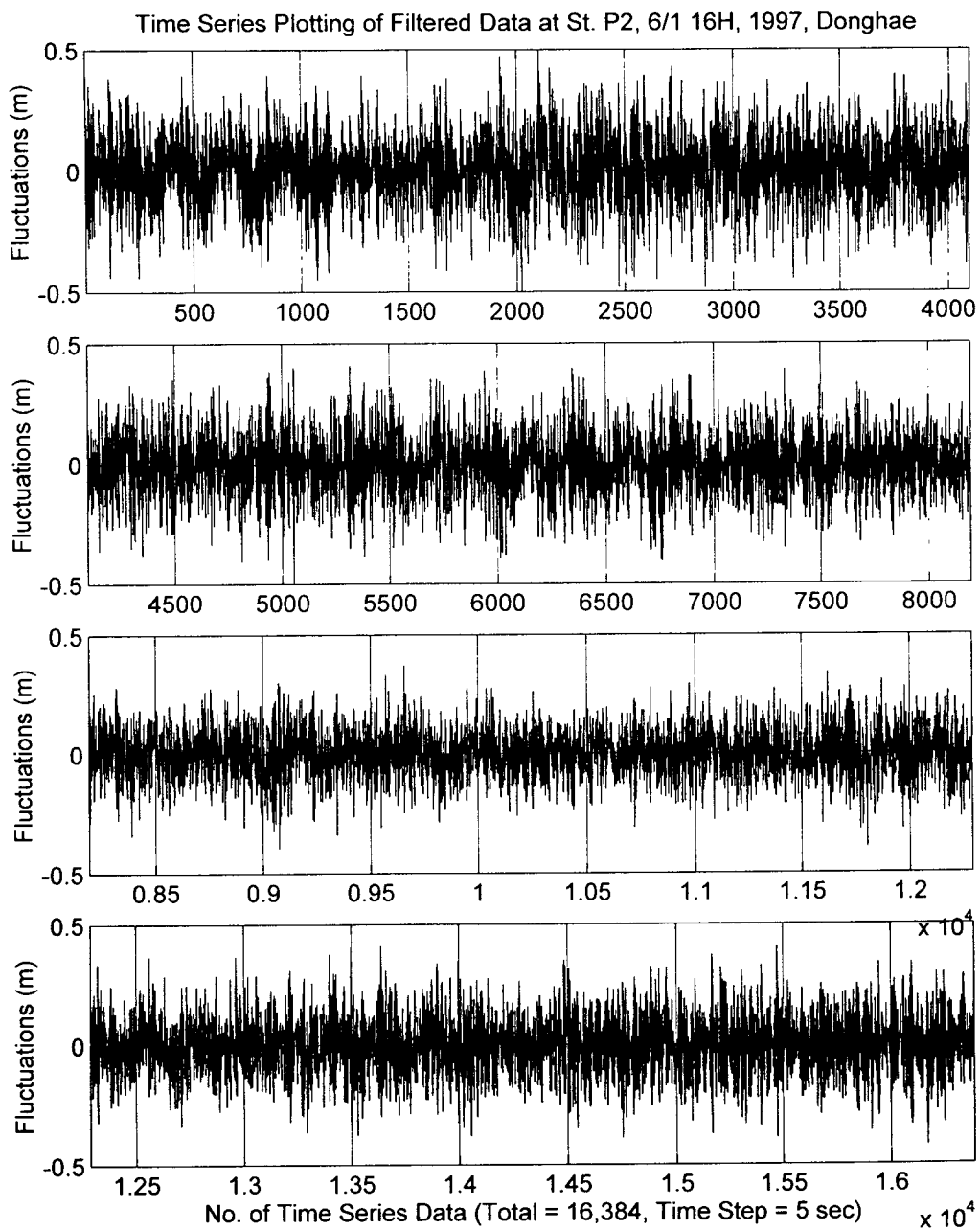


Fig. A2.14 Time series of filtered sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

Time Series Plotting of Filtered Data at St. P3, 6/1 16H, 1997, Donghae

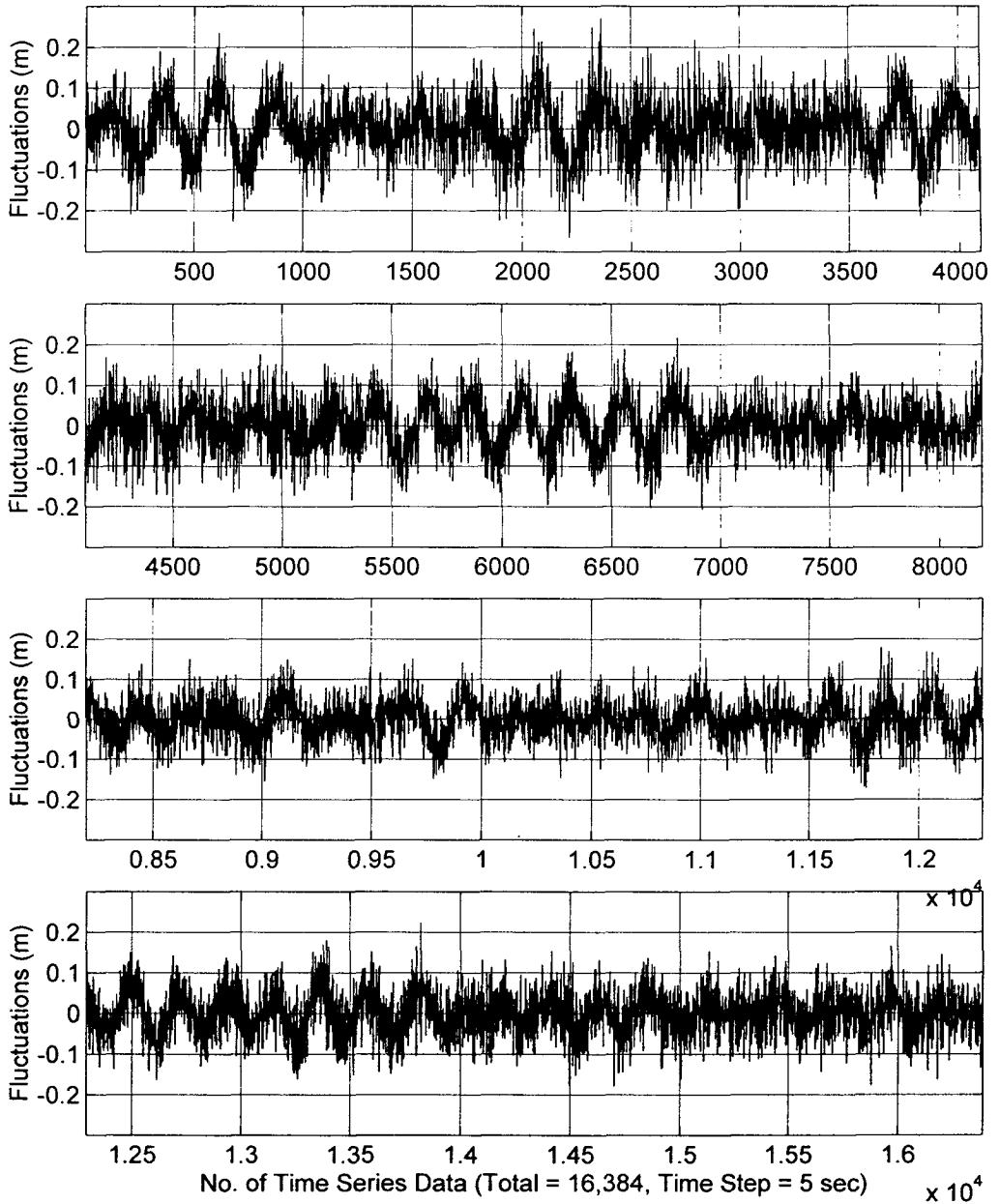


Fig. A2.15 Time series of filtered sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

Time Series Plotting of Filtered Data at St. P4, 6/1 16H, 1997, Donghae

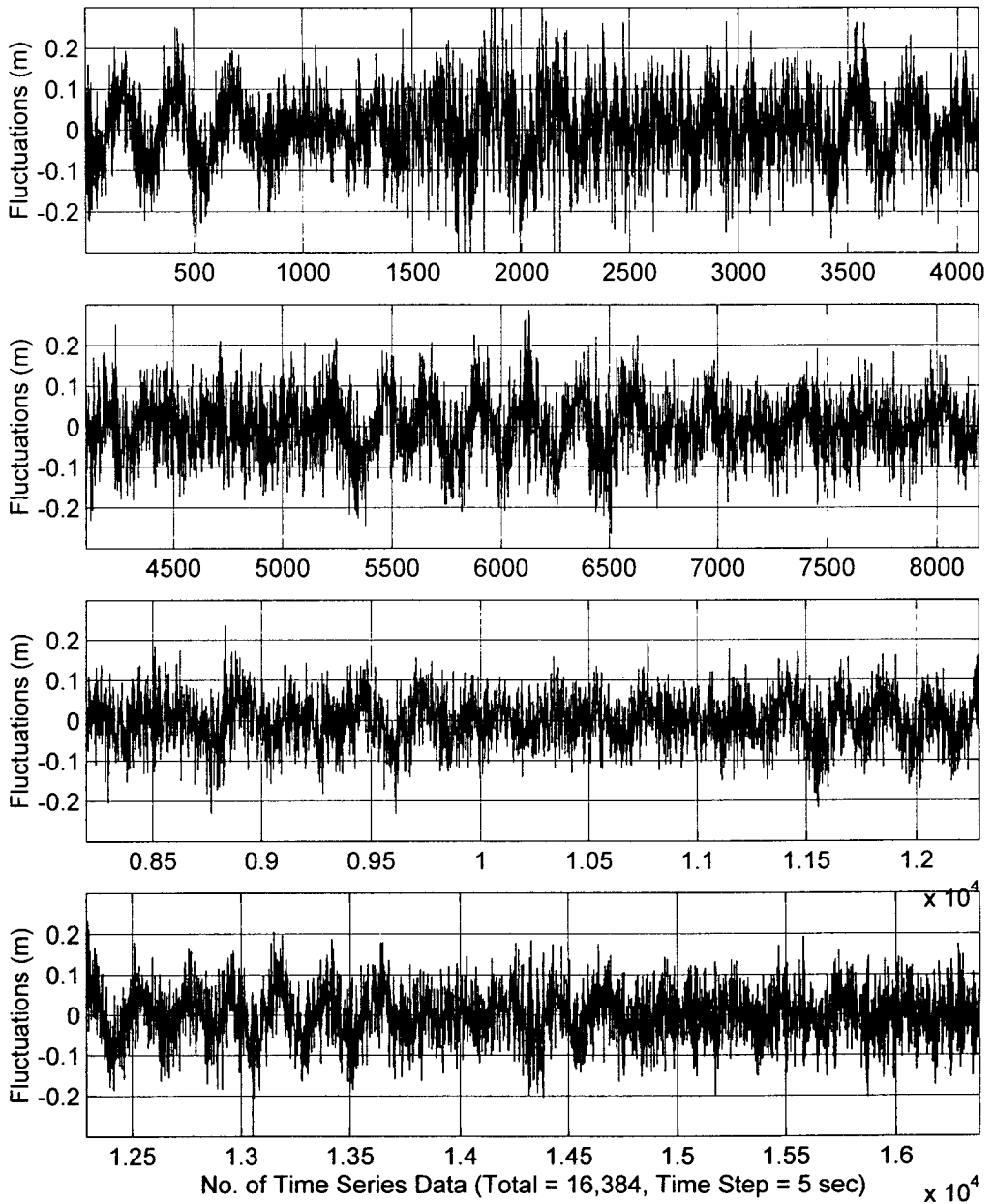


Fig. A2.16 Time series of filtered sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from June 1 16:00, 1997.

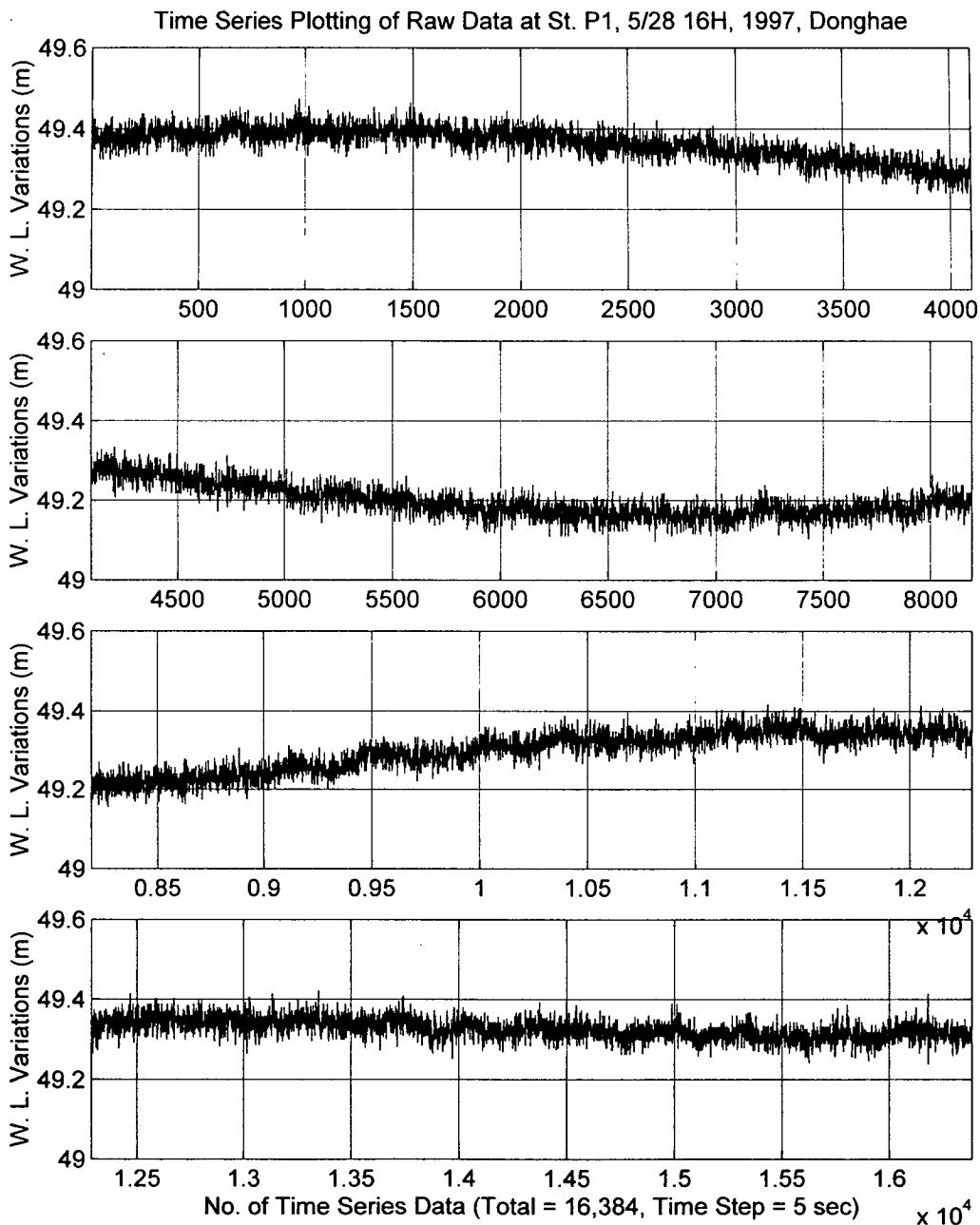


Fig. A2.17 Time series of raw sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

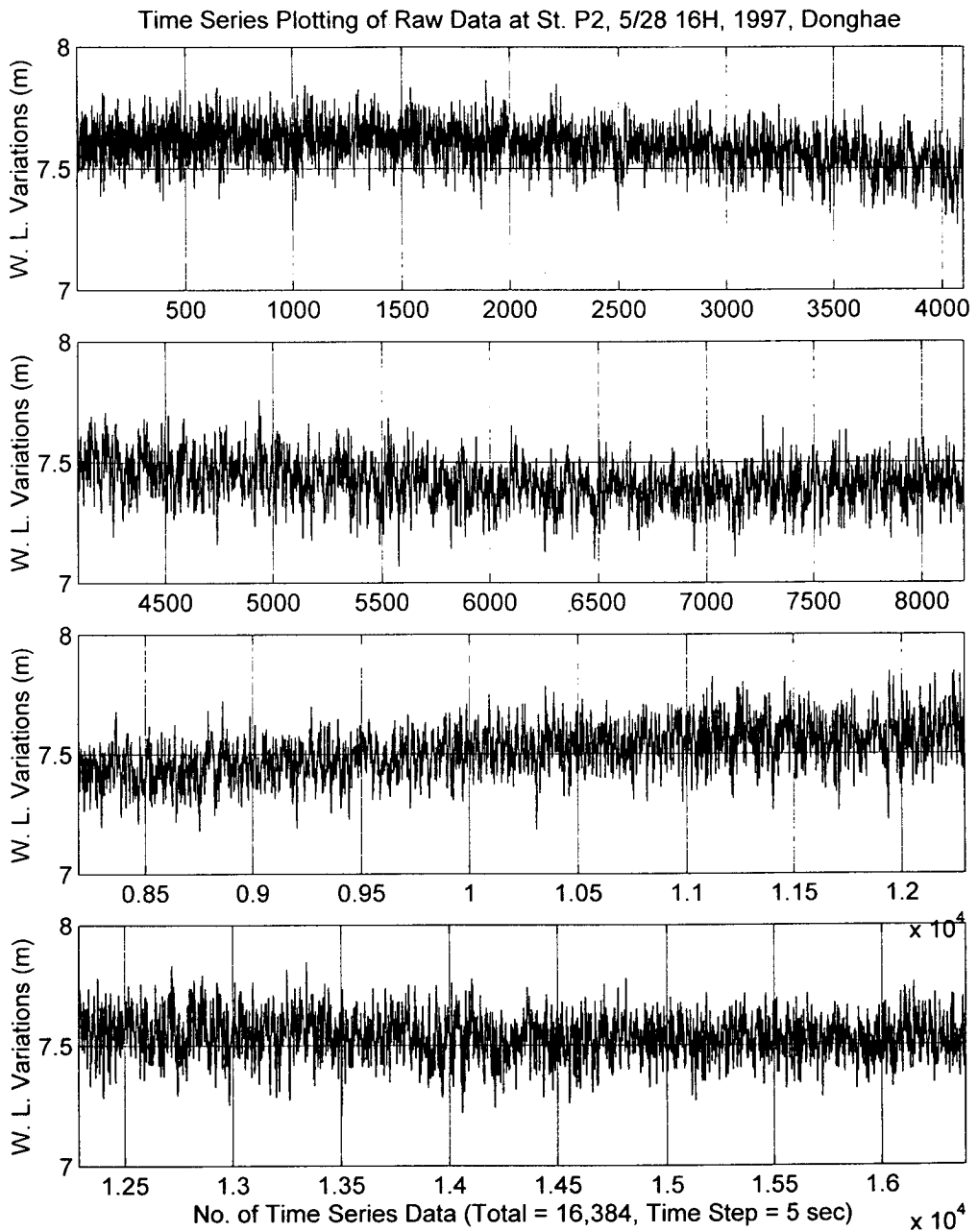


Fig. A2.18 Time series of raw sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

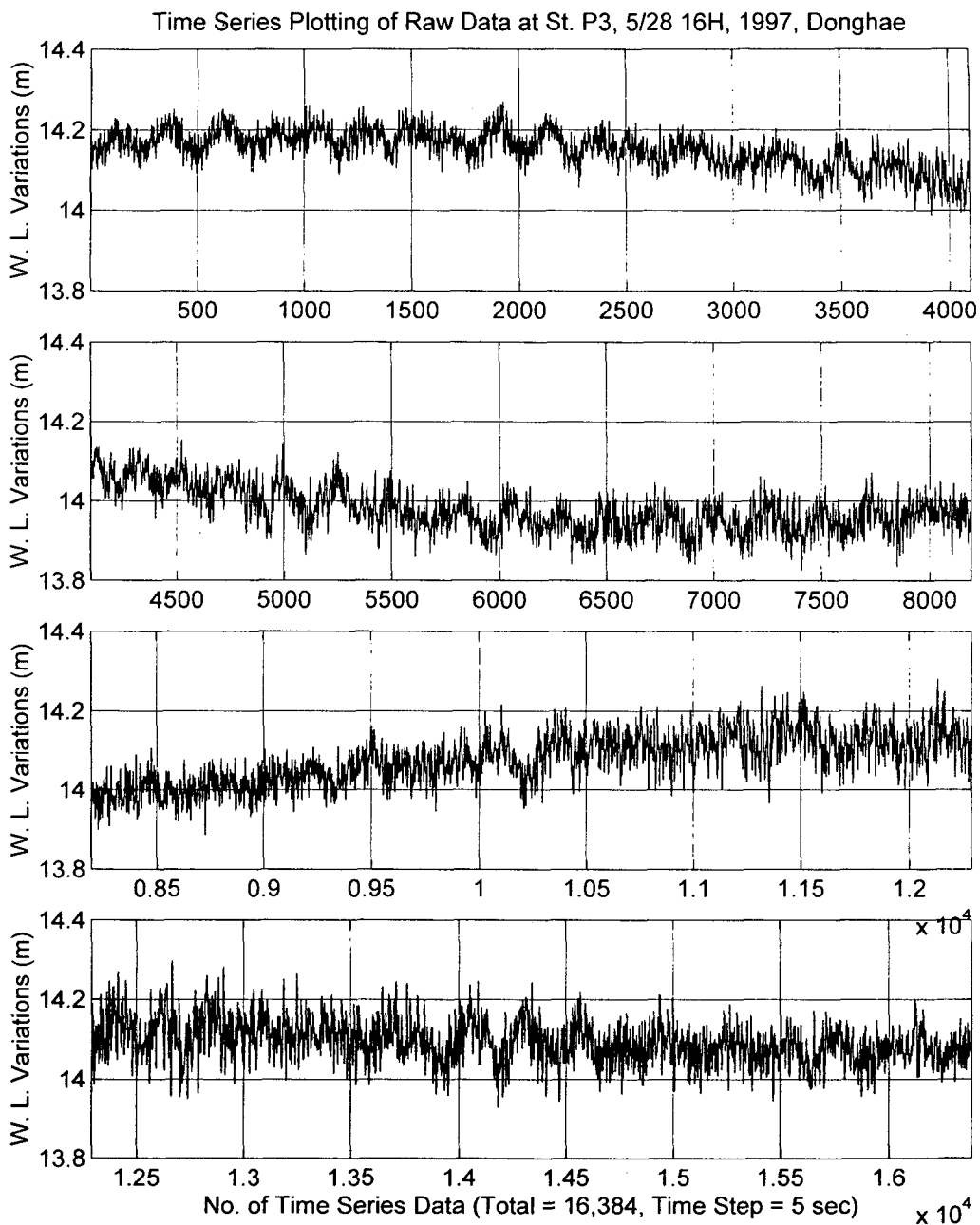


Fig. A2.19 Time series of raw sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

Time Series Plotting of Raw Data at St. P4, 5/28 16H, 1997, Donghae

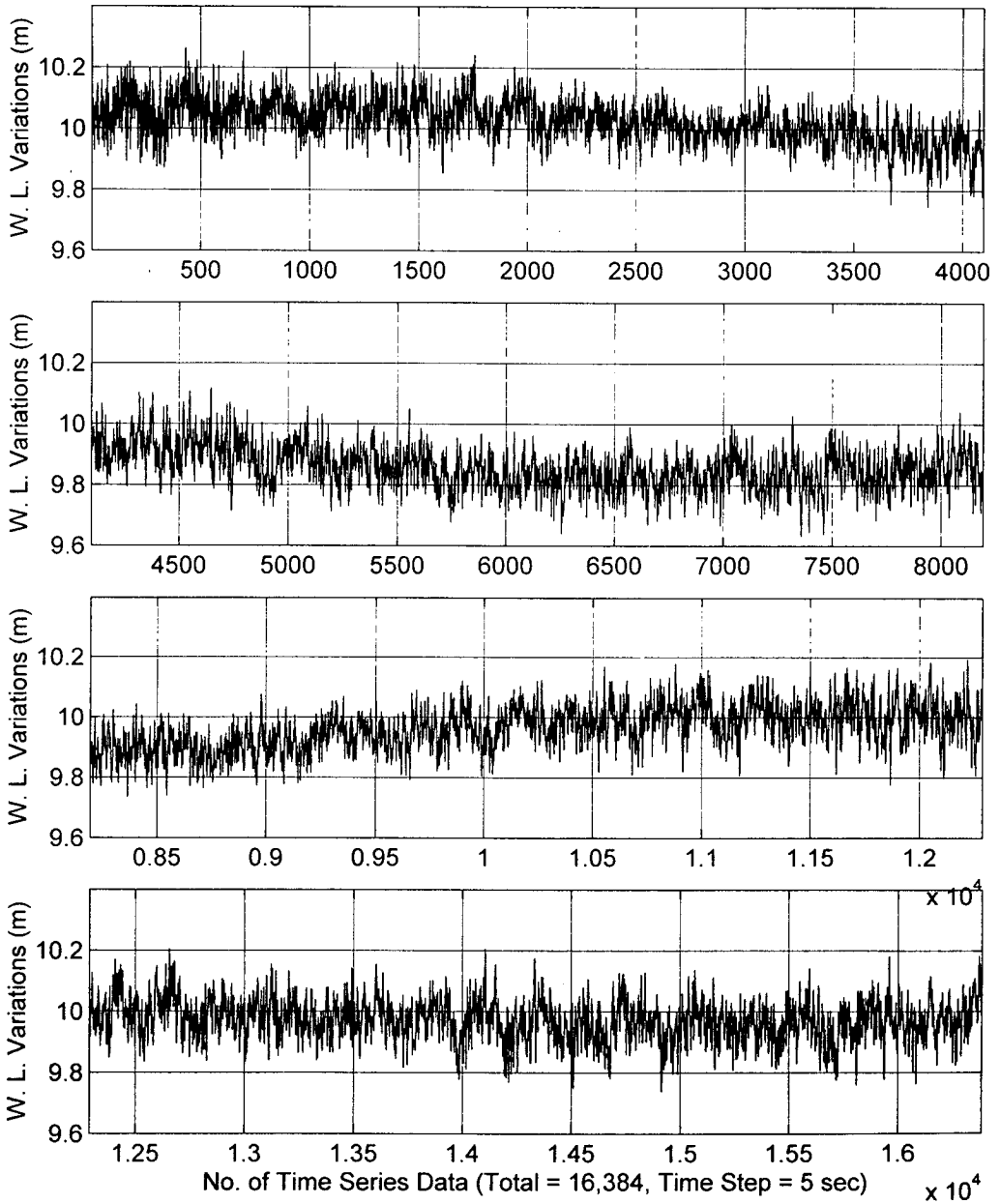


Fig. A2.20 Time series of raw sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

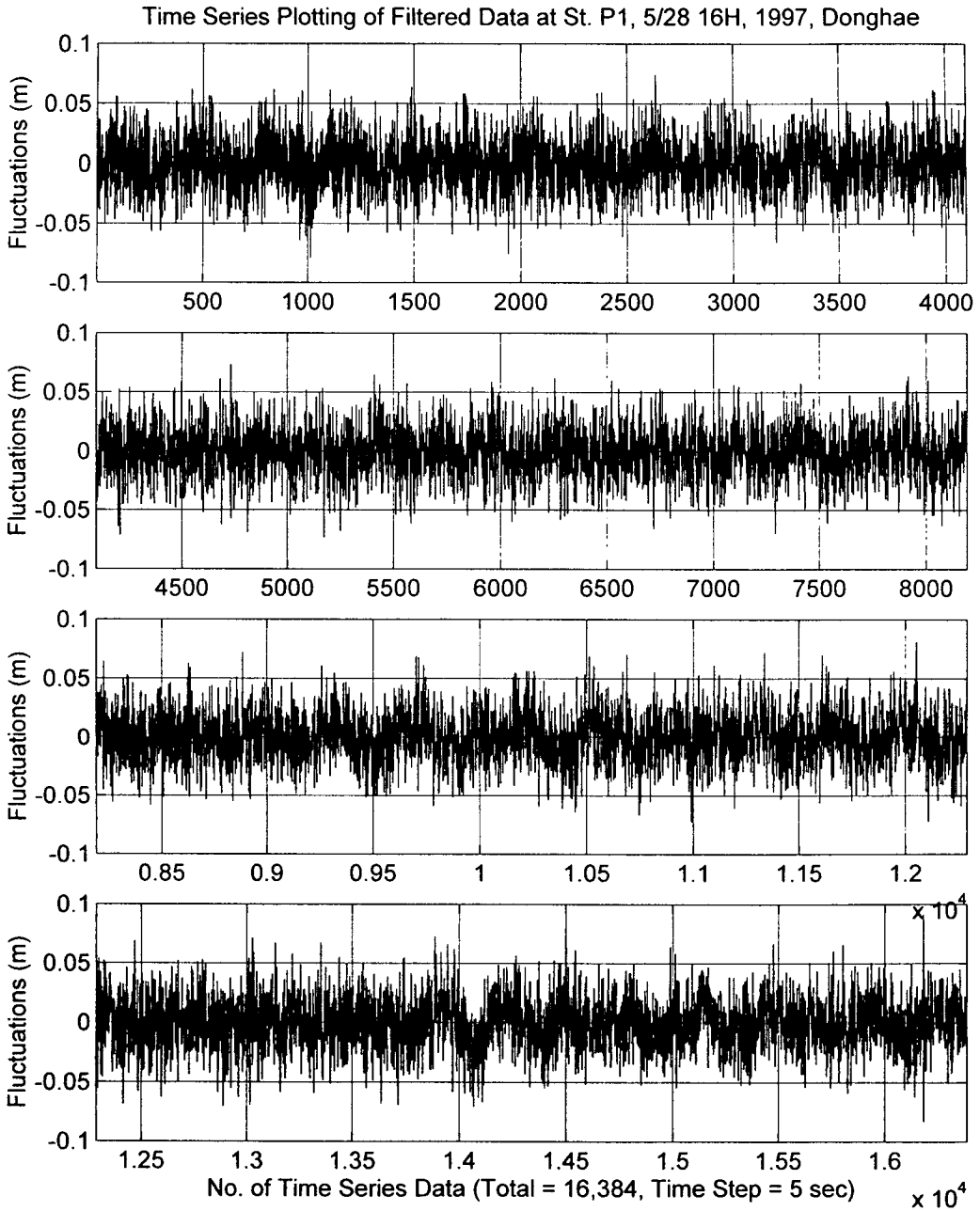


Fig. A2.21 Time series of filtered sea level data measured at station P1 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

Time Series Plotting of Filtered Data at St. P2, 5/28 16H, 1997, Donghae

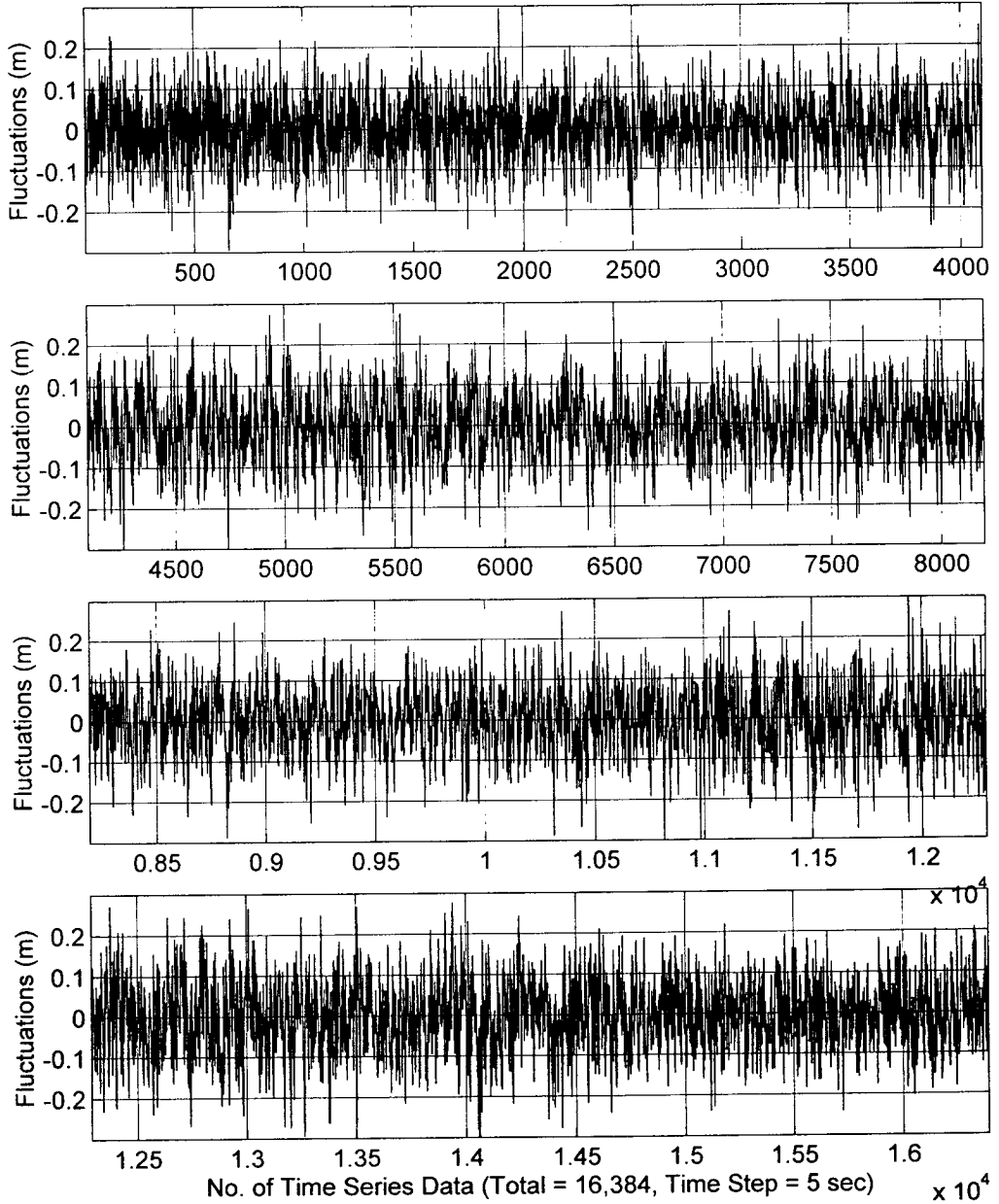


Fig. A2.22 Time series of filtered sea level data measured at station P2 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

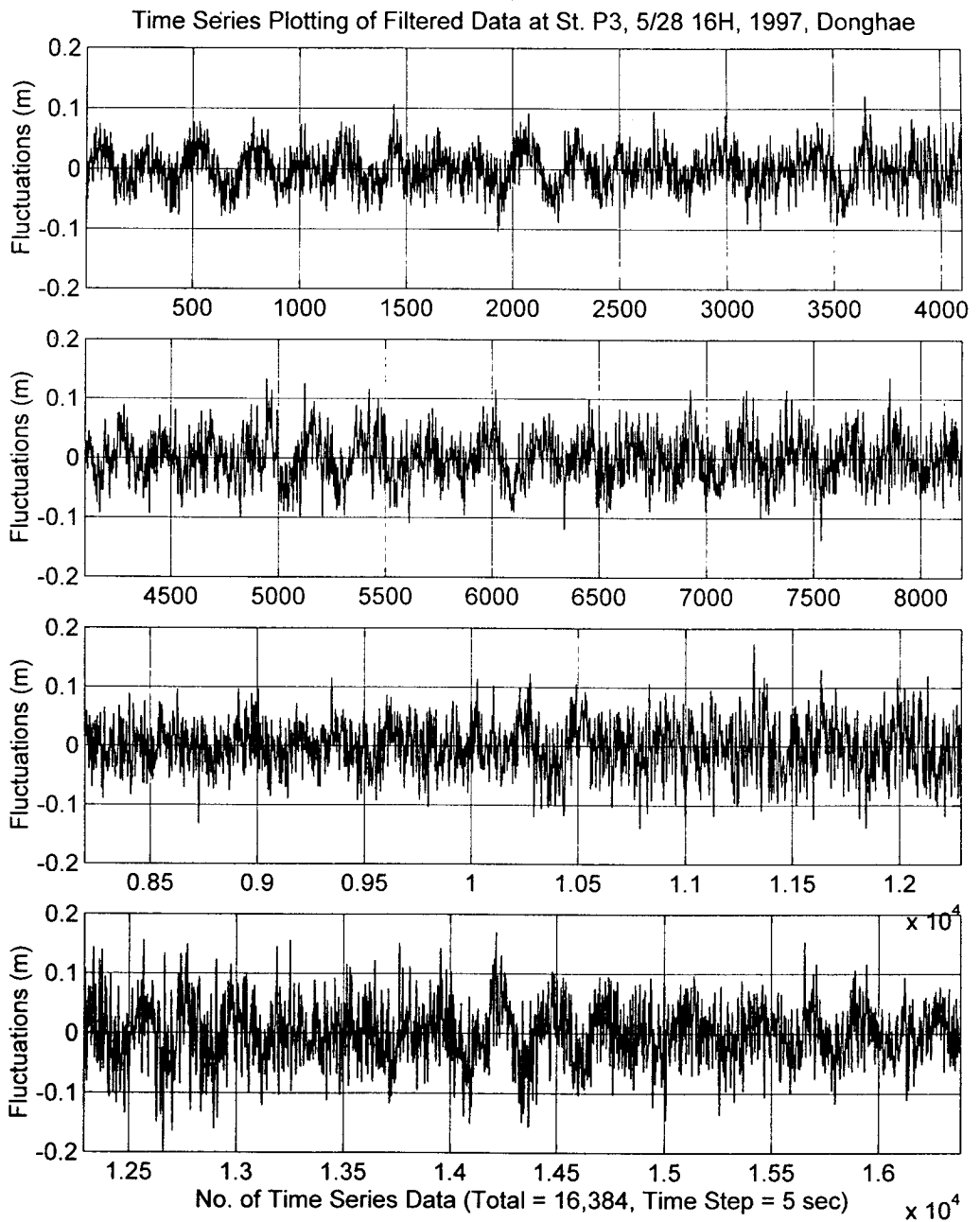


Fig. A2.23 Time series of filtered sea level data measured at station P3 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

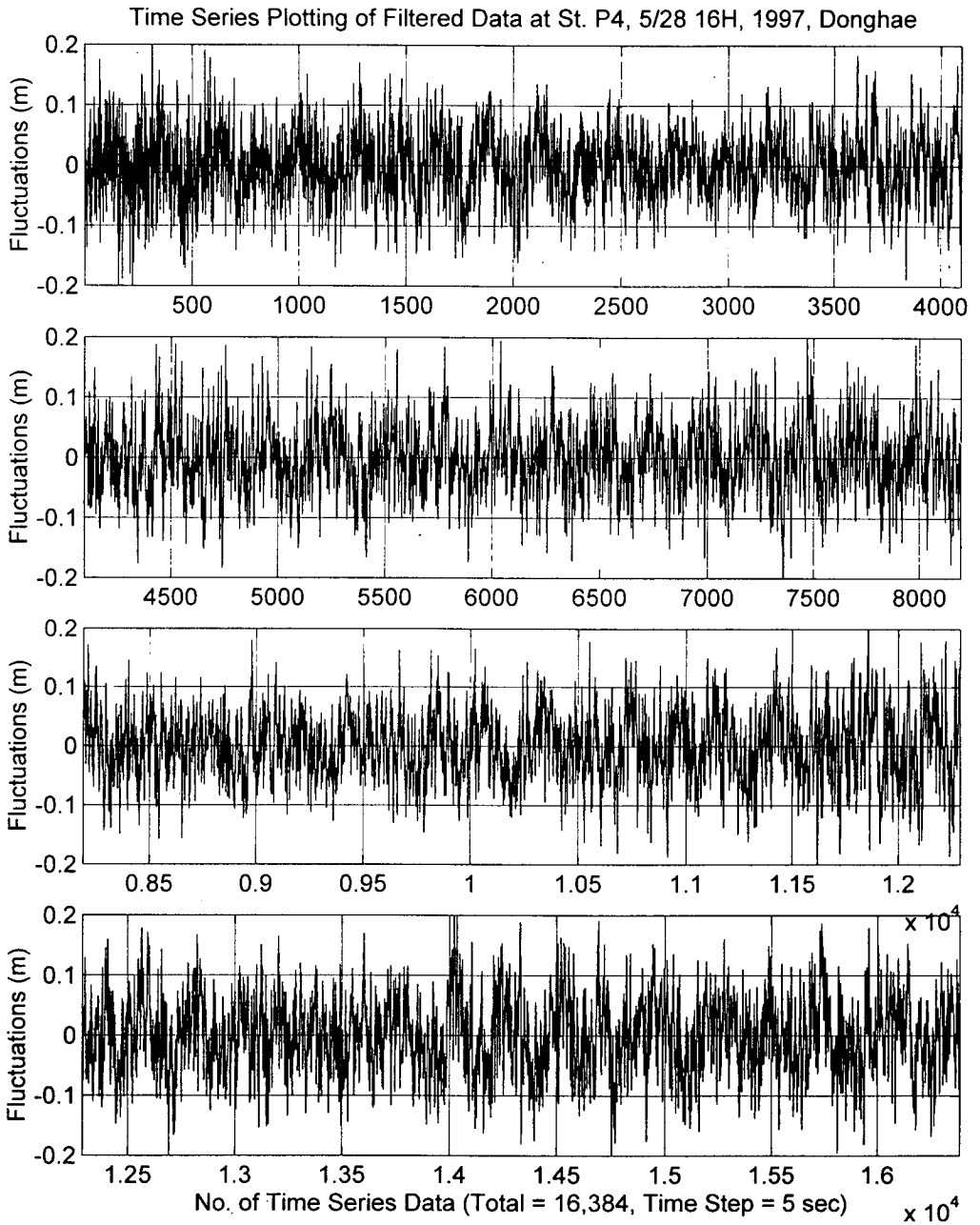


Fig. A2.24 Time series of filtered sea level data measured at station P4 for 22.8 hours from May 28 16:00, 1997.

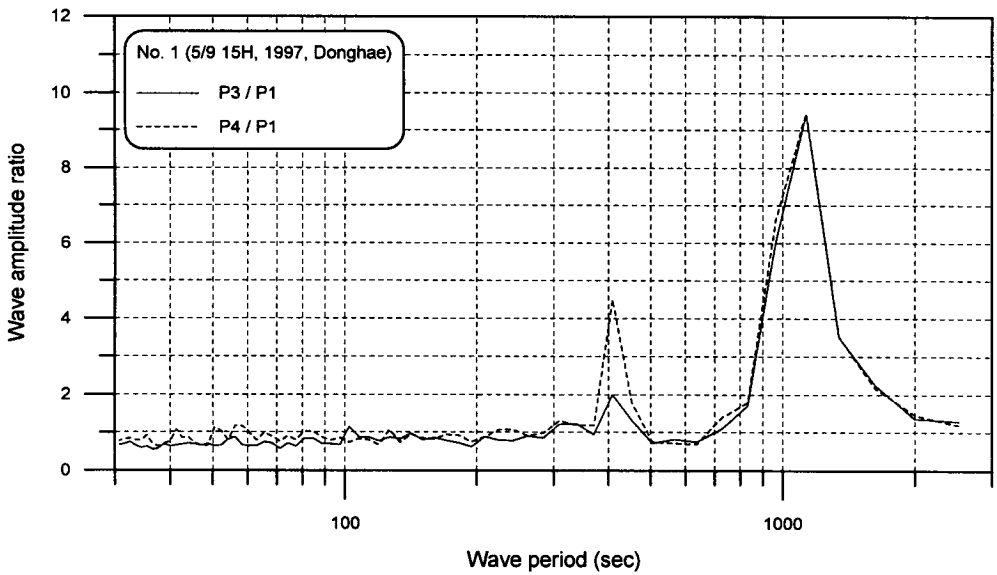
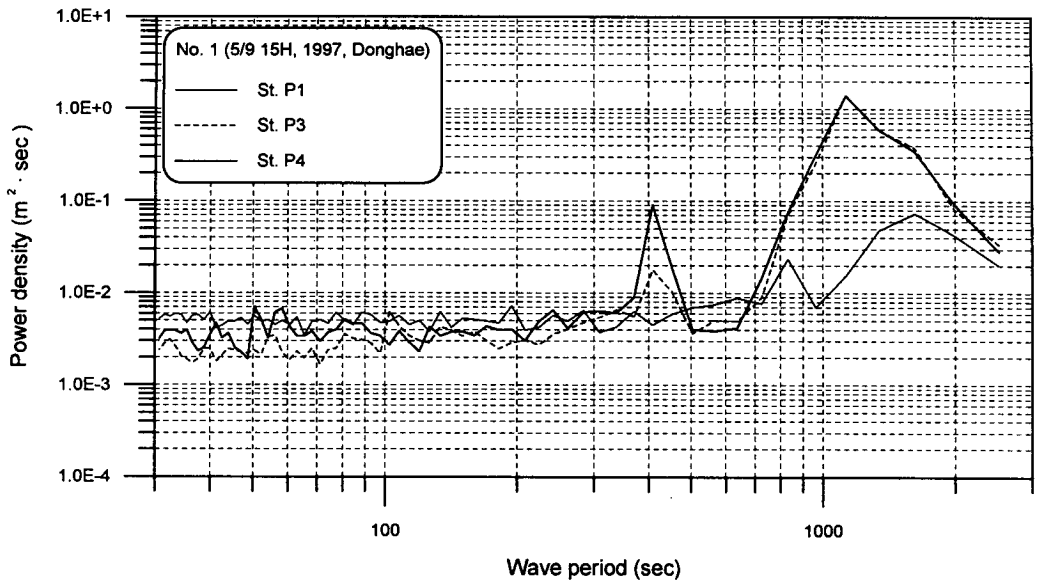


Fig. A3.1 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 9 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

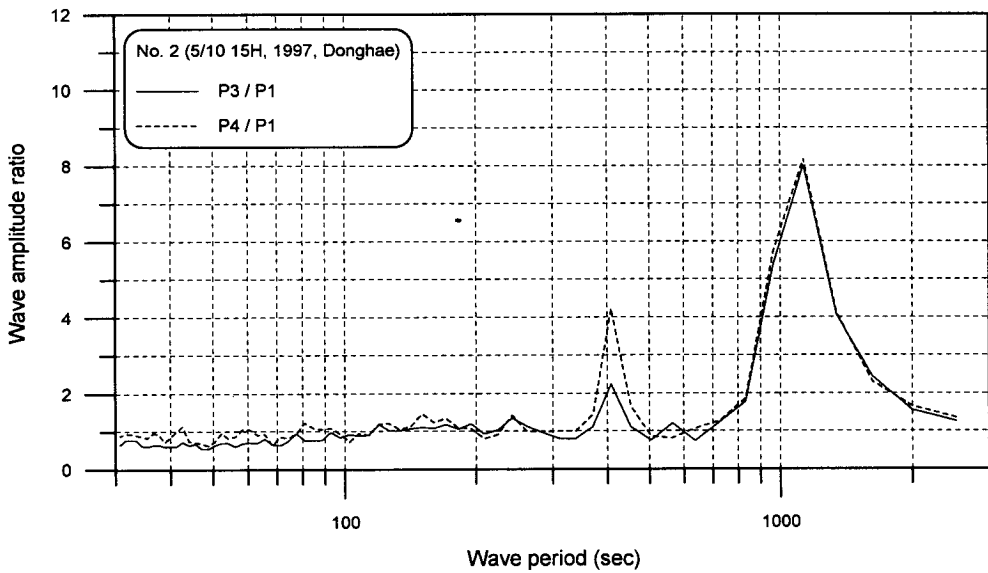
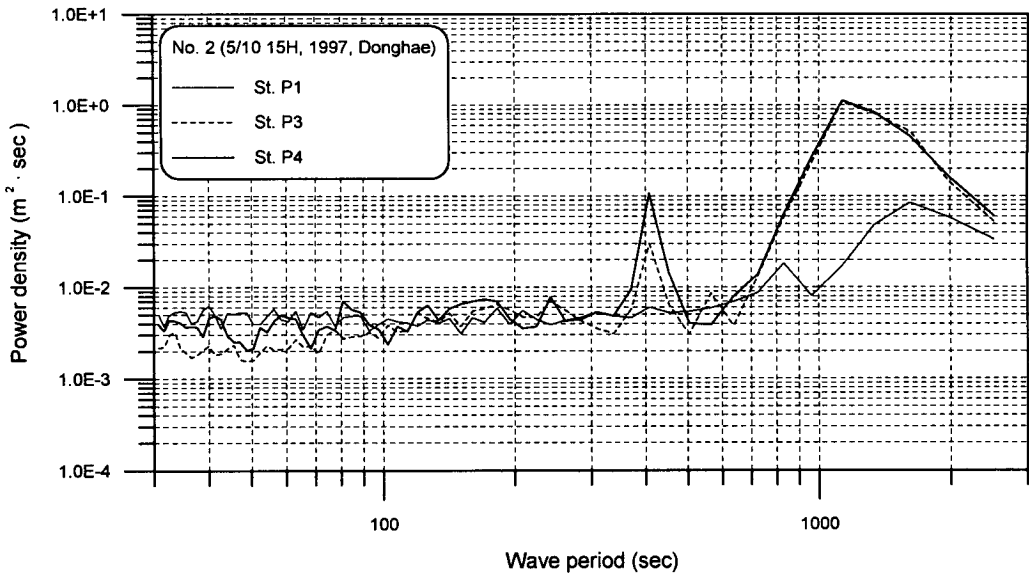


Fig. A3.2 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 10 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

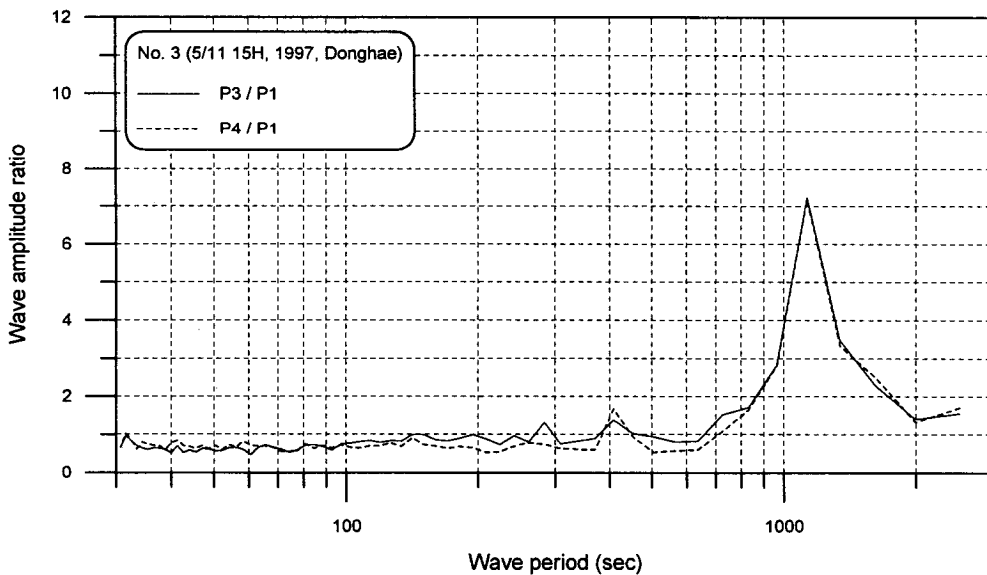
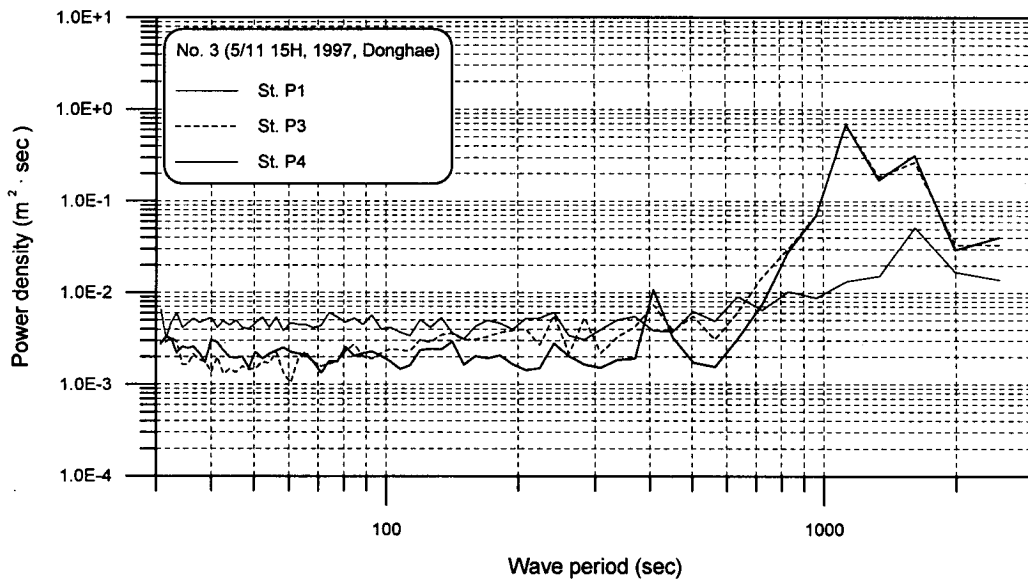


Fig. A3.3 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 11 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

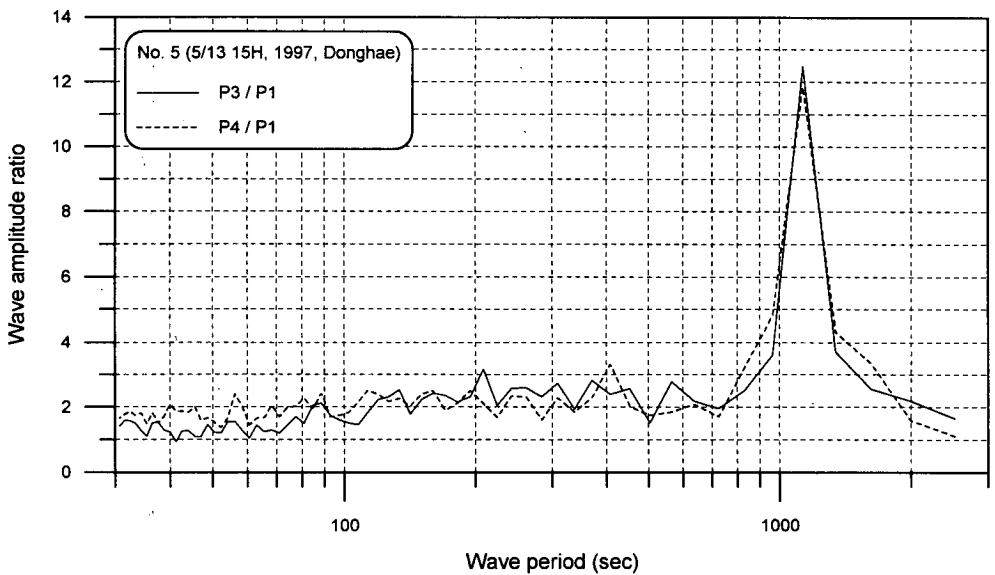
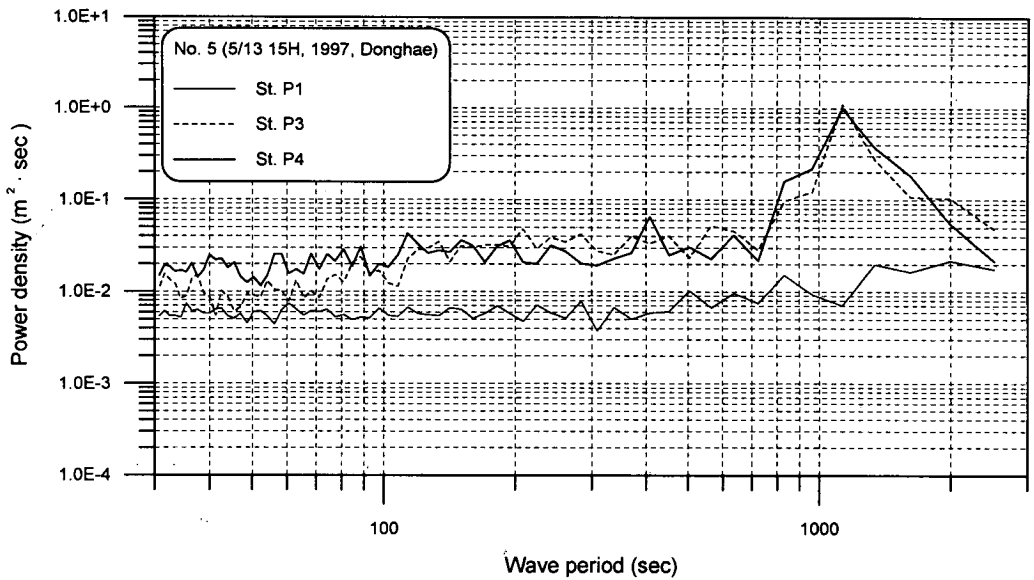


Fig. A3.4 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 13 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

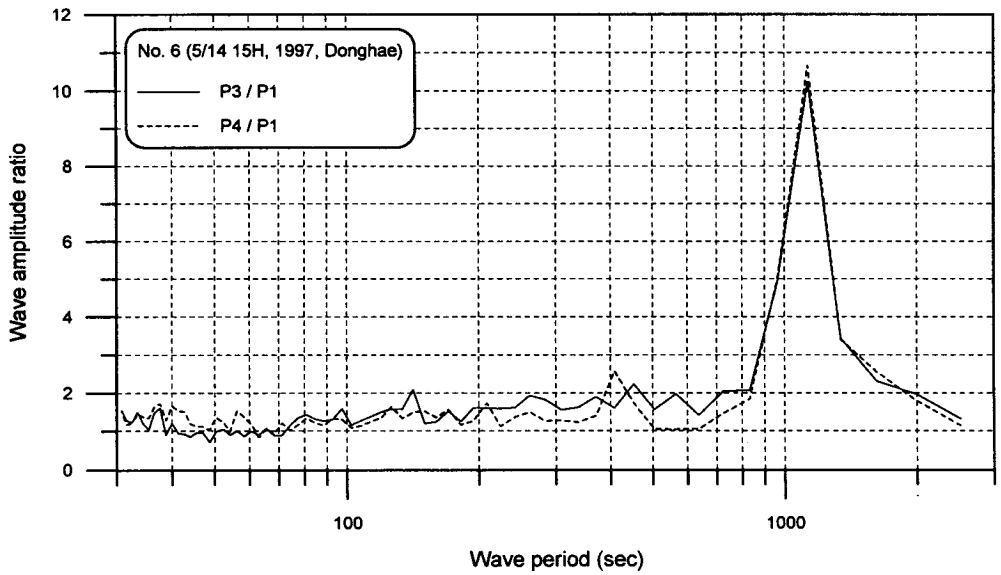
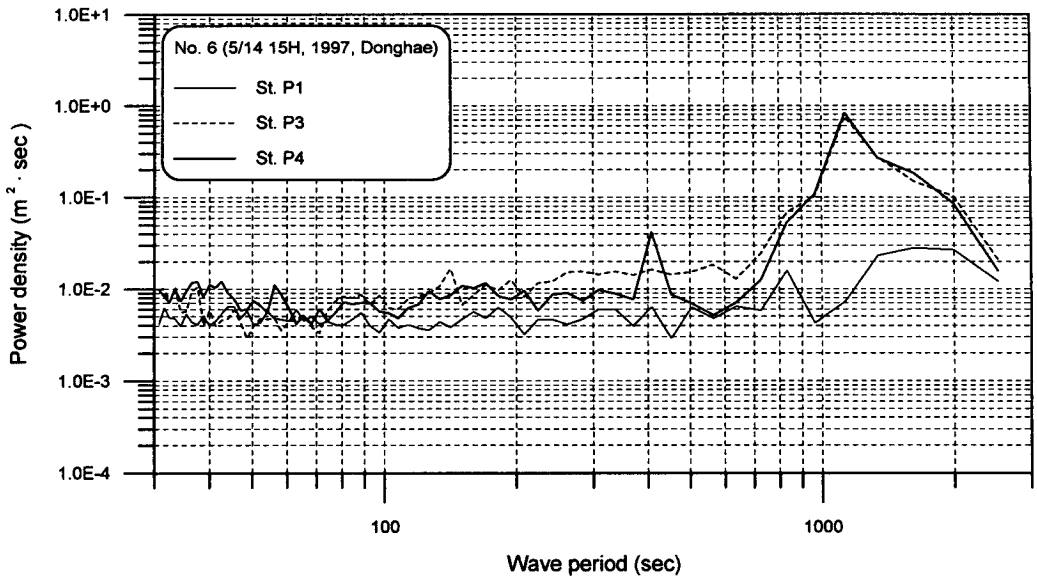


Fig. A3.5 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 14 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

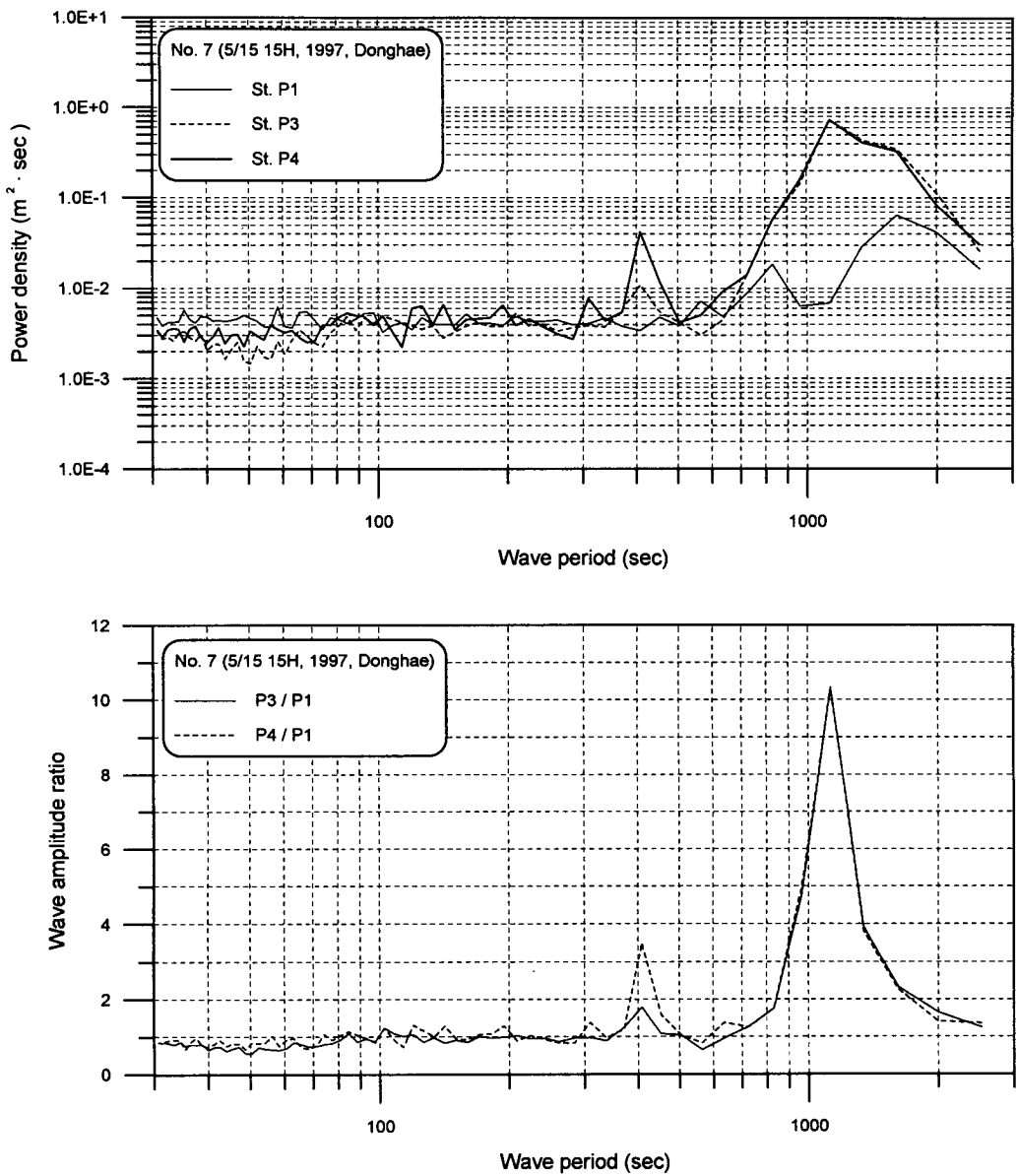


Fig. A3.6 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 15 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

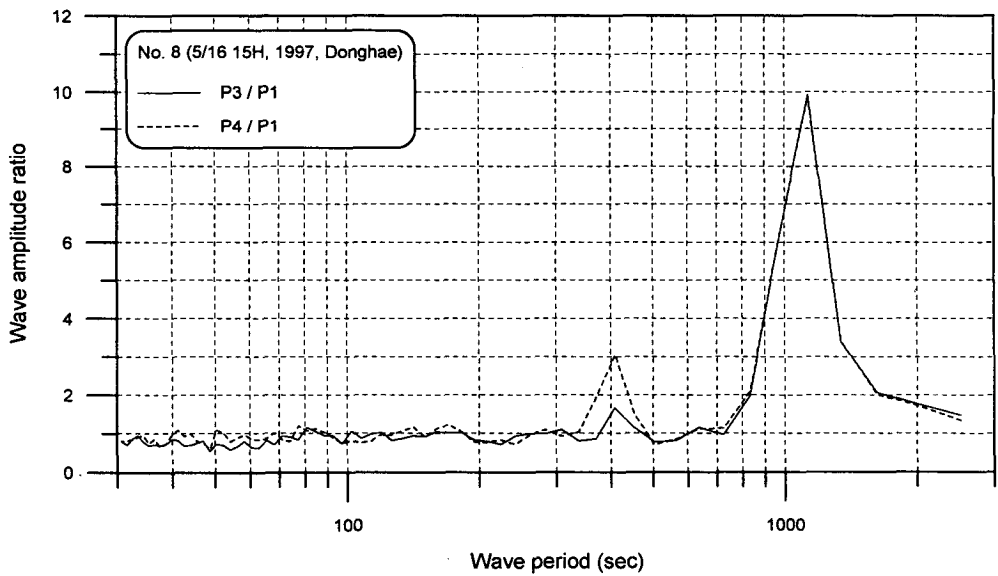
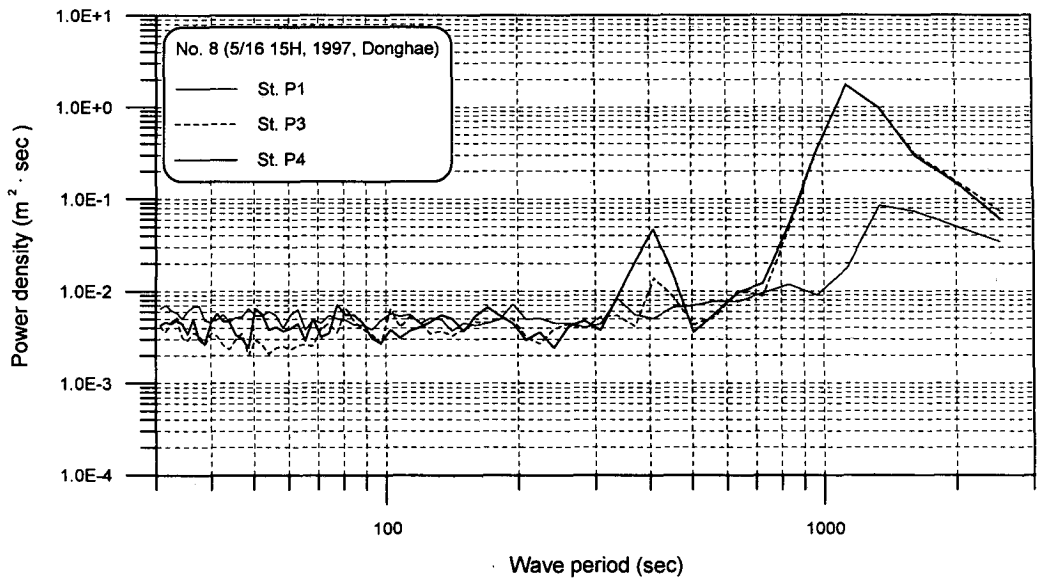


Fig. A3.7 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 16 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

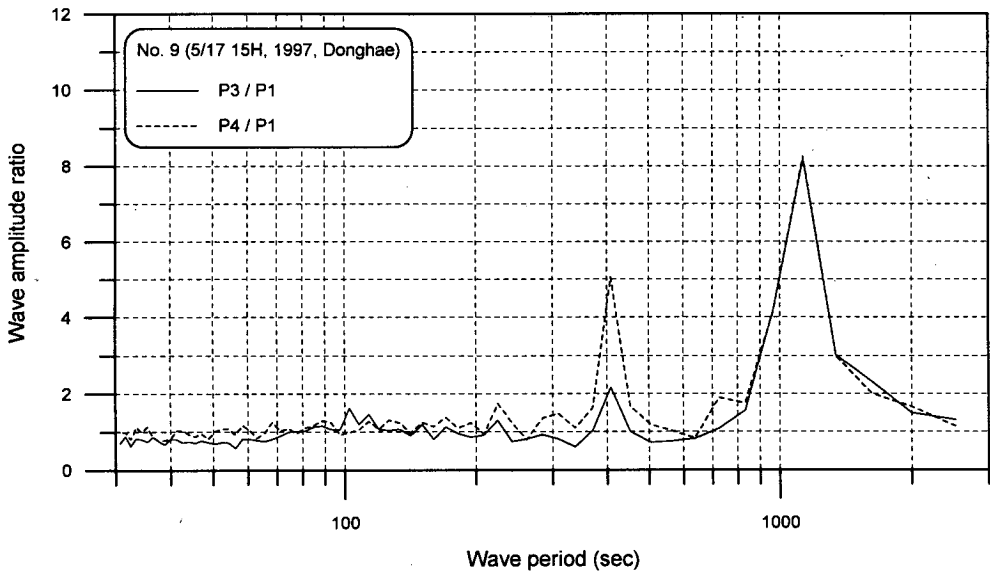
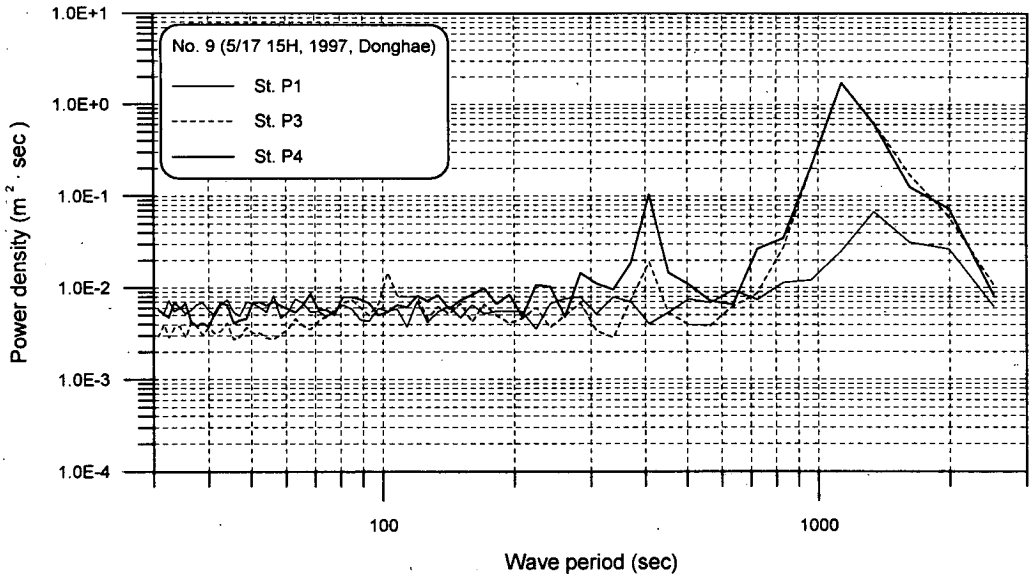


Fig. A3.8 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 17 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

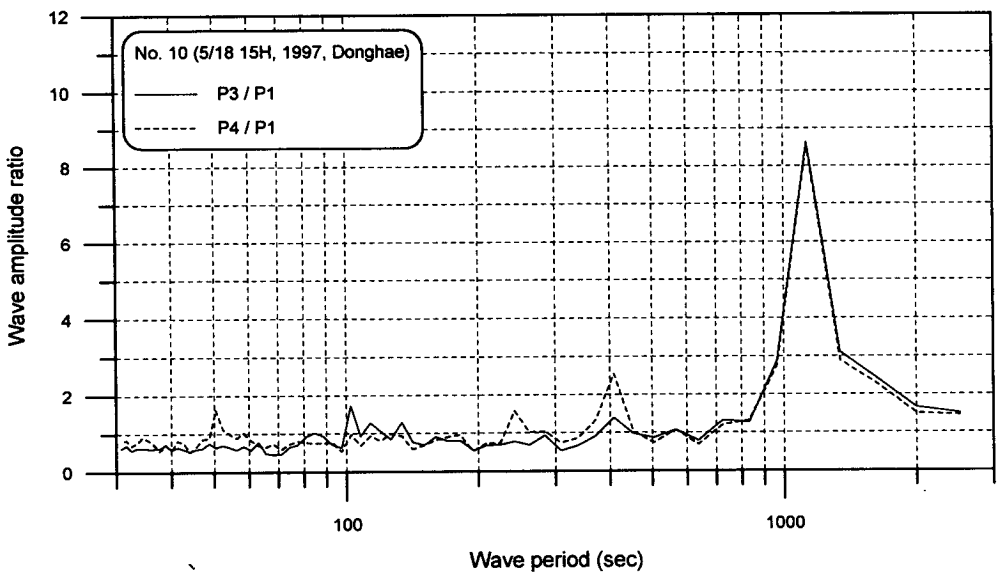
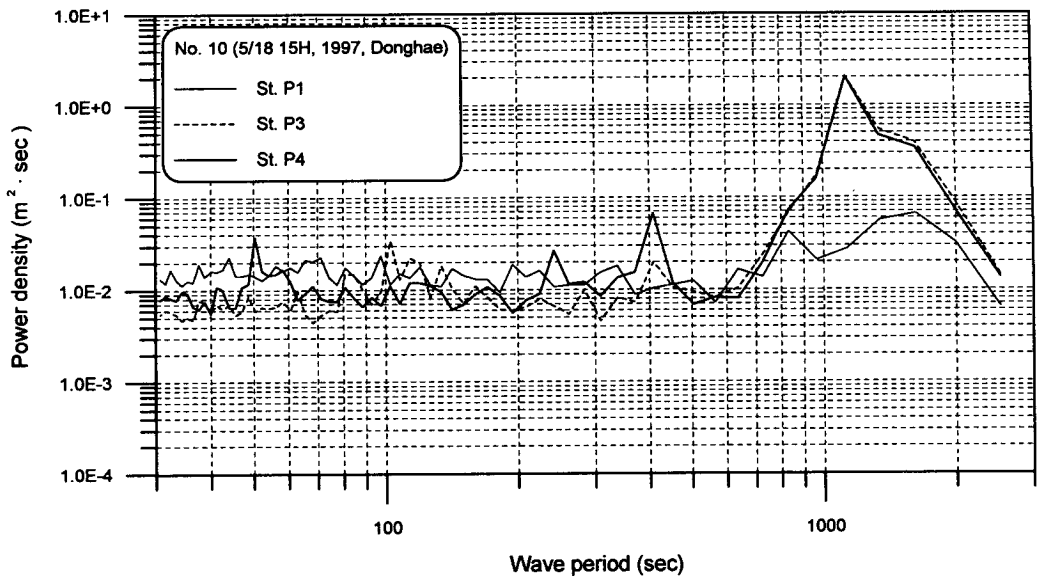


Fig. A3.9 Results of spectral analysis for sea level data measured at 3 stations for 22.8 hours from May 18 15:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

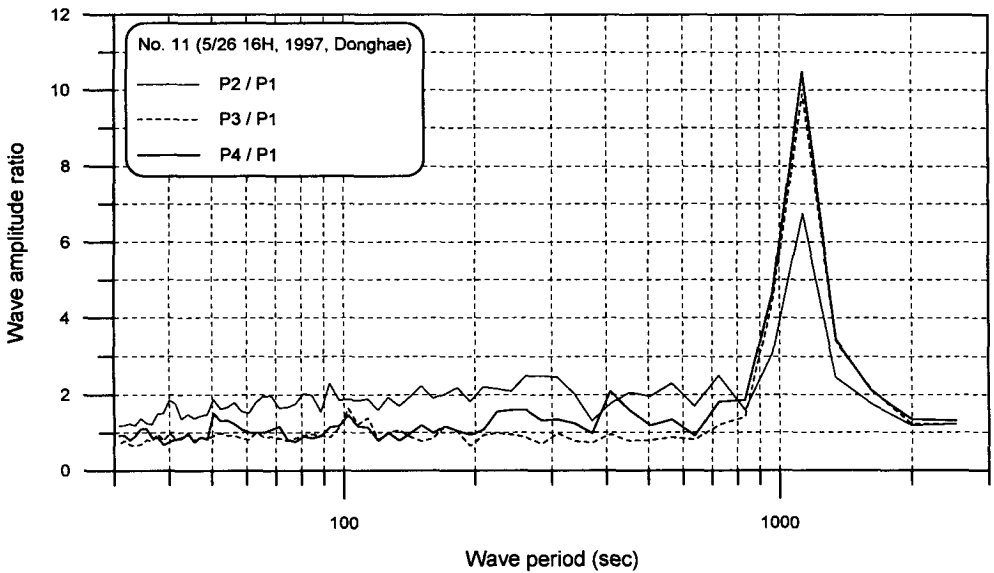
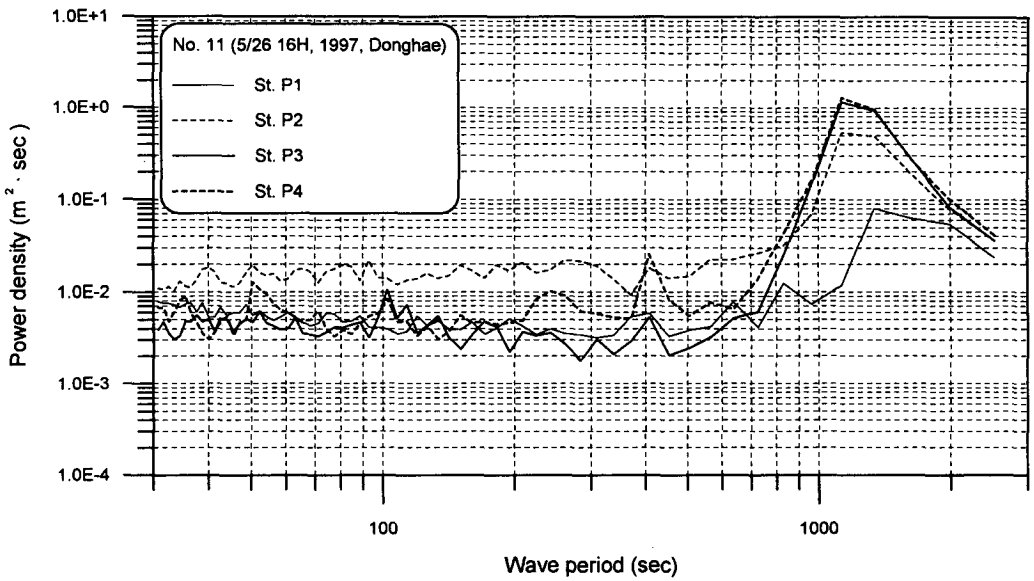


Fig. A3.10 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 26 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

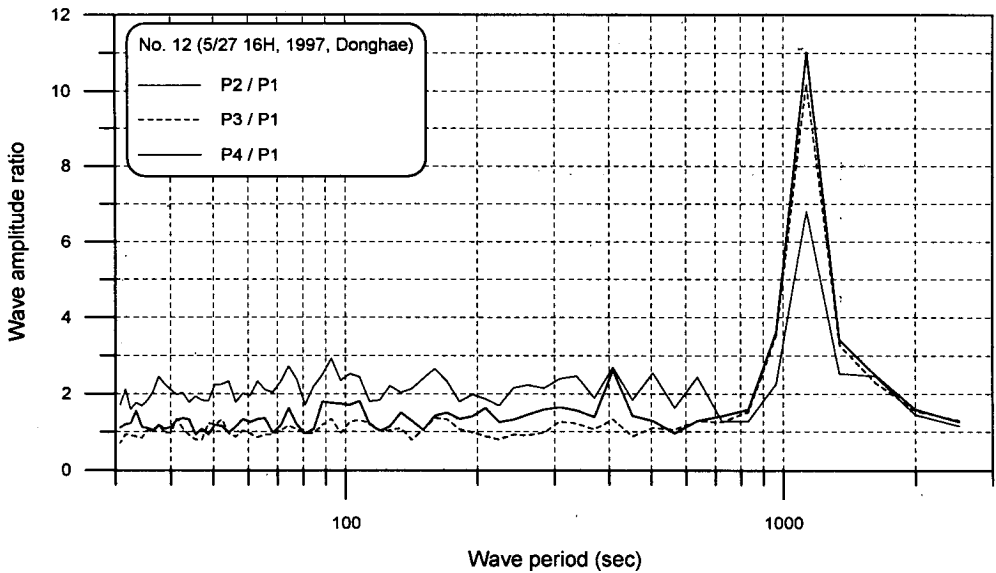
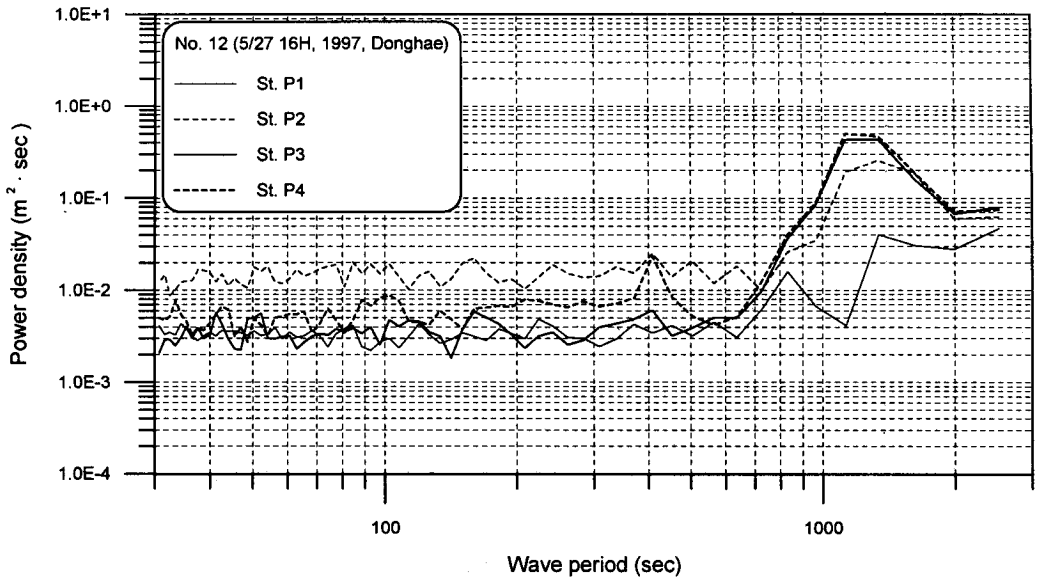


Fig. A3.11 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 27 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

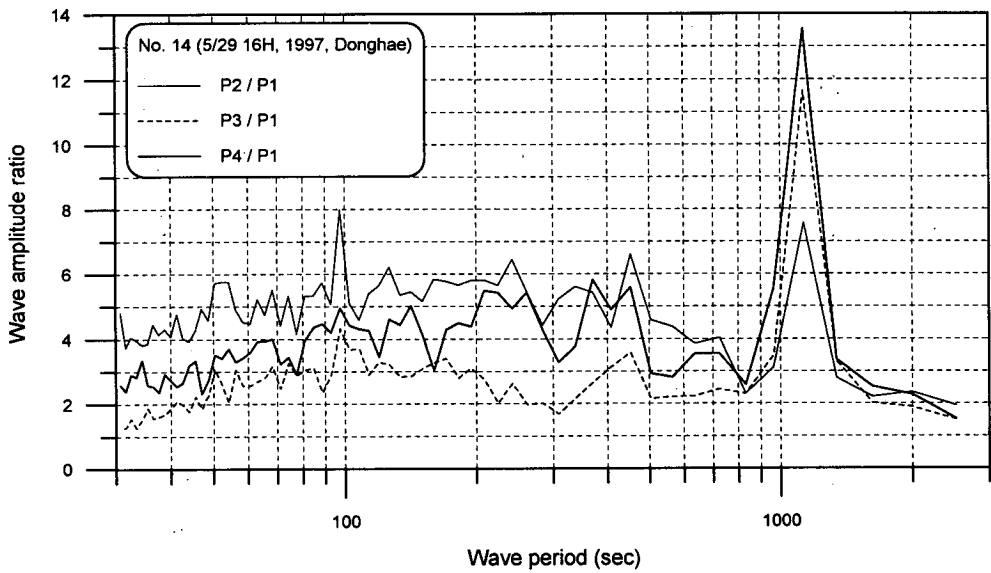
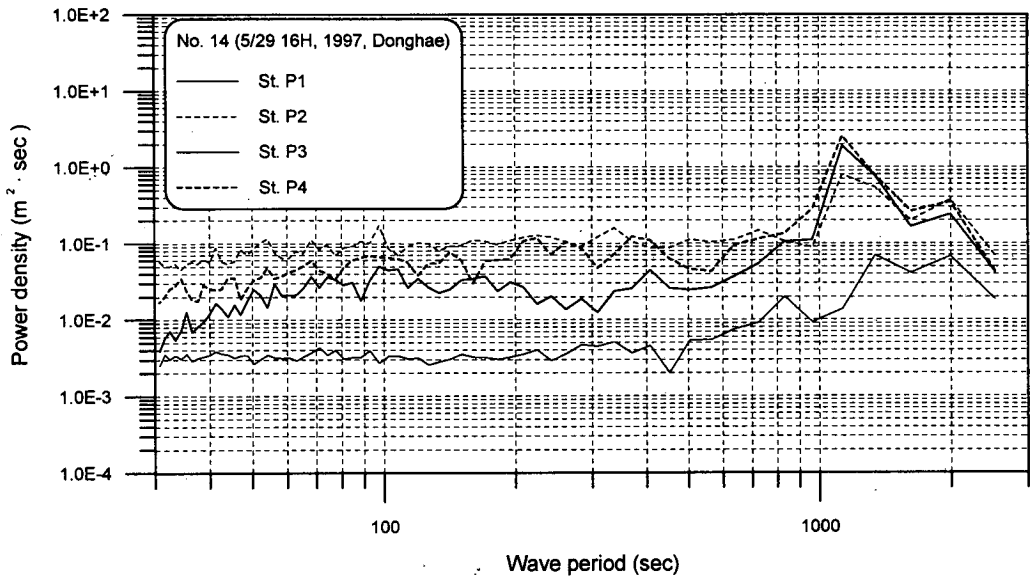


Fig. A3.12 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 29 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

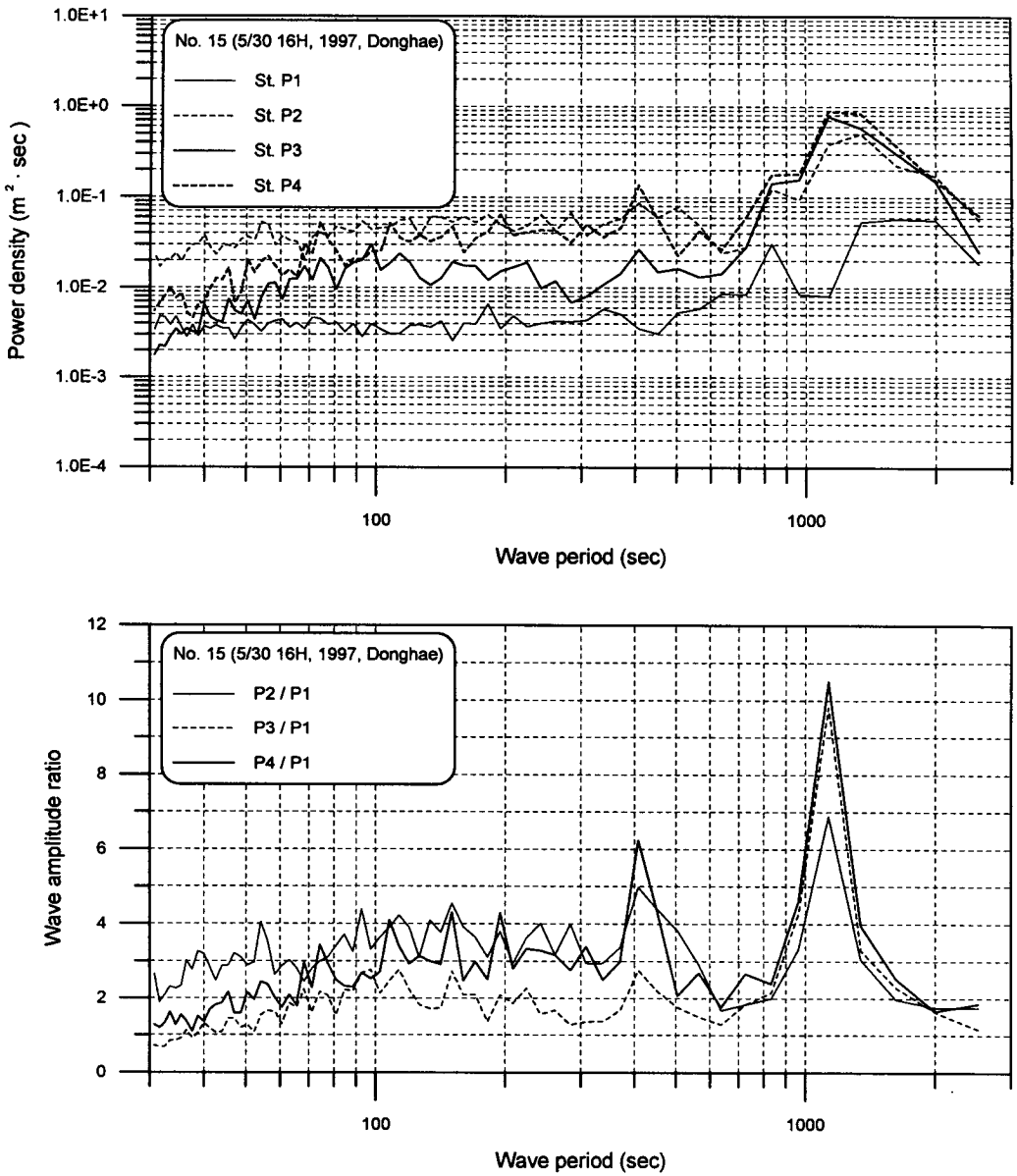


Fig. A3.13 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 30 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

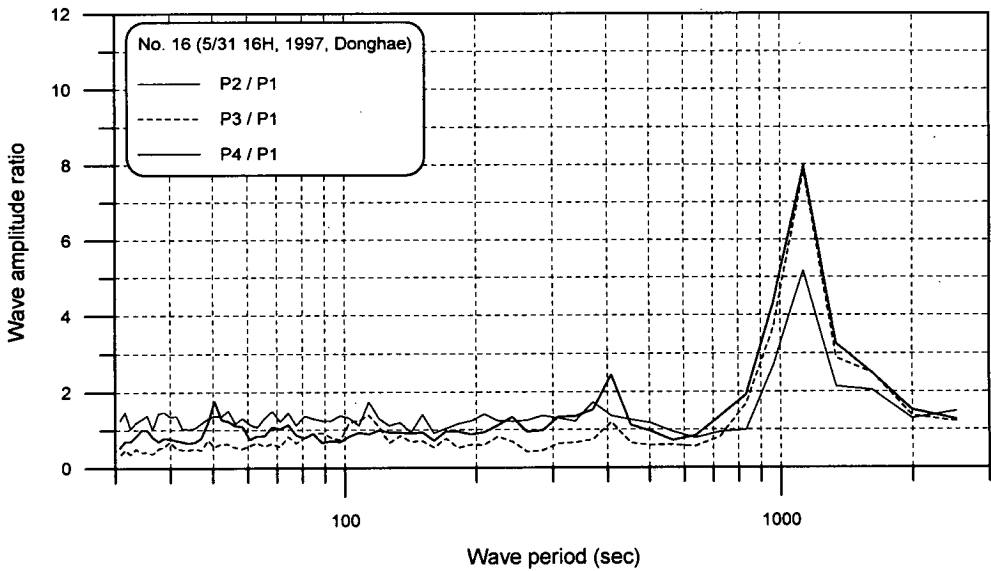
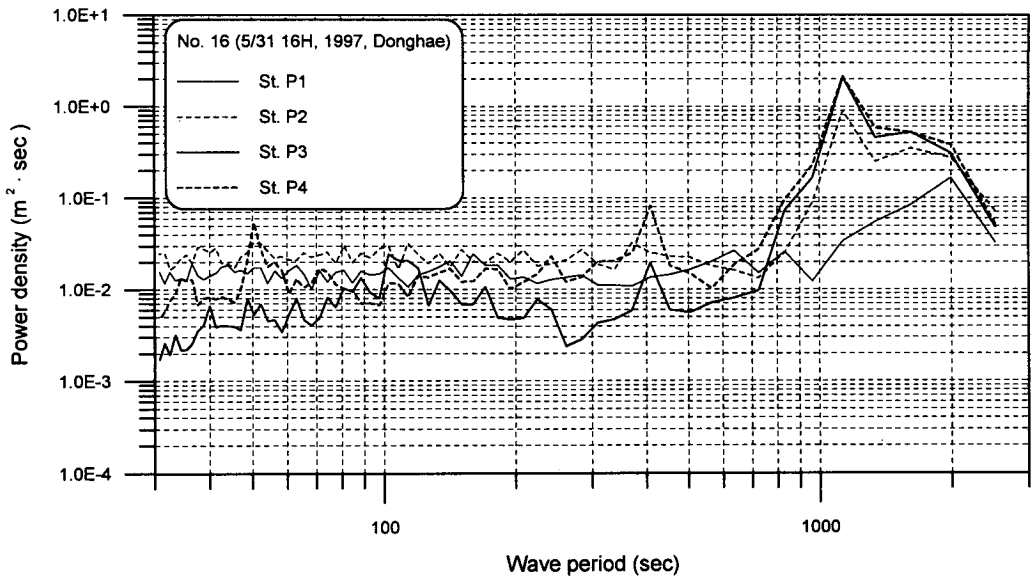


Fig. A3.14 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from May 31 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

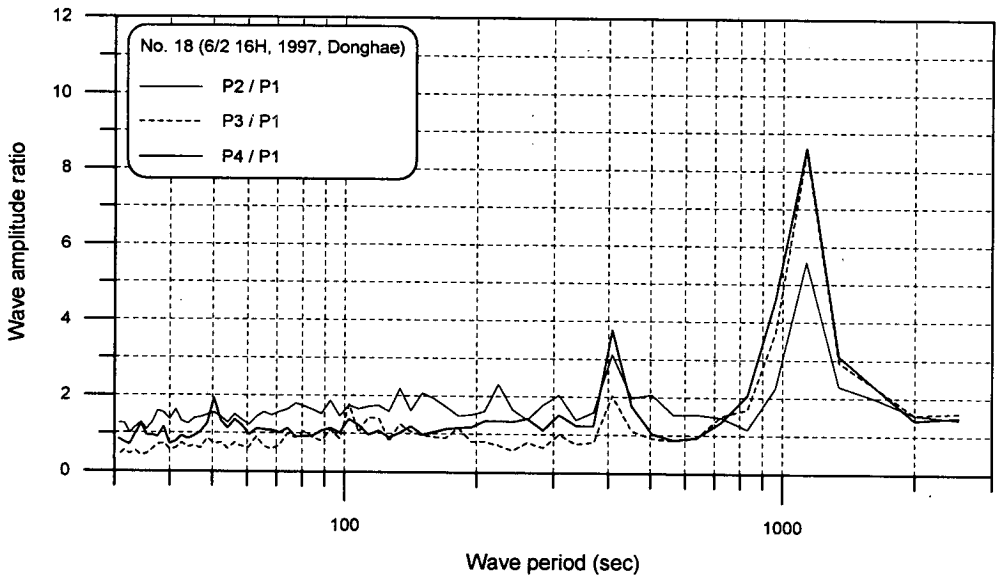
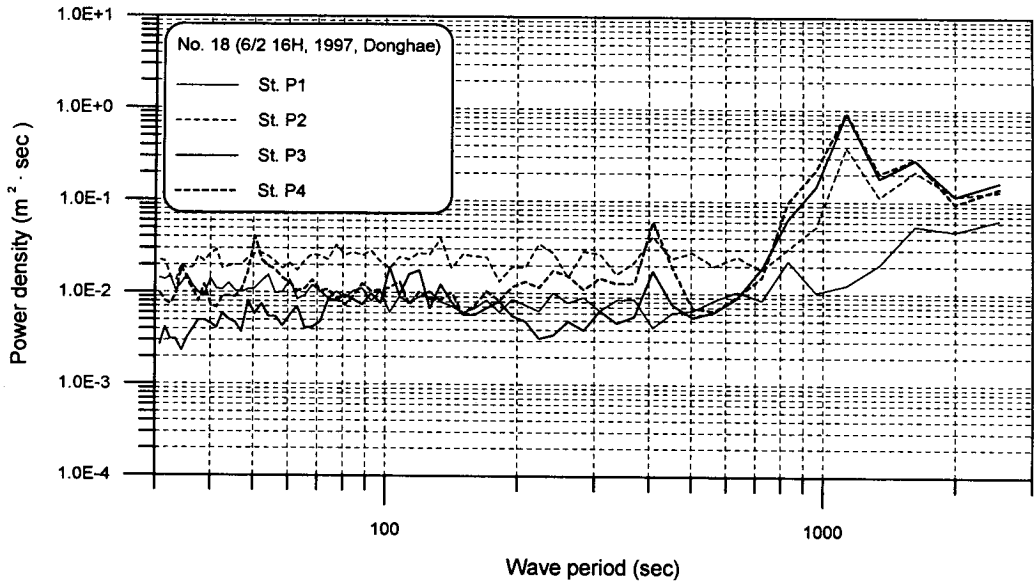


Fig. A3.15 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 2 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

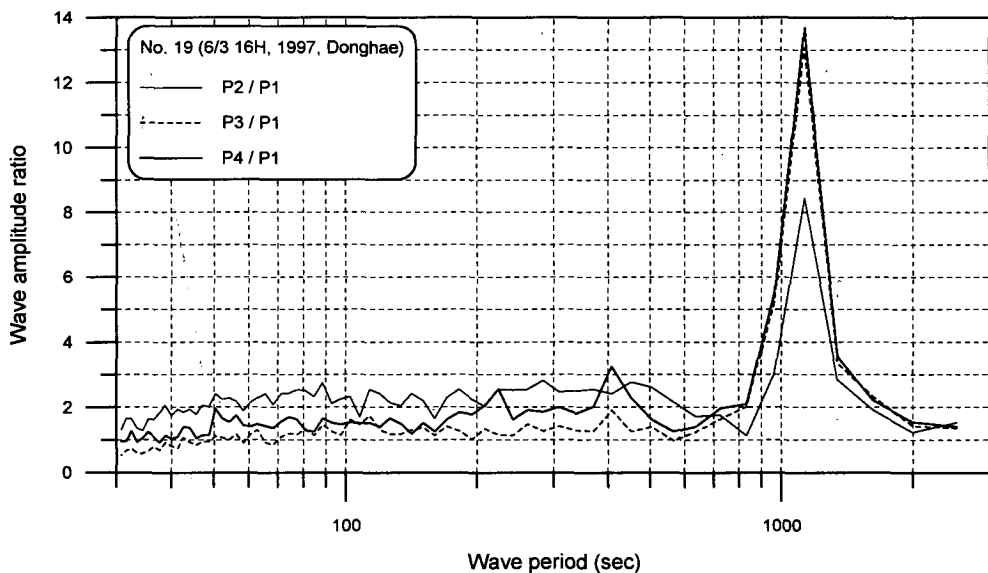
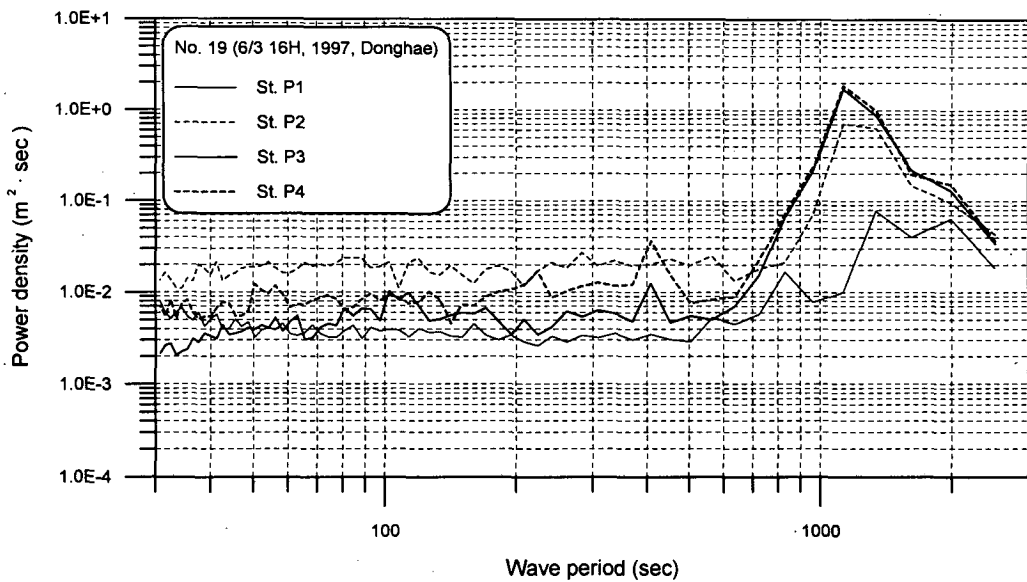


Fig. A3.16 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 3 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

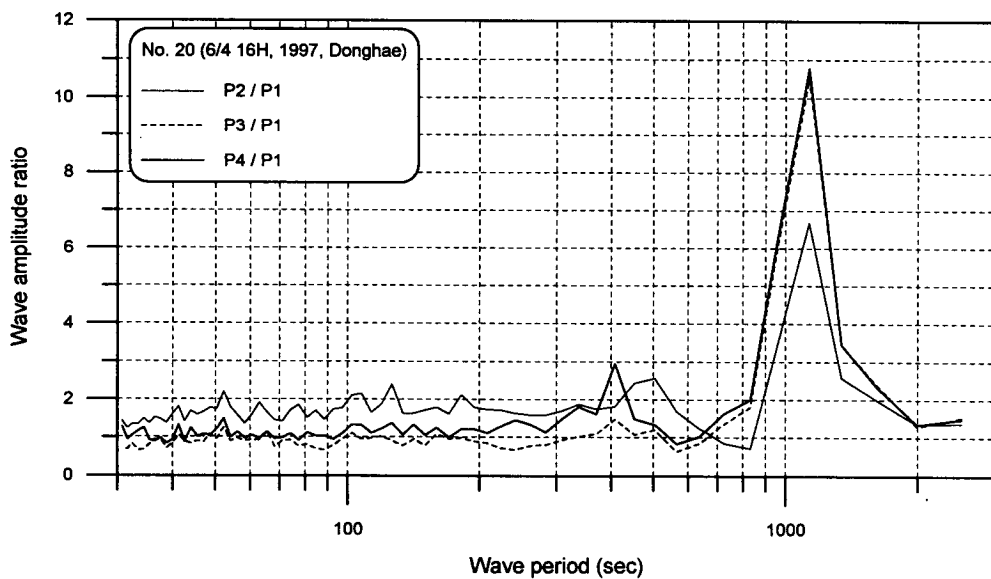
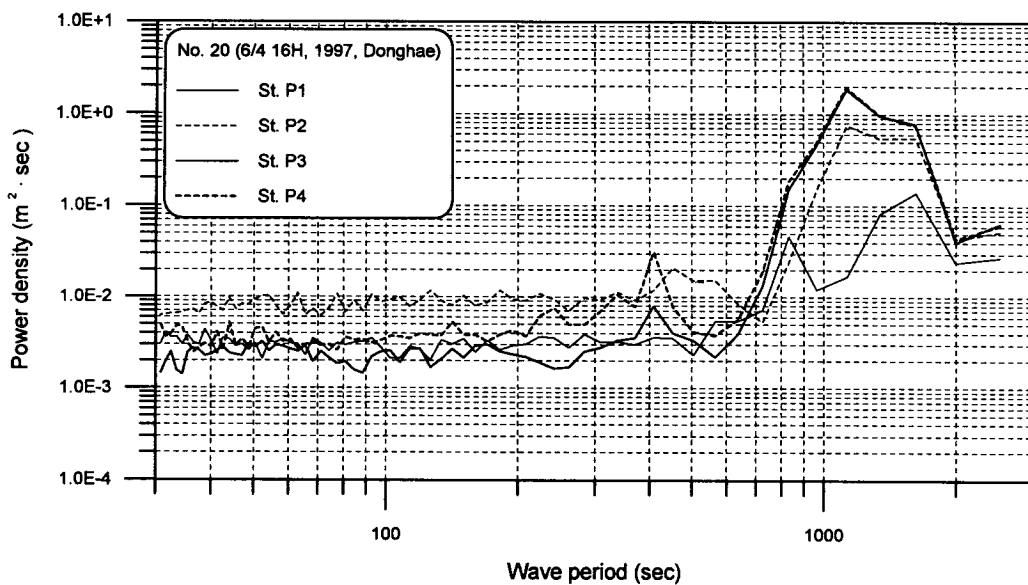


Fig. A3.17 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 4 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

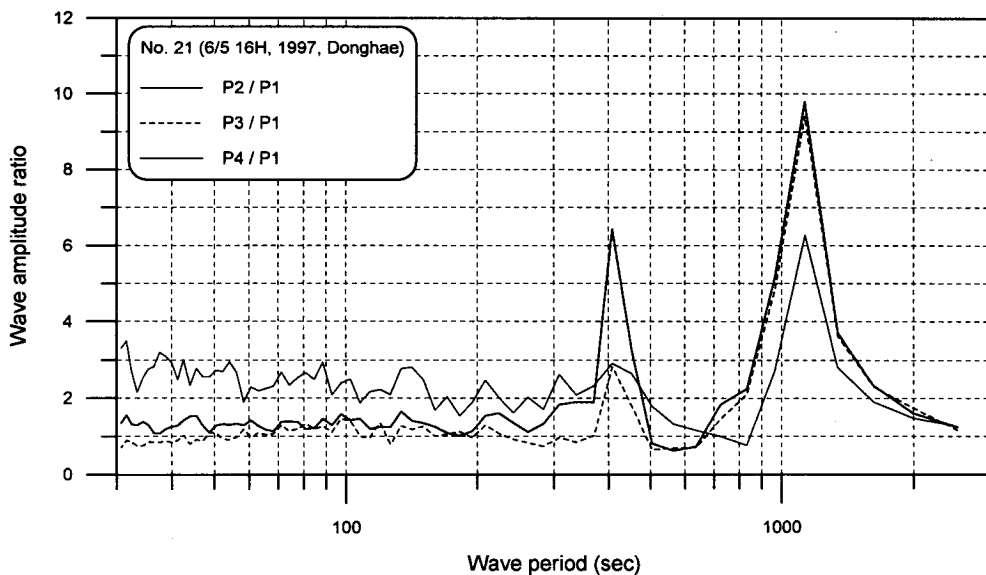
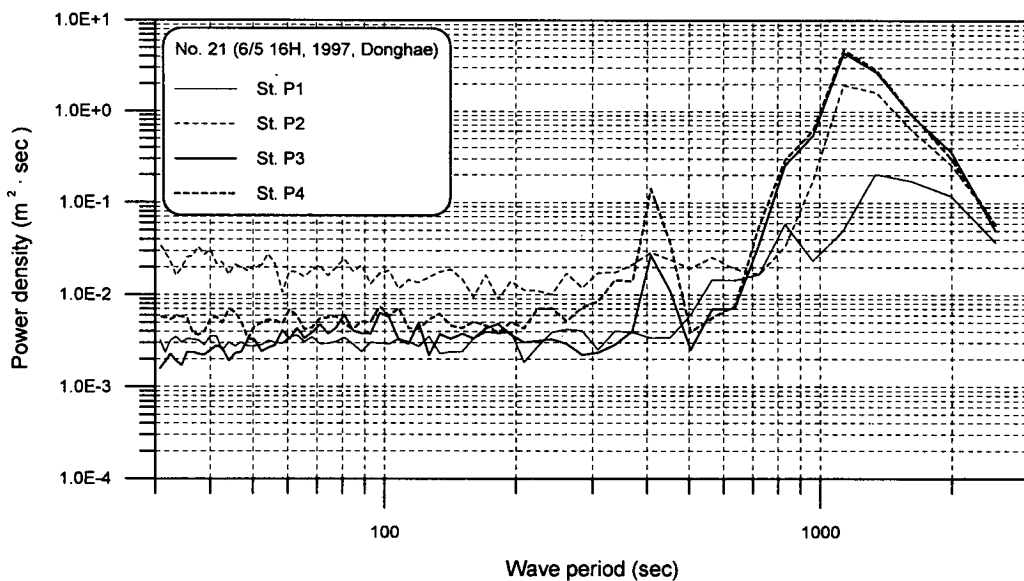


Fig. A3.18 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 5 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

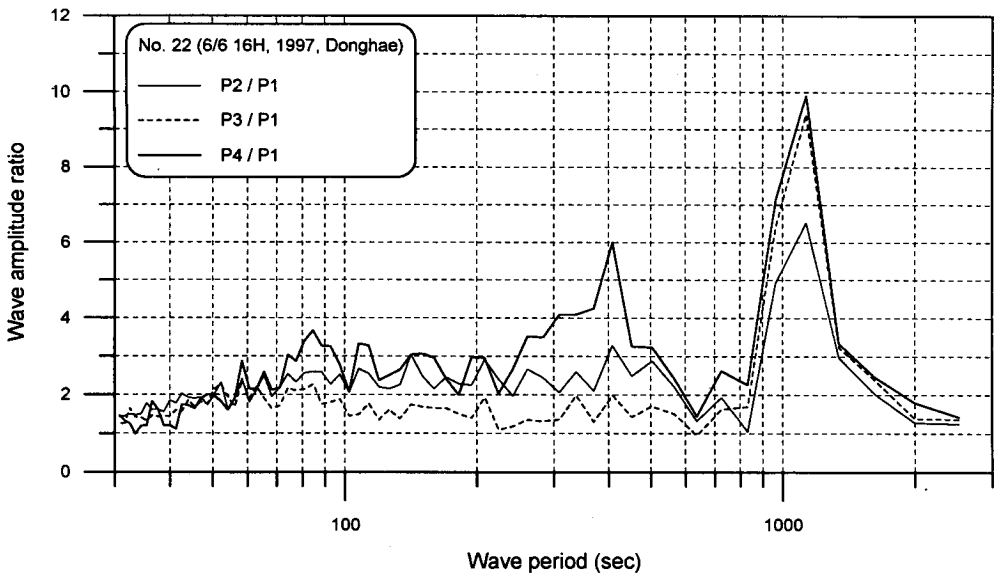
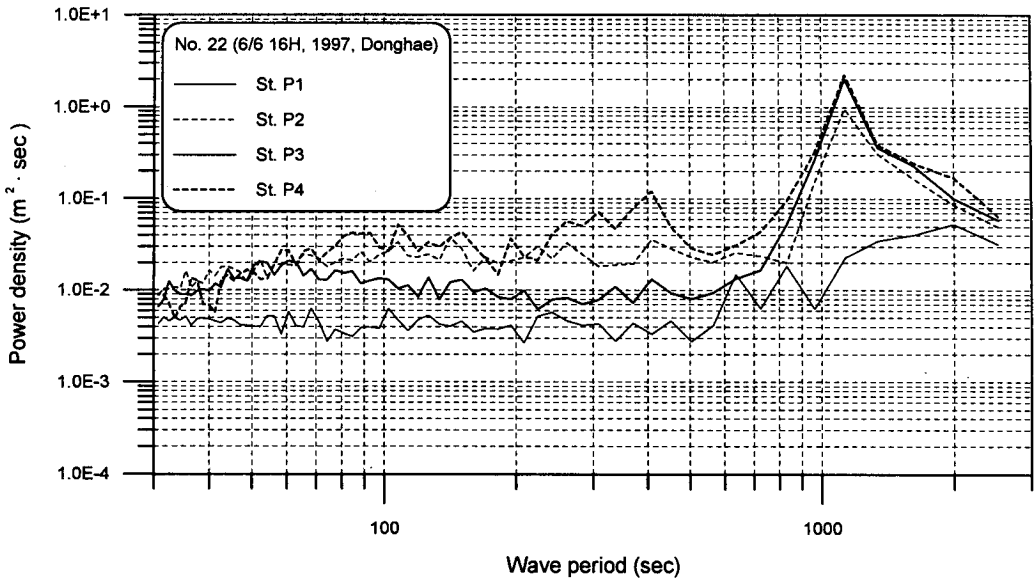


Fig. A3.19 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 6 16:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

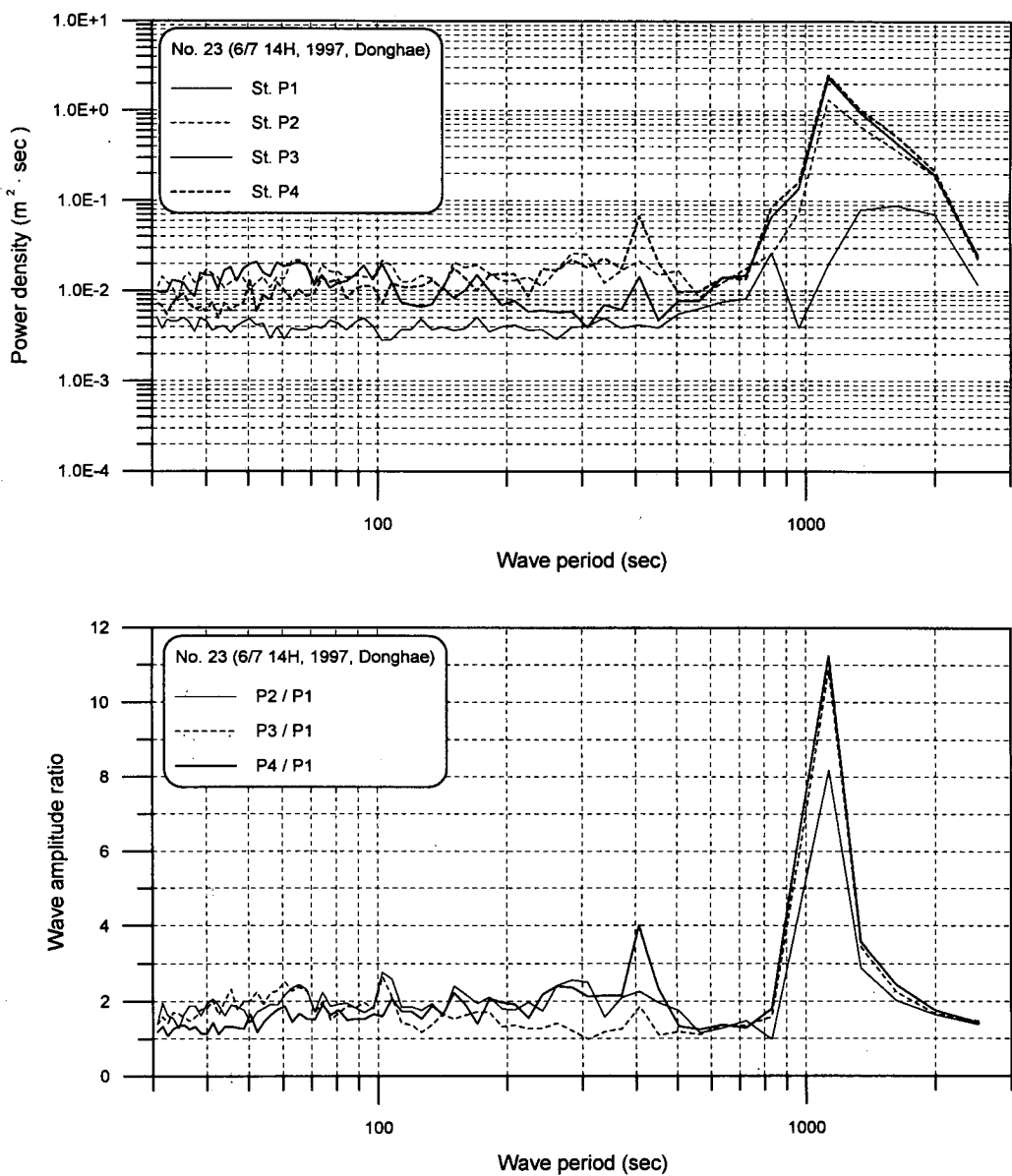


Fig. A3.20 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 7 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

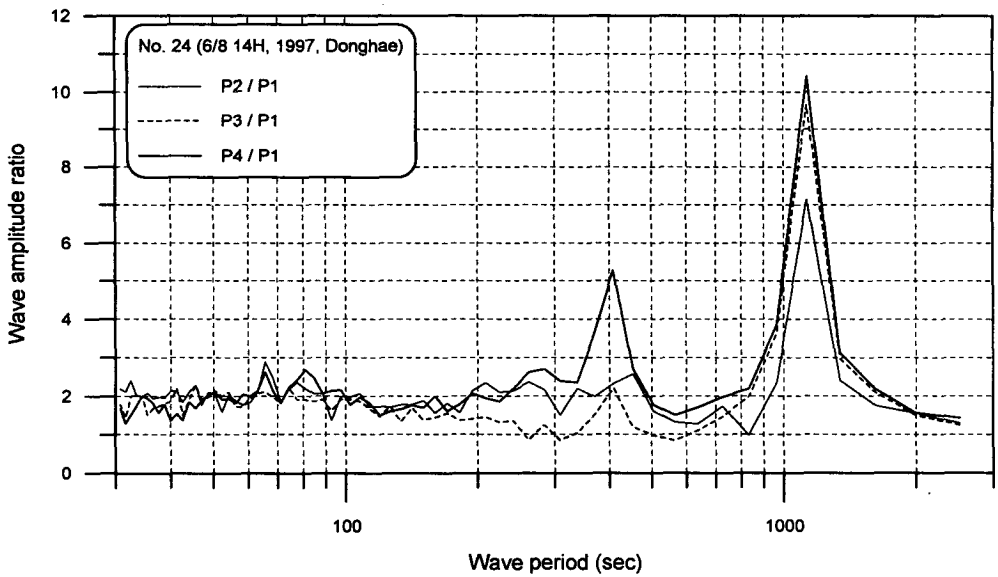
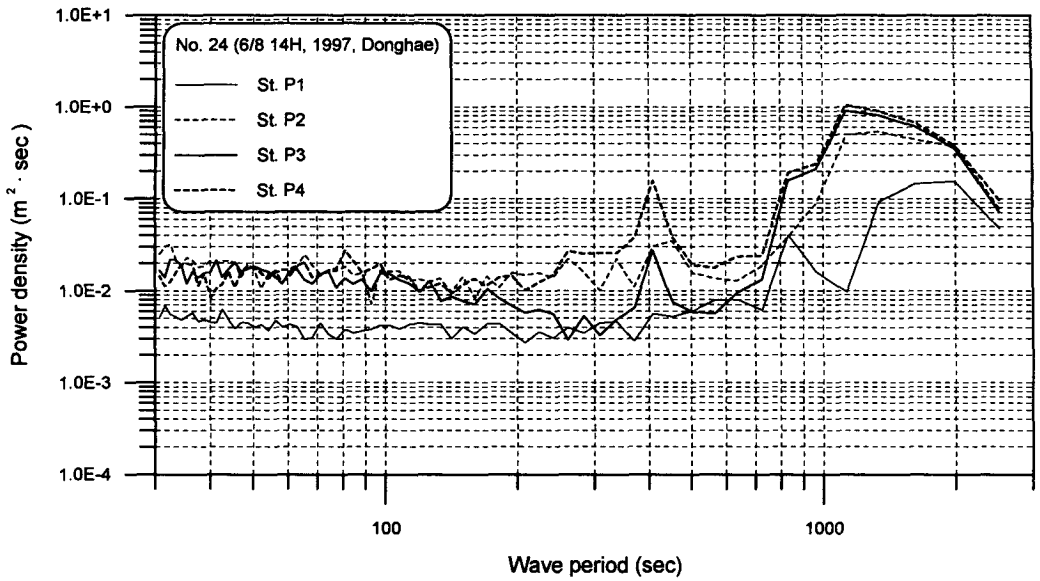


Fig. A3.21 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 8 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

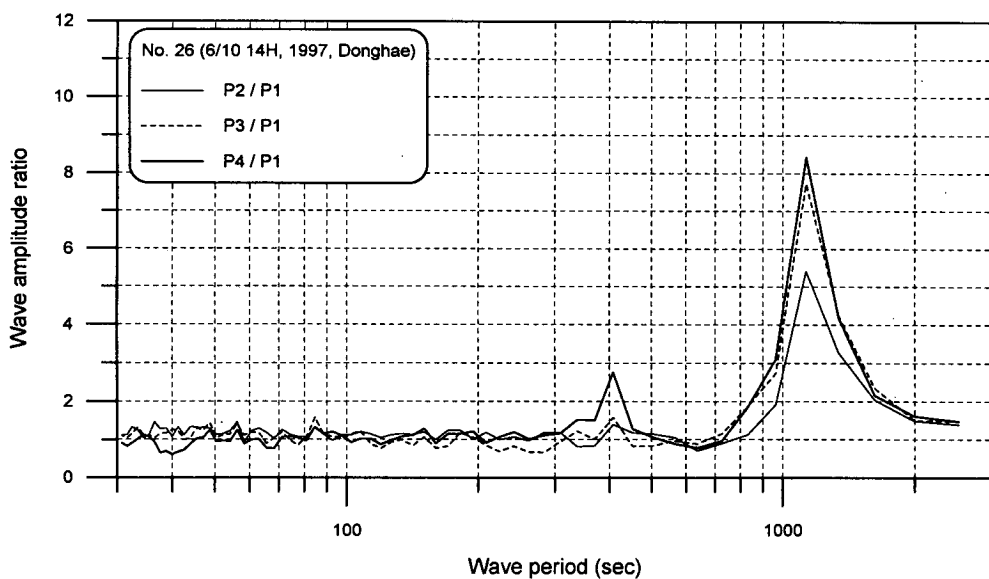
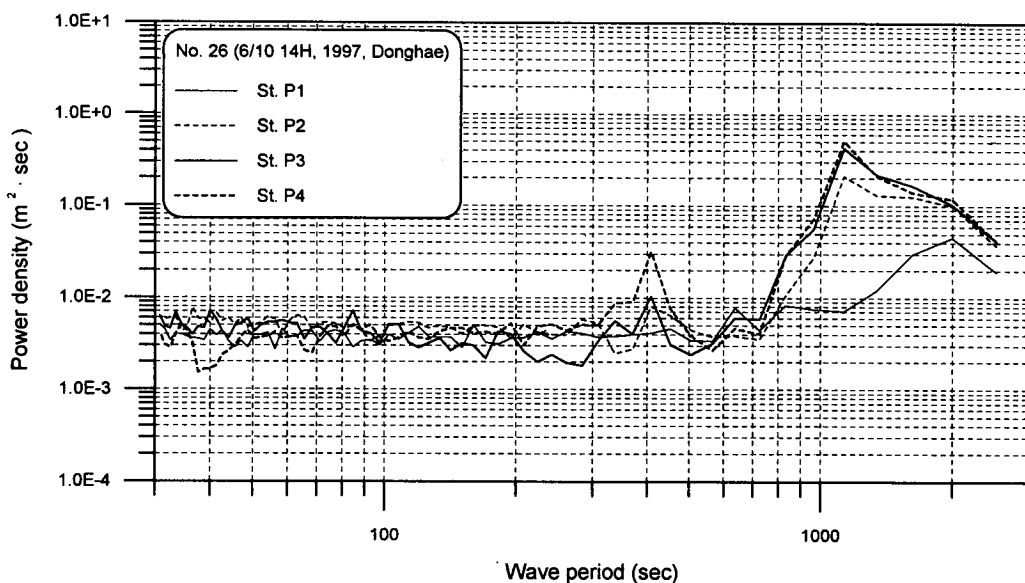


Fig. A3.22 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 10 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

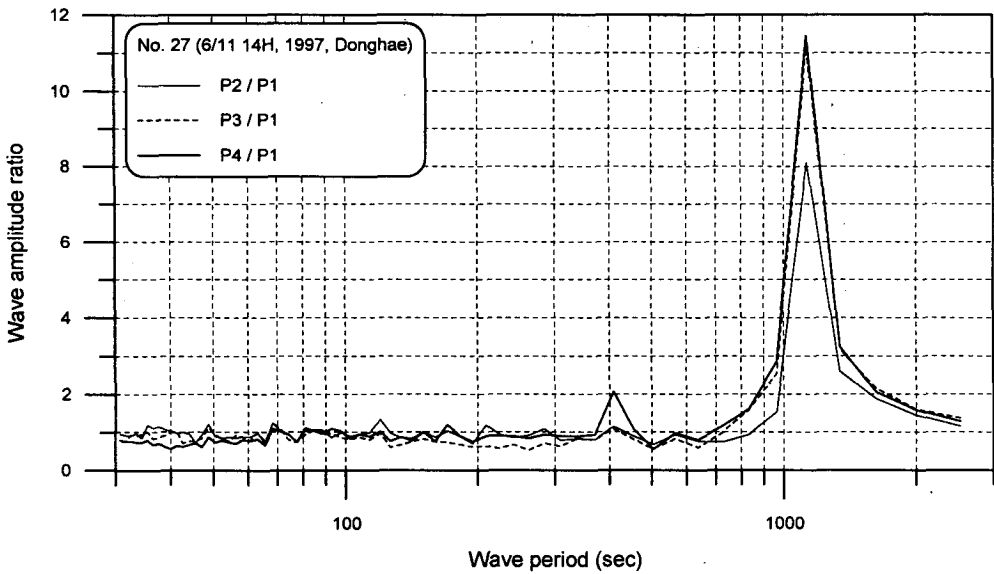
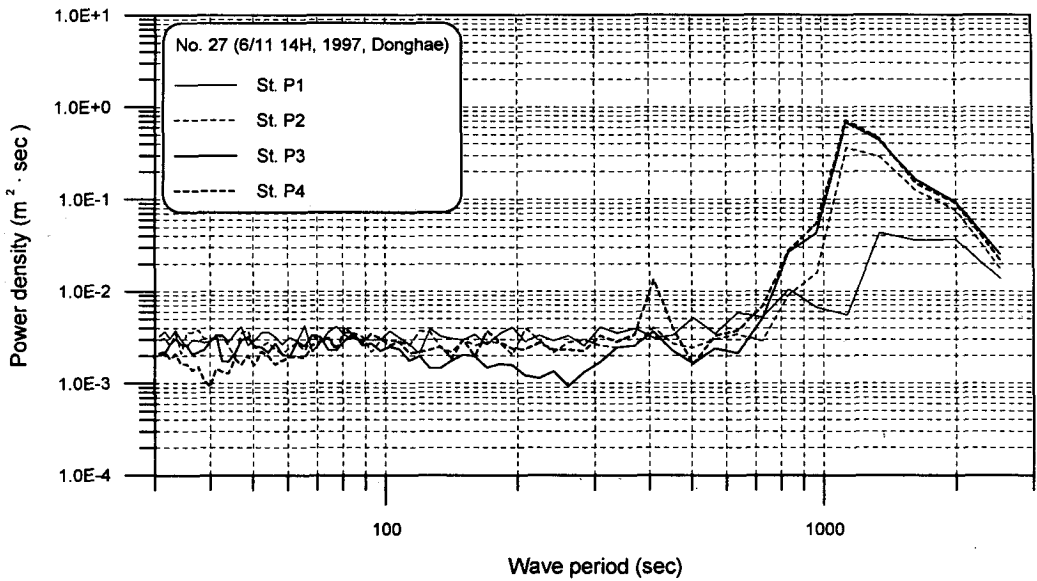


Fig. A3.23 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 11 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

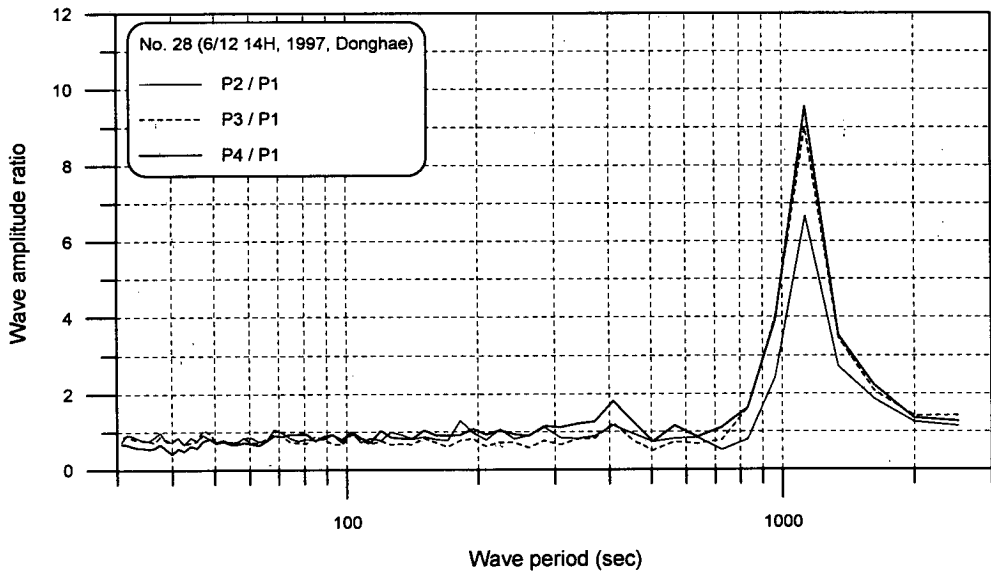
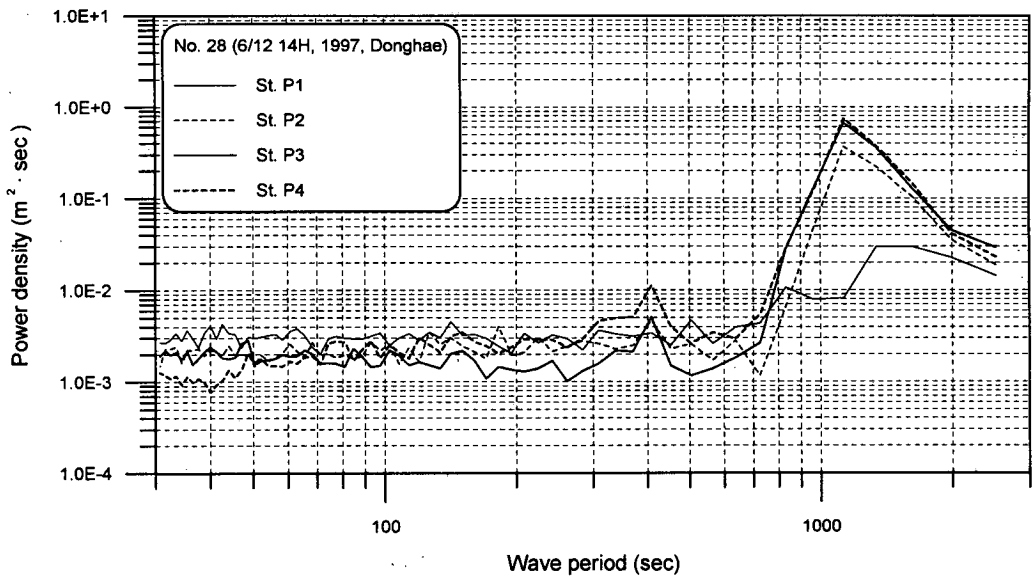


Fig. A3.24 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 12 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

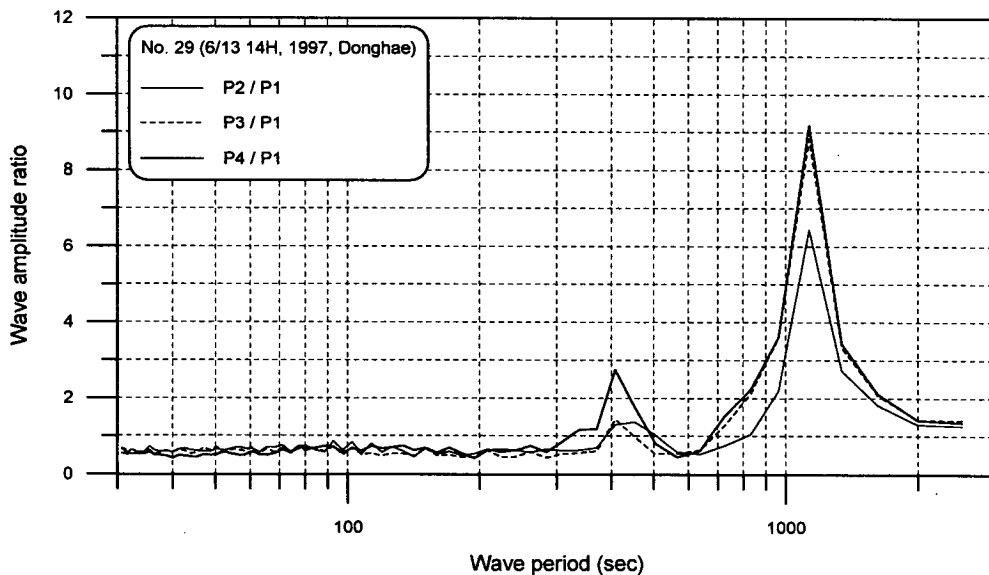
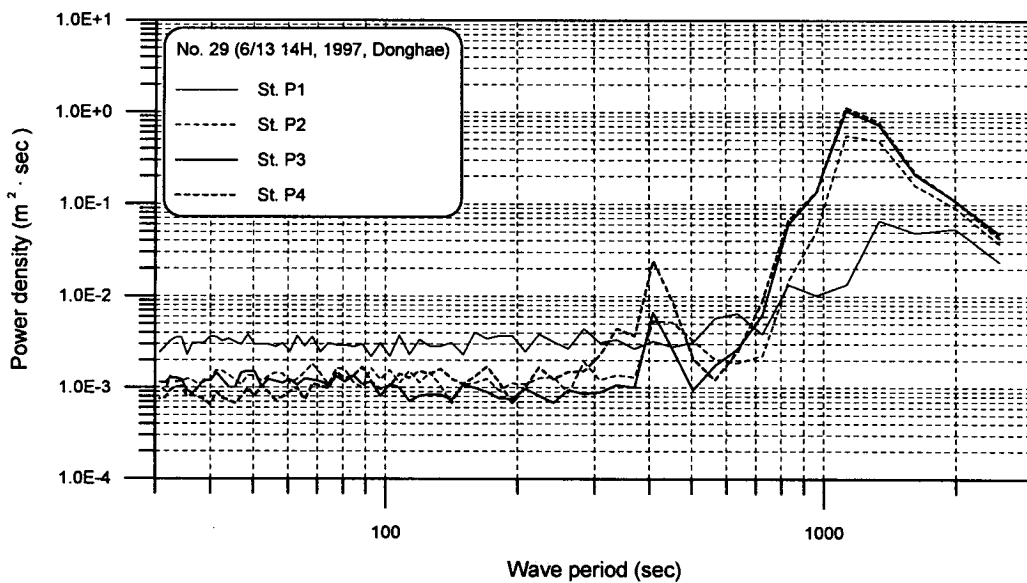


Fig. A3.25 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 13 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

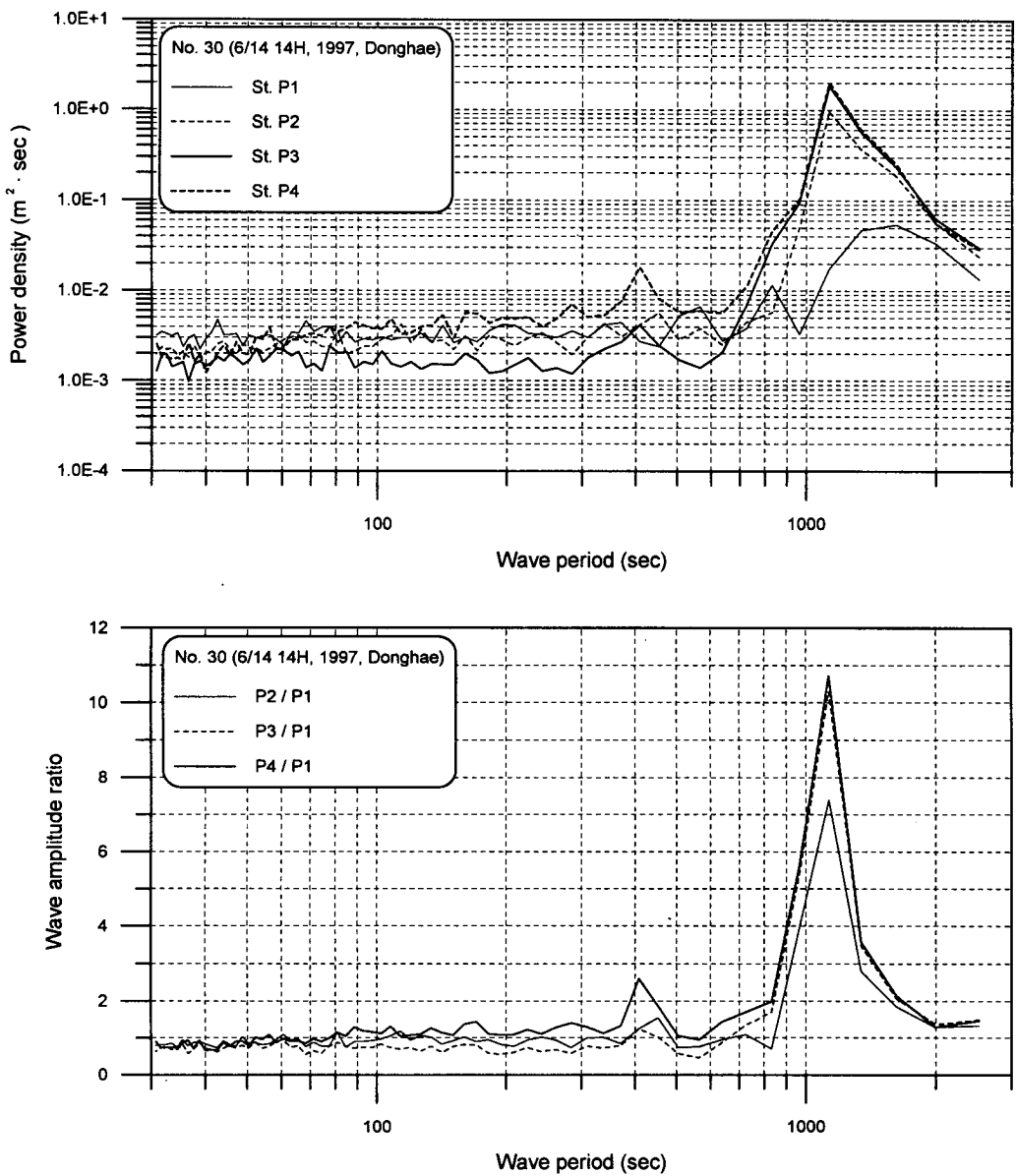


Fig. A3.26 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 14 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

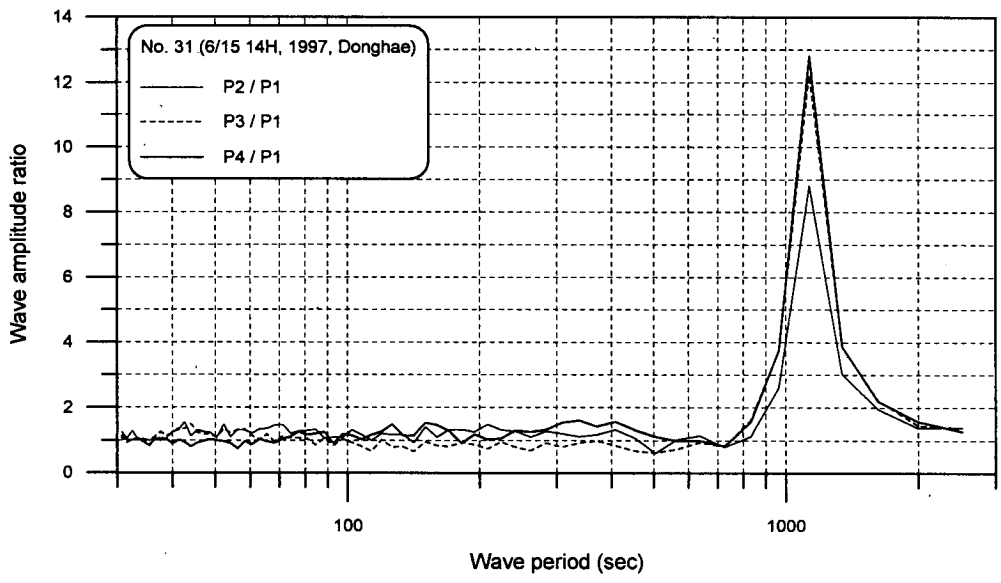
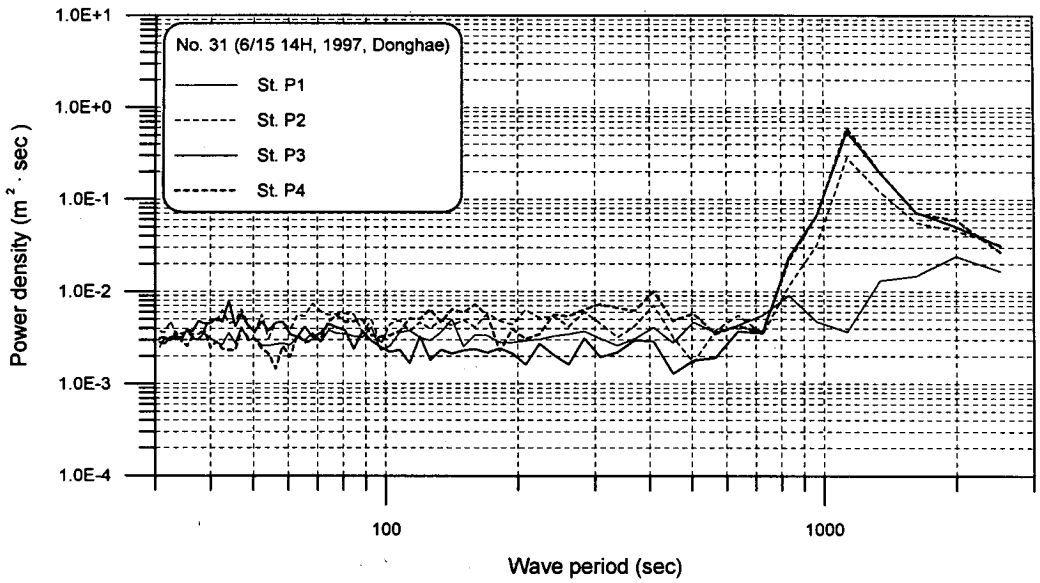


Fig. A3.27 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 15 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

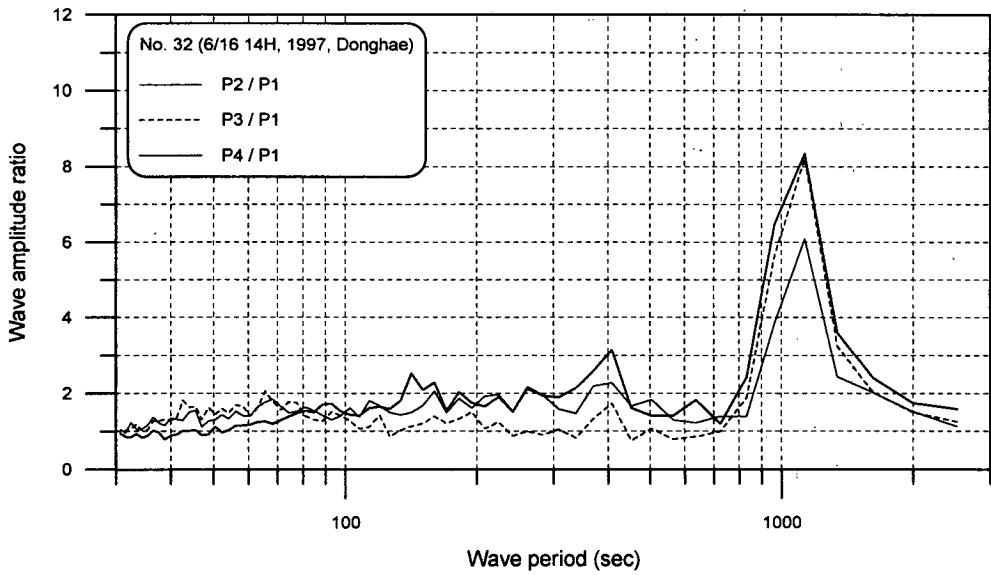
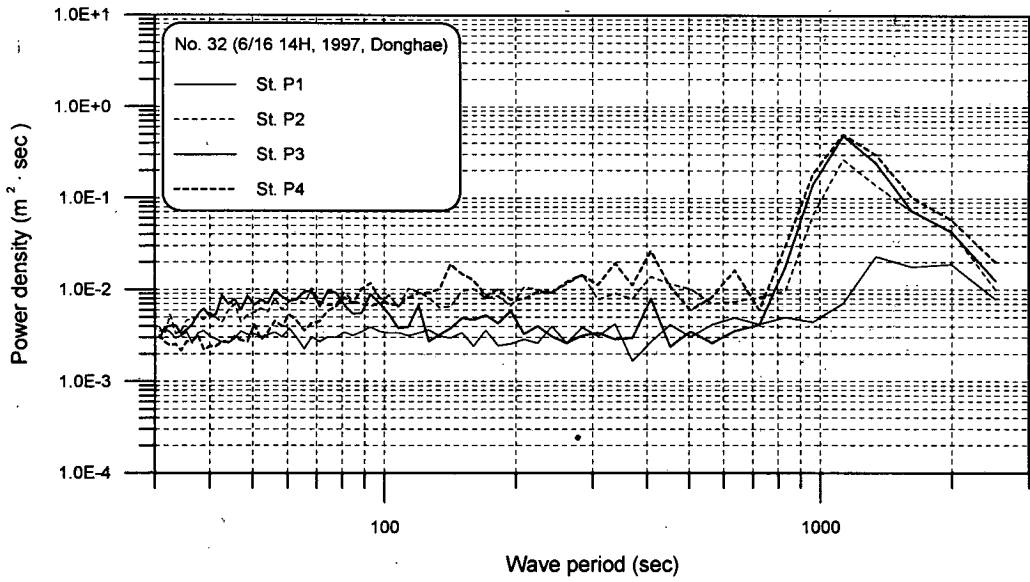


Fig. A3.28 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 16 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

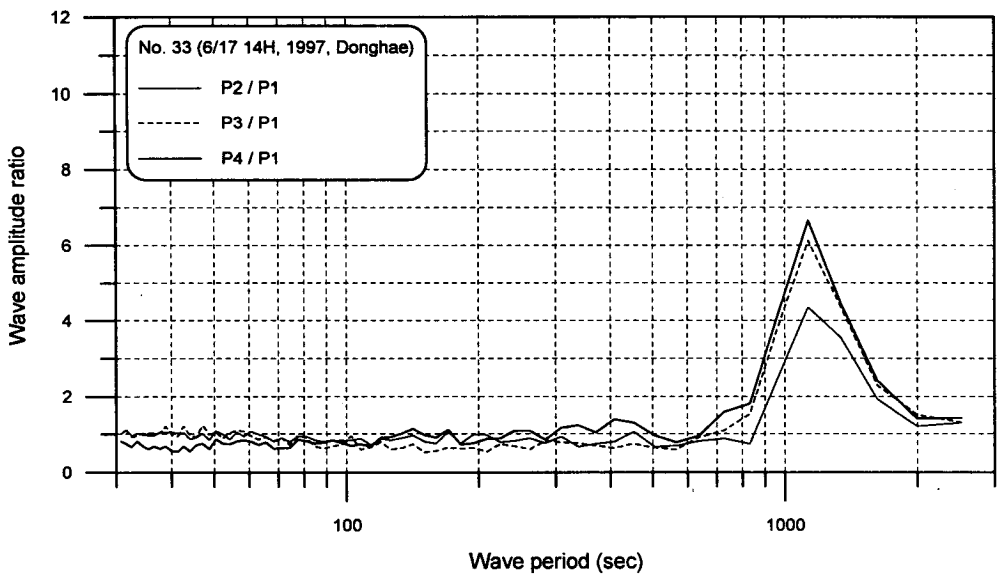
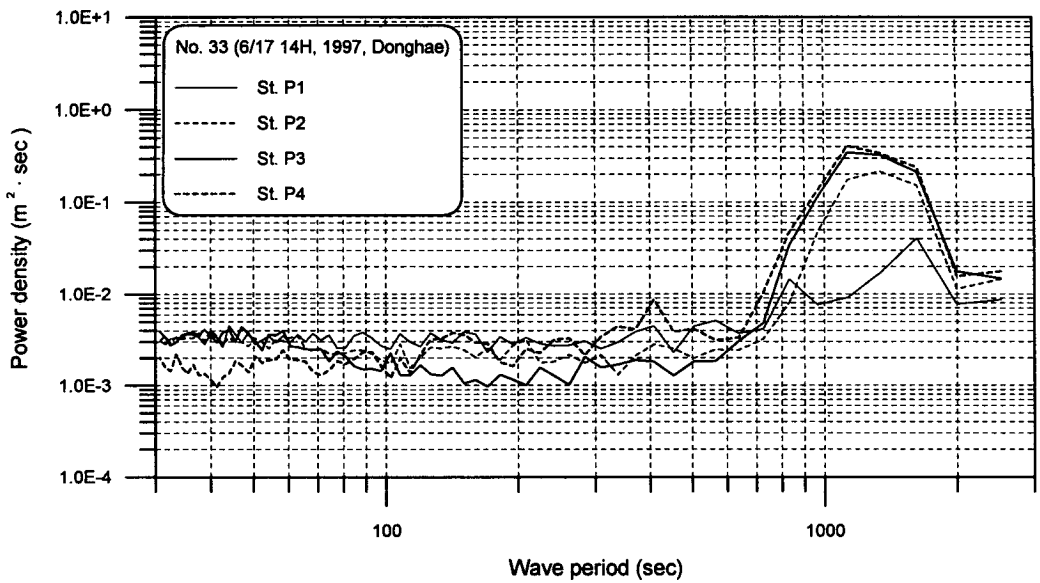


Fig. A3.29 Results of spectral analysis for sea level data measured at 4 stations for 22.8 hours from June 17 14:00, 1997, upper : spectral densities, lower : relative amplitude ratio.

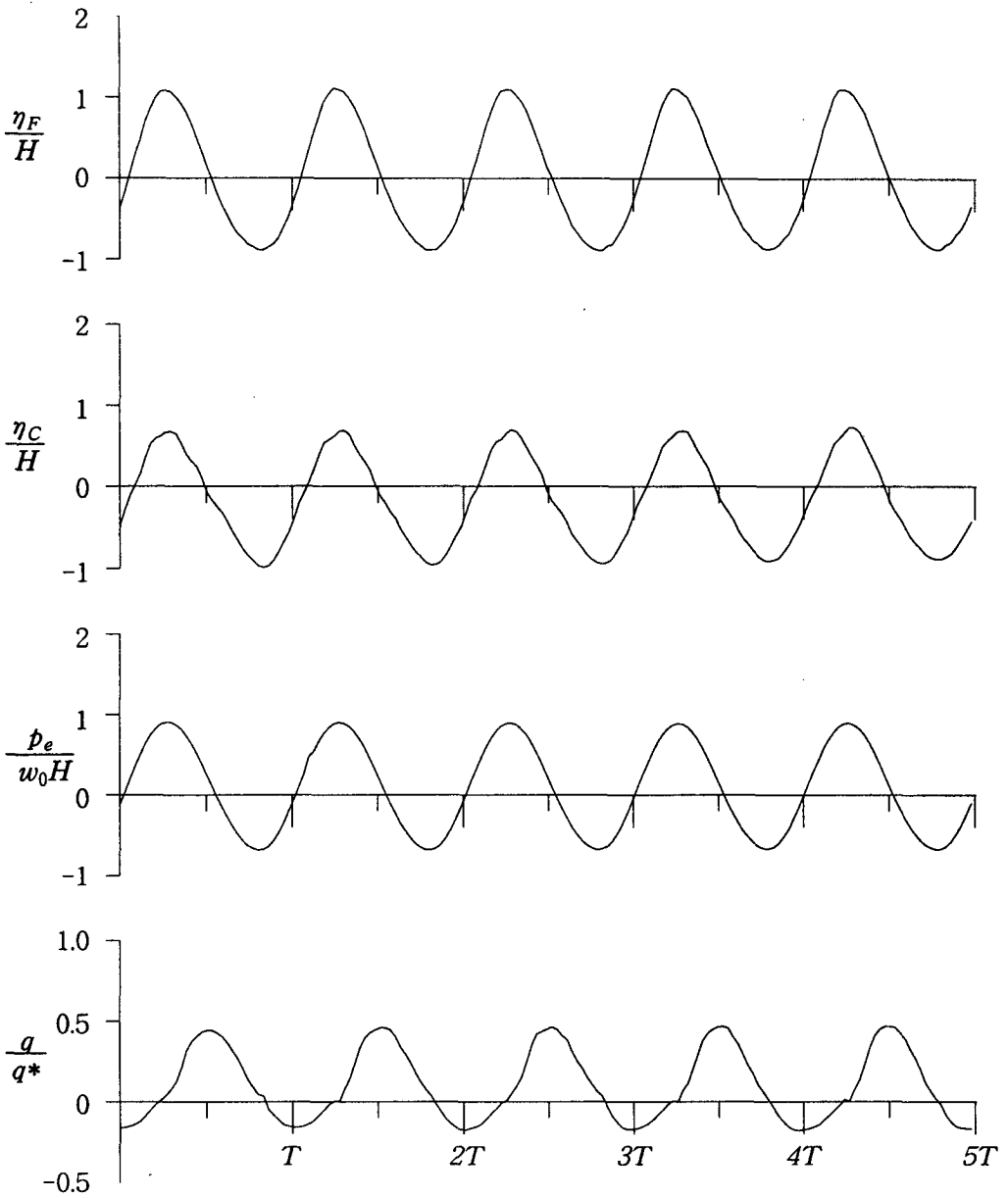


Fig. A4.1 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.687$ sec ($\omega^*=0.5$) & $H=3.2$ cm.

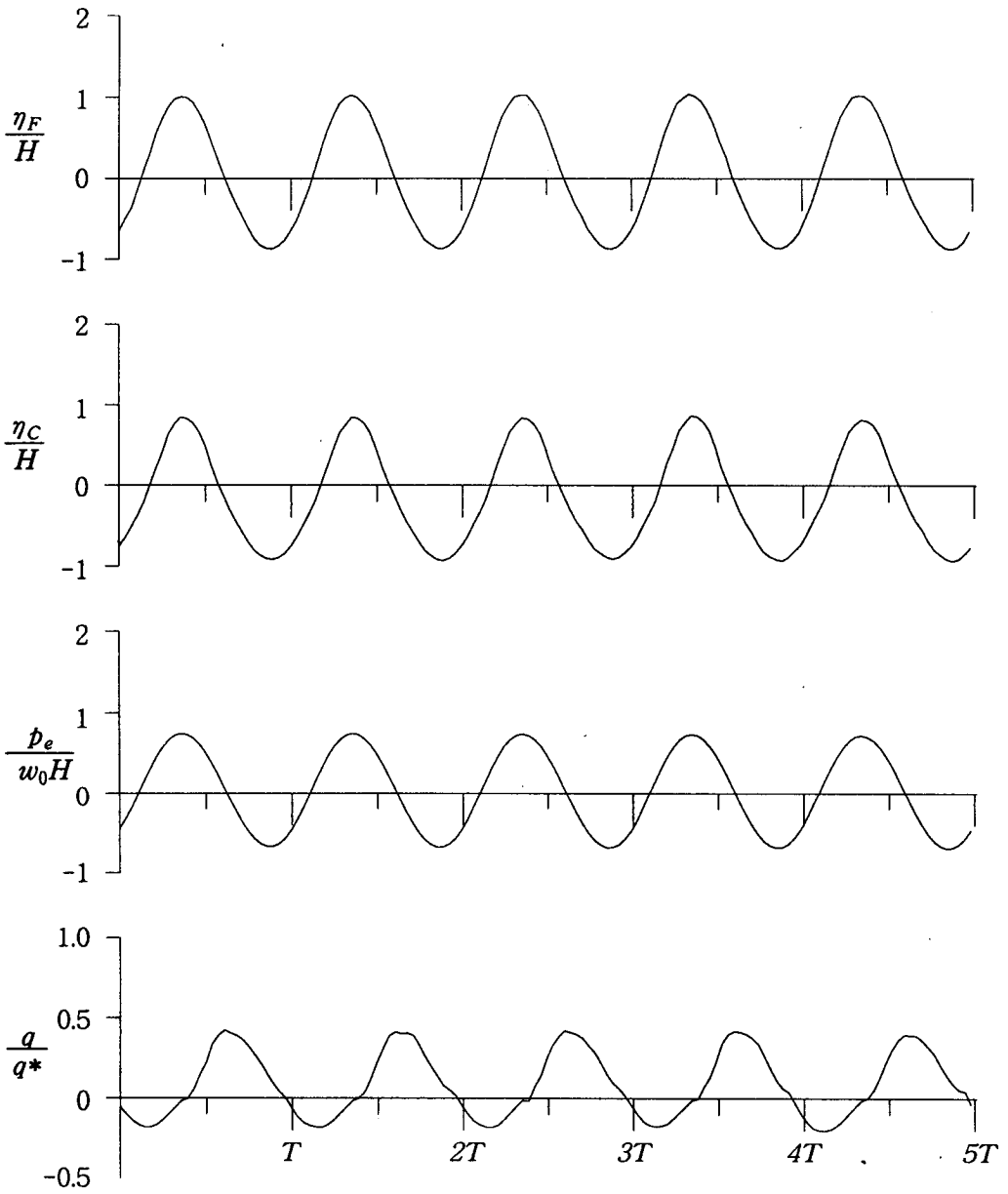


Fig. A4.2 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1:406$ sec ($\omega^*=0.6$) & $H=3.35$ cm.

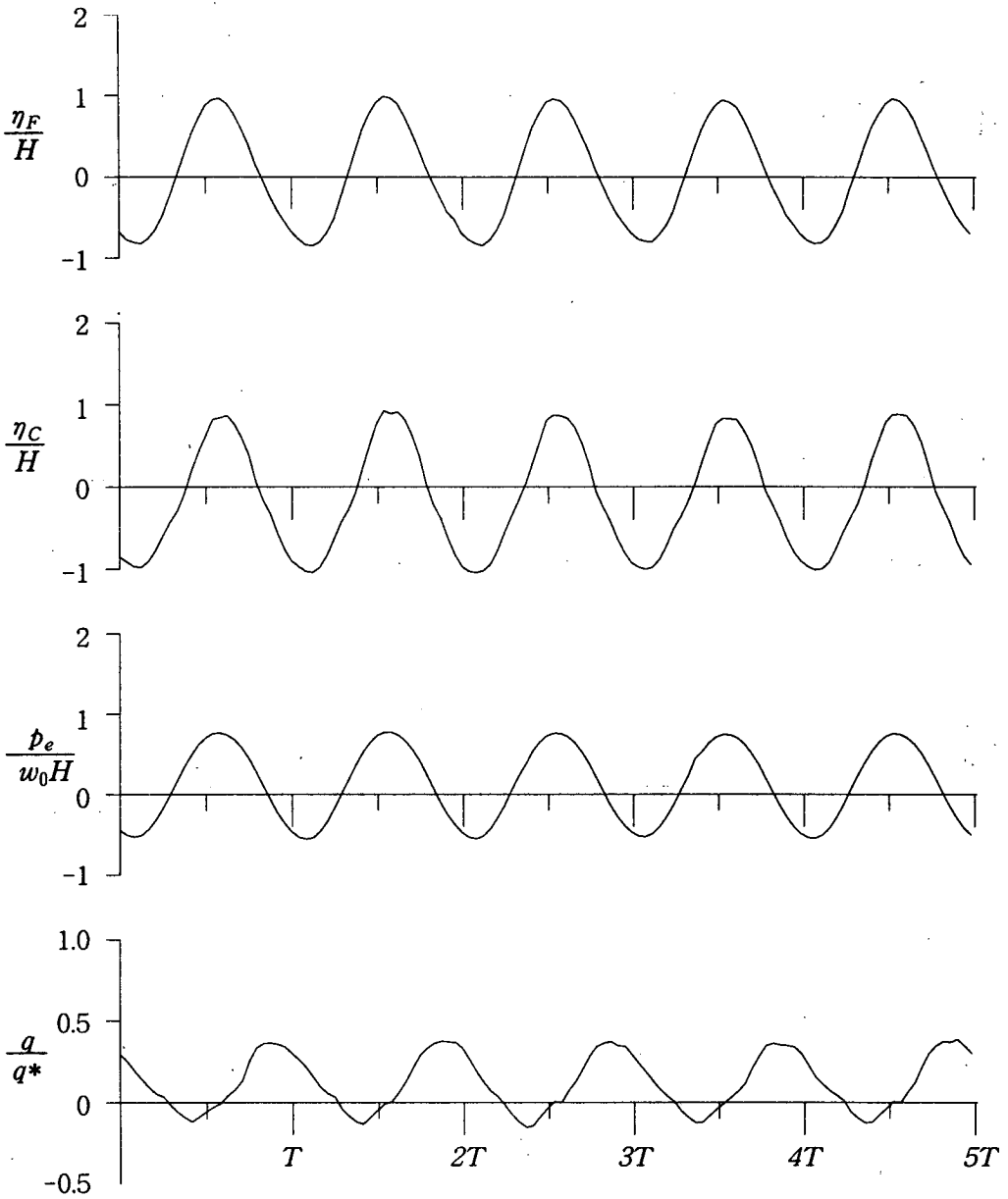


Fig. A4.3 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.205$ sec ($\omega^*=0.7$) & $H=3.3$ cm.

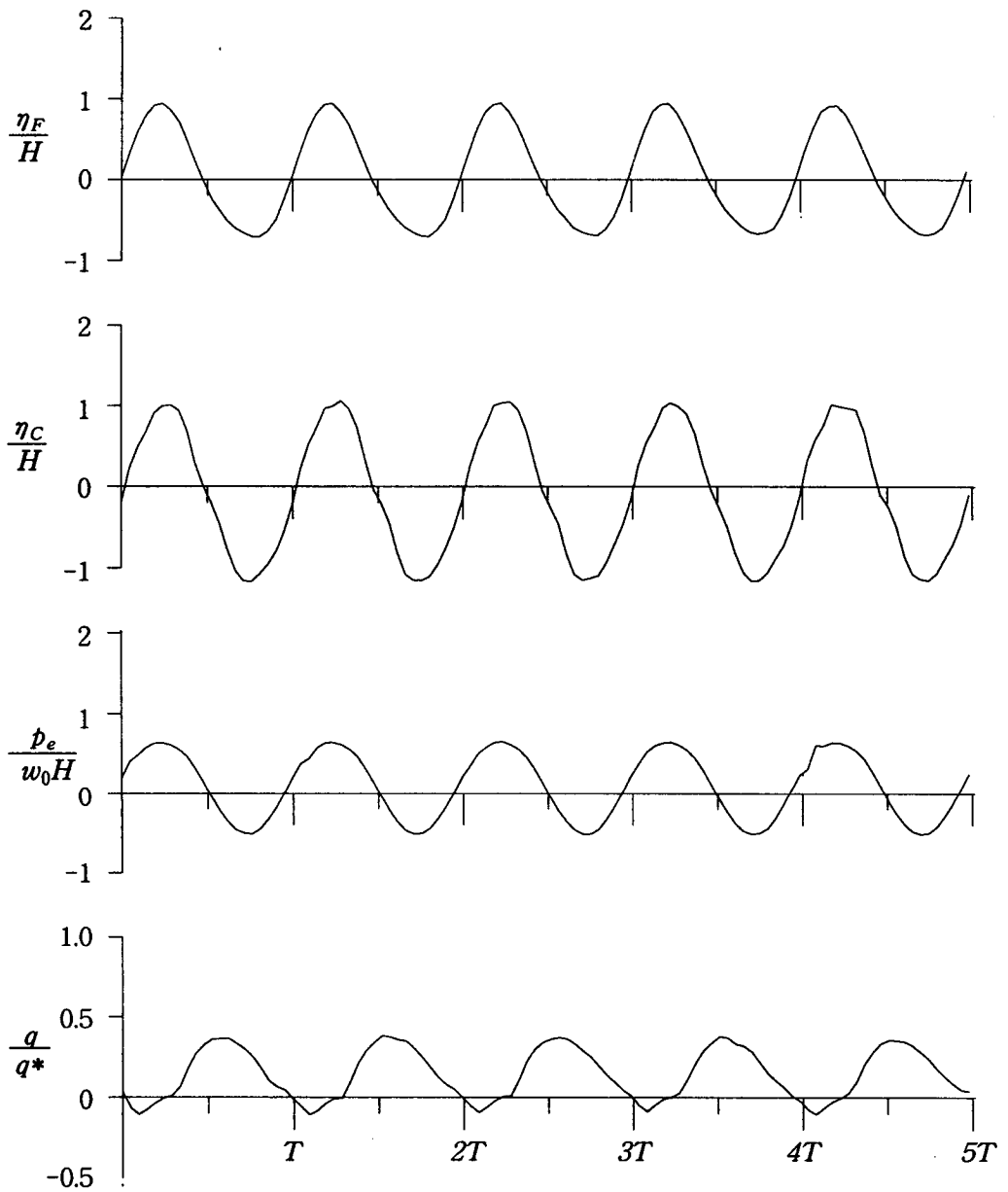


Fig. A4.4 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.054$ sec ($\omega^*=0.8$) & $H=3.3$ cm.

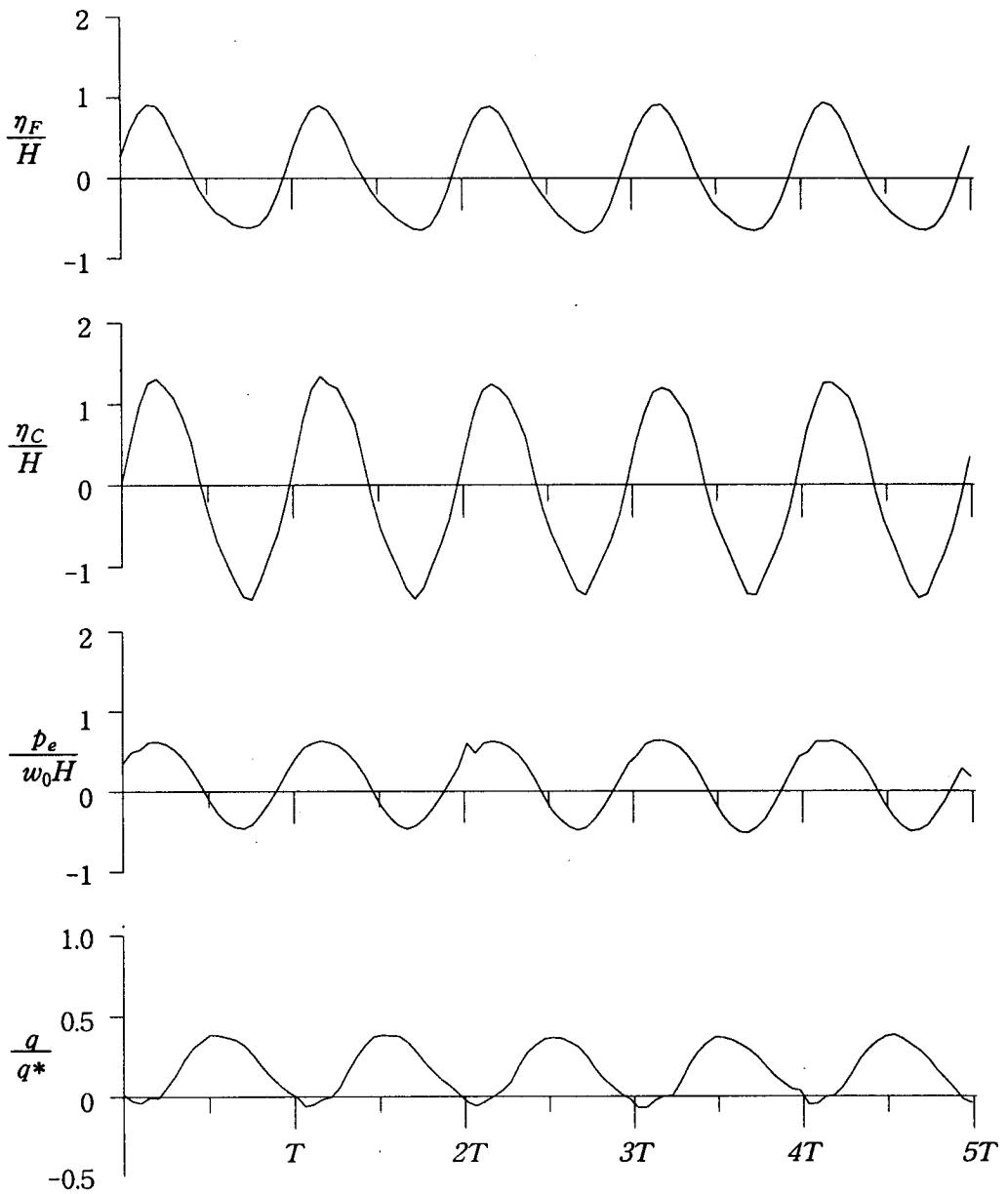


Fig. A4.5 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.992$ sec ($\omega^*=0.85$) & $H=3.15$ cm.

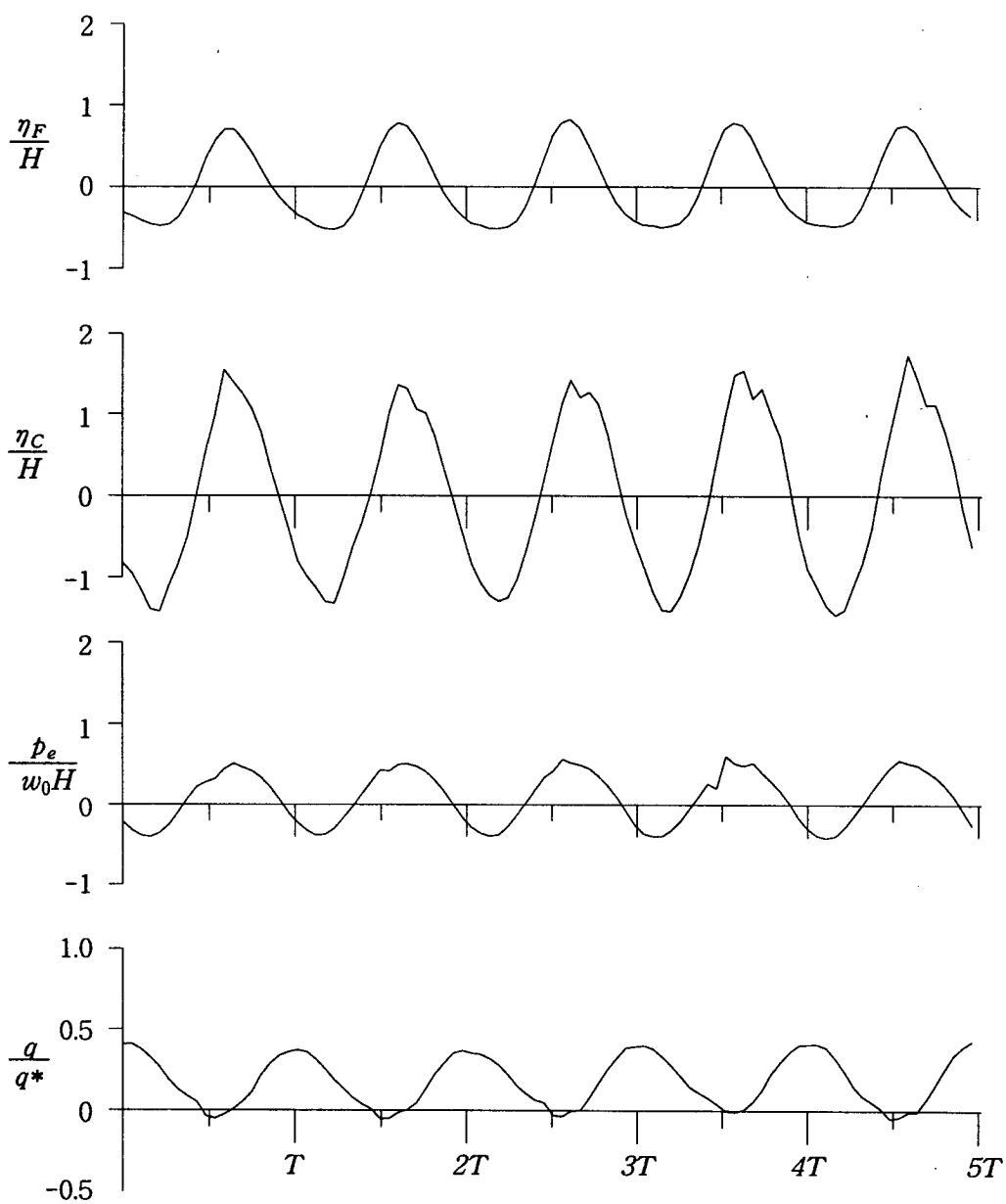


Fig. A4.6 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.937$ sec ($\omega^*=0.9$) & $H=3.25$ cm.

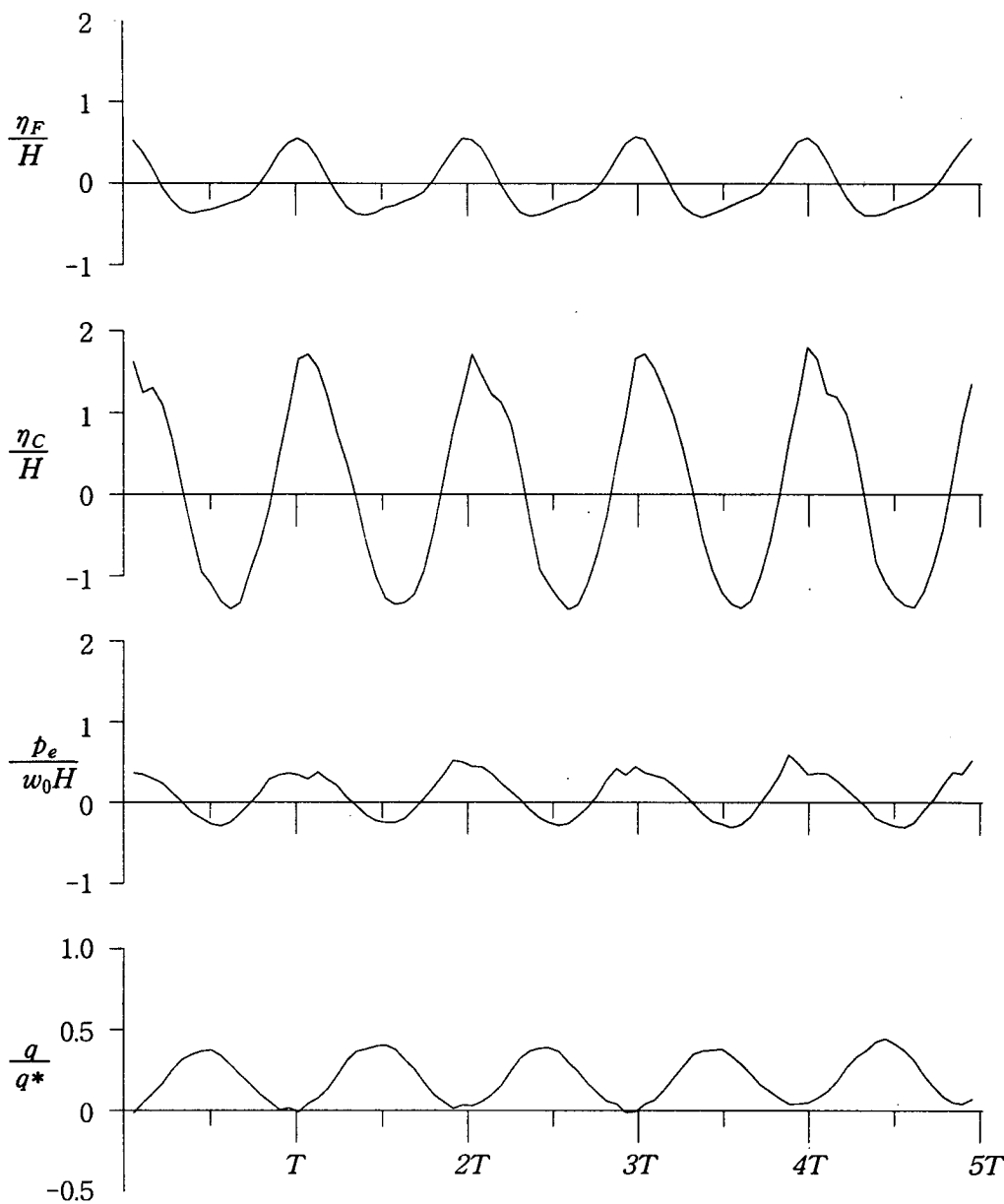


Fig. A4.7 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.888$ sec ($\omega^*=0.95$) & $H=3.4$ cm.

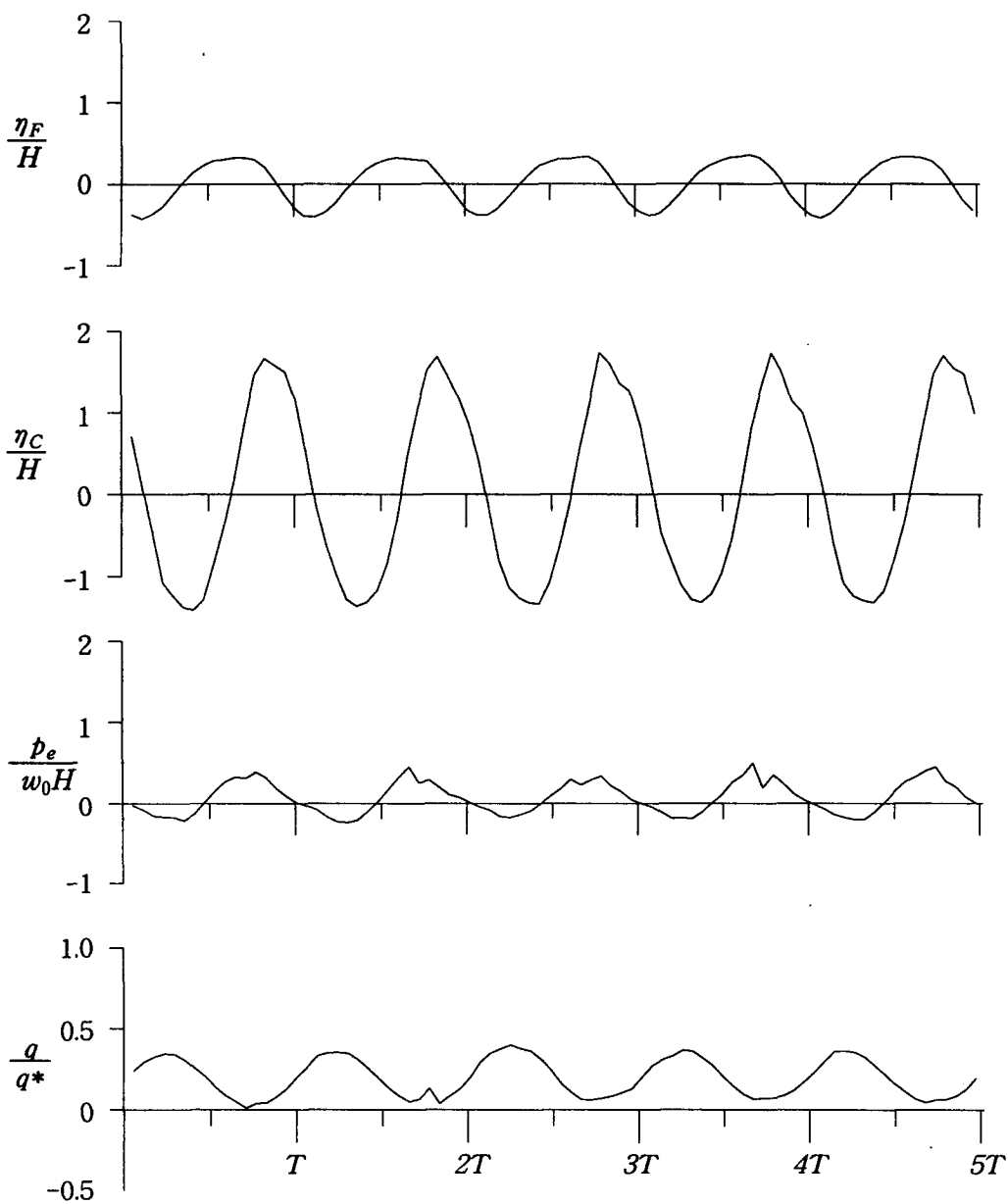


Fig. A4.8 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.844$ sec ($\omega^*=1.0$) & $H=3.3$ cm.

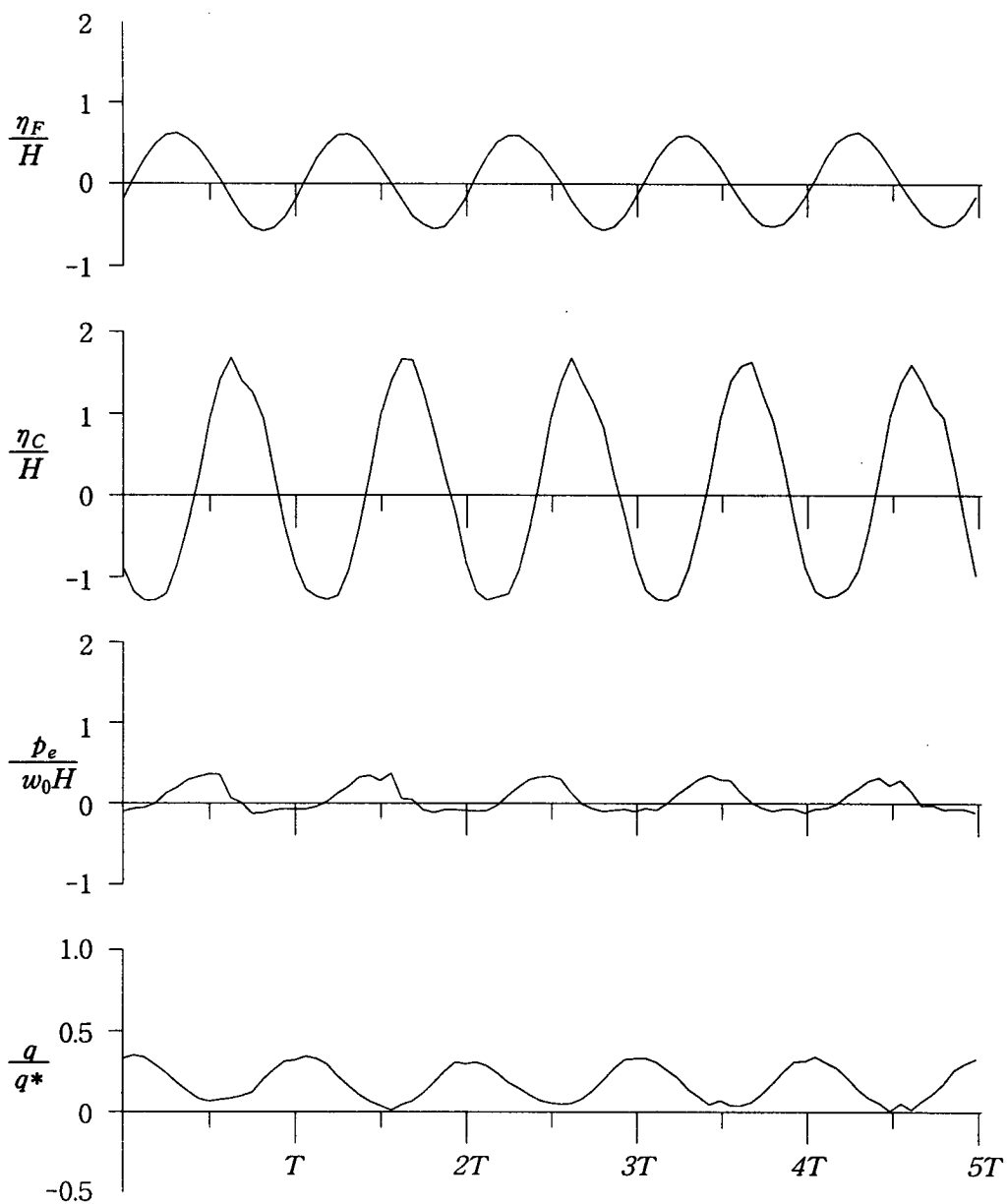


Fig. A4.9 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.803$ sec ($\omega^*=1.05$) & $H=3.3$ cm.

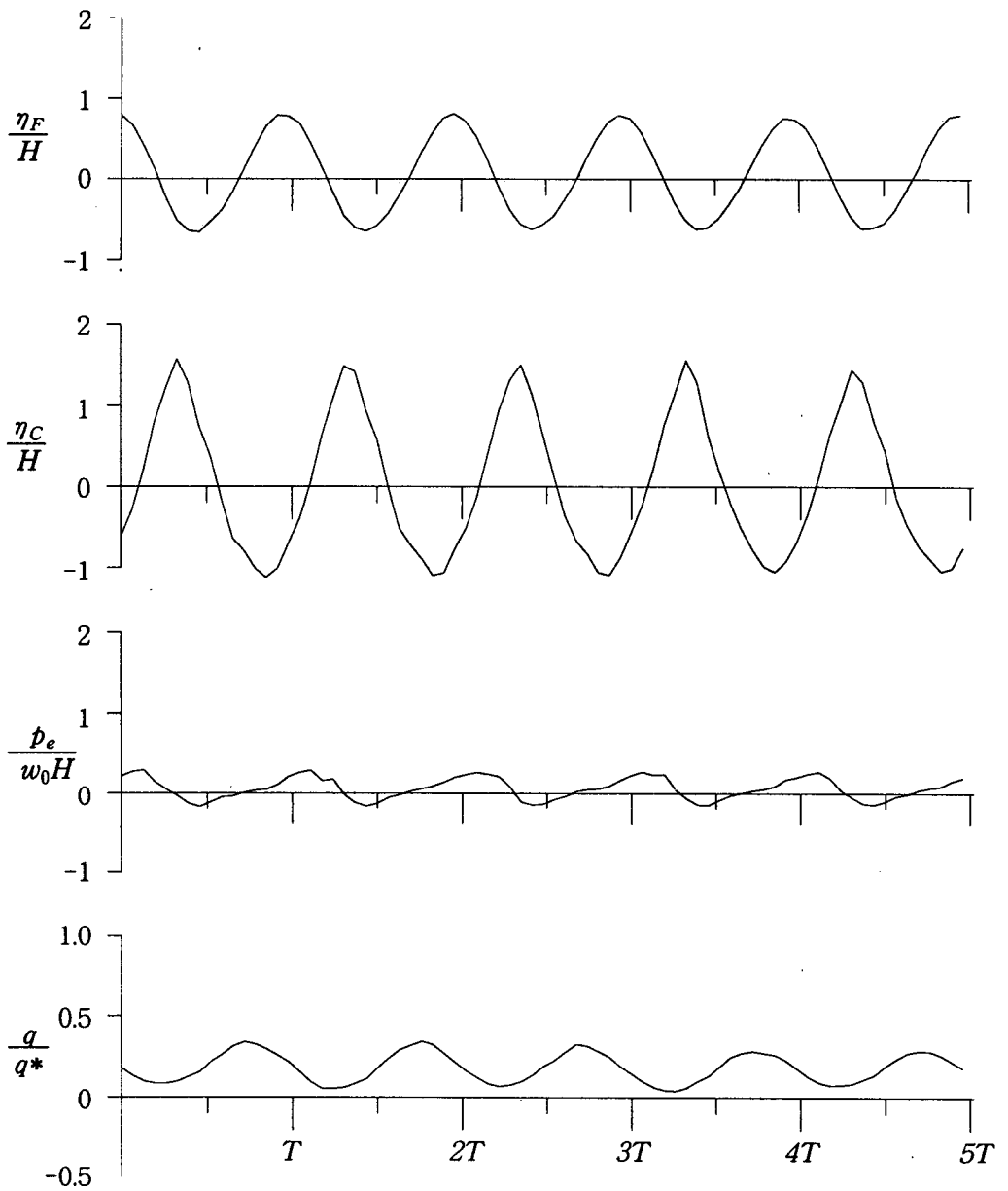


Fig. A4.10 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.767$ sec ($\omega^*=1.1$) & $H=3.2$ cm.

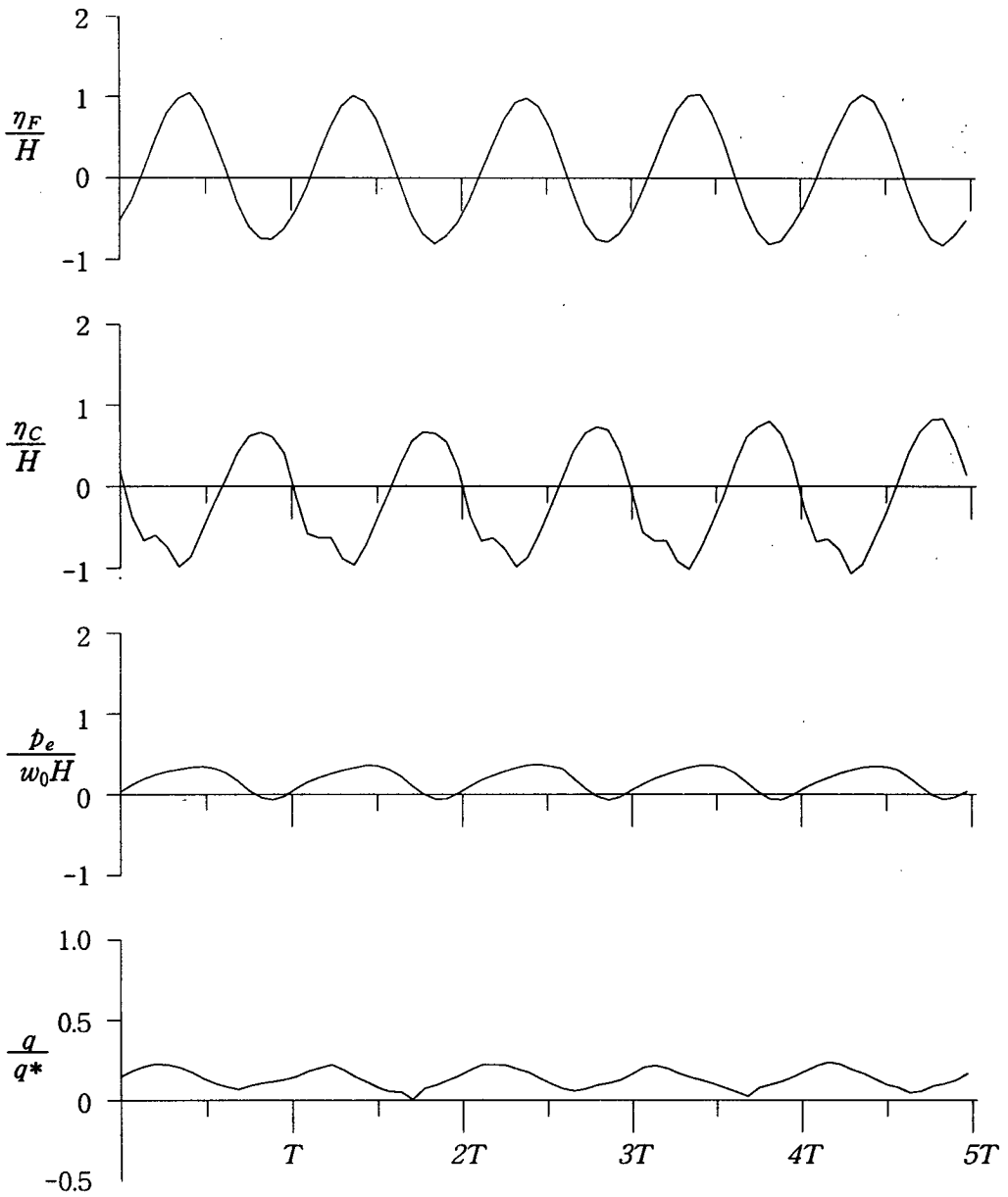


Fig. A4.11 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.734$ sec ($\omega^*=1.15$) & $H=2.1$ cm.

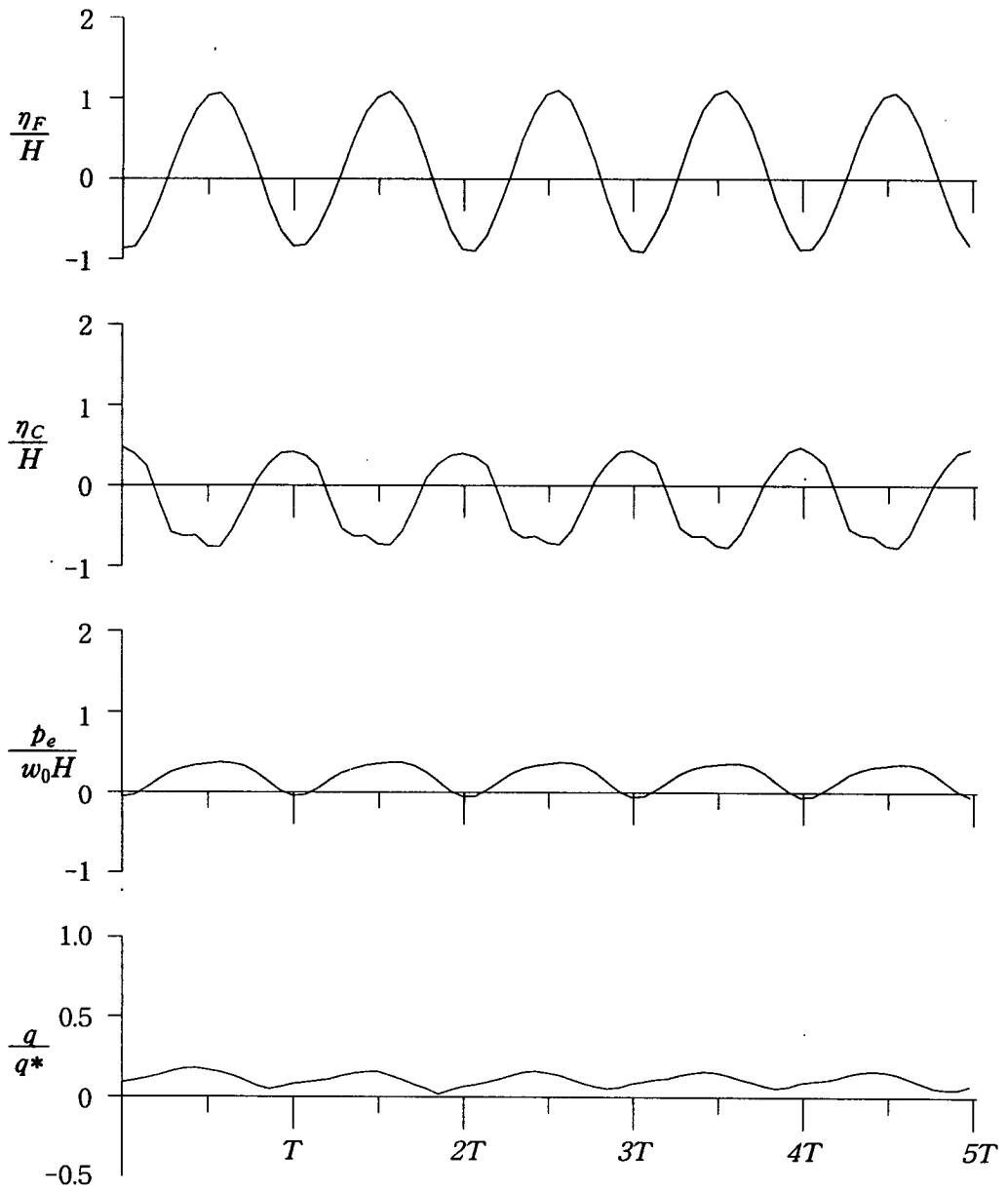


Fig. A4.12 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.703$ sec ($\omega^*=1.2$) & $H=2.0$ cm.

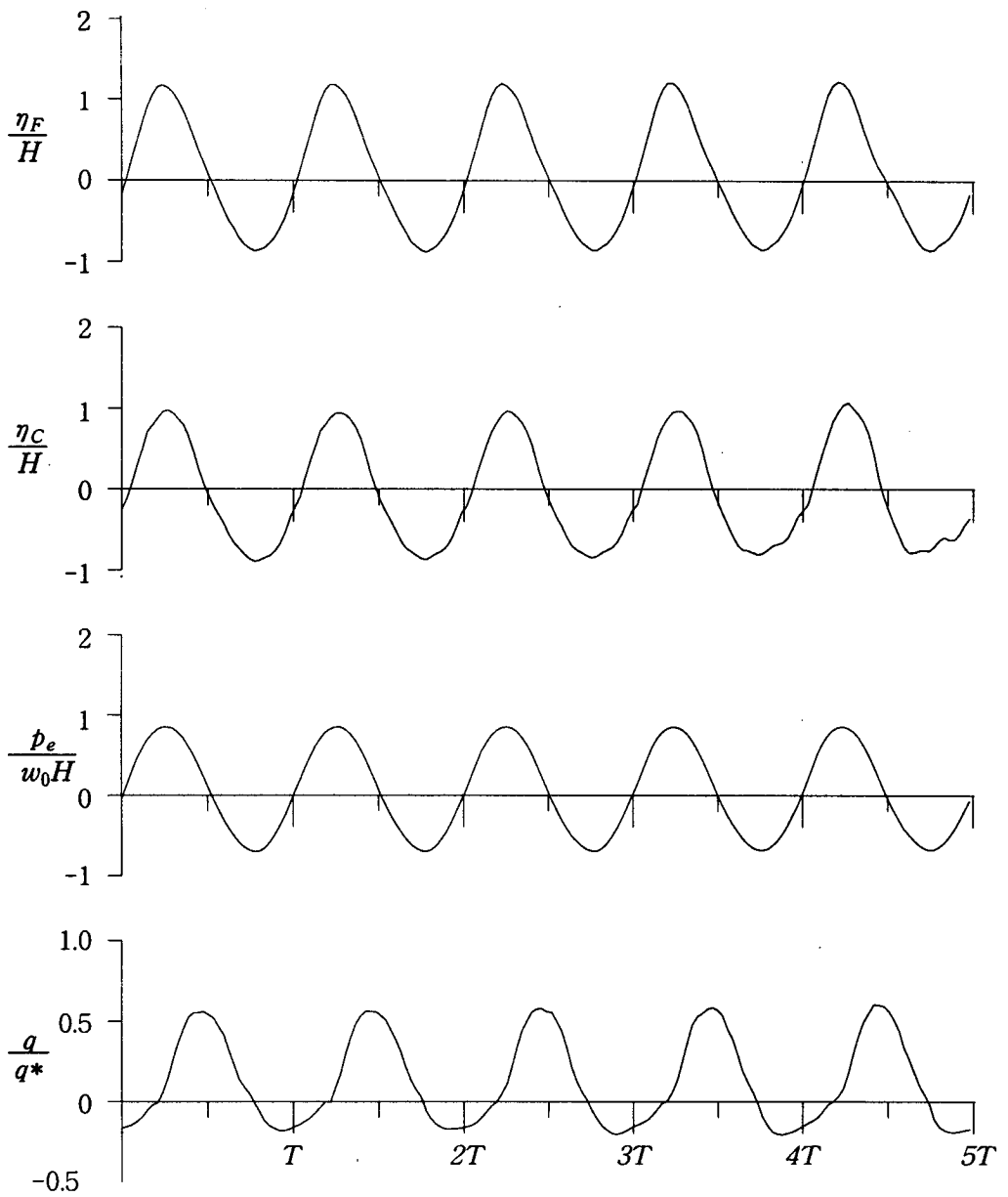


Fig. A4.13 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.687$ sec ($\omega^*=0.5$) & $H=5.3$ cm.

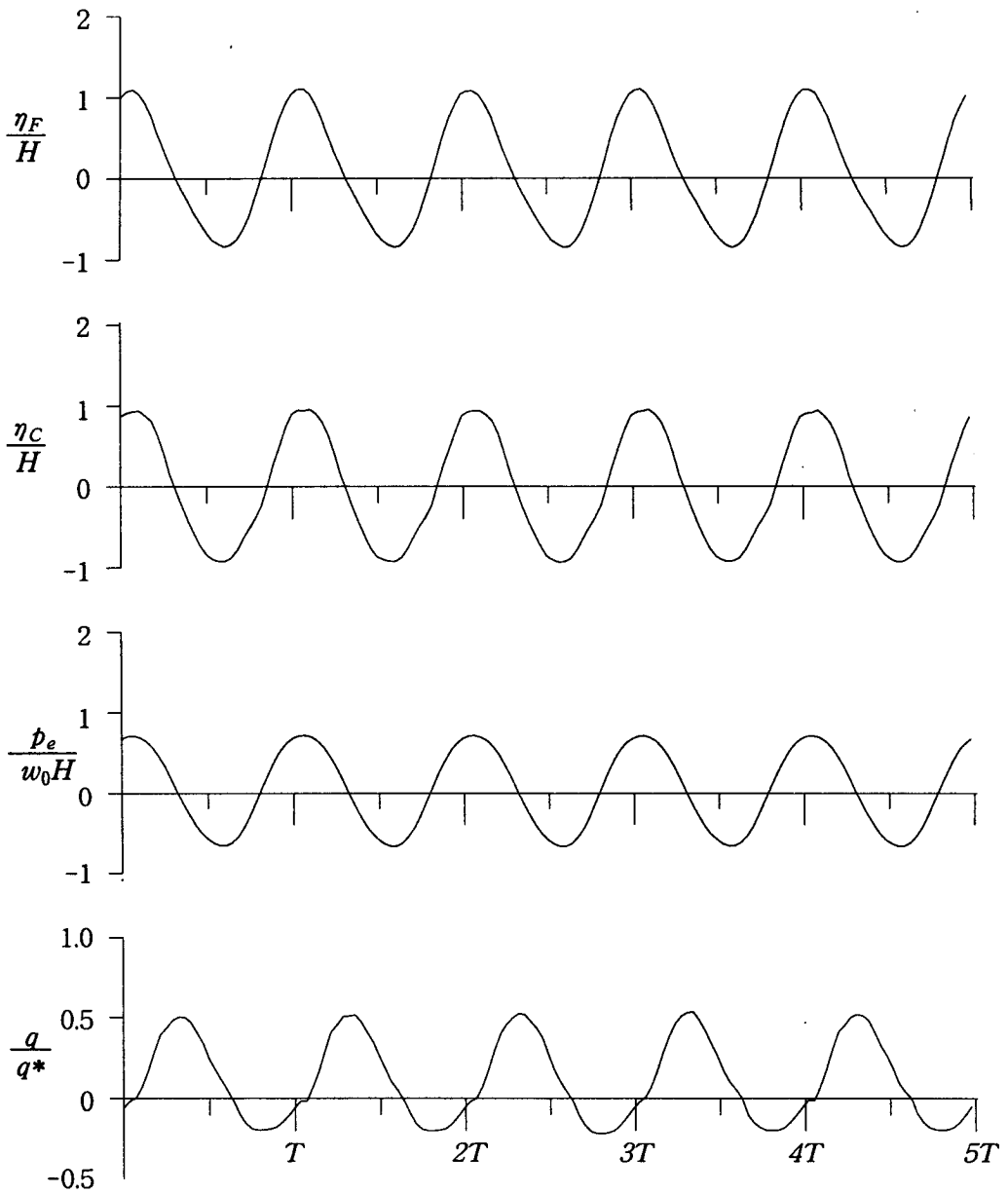


Fig. A4.14 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.406$ sec ($\omega^*=0.6$) & $H=5.4$ cm.

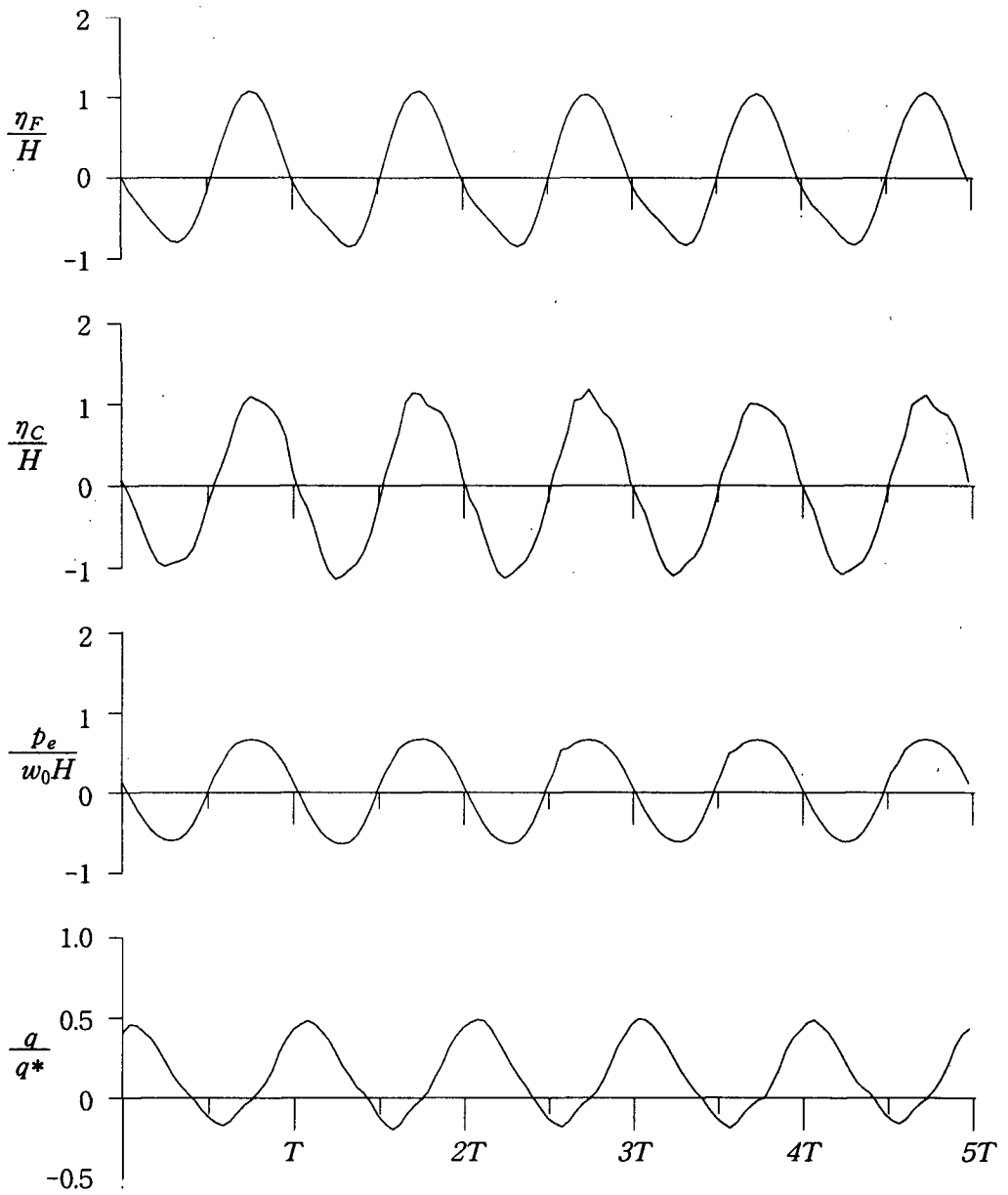


Fig. A4.15 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.205$ sec ($\omega^*=0.7$) & $H=5.3$ cm.

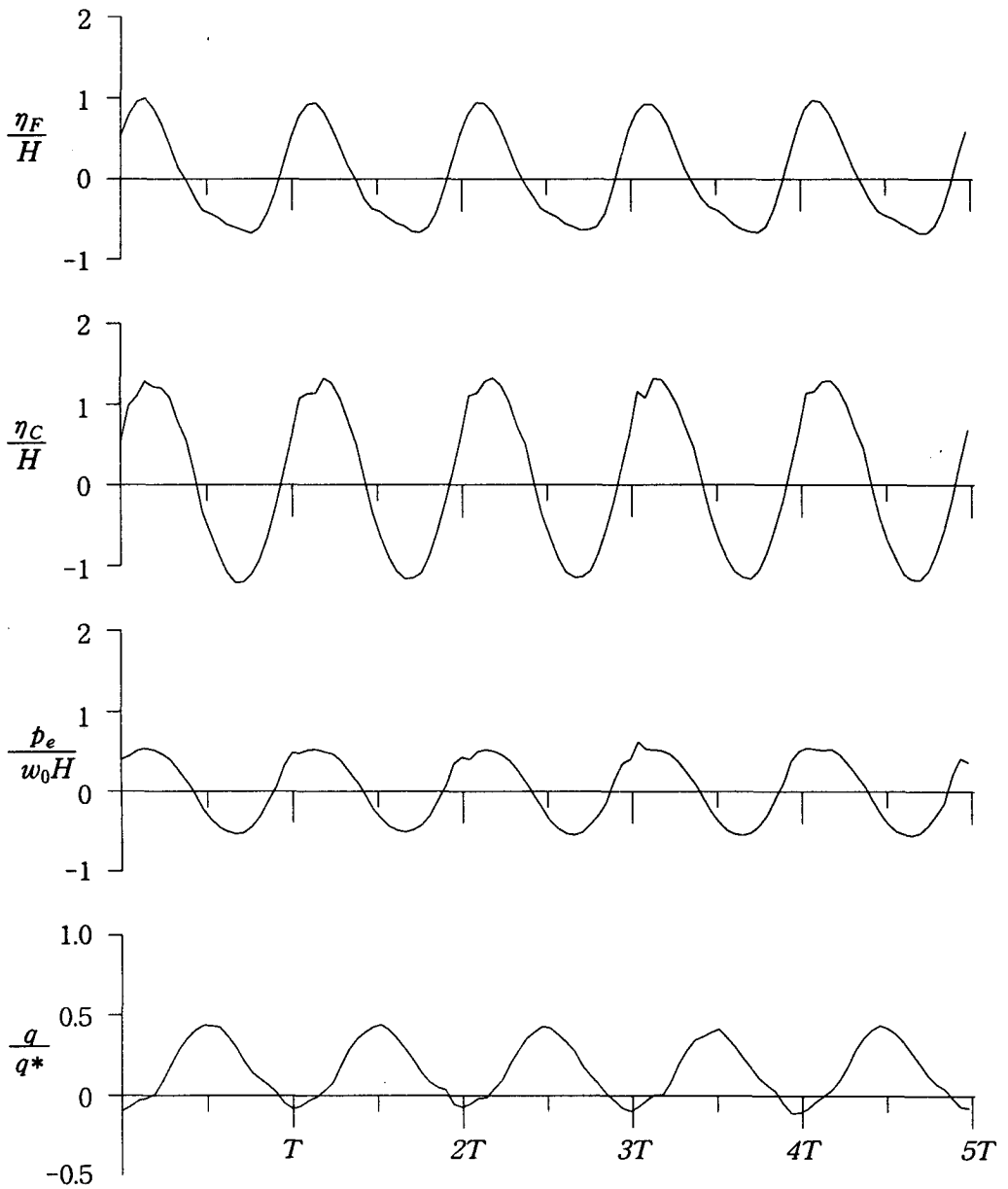


Fig. A4.16 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.054$ sec ($\omega^*=0.8$) & $H=5.4$ cm.

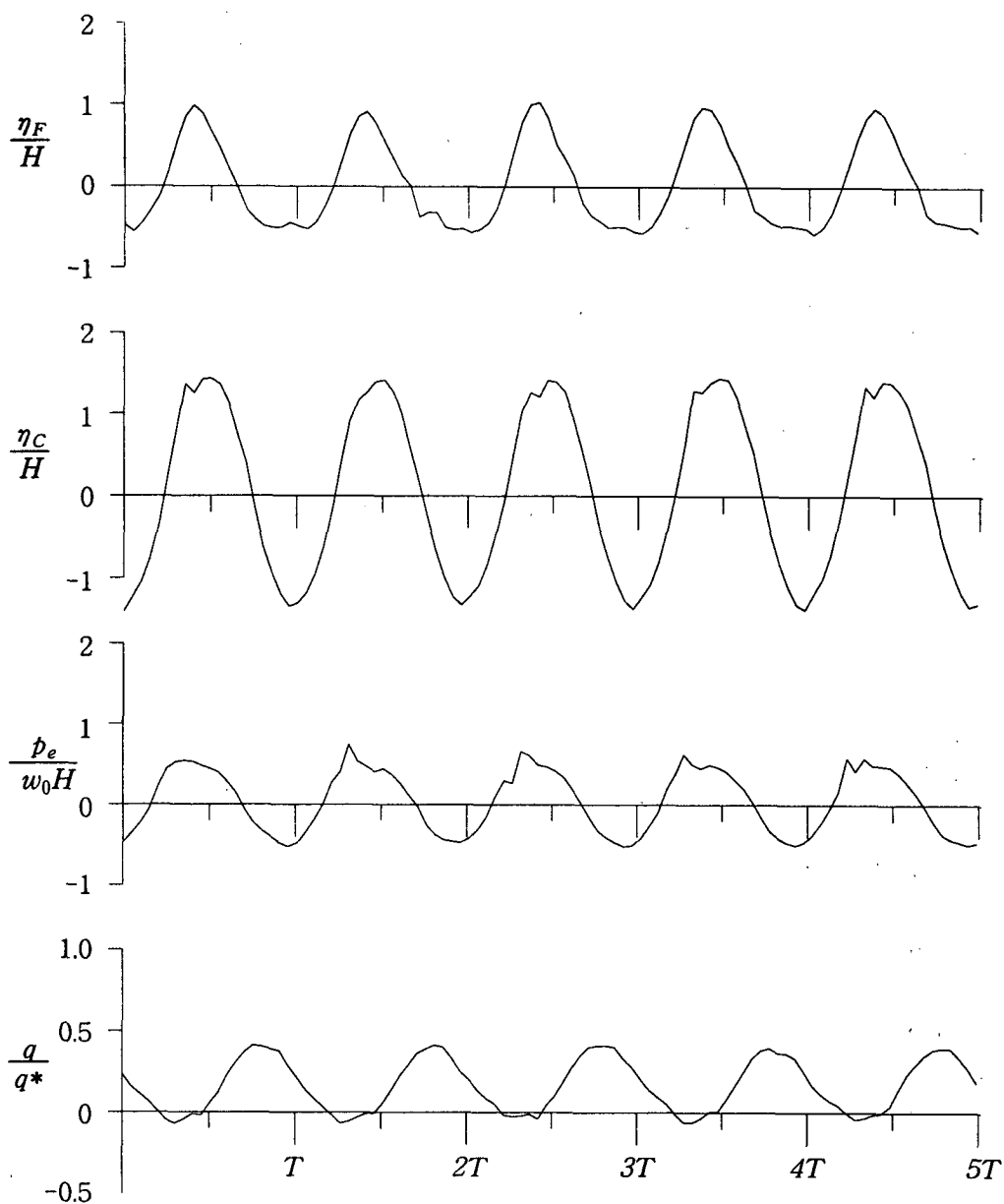


Fig. A4.17 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.992$ sec ($\omega^*=0.85$) & $H=5.2$ cm.

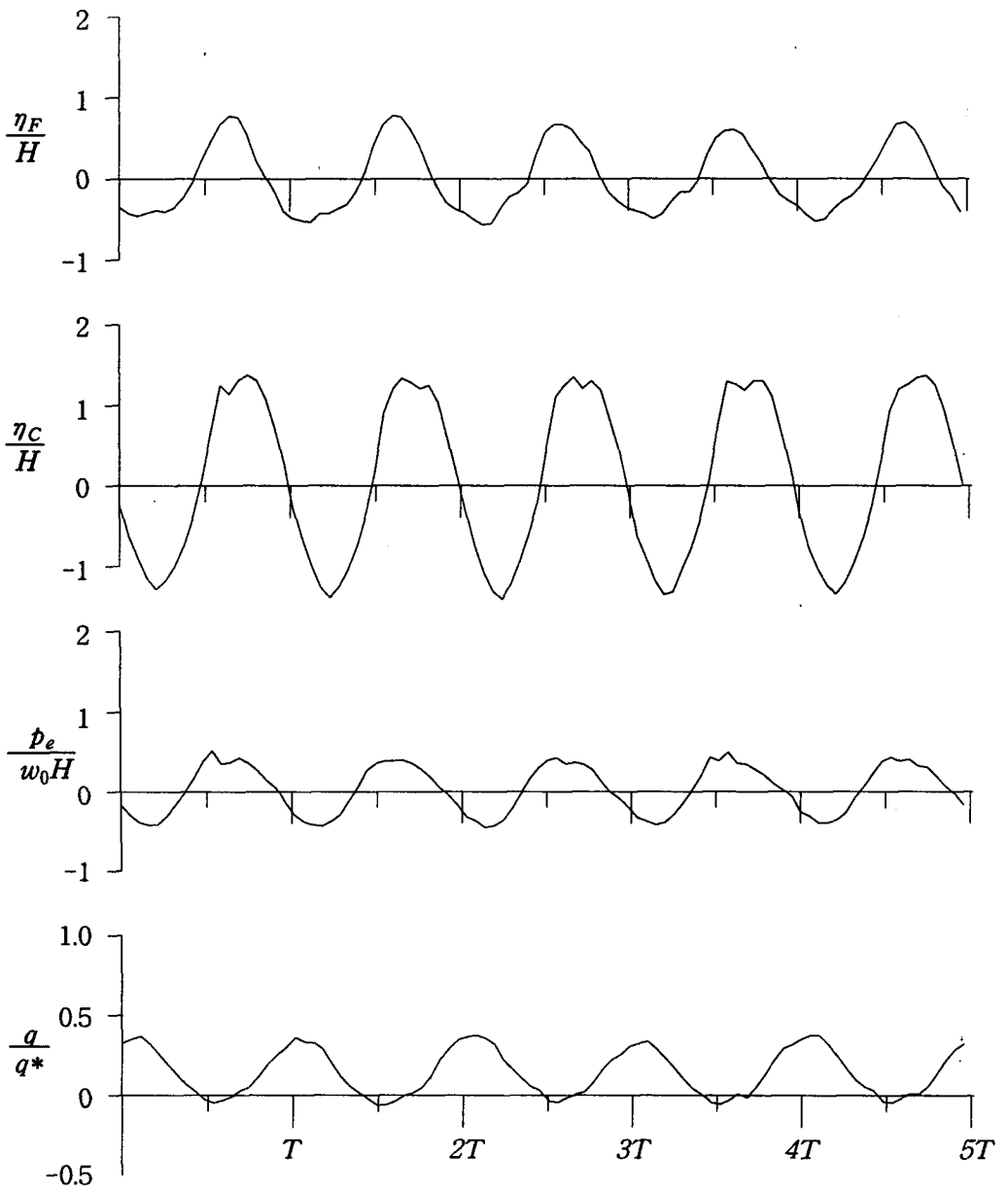


Fig. A4.18 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.937$ sec ($\omega^*=0.9$) & $H=5.5$ cm.

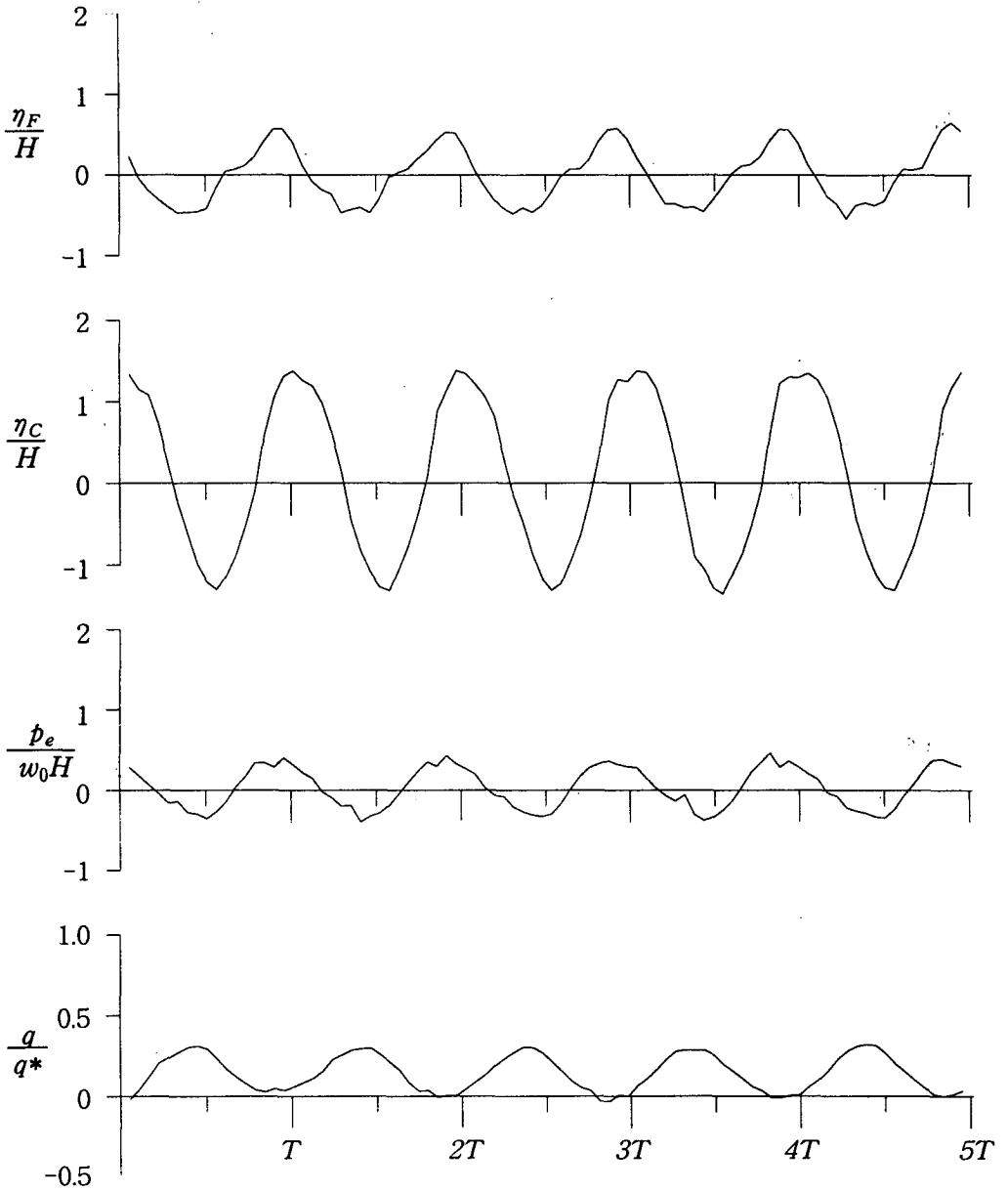


Fig. A4.19 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.888$ sec ($\omega^*=0.95$) & $H=5.35$ cm.

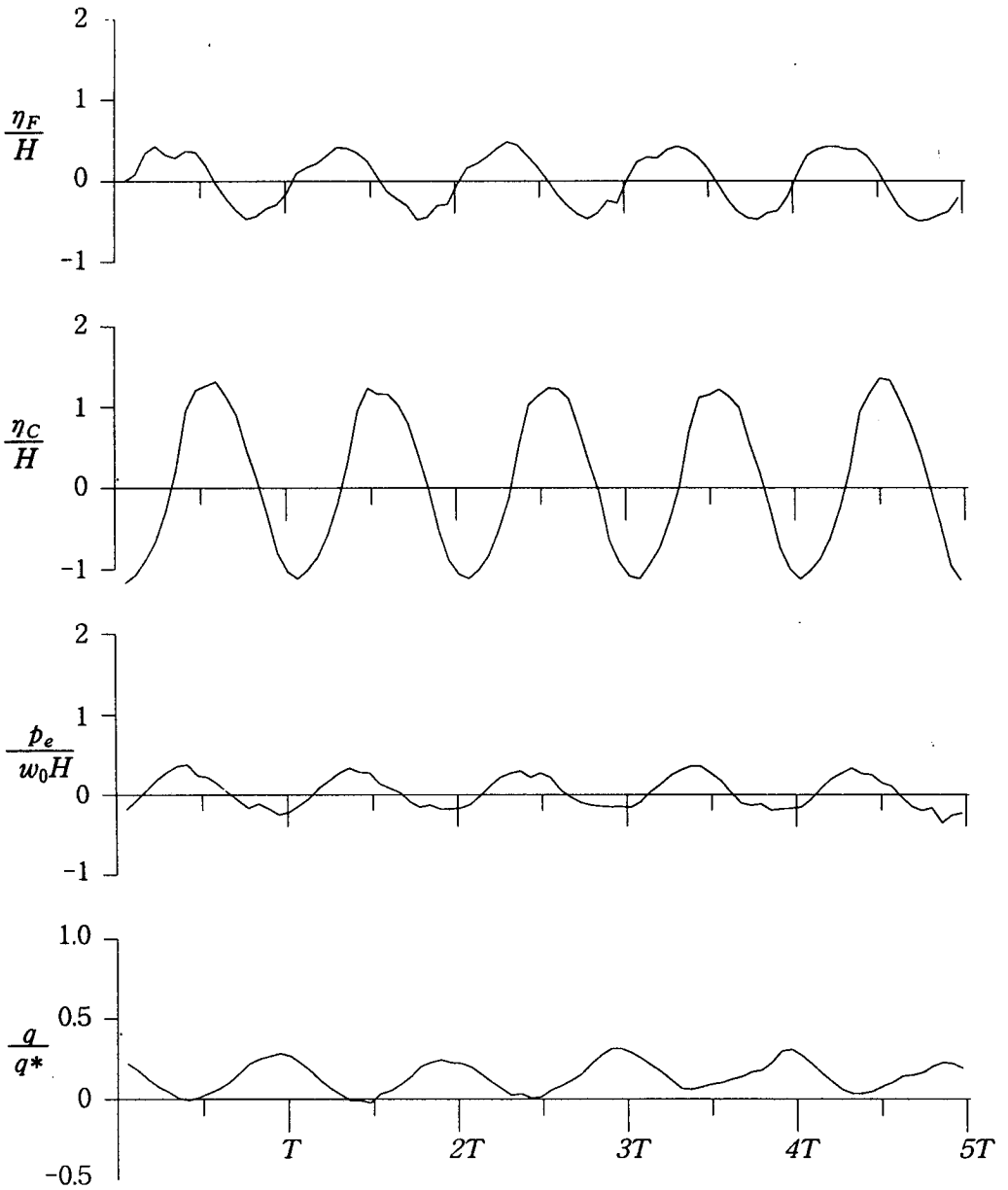


Fig. A4.20 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.844$ sec ($\omega^*=1.0$) & $H=5.3$ cm.

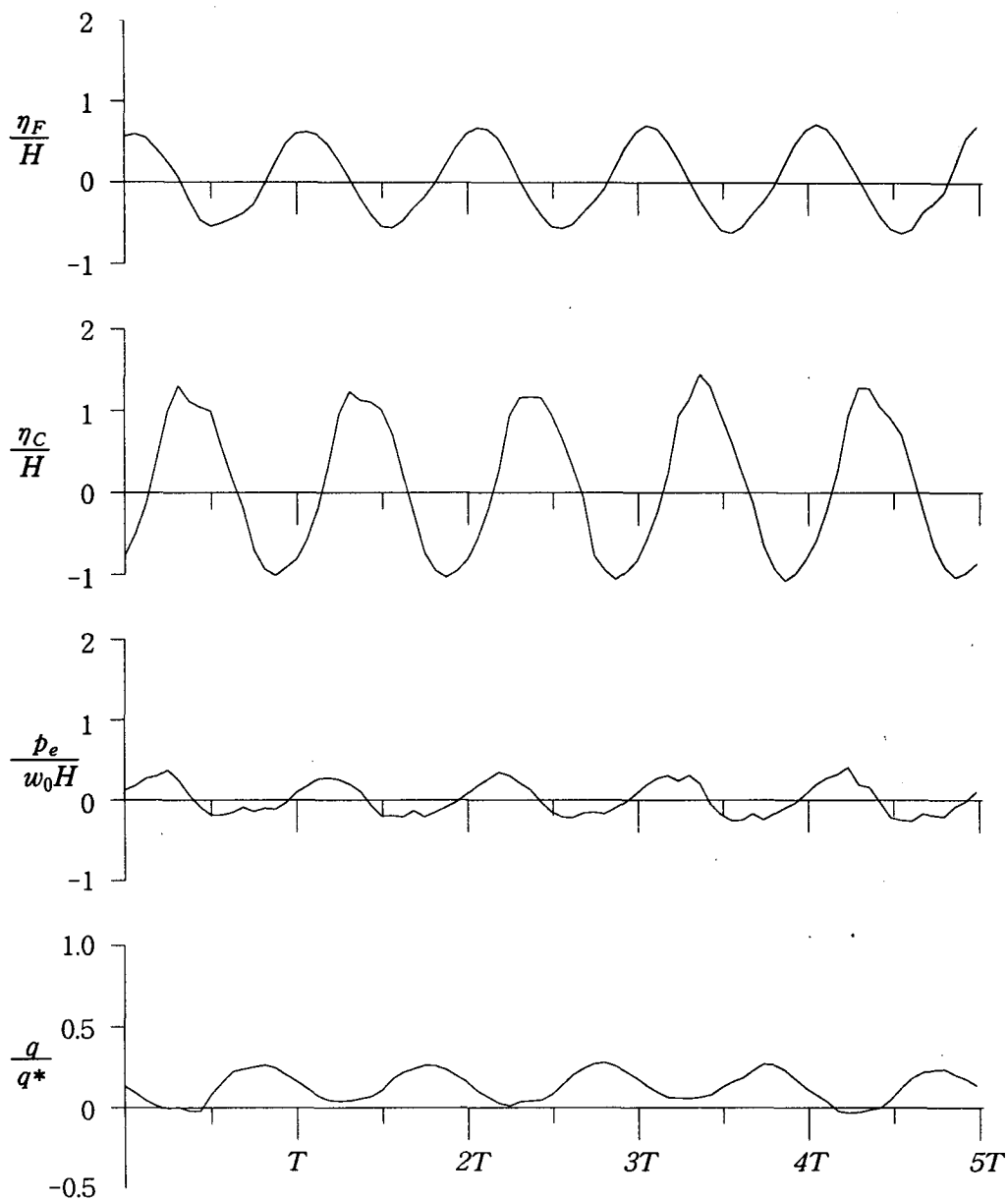


Fig. A4.21 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.803$ sec ($\omega^*=1.05$) & $H=5.3$ cm.

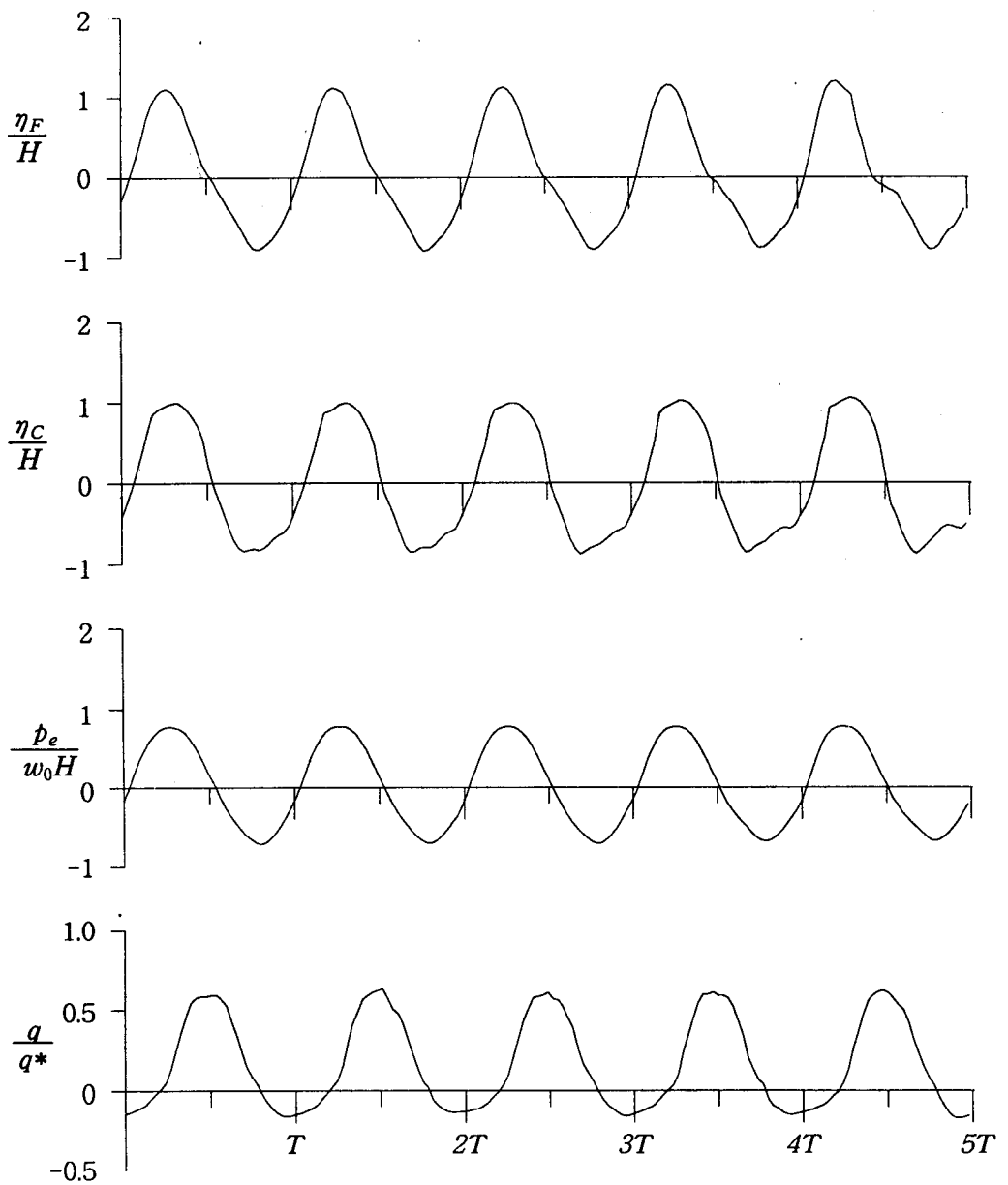


Fig. A4.22 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.687$ sec ($\omega^*=0.5$) & $H=7.6$ cm.

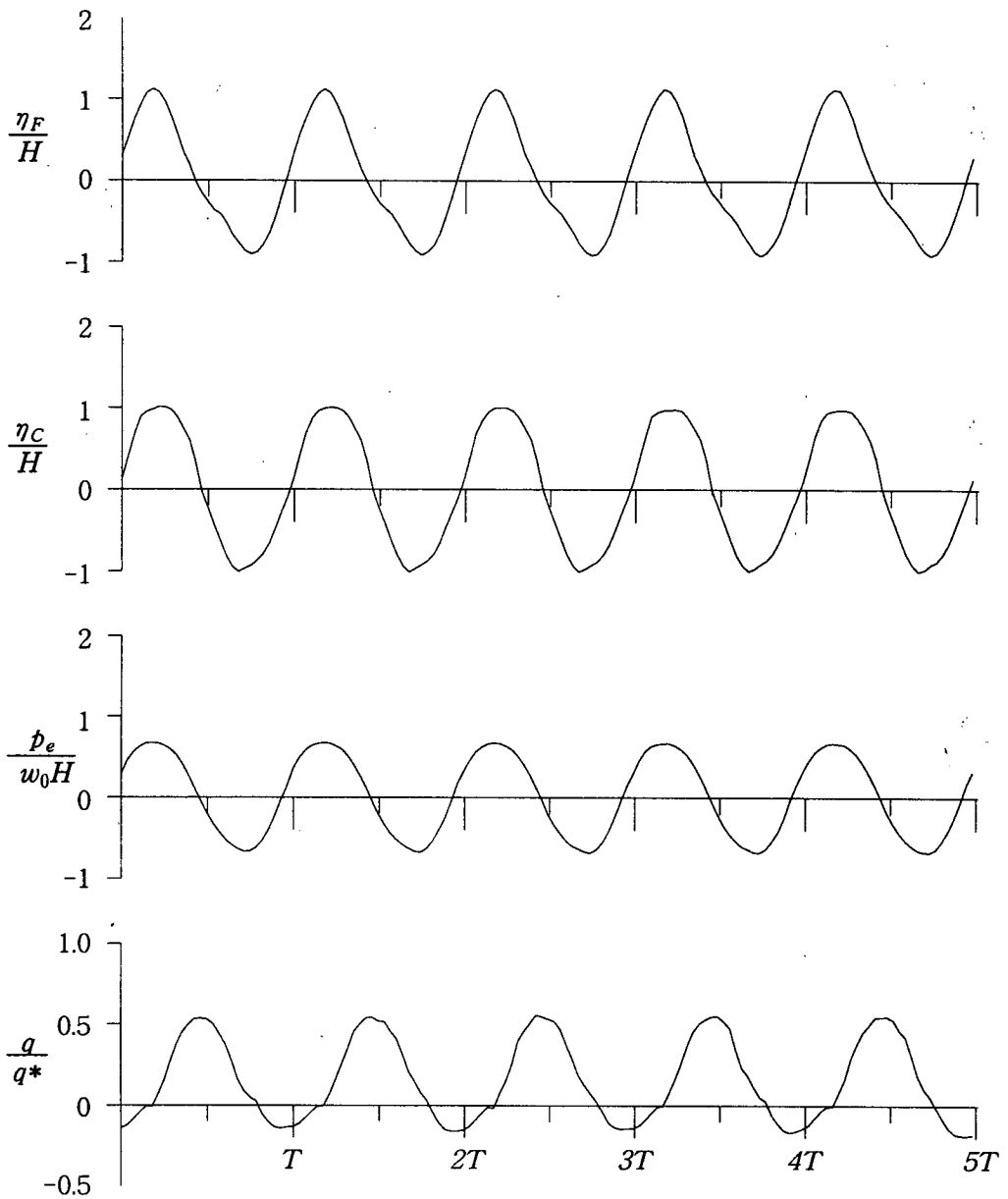


Fig. A4.23 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.406$ sec ($\omega^*=0.6$) & $H=7.4$ cm.

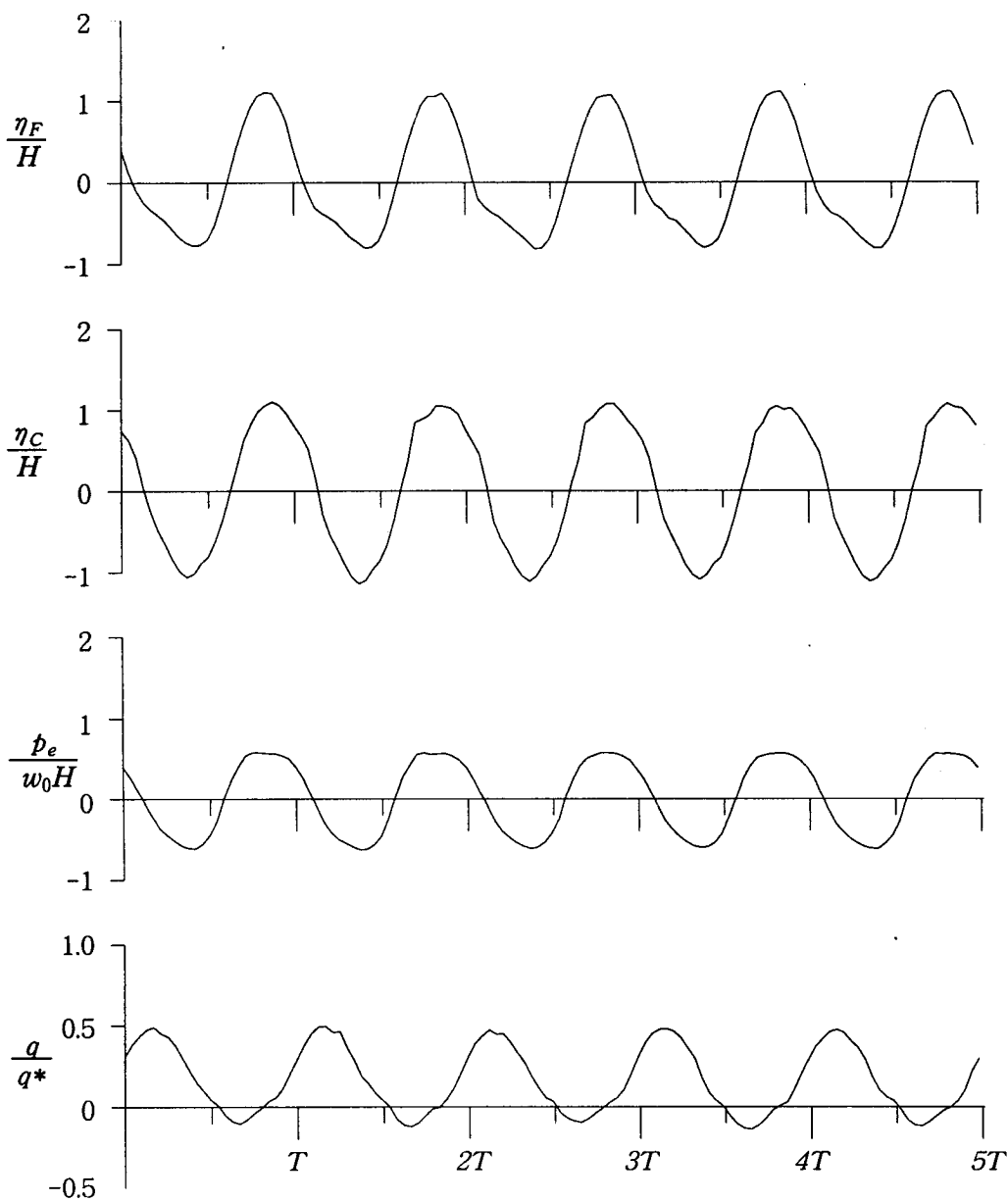


Fig. A4.24 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.205$ sec ($\omega^*=0.7$) & $H=7.5$ cm.

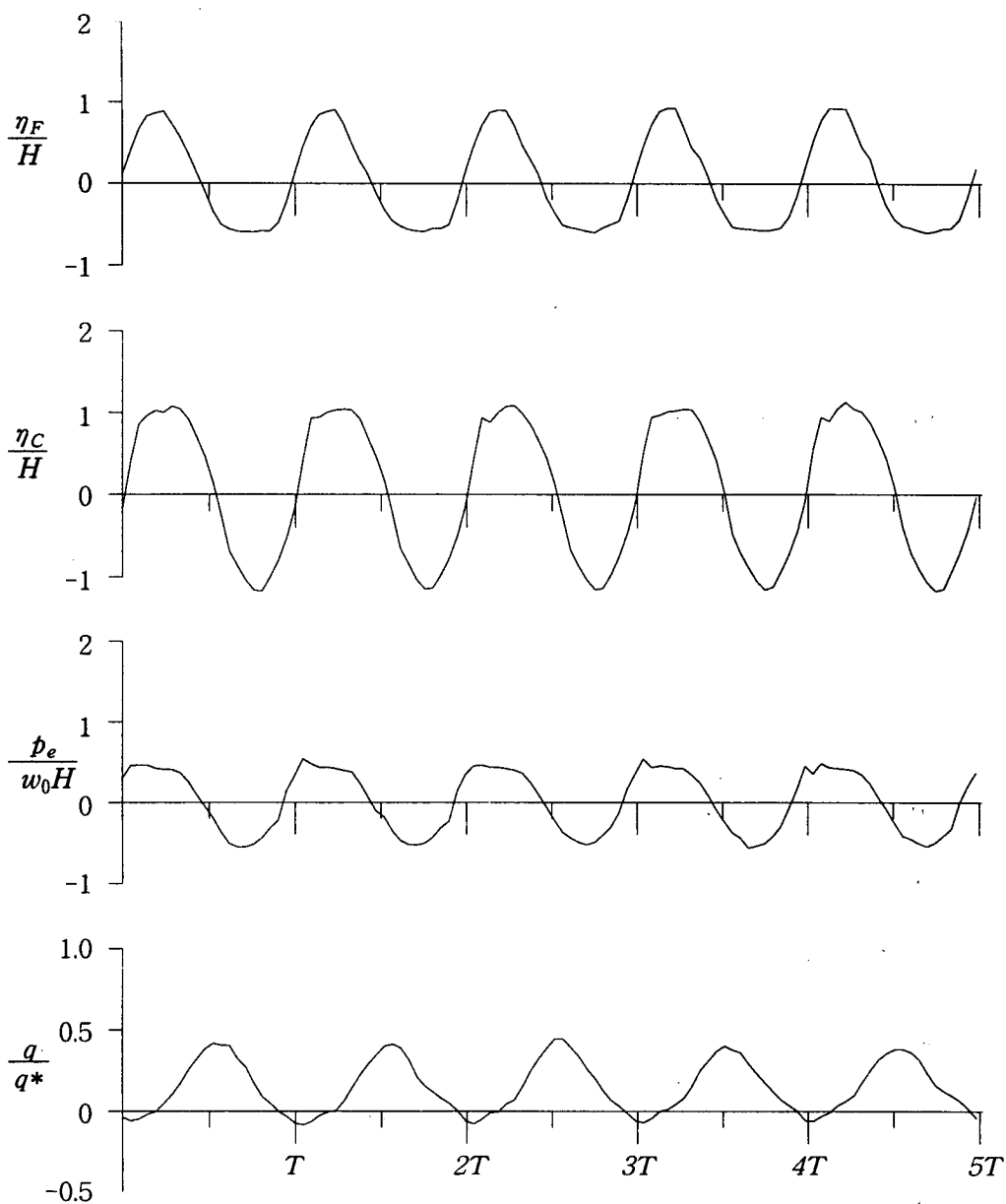


Fig. A4.25 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.054$ sec ($\omega^*=0.8$) & $H=7.5$ cm.

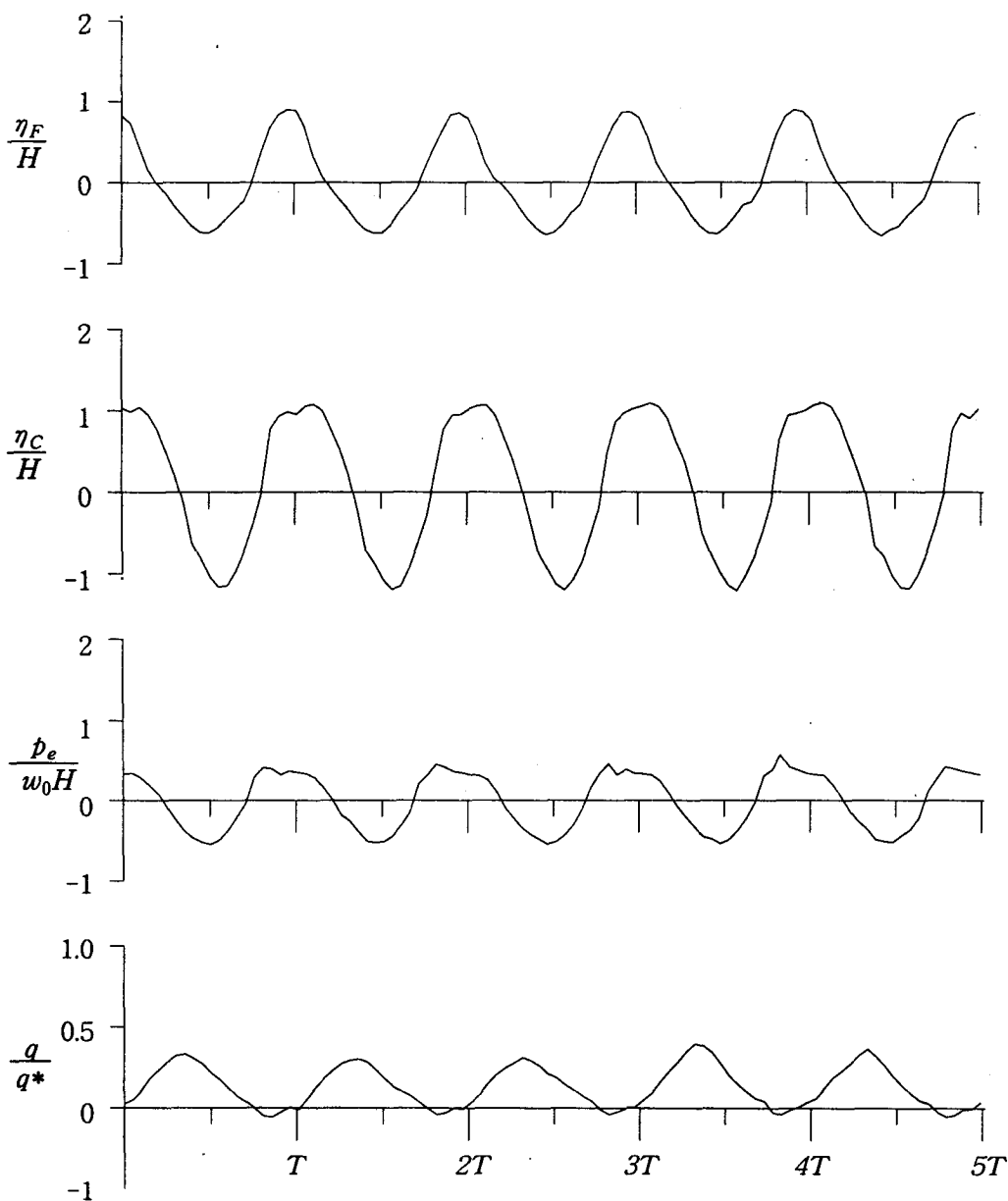


Fig. A4.26 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.992$ sec ($\omega^*=0.85$) & $H=7.6$ cm.

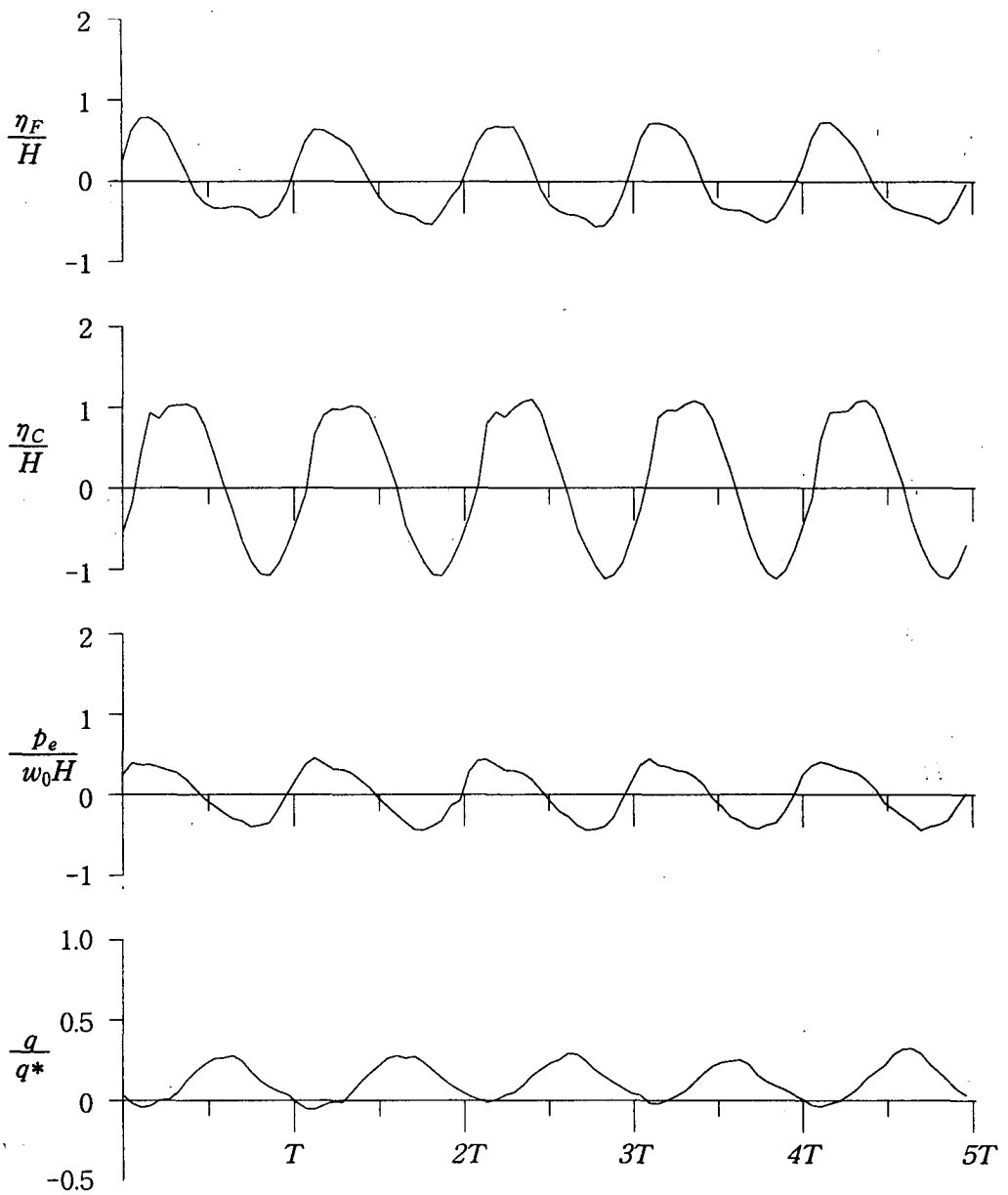


Fig. A4.27 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.937$ sec ($\omega^*=0.9$) & $H=7.7$ cm.

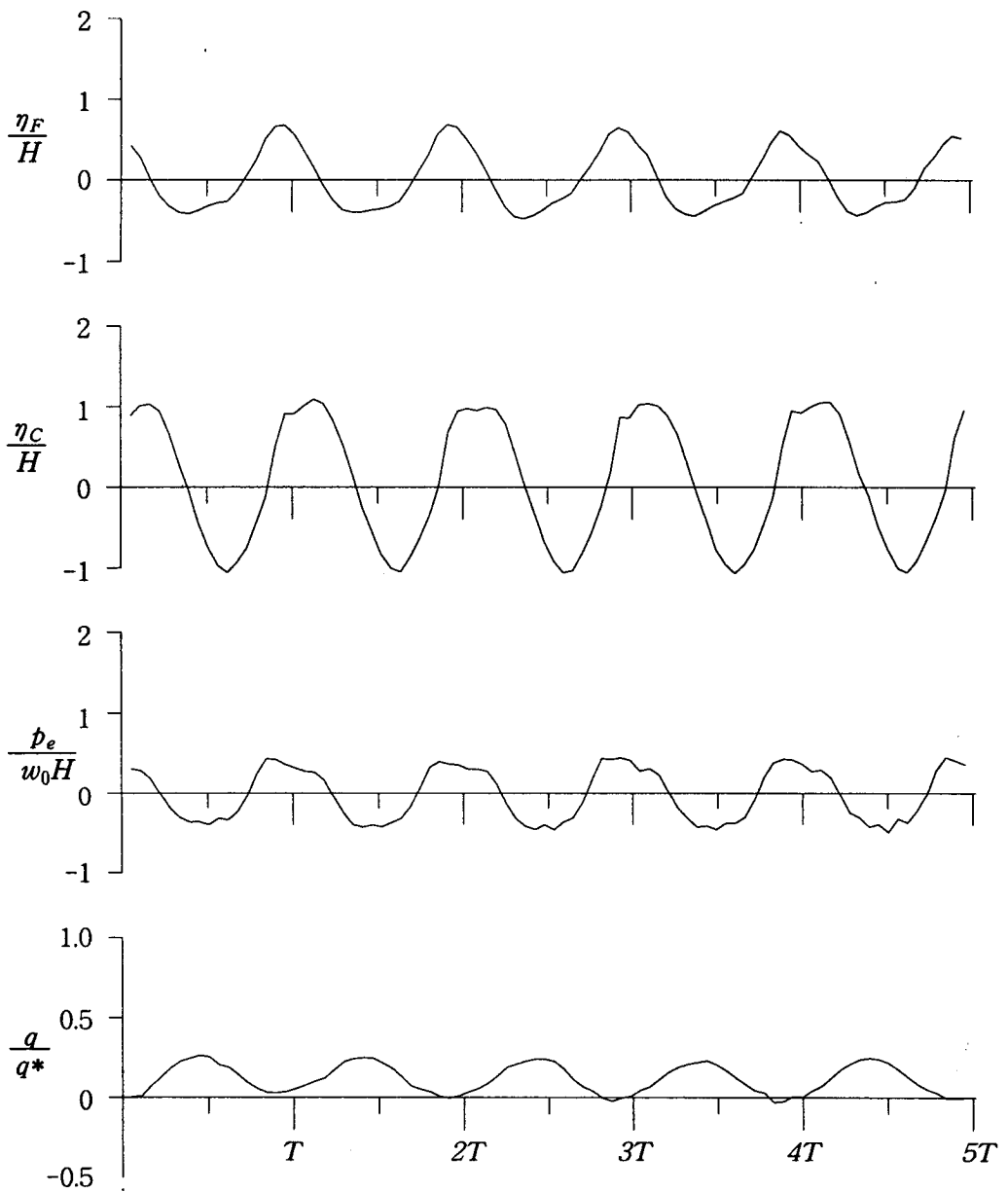


Fig. A4.28 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.888$ sec ($\omega^*=0.95$) & $H=7.5$ cm.

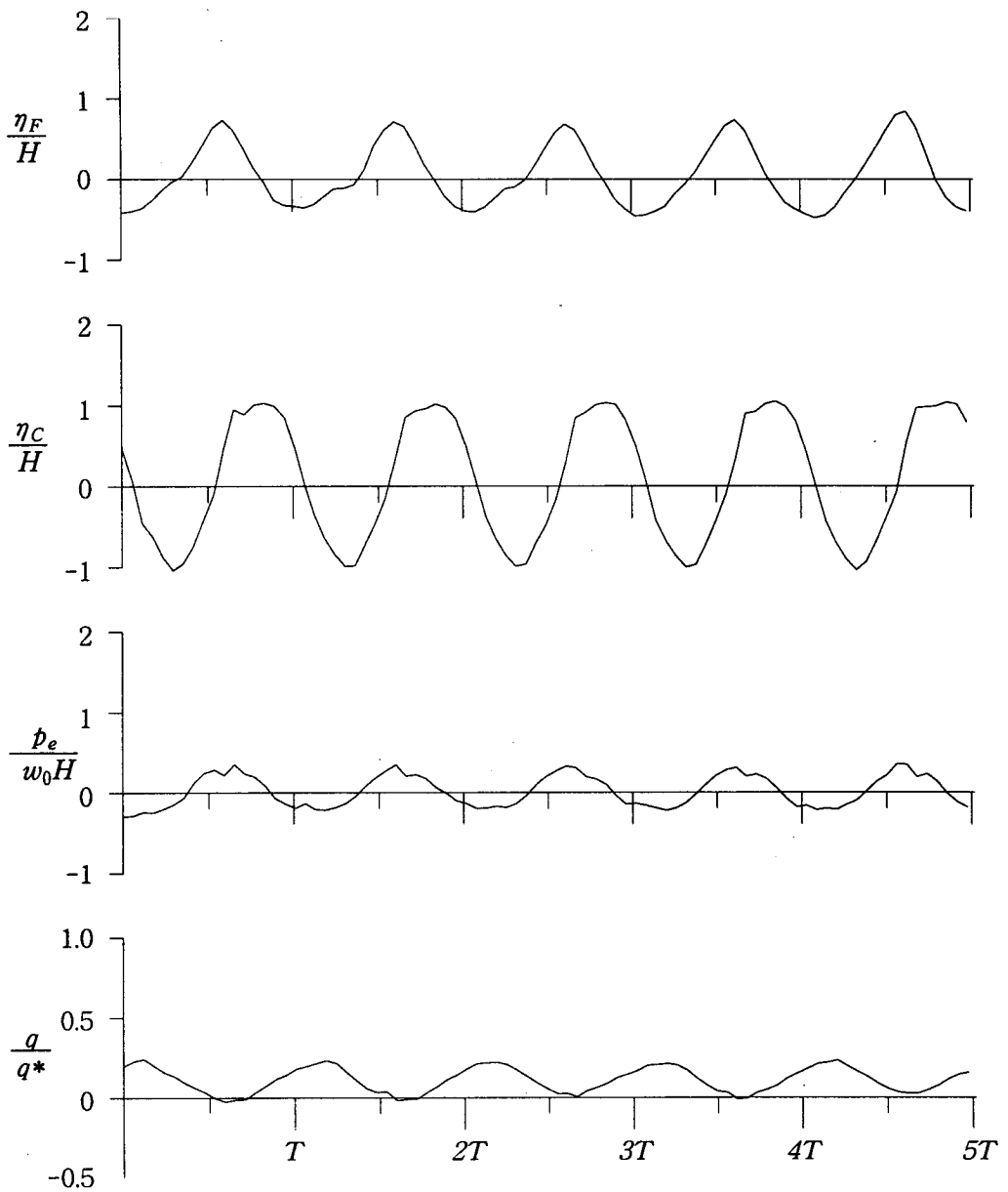


Fig. A4.29 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.844$ sec ($\omega^*=1.0$) & $H=7.4$ cm.

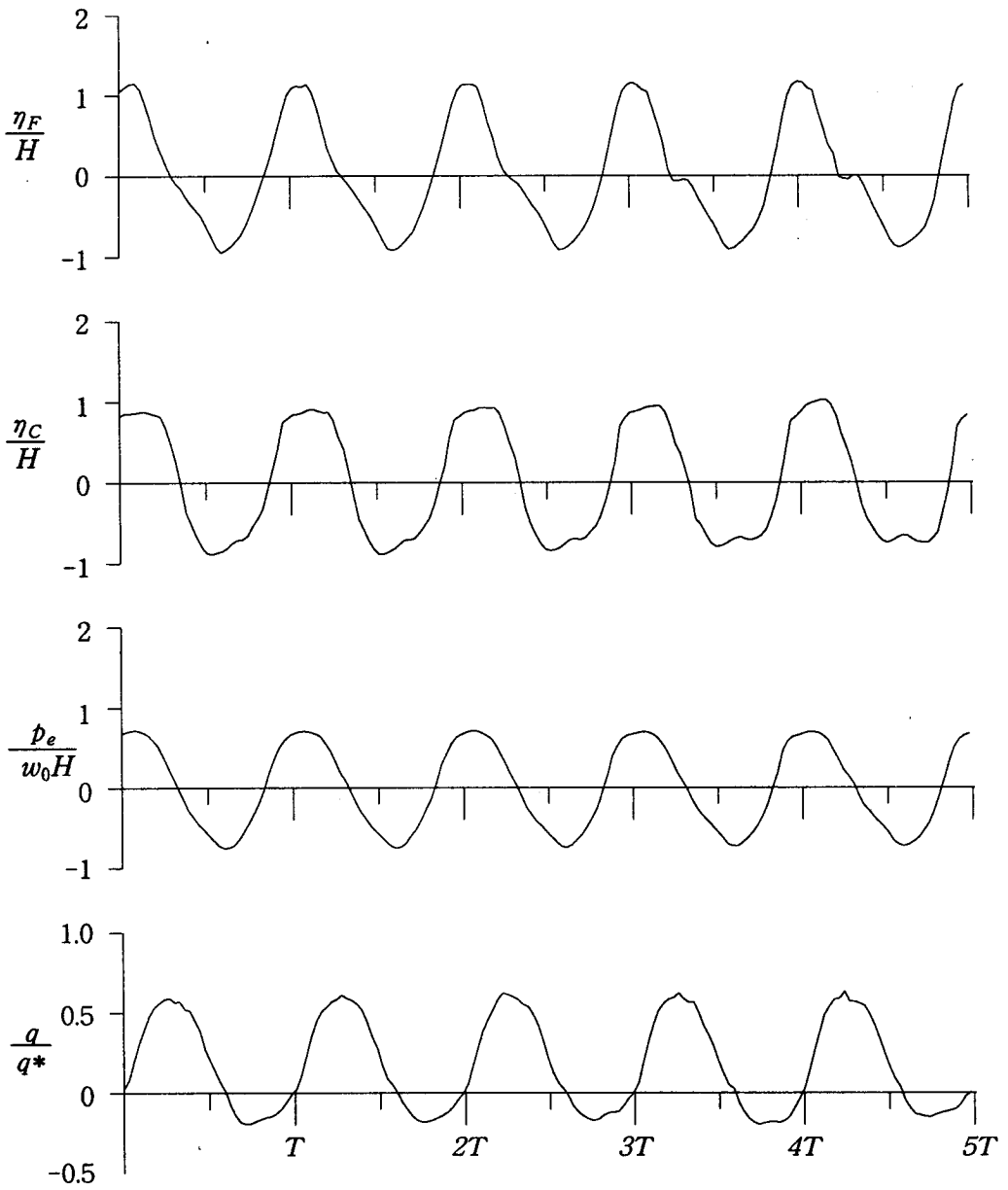


Fig. A4.30 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.687$ sec ($\omega^*=0.5$) & $H=9.6$ cm.

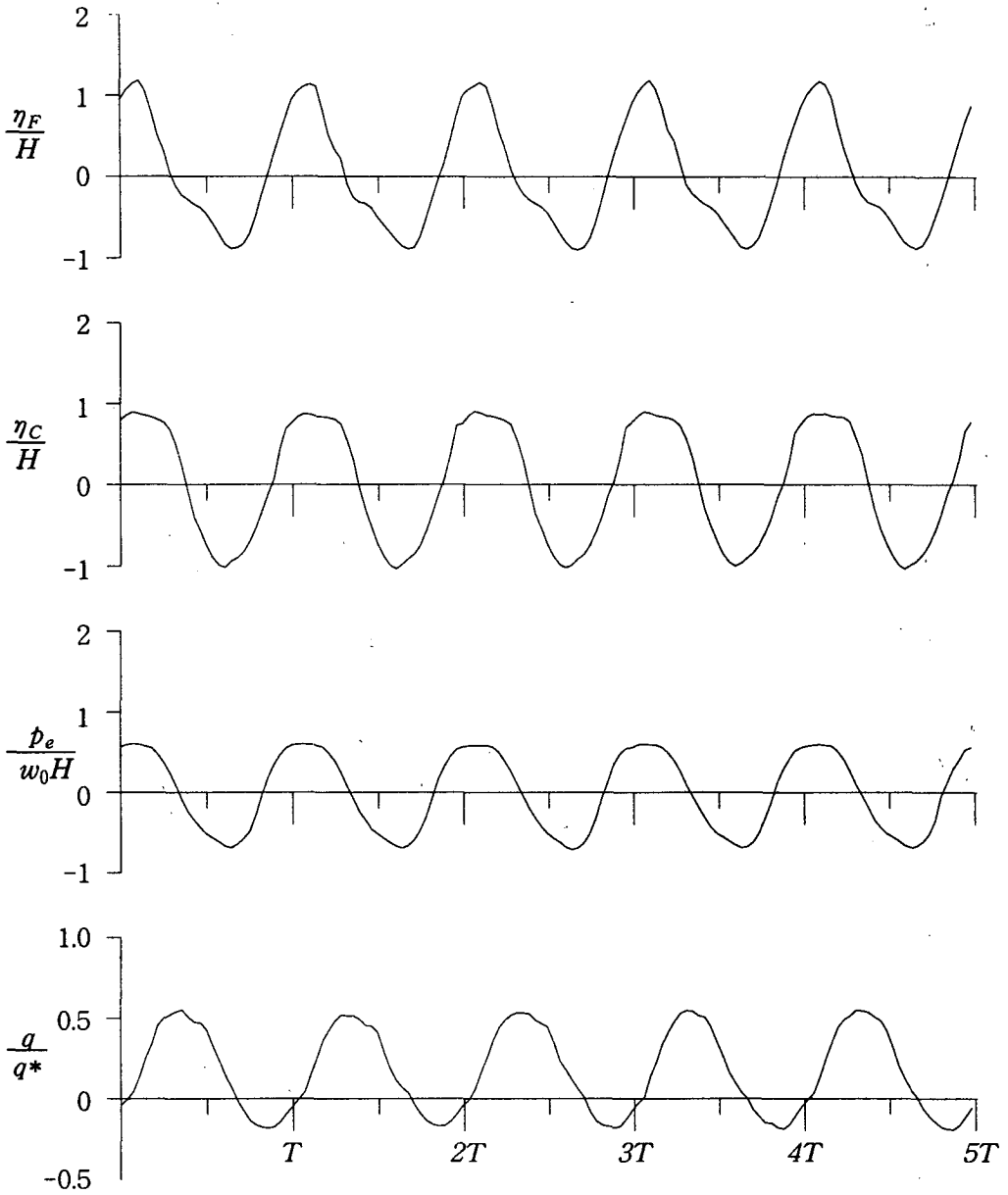


Fig. A4.31 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.406$ sec ($\omega^*=0.6$) & $H=9.6$ cm.

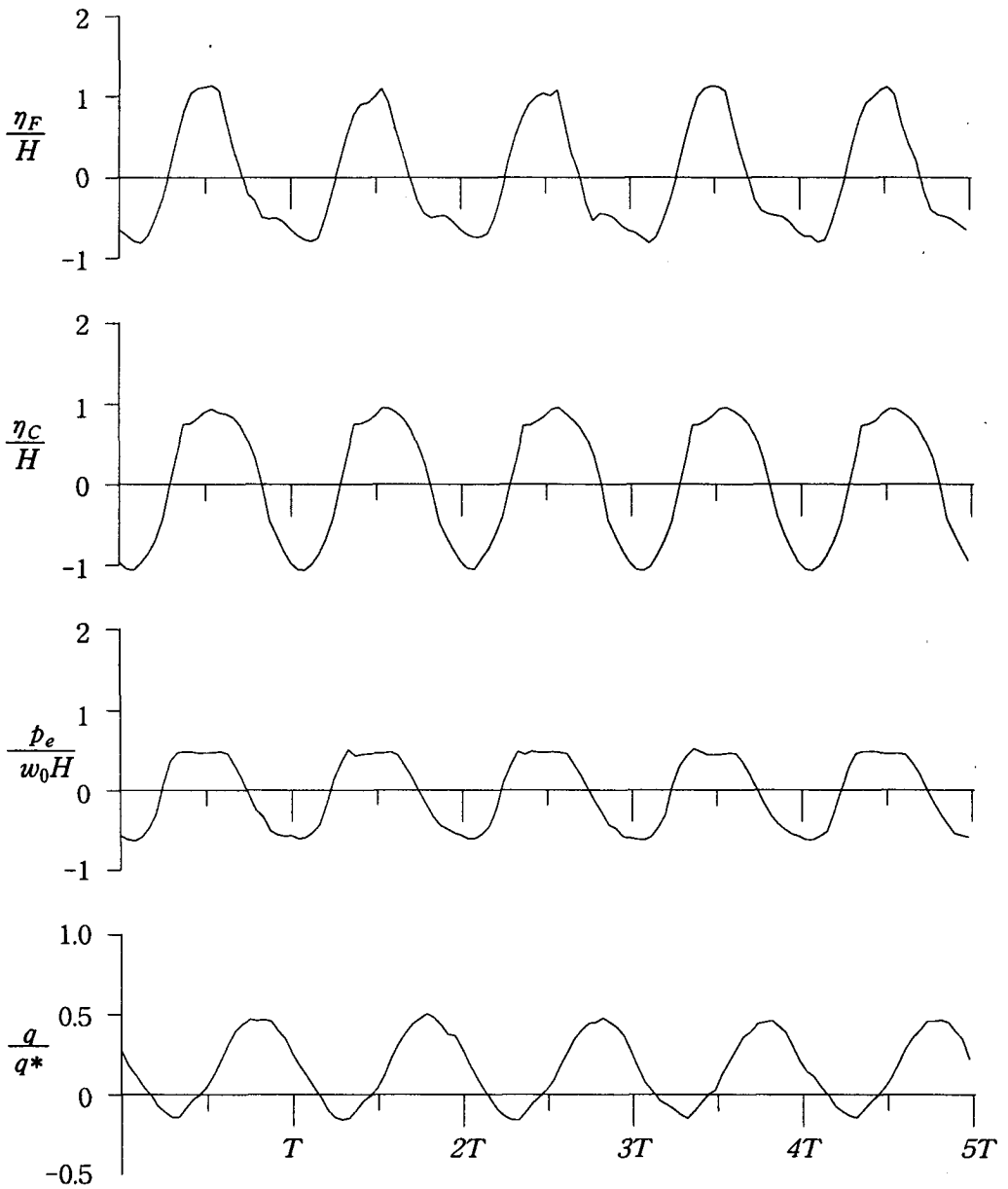


Fig. A4.32 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.205$ sec ($\omega^*=0.7$) & $H=9.6$ cm.

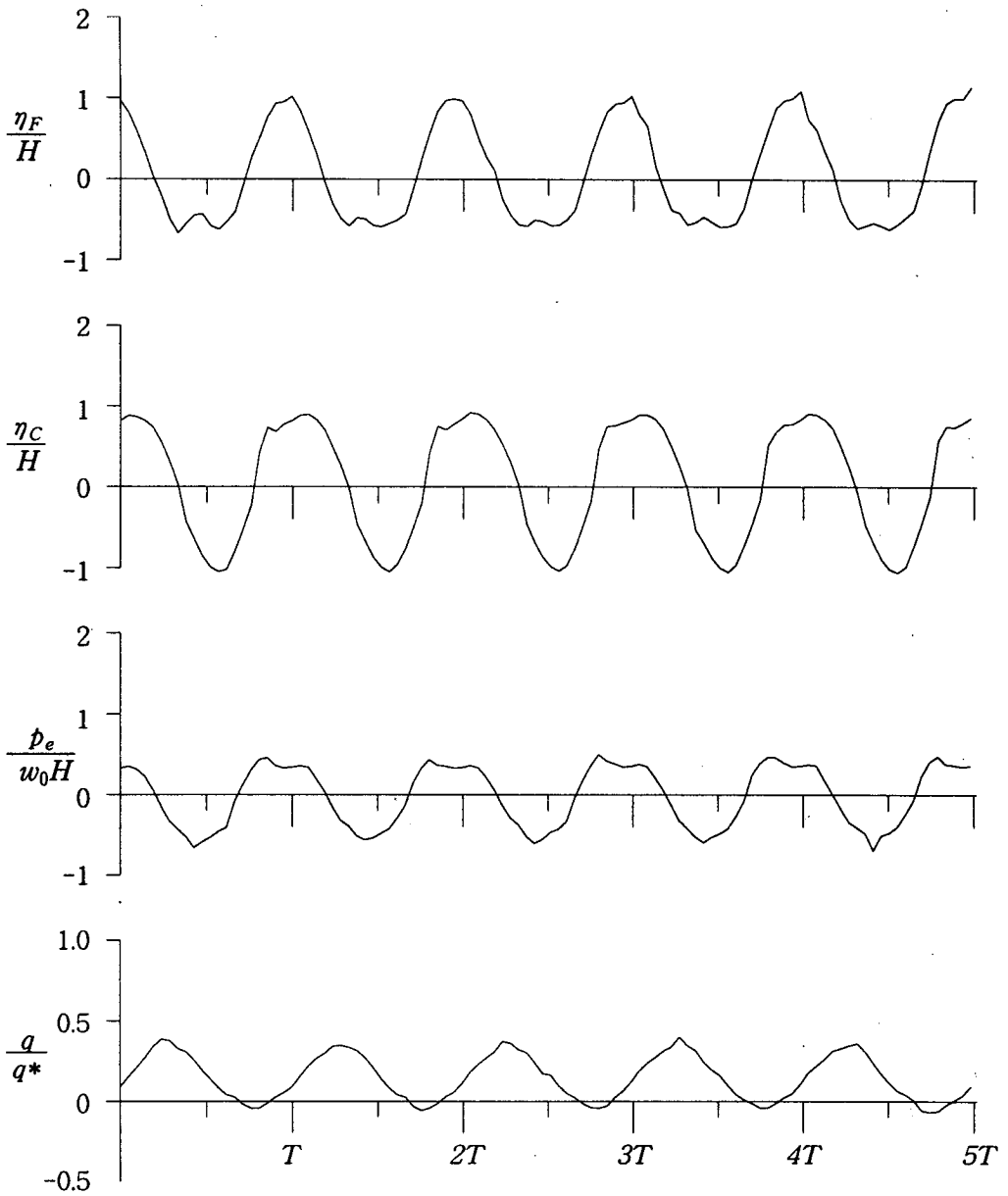


Fig. A4.33 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.054$ sec ($\omega^*=0.8$) & $H=9.7$ cm.

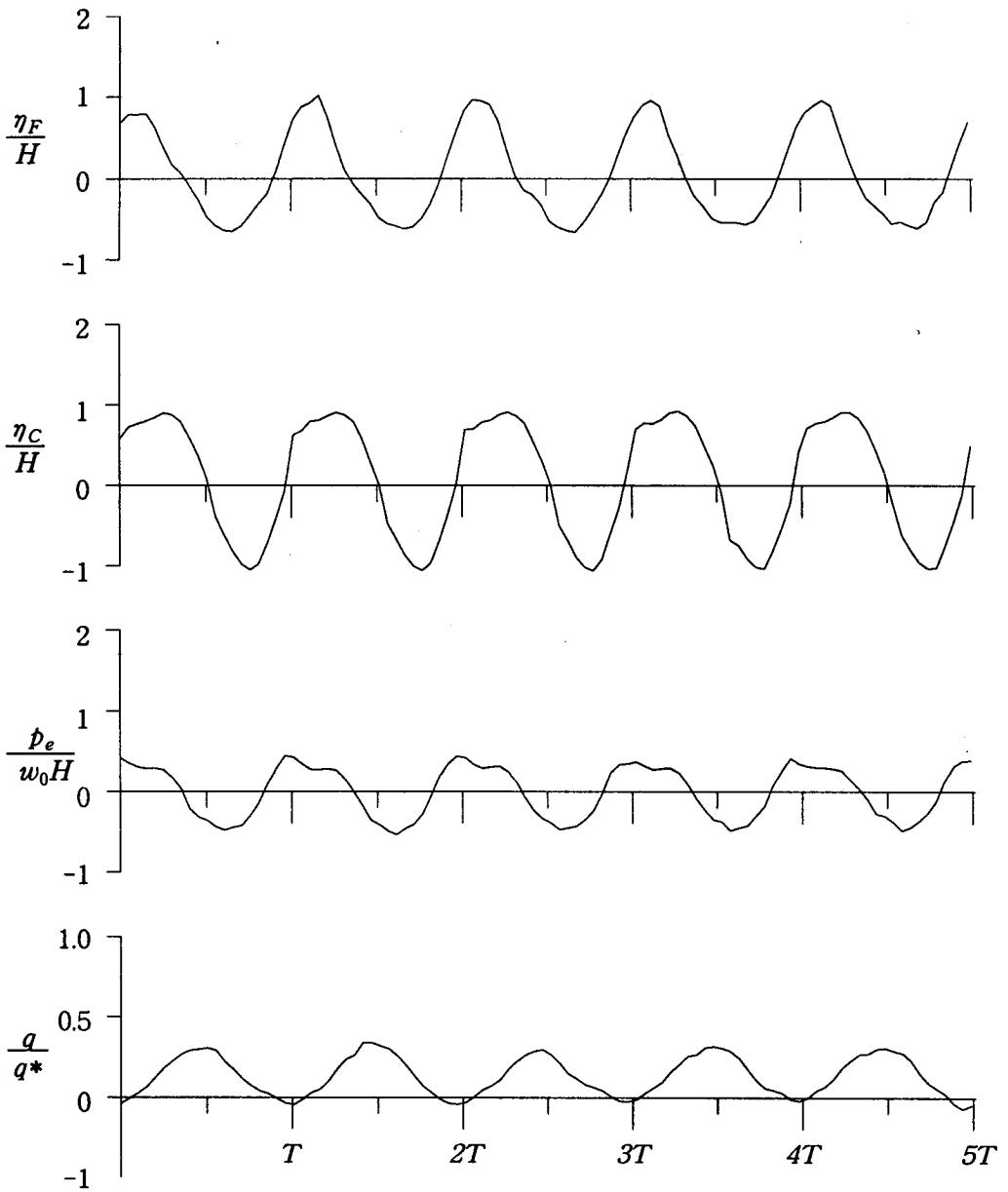


Fig. A4.34 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.992$ sec ($\omega^*=0.85$) & $H=9.6$ cm.

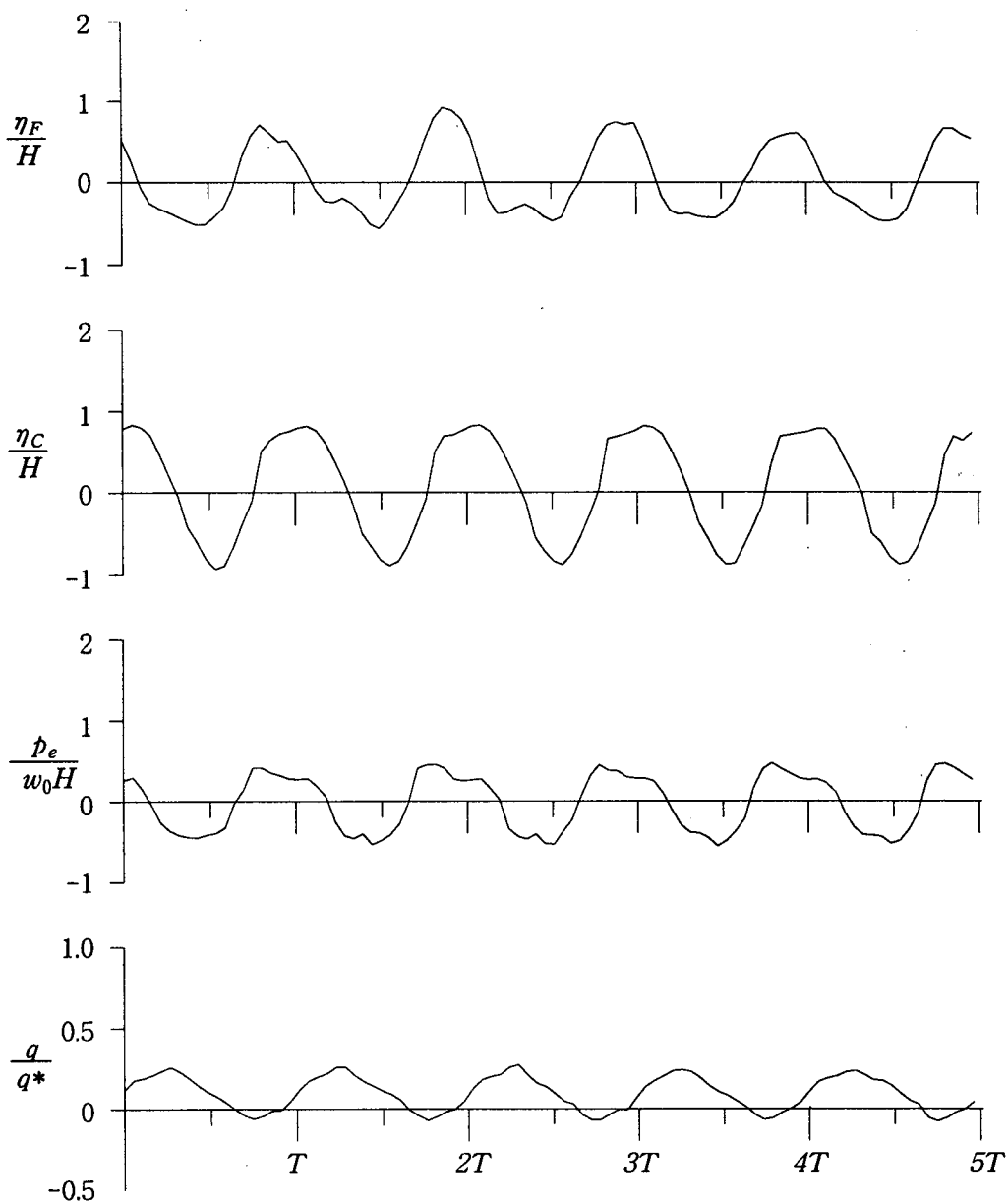


Fig. A4.35 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.937$ sec ($\omega^*=0.9$) & $H=10.5$ cm.

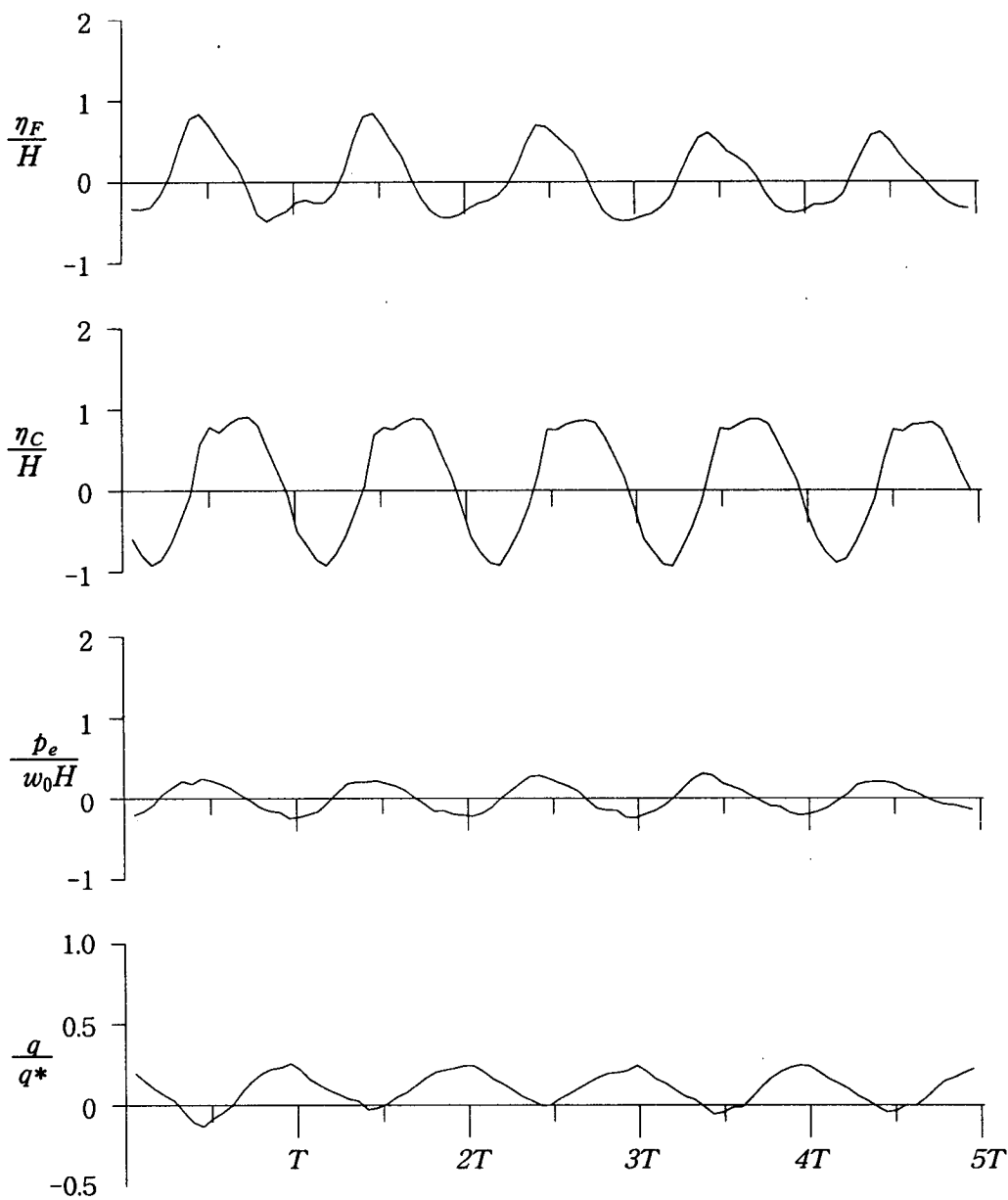


Fig. A4.36 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=0.888$ sec ($\omega^*=0.95$) & $H=9.4$ cm.

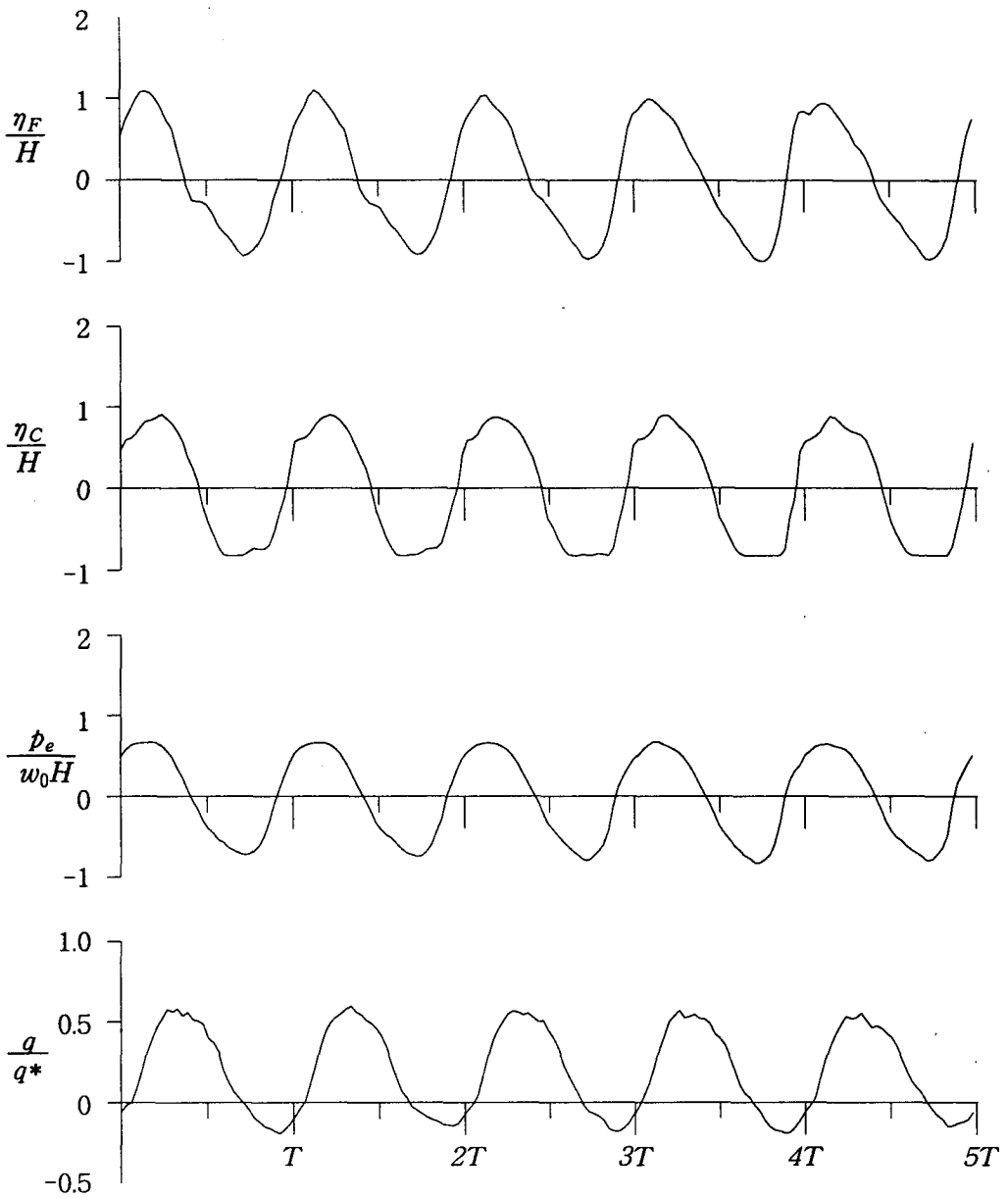


Fig. A4.37 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.687$ sec ($\omega^*=0.5$) & $H=12.5$ cm.

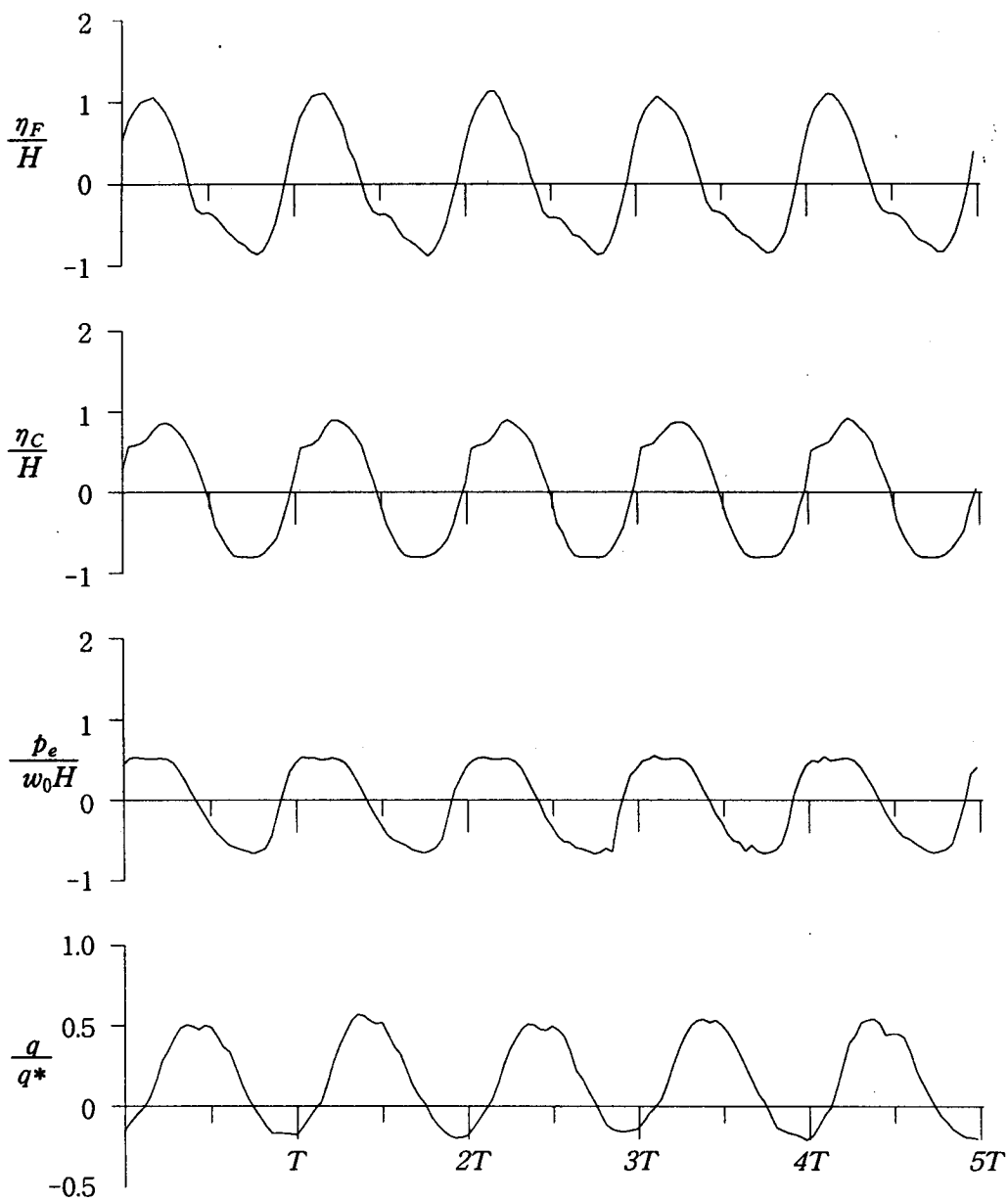


Fig. A4.38 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.406$ sec ($\omega^*=0.6$) & $H=12.8$ cm.

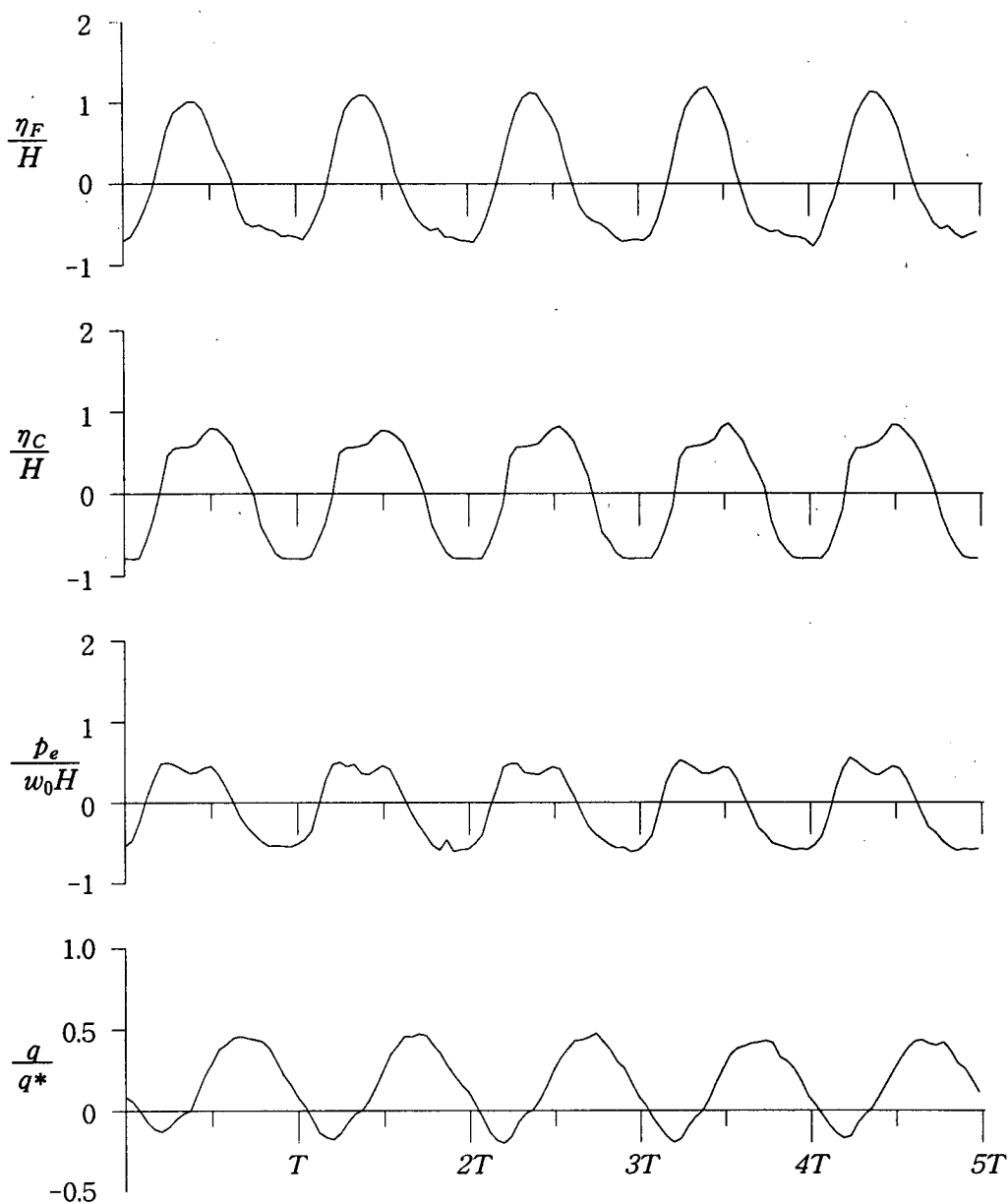


Fig. A4.39 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.205$ sec ($\omega^*=0.7$) & $H=13.0$ cm.

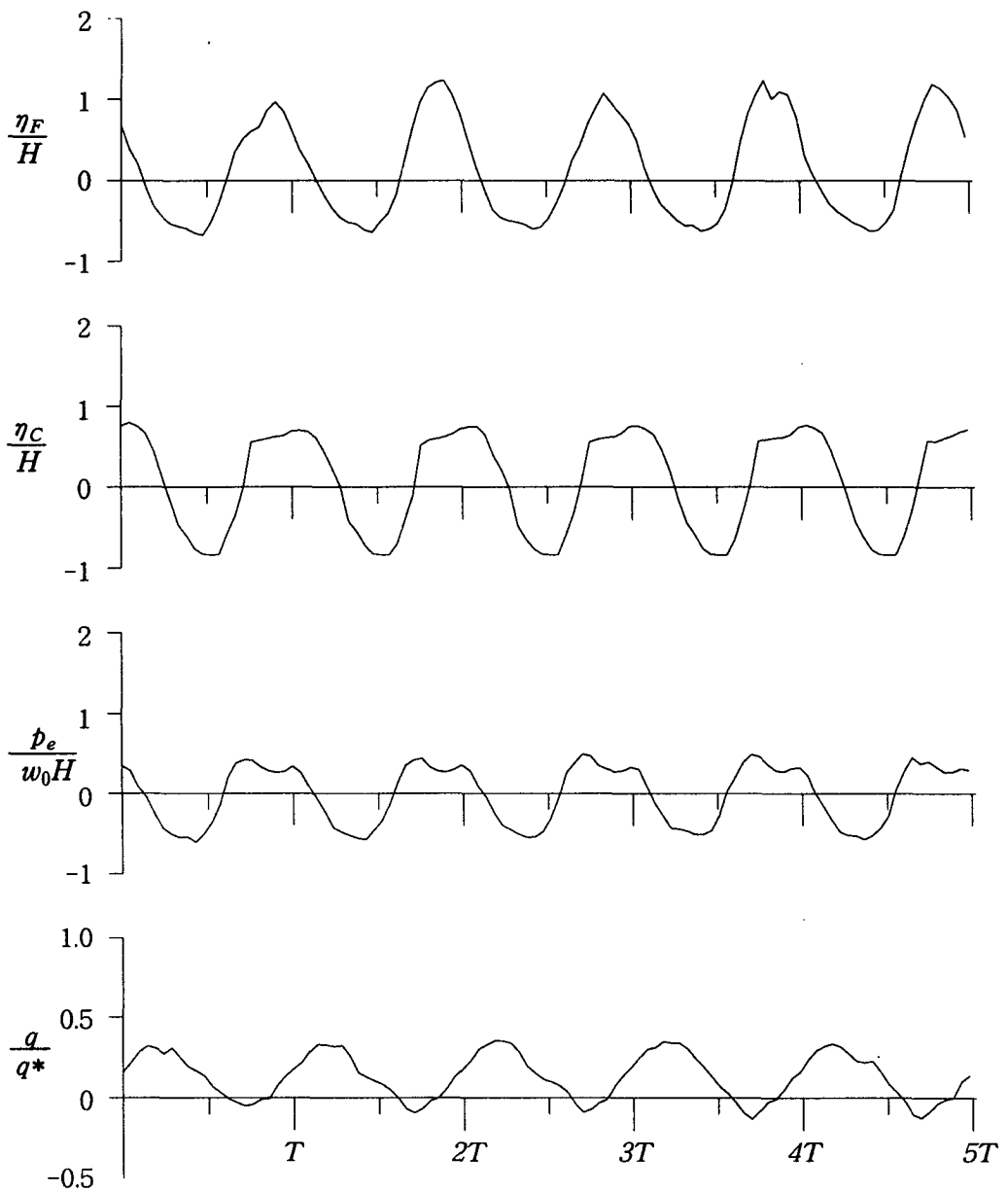


Fig. A4.40 Time series for water surface elevations at the front of the caisson (η_F) and inside of the circular channel (η_C), the hydrodynamic pressure at the entrance of the circular channel (p_e), and flow rate from the flow conduit (q) under the regular wave condition of $T=1.054$ sec ($\omega^*=0.8$) & $H=12.3$ cm.

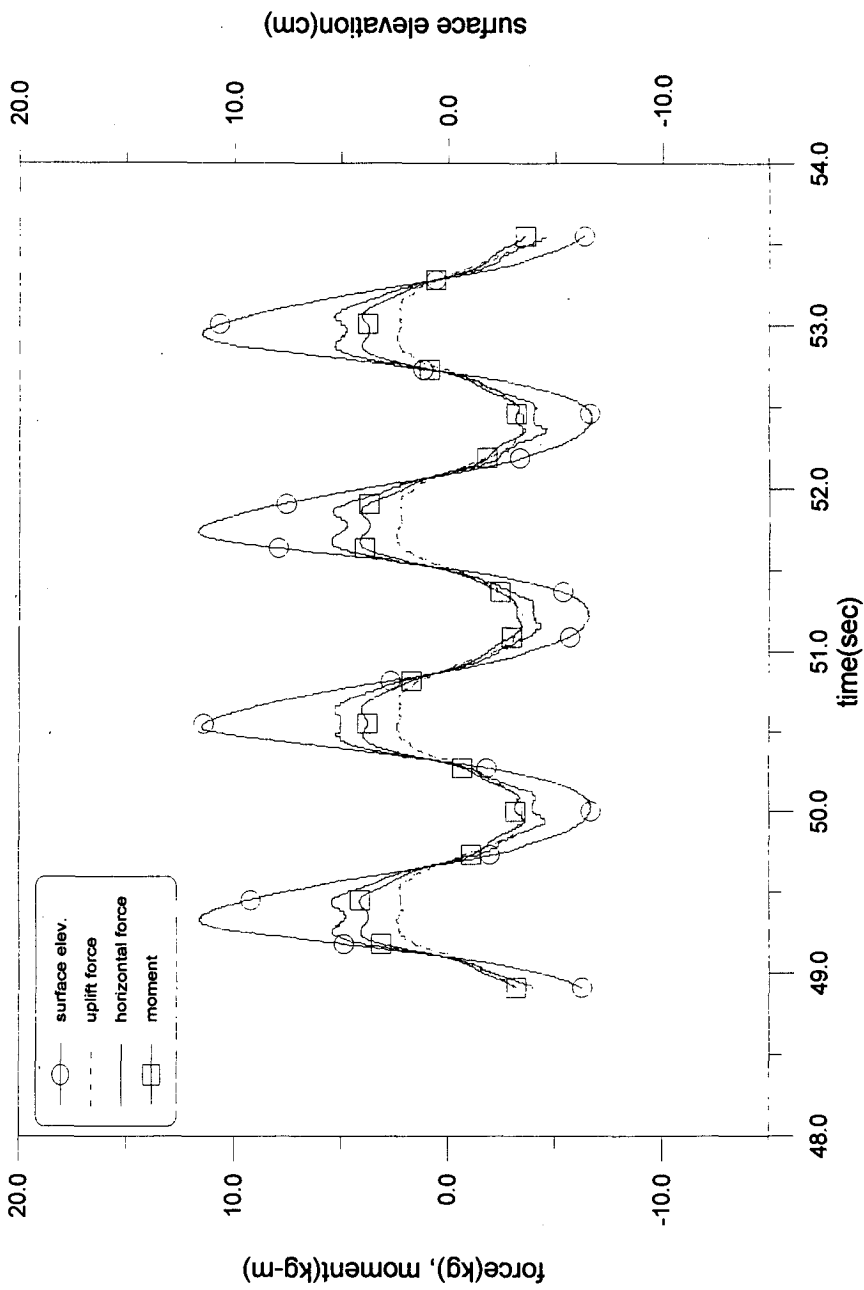


Fig. A5.1 Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson ($T=1.2s$, $H=9cm$)

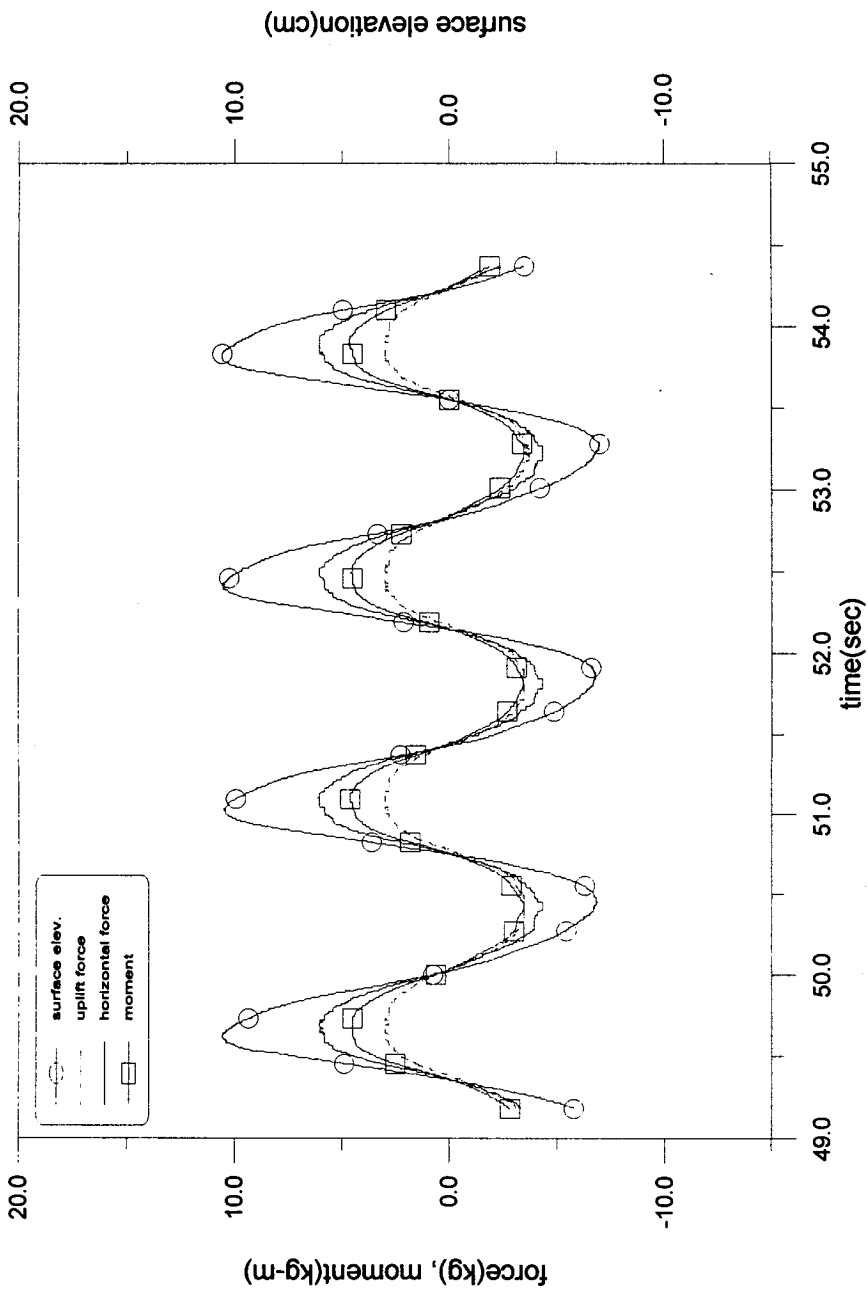


Fig. A5.2 Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson ($T=1.4s$, $H=9cm$)

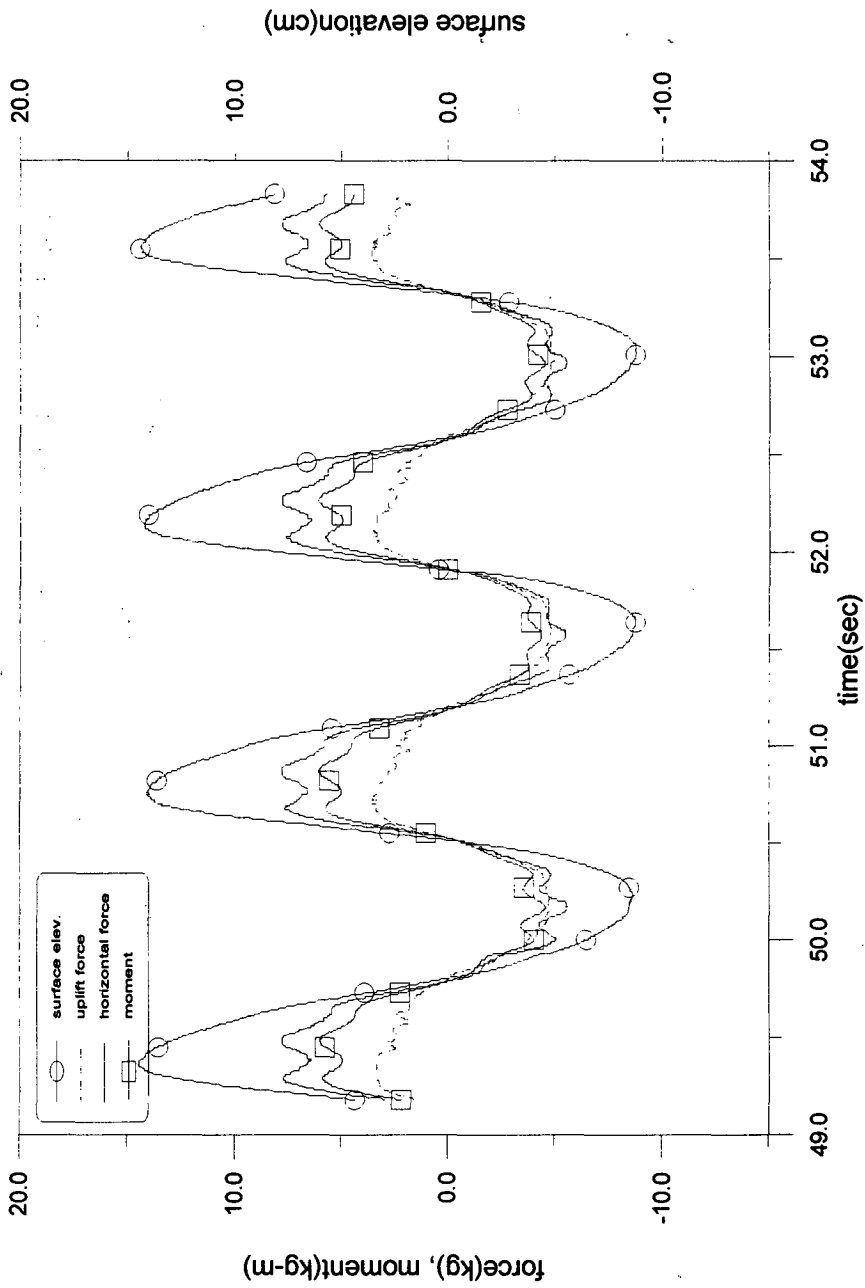


Fig. A3.3 Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson ($T=1.4s$, $H=12cm$)

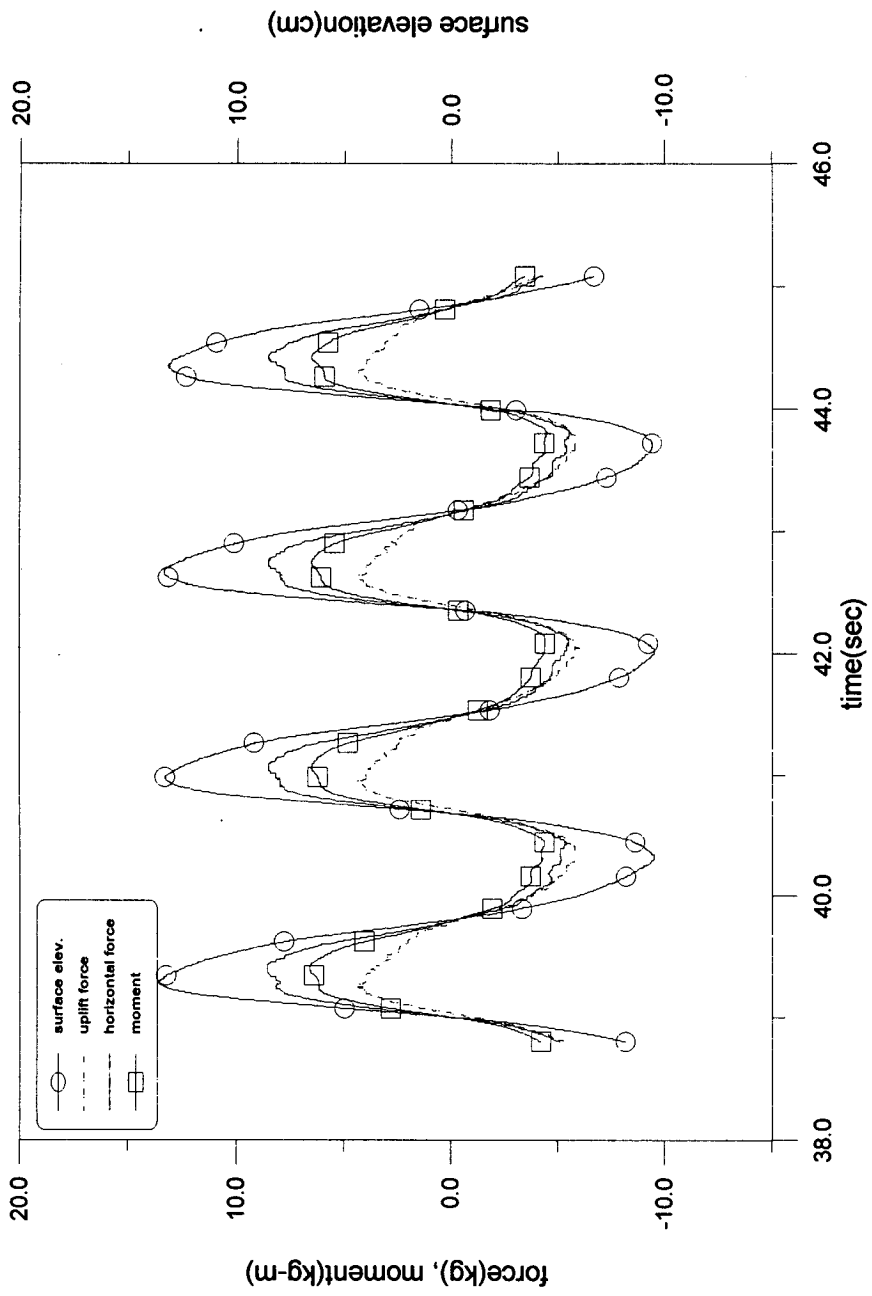


Fig. A5.4 Time series of wave forces and moment acting on the non-perforated wall caisson ($T=1.6s$, $H=12cm$)

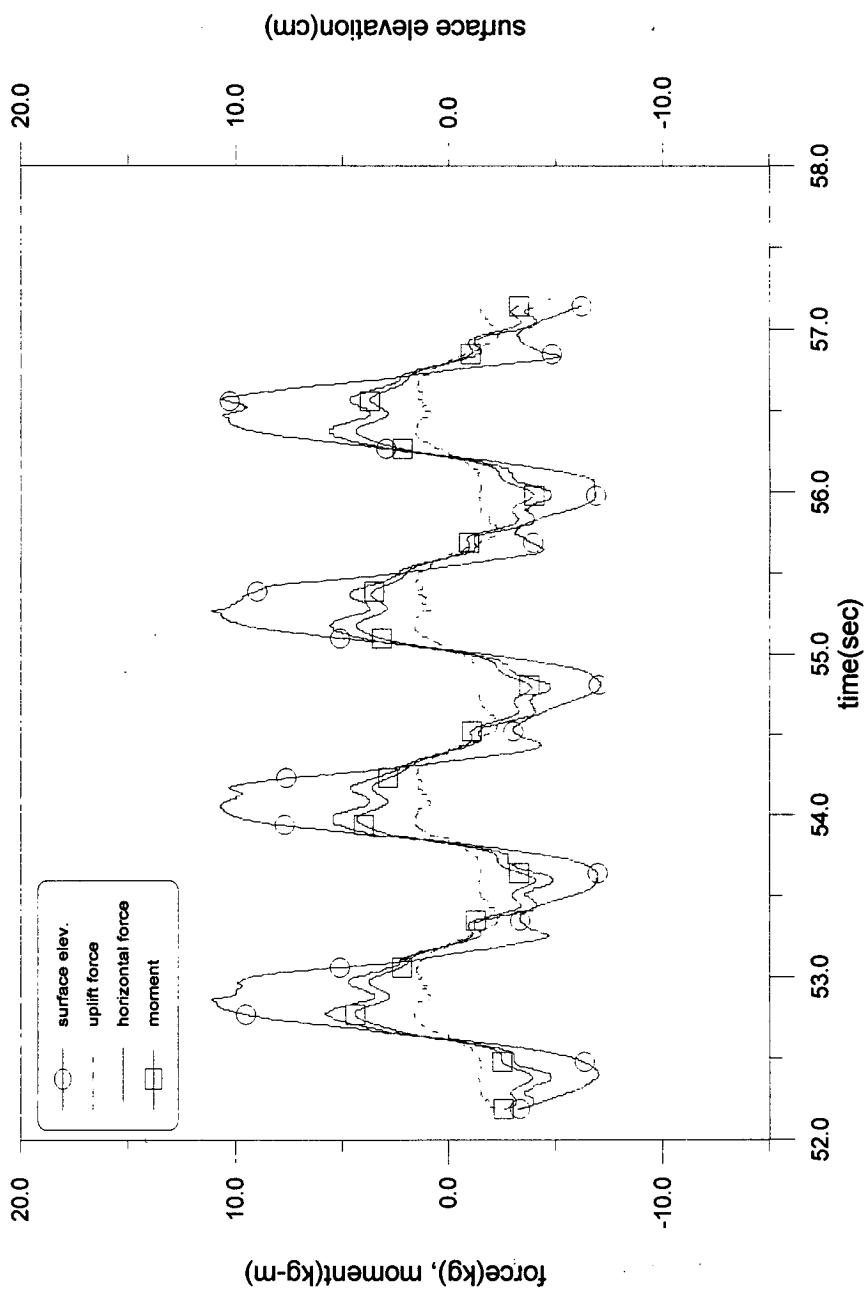


Fig. A5.5 Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson ($T=1.2s$, $H=9cm$)

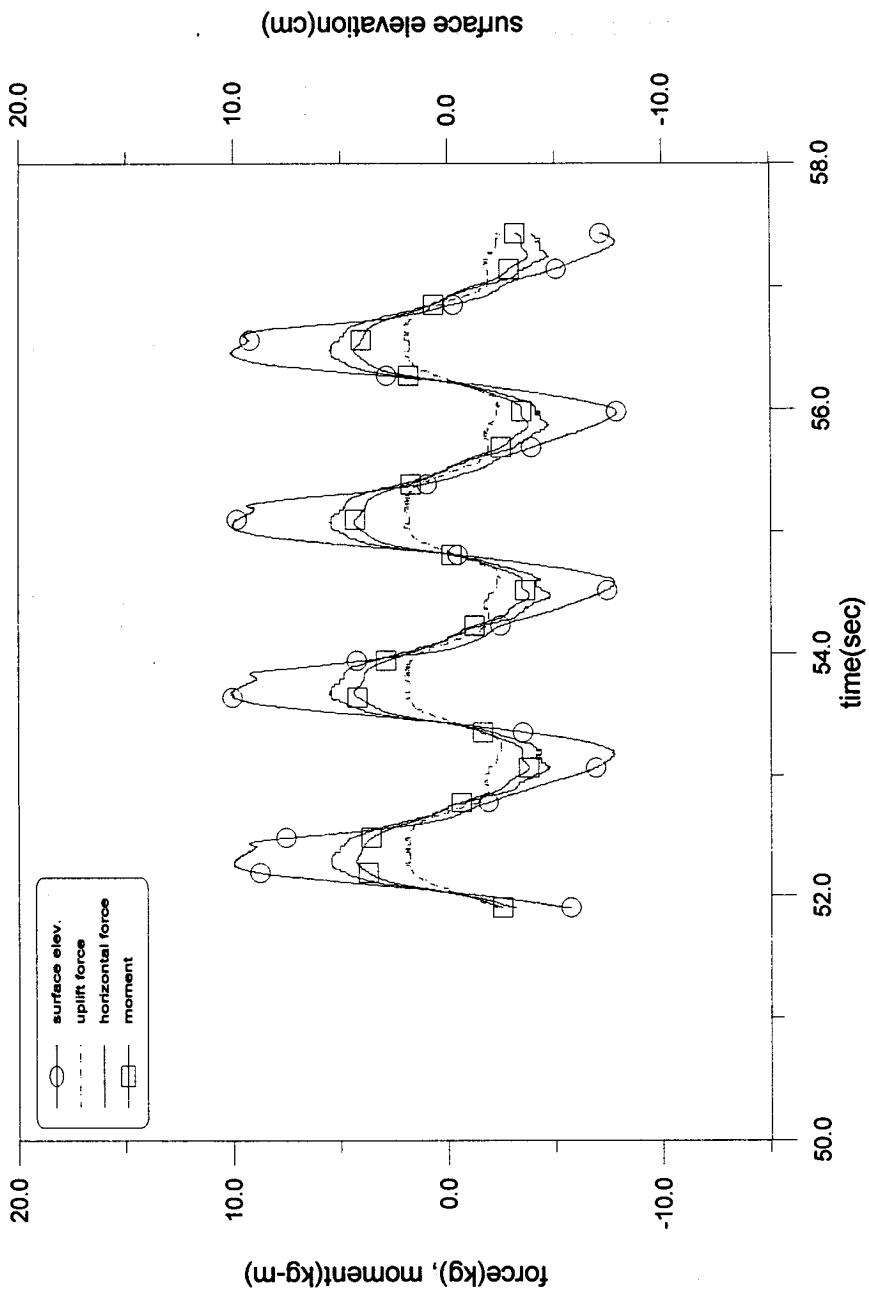


Fig. A5.6 Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson ($T=1.4s$, $H=9cm$)

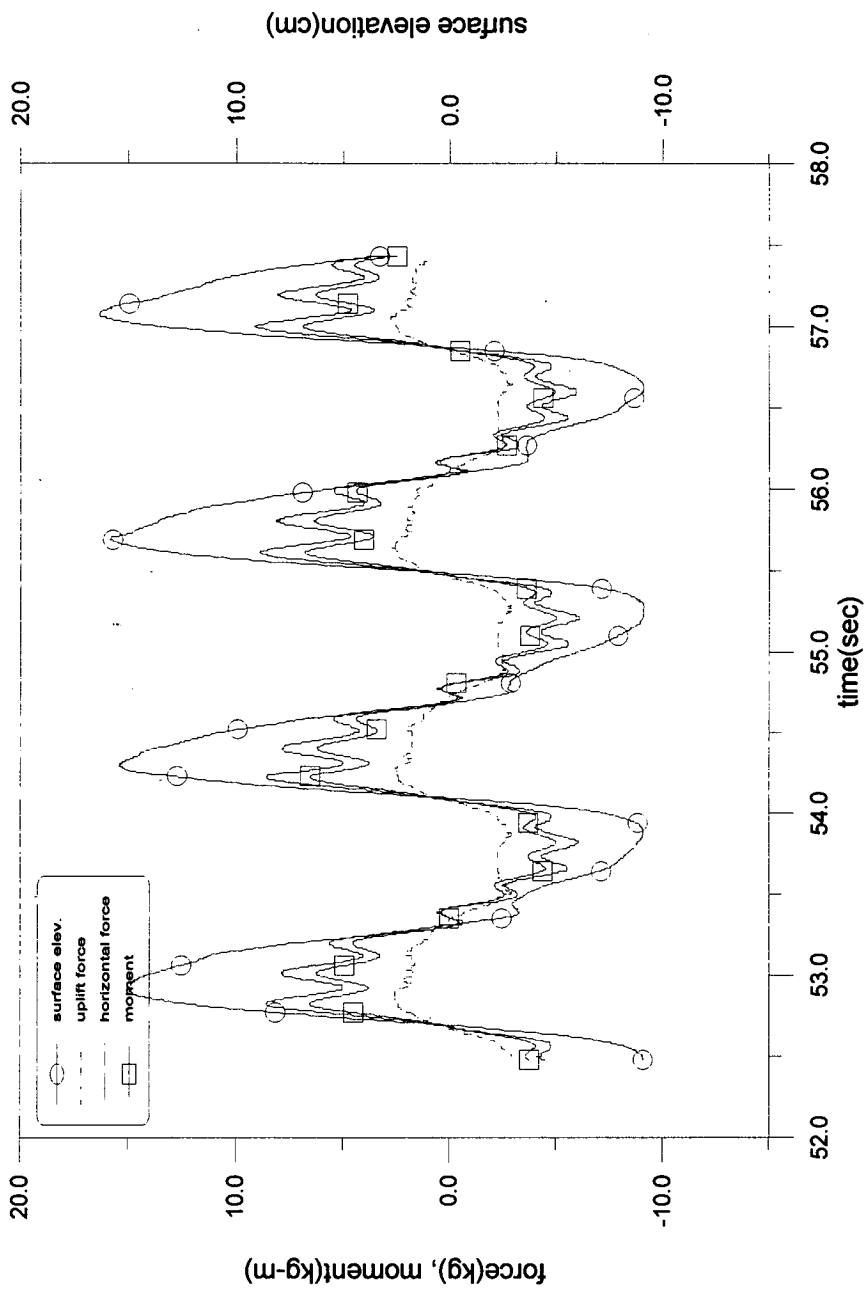


Fig. A5.7 Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson ($T=1.4s$, $H=12cm$)

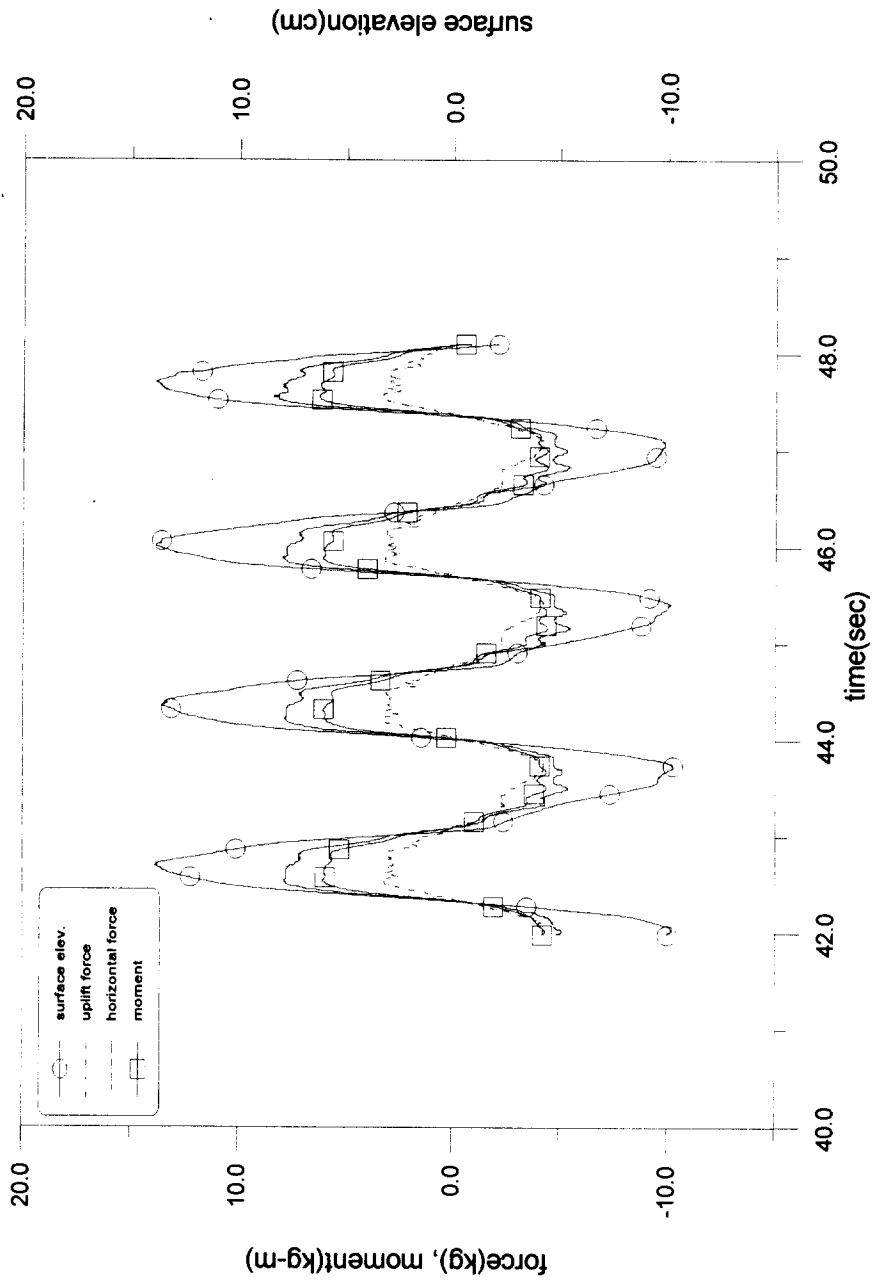


Fig. A5.8 Time series of wave forces and moment acting on the circular channel caisson ($T=1.6s$, $H=12cm$)

Table A1.1 Characteristics of wave data measured at station W
in Donghae Harbor.

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
9D 11H	1.15	8.66	6.34	0.71	2.97	1.97	1.18	19.90	8.75	7.71	46.8	23.0
9D 12H	1.12	8.63	6.54	0.68	3.31	1.79	1.11	10.72	8.66	7.77	55.6	35.5
9D 13H	1.03	8.55	6.46	0.73	3.12	1.78	1.02	10.44	8.44	7.76	50.5	31.5
9D 14H	1.02	8.58	6.81	0.67	3.24	1.81	1.00	10.71	8.62	7.92	52.0	28.9
9D 15H	0.86	9.08	6.53	0.70	3.08	1.38	0.86	10.20	8.54	7.79	60.1	39.4
9D 16H	0.86	8.71	6.41	0.77	3.71	1.28	0.86	10.64	8.60	7.96	55.1	31.3
9D 17H	0.84	8.24	5.53	0.80	3.26	1.42	0.85	10.41	7.57	6.94	56.1	36.0
9D 18H	0.84	8.21	4.44	0.75	2.42	1.45	0.84	10.10	6.46	5.21	53.6	34.2
9D 19H	0.74	9.65	4.76	0.78	2.44	1.42	0.77	11.33	7.04	5.71	58.8	40.7
9D 20H	0.69	9.63	4.65	0.75	2.04	1.15	0.71	9.86	6.49	5.31	57.5	40.9
9D 21H	0.74	10.24	4.16	0.73	2.28	1.32	0.76	10.03	6.22	4.99	54.4	40.3
9D 22H	0.65	8.62	4.84	0.76	2.56	1.20	0.68	9.79	6.16	5.18	53.5	39.7
9D 23H	0.55	9.66	5.10	0.76	2.85	1.02	0.57	11.07	6.50	5.64	60.1	35.4
10D 0H	0.57	9.08	5.65	0.77	3.69	0.99	0.58	10.20	7.26	6.31	59.0	31.8
10D 1H	0.53	9.12	5.14	0.76	3.64	1.07	0.55	11.03	6.34	5.40	54.7	37.6
10D 2H	0.52	9.04	4.87	0.75	2.72	1.08	0.54	9.73	6.07	5.03	58.3	37.1
10D 3H	0.50	8.63	5.20	0.73	3.61	0.73	0.49	10.16	7.42	6.78	57.8	32.4
10D 4H	0.50	8.58	5.26	0.74	3.21	0.78	0.50	10.86	7.44	6.73	61.0	34.1
10D 5H	0.45	8.19	5.65	0.71	2.69	0.75	0.43	10.19	7.85	7.09	61.8	33.5
10D 6H	0.43	8.66	5.41	0.71	2.40	0.65	0.42	10.38	7.55	6.84	61.0	36.6
10D 7H	0.43	8.16	5.46	0.72	2.34	0.74	0.42	10.74	7.73	6.88	59.5	37.5
10D 8H	0.39	8.19	4.83	0.68	1.80	0.68	0.39	10.16	6.71	5.86	61.9	44.8
10D 9H	0.43	9.08	5.11	0.62	2.05	0.67	0.43	10.49	6.84	5.99	69.5	44.7
10D 10H	0.36	8.63	5.34	0.64	2.26	0.63	0.36	9.83	6.62	5.99	67.2	41.8
10D 11H	0.33	8.57	5.29	0.64	1.99	0.55	0.34	10.31	7.11	6.46	46.0	42.6
10D 12H	0.36	8.63	4.90	0.68	1.72	0.64	0.38	10.23	5.86	5.15	55.9	40.3
10D 13H	0.37	9.08	4.18	0.64	1.64	0.59	0.38	8.70	5.91	4.99	63.7	45.4
10D 14H	0.36	8.69	4.18	0.63	1.65	0.53	0.36	9.30	6.29	5.27	59.6	54.8
10D 15H	0.34	8.64	3.92	0.63	1.73	0.61	0.37	9.00	5.07	3.87	57.4	54.4
10D 16H	0.31	9.09	4.64	0.66	1.68	0.52	0.32	9.24	5.71	4.85	77.6	44.8
10D 17H	0.28	8.65	4.37	0.61	1.57	0.55	0.33	9.33	4.94	3.96	71.7	53.6
10D 18H	0.31	5.41	4.38	0.56	1.96	0.57	0.32	8.74	5.66	4.91	15.3	45.4
10D 19H	0.31	5.60	4.03	0.60	1.71	0.58	0.32	8.37	5.59	4.56	45.4	61.3

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
10D 20H	0.30	4.93	4.33	0.59	1.82	0.46	0.30	9.83	5.80	4.83	71.1	59.9
10D 21H	0.34	4.92	4.33	0.52	2.22	0.63	0.36	8.71	5.55	4.83	105.5	54.4
10D 22H	0.31	3.94	4.09	0.51	1.94	0.53	0.31	8.90	5.43	4.48	120.7	61.9
10D 23H	0.31	4.50	4.26	0.54	1.96	0.60	0.30	8.70	5.69	4.85	55.2	59.1
11D 0H	0.34	5.07	4.34	0.55	2.08	0.57	0.34	8.76	5.83	4.88	138.4	49.7
11D 1H	0.32	5.60	4.39	0.56	1.97	0.56	0.32	8.53	5.83	5.01	108.1	54.4
11D 2H	0.34	6.25	4.50	0.55	2.11	0.55	0.33	8.24	6.08	5.29	121.0	33.0
11D 3H	0.31	4.05	4.29	0.54	1.90	0.49	0.31	8.60	5.93	4.88	118.9	47.4
11D 4H	0.31	4.63	4.37	0.57	2.02	0.55	0.32	8.28	5.90	4.90	125.9	43.4
11D 5H	0.34	5.61	4.24	0.54	2.03	0.55	0.35	7.76	5.62	4.75	111.0	52.9
11D 6H	0.39	5.07	4.10	0.53	1.96	0.64	0.38	7.89	5.41	4.60	117.2	61.9
11D 7H	0.36	5.42	3.90	0.53	1.90	0.55	0.37	7.65	5.21	4.26	110.3	55.8
11D 8H	0.34	4.15	3.74	0.52	1.84	0.62	0.35	7.50	5.12	4.19	130.4	46.6
11D 9H	0.34	4.05	3.82	0.50	1.95	0.69	0.35	8.69	4.94	4.19	129.3	46.2
11D 10H	0.30	5.42	3.99	0.50	2.18	0.46	0.31	8.89	5.25	4.47	82.2	57.3
11D 11H	0.29	5.22	4.03	0.52	1.93	0.53	0.29	9.57	5.53	4.60	126.1	62.9
11D 12H	0.30	5.25	4.17	0.52	2.15	0.55	0.30	9.29	5.45	4.65	50.1	57.6
11D 13H	0.28	4.38	3.92	0.53	1.89	0.48	0.30	7.58	5.15	4.46	119.2	58.8
11D 14H	0.34	5.80	4.06	0.52	2.13	1.10	0.34	8.50	5.30	4.55	291.6	73.4
11D 15H	0.27	3.86	3.84	0.48	2.15	0.53	0.28	7.35	5.04	4.24	118.4	47.8
11D 16H	0.29	5.23	3.96	0.52	1.93	0.79	0.29	9.00	5.33	4.28	60.7	55.7
11D 17H	0.29	5.41	4.06	0.51	1.86	0.46	0.29	8.91	5.57	4.66	30.3	49.0
11D 18H	0.29	4.76	4.10	0.52	1.89	0.54	0.29	9.79	5.73	4.65	44.1	52.6
11D 19H	0.29	4.64	4.12	0.50	1.91	0.52	0.29	9.66	5.54	4.79	34.9	52.4
11D 20H	0.32	4.38	4.07	0.51	1.89	0.64	0.32	7.87	5.51	4.53	26.1	51.1
11D 21H	0.31	5.08	3.98	0.51	1.92	0.58	0.32	8.31	5.40	4.55	93.0	56.9
11D 22H	0.30	4.15	4.07	0.56	1.69	0.46	0.30	9.18	5.68	4.83	29.3	42.9
11D 23H	0.32	3.60	3.89	0.52	1.93	0.61	0.33	8.87	5.51	4.33	39.9	52.0
12D 0H	0.38	7.79	3.98	0.54	2.06	0.65	0.37	8.95	5.52	4.48	28.1	28.7
12D 1H	0.37	7.39	4.28	0.60	1.94	0.59	0.37	10.77	6.38	5.15	17.7	33.6
12D 2H	0.37	7.11	4.39	0.59	1.98	0.62	0.36	8.59	6.43	5.35	21.9	35.0
12D 3H	0.43	7.09	4.83	0.63	2.99	0.67	0.42	9.00	6.89	6.12	14.3	29.7
12D 4H	0.44	6.77	5.07	0.62	2.67	0.71	0.44	9.23	6.99	6.18	23.0	27.5

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
12D 5H	0.48	7.07	5.16	0.63	3.06	0.73	0.47	9.22	7.10	6.39	27.8	31.5
12D 6H	0.56	7.06	5.23	0.65	3.41	0.99	0.56	10.49	7.20	6.46	17.3	34.1
12D 7H	0.63	7.12	5.44	0.66	4.43	1.05	0.63	8.73	7.12	6.59	21.7	32.4
12D 8H	0.60	7.39	5.32	0.65	3.87	1.10	0.59	8.44	7.02	6.47	17.6	29.5
12D 9H	0.59	6.81	4.51	0.63	2.44	0.94	0.60	9.12	6.39	5.55	16.4	38.6
12D 10H	0.57	7.08	4.12	0.59	2.13	0.83	0.56	8.11	5.68	4.72	17.6	40.2
12D 11H	0.61	6.79	4.28	0.60	2.66	0.94	0.61	8.63	5.90	5.05	21.2	27.2
12D 12H	0.60	6.55	4.26	0.58	2.04	1.00	0.60	8.05	5.98	5.13	16.1	25.8
12D 13H	0.58	6.52	4.39	0.58	2.18	1.13	0.58	8.38	6.14	5.19	23.9	29.5
12D 14H	0.56	6.54	4.30	0.57	1.99	0.79	0.56	9.11	6.01	5.05	25.5	34.4
12D 15H	0.52	6.52	4.21	0.57	2.00	0.82	0.51	8.17	5.80	4.91	29.1	34.6
12D 16H	0.57	6.51	4.35	0.55	2.05	1.15	0.57	8.74	6.06	5.21	23.7	30.1
12D 17H	0.55	10.28	4.60	0.60	1.82	0.93	0.54	9.76	6.24	5.44	51.0	26.2
12D 18H	0.47	6.80	4.27	0.56	2.00	0.73	0.47	8.06	6.02	5.19	27.1	45.5
12D 19H	0.48	6.26	4.42	0.56	2.27	0.77	0.48	9.63	6.03	5.21	19.6	39.9
12D 20H	0.47	6.53	4.55	0.58	2.37	0.98	0.45	7.57	6.12	5.30	18.0	45.4
12D 21H	0.49	6.26	4.65	0.58	2.67	0.71	0.49	8.10	6.31	5.42	33.4	35.3
12D 22H	0.44	6.04	4.57	0.56	2.29	0.73	0.44	8.66	6.26	5.41	17.5	37.0
12D 23H	0.45	6.30	4.60	0.54	2.29	0.85	0.45	8.40	6.22	5.34	17.6	39.9
13D 0H	0.43	6.26	4.56	0.54	2.96	0.73	0.43	7.61	6.17	5.46	15.2	36.6
13D 1H	0.45	5.77	4.65	0.52	2.36	0.69	0.45	7.81	5.97	5.17	12.7	46.9
13D 2H	0.45	6.03	4.67	0.54	2.69	0.73	0.44	7.97	6.14	5.49	43.7	37.6
13D 3H	0.45	5.85	4.45	0.56	2.55	0.81	0.45	8.17	5.89	4.94	38.4	33.8
13D 4H	0.47	5.81	3.81	0.56	1.98	0.87	0.48	7.66	5.20	4.34	35.9	37.8
13D 5H	0.52	6.26	3.74	0.55	1.94	0.89	0.54	7.69	4.83	4.08	25.6	41.2
13D 6H	0.56	5.59	3.86	0.50	1.97	0.93	0.58	8.73	5.18	4.35	50.2	31.6
13D 7H	0.57	4.04	3.93	0.49	2.19	1.01	0.57	8.28	5.13	4.39	71.3	32.5
13D 8H	0.58	4.48	3.93	0.49	2.33	1.01	0.58	6.77	5.25	4.34	72.8	34.9
13D 9H	0.60	4.78	3.97	0.48	2.35	1.16	0.61	7.03	5.09	4.43	81.7	37.2
13D 10H	0.67	4.26	4.07	0.46	2.62	1.20	0.66	7.09	5.11	4.41	71.2	35.8
13D 11H	0.71	4.64	4.24	0.48	2.74	1.45	0.70	7.22	5.35	4.63	78.3	34.5
13D 12H	0.72	4.51	4.17	0.47	3.25	1.50	0.71	7.68	5.27	4.66	87.2	31.8
13D 13H	0.69	5.07	4.33	0.49	3.04	1.24	0.70	7.28	5.46	4.77	90.9	35.8
13D 14H	0.82	5.59	4.53	0.54	4.41	1.45	0.84	7.81	5.56	5.01	103.2	24.1

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
13D 15H	0.91	5.24	4.33	0.54	3.85	1.77	0.92	7.13	5.53	4.92	98.2	29.7
13D 16H	0.87	5.23	3.98	0.51	2.90	1.51	0.86	7.34	5.34	4.51	97.1	32.3
13D 17H	0.83	5.09	3.85	0.49	2.43	1.42	0.84	6.89	5.13	4.49	94.2	40.6
13D 18H	0.78	5.81	3.97	0.53	2.39	1.26	0.81	7.19	5.27	4.54	82.4	41.8
13D 19H	0.79	5.24	4.05	0.49	2.51	1.48	0.81	7.19	5.27	4.45	88.4	45.7
13D 20H	0.80	5.08	4.16	0.54	2.20	1.27	0.81	8.26	5.59	4.87	86.7	44.7
13D 21H	0.81	5.25	4.02	0.54	2.11	1.30	0.81	7.49	5.41	4.59	67.5	43.1
13D 22H	0.76	5.41	4.05	0.54	1.94	1.38	0.76	7.51	5.27	4.57	70.6	51.5
13D 23H	0.77	5.10	4.04	0.51	2.20	1.25	0.76	8.53	5.29	4.50	59.9	38.7
14D 0H	0.84	4.03	3.88	0.48	2.45	1.38	0.84	6.93	4.94	4.33	358.1	21.7
14D 1H	0.83	4.27	4.01	0.51	2.10	1.37	0.83	9.06	5.29	4.55	5.4	28.1
14D 2H	0.84	4.25	4.16	0.51	2.26	1.36	0.83	8.81	5.50	4.78	4.3	28.1
14D 3H	0.78	5.38	4.38	0.55	2.25	1.16	0.78	7.90	5.75	4.95	52.0	41.6
14D 4H	0.85	5.09	4.50	0.53	2.77	1.59	0.83	9.25	5.83	5.12	63.0	39.9
14D 5H	0.87	5.60	4.81	0.57	2.57	1.38	0.86	8.27	6.14	5.45	73.0	43.0
14D 6H	0.90	5.45	4.94	0.58	2.32	1.44	0.90	9.88	6.82	5.87	58.9	39.7
14D 7H	0.88	5.78	4.90	0.56	2.40	1.23	0.86	9.22	6.39	5.57	45.0	50.8
14D 8H	0.90	6.47	5.00	0.54	2.56	1.61	0.89	8.72	6.48	5.60	17.4	49.2
14D 9H	0.94	6.79	5.16	0.54	3.01	1.80	0.92	8.60	6.46	5.73	10.1	50.8
14D 10H	0.88	6.02	5.04	0.53	3.20	1.24	0.87	8.91	6.46	5.56	25.1	38.6
14D 11H	0.81	6.26	4.95	0.54	2.54	1.54	0.80	8.37	6.53	5.65	36.0	47.9
14D 12H	0.72	6.27	4.94	0.54	2.59	1.21	0.70	9.08	6.39	5.64	19.1	38.9
14D 13H	0.74	6.03	5.07	0.55	2.71	1.58	0.74	8.91	6.61	5.64	7.1	42.2
14D 14H	0.84	6.02	5.14	0.53	3.16	1.26	0.82	8.70	6.45	5.73	19.0	34.2
14D 15H	0.78	6.49	5.10	0.53	3.55	1.40	0.78	8.39	6.40	5.73	15.7	30.8
14D 16H	0.78	6.06	5.06	0.55	3.25	1.24	0.78	9.11	6.50	5.75	25.6	43.5
14D 17H	0.71	6.50	5.02	0.55	3.18	1.29	0.71	8.21	6.38	5.60	10.2	33.5
14D 18H	0.65	6.51	4.92	0.54	3.11	0.99	0.64	8.06	6.38	5.67	15.2	35.7
14D 19H	0.58	6.26	4.93	0.54	2.92	1.03	0.58	8.35	6.34	5.42	28.4	44.5
14D 20H	0.57	6.51	4.83	0.54	3.10	0.83	0.56	8.00	6.33	5.54	17.8	36.4
14D 21H	0.61	6.04	4.70	0.53	3.11	1.01	0.58	7.94	6.03	5.30	31.5	43.8
14D 22H	0.56	5.63	4.67	0.54	2.92	0.89	0.54	8.35	5.96	5.35	39.1	41.0
14D 23H	0.53	6.01	4.59	0.55	2.71	1.04	0.52	8.91	6.02	5.15	27.7	37.6

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
15D 0H	0.48	5.25	4.53	0.54	2.58	0.79	0.47	7.65	5.91	5.19	40.1	43.9
15D 1H	0.44	6.02	4.64	0.55	2.71	0.72	0.44	9.39	6.11	5.28	34.4	44.5
15D 2H	0.44	5.82	4.49	0.53	2.46	0.75	0.44	7.90	5.82	5.17	38.2	49.4
15D 3H	0.44	5.25	4.58	0.51	2.95	0.69	0.44	8.12	5.87	5.09	28.9	45.7
15D 4H	0.44	5.24	4.54	0.50	3.12	0.79	0.44	8.15	5.80	5.05	48.2	39.5
15D 5H	0.45	5.42	4.56	0.51	3.71	0.76	0.45	8.11	5.66	5.06	40.4	30.2
15D 6H	0.44	5.57	4.52	0.49	3.11	0.68	0.44	7.67	5.70	5.08	43.5	35.5
15D 7H	0.40	5.08	4.50	0.53	2.49	0.70	0.40	7.64	5.76	5.12	43.1	45.6
15D 8H	0.38	4.77	4.63	0.51	2.87	0.55	0.38	8.01	5.94	5.08	50.2	39.5
15D 9H	0.35	5.40	4.40	0.53	2.47	0.56	0.35	8.24	5.80	5.00	37.5	49.7
15D 10H	0.34	5.22	4.46	0.53	2.66	0.61	0.34	7.75	5.78	4.99	47.6	39.5
15D 11H	0.34	4.91	4.29	0.53	2.48	0.62	0.34	7.81	5.64	4.76	50.1	42.7
15D 12H	0.31	4.75	4.27	0.53	2.11	0.53	0.32	10.36	5.82	4.84	37.8	49.5
15D 13H	0.30	4.50	4.46	0.52	2.34	0.48	0.29	8.33	5.95	5.11	93.0	34.5
15D 14H	0.33	5.27	4.66	0.56	2.94	0.61	0.33	7.81	5.94	5.23	105.4	44.1
15D 15H	0.35	5.39	4.65	0.54	2.82	0.69	0.36	8.05	5.90	5.12	105.0	44.3
15D 16H	0.34	5.07	4.71	0.53	2.84	0.61	0.35	7.69	5.71	5.10	90.6	39.4
15D 17H	0.31	5.07	4.69	0.55	2.73	0.48	0.32	8.27	6.01	5.33	62.1	34.9
15D 18H	0.31	6.49	4.59	0.52	2.26	0.55	0.31	7.75	5.99	5.24	48.7	40.5
15D 19H	0.30	6.48	4.89	0.58	2.27	0.49	0.31	9.37	6.64	5.88	39.7	44.5
15D 20H	0.29	5.83	4.59	0.59	1.87	0.64	0.28	9.43	6.21	5.33	36.0	41.9
15D 21H	0.32	6.24	4.83	0.59	2.11	0.54	0.32	10.55	6.70	5.64	38.1	50.0
15D 22H	0.33	5.81	4.73	0.63	2.08	0.51	0.32	8.34	6.45	5.64	33.6	33.7
15D 23H	0.32	5.81	4.92	0.64	2.36	0.51	0.32	9.00	6.69	5.86	42.8	37.9
16D 0H	0.32	7.39	5.30	0.64	2.31	0.56	0.34	10.94	7.16	6.19	24.6	36.7
16D 1H	0.34	7.10	5.24	0.65	2.27	0.54	0.34	10.15	7.25	6.41	29.1	34.6
16D 2H	0.37	7.11	5.45	0.67	2.67	0.66	0.38	10.31	7.42	6.72	26.9	34.7
16D 3H	0.39	6.80	5.60	0.66	3.34	0.68	0.38	9.64	7.40	6.77	27.5	29.5
16D 4H	0.37	8.15	5.62	0.66	2.91	0.57	0.36	9.57	7.54	6.88	22.7	32.6
16D 5H	0.40	7.13	5.51	0.67	3.05	0.62	0.40	9.89	7.24	6.62	18.2	36.9
16D 6H	0.50	7.74	5.82	0.66	4.41	0.79	0.50	9.51	7.65	7.00	22.1	28.5
16D 7H	0.49	6.83	5.69	0.62	4.76	0.82	0.50	8.35	7.13	6.55	23.0	21.4
16D 8H	0.52	7.41	5.71	0.66	5.68	0.82	0.51	9.81	7.44	6.69	19.9	24.8
16D 9H	0.47	7.07	5.31	0.65	3.82	0.74	0.46	8.94	7.10	6.24	19.9	31.9

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
16D 10H	0.49	7.09	5.31	0.65	4.36	0.82	0.48	8.35	6.95	6.35	21.4	29.8
16D 11H	0.49	6.82	5.40	0.65	4.64	0.91	0.50	9.33	7.02	6.44	26.5	27.9
16D 12H	0.47	6.81	5.74	0.60	4.96	0.87	0.49	9.06	7.22	6.43	28.0	30.0
16D 13H	0.41	6.54	5.55	0.61	3.49	0.72	0.42	8.48	6.82	6.02	21.6	34.7
16D 14H	0.46	7.75	5.54	0.62	2.84	0.66	0.45	9.19	7.12	6.43	31.7	36.3
16D 15H	0.50	7.75	5.87	0.62	3.80	0.84	0.53	9.12	7.25	6.73	36.0	33.6
16D 16H	0.44	7.74	5.55	0.68	3.80	0.77	0.44	10.04	7.26	6.59	27.5	43.8
16D 17H	0.49	7.74	5.71	0.68	4.34	0.75	0.49	10.34	7.51	6.92	34.7	37.7
16D 18H	0.55	7.76	5.84	0.64	4.73	0.99	0.56	9.47	7.80	6.96	53.6	36.0
16D 19H	0.48	7.43	5.65	0.63	4.31	0.84	0.47	8.70	7.39	6.72	42.3	41.8
16D 20H	0.42	7.41	5.26	0.65	3.29	0.75	0.44	9.89	6.63	5.96	33.1	39.2
16D 21H	0.57	7.40	3.43	0.59	3.29	1.03	0.63	8.31	4.71	3.50	31.8	39.5
16D 22H	0.39	7.42	4.49	0.69	2.27	0.72	0.43	9.06	5.65	4.48	31.8	38.8
16D 23H	0.40	6.81	5.04	0.70	3.08	0.64	0.41	9.29	6.72	5.96	29.4	39.8
17D 0H	0.42	6.80	5.32	0.67	2.48	0.64	0.42	9.96	7.29	6.50	25.8	42.3
17D 1H	0.51	7.11	5.85	0.64	3.15	0.72	0.50	10.24	7.94	7.06	27.3	37.5
17D 2H	0.67	6.79	5.65	0.62	2.77	1.25	0.66	10.37	7.37	6.47	19.4	36.7
17D 3H	0.73	7.42	5.62	0.62	2.57	1.43	0.71	9.90	7.39	6.61	25.5	33.6
17D 4H	0.89	7.40	5.82	0.60	3.09	1.54	0.87	9.74	7.37	6.66	13.8	33.4
17D 5H	0.99	6.79	5.90	0.60	3.57	1.72	1.00	10.25	7.27	6.51	0.6	26.9
17D 6H	0.93	6.80	5.79	0.54	3.43	1.47	0.92	9.92	7.15	6.40	0.3	22.2
17D 7H	0.81	5.83	5.47	0.55	2.98	1.39	0.80	10.06	7.08	6.22	352.3	24.2
17D 8H	0.71	6.23	5.26	0.58	2.32	1.26	0.70	8.88	7.06	6.07	357.0	26.5
17D 9H	0.66	7.82	5.48	0.59	2.47	0.98	0.64	9.44	7.31	6.22	31.9	42.4
17D 10H	0.63	8.17	5.24	0.63	2.14	1.19	0.63	10.57	6.84	6.10	38.9	30.7
17D 11H	0.58	7.78	4.47	0.68	2.11	0.97	0.58	9.34	6.20	5.41	34.2	37.7
17D 12H	0.71	3.05	3.72	0.52	2.33	1.25	0.69	8.47	4.98	4.03	122.9	26.9
17D 13H	0.78	3.96	4.00	0.50	2.60	1.30	0.78	8.38	5.15	4.46	131.8	33.0
17D 14H	0.75	4.39	4.33	0.47	2.90	1.35	0.75	8.36	5.08	4.53	115.1	34.6
17D 15H	0.63	4.63	4.59	0.46	3.38	1.11	0.63	8.24	5.45	4.65	123.3	35.7
17D 16H	0.48	4.51	4.76	0.50	2.93	0.80	0.51	8.34	5.61	4.63	109.9	49.9
17D 17H	0.48	4.52	4.88	0.48	2.40	0.88	0.48	8.74	5.55	4.83	124.3	43.4
17D 18H	0.43	7.10	4.92	0.55	2.36	0.75	0.45	8.72	5.93	5.16	127.4	43.5
17D 19H	0.46	4.63	4.43	0.62	2.35	0.79	0.51	8.51	5.40	4.52	127.9	39.6

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
17D 20H	0.44	7.11	5.16	0.54	2.46	0.76	0.46	8.91	5.98	5.08	32.5	38.2
17D 21H	0.44	7.37	4.91	0.55	2.20	0.77	0.43	8.67	6.34	5.45	27.9	36.5
17D 22H	0.44	7.12	5.20	0.61	2.52	0.87	0.45	8.85	6.48	5.70	34.5	34.0
17D 23H	0.52	7.10	5.22	0.66	2.16	0.82	0.54	10.37	6.90	5.94	38.3	32.9
18D 0H	0.63	8.18	4.66	0.65	1.77	1.07	0.64	9.04	6.36	5.60	35.1	33.4
18D 1H	0.66	8.12	5.10	0.68	2.10	1.51	0.66	9.91	7.48	6.47	34.0	36.8
18D 2H	0.67	7.86	5.50	0.71	2.39	1.27	0.66	11.72	8.00	7.24	36.5	34.3
18D 3H	0.71	8.61	6.07	0.73	3.24	1.22	0.69	10.88	8.62	7.73	34.5	41.6
18D 4H	0.71	8.64	6.35	0.72	2.91	1.04	0.72	11.43	8.88	8.06	33.0	39.2
18D 5H	0.67	8.19	6.11	0.76	2.81	1.14	0.67	11.38	8.50	7.87	27.8	42.6
18D 6H	0.66	8.19	6.15	0.75	3.22	1.12	0.65	10.44	8.48	7.85	25.8	38.0
18D 7H	0.63	8.17	6.35	0.73	3.07	1.24	0.61	12.69	8.54	7.74	33.9	32.4
18D 8H	0.66	8.61	6.44	0.74	2.32	1.10	0.64	11.81	9.11	8.29	32.5	38.1
18D 9H	0.77	8.19	7.05	0.73	2.96	1.39	0.75	12.50	9.50	8.39	32.7	28.3
18D 10H	0.65	10.33	6.71	0.78	2.49	0.94	0.64	12.57	9.77	8.89	32.5	50.0
18D 11H	0.72	10.99	6.98	0.78	2.67	1.24	0.71	12.17	9.70	8.99	31.9	45.5
18D 12H	0.74	11.06	6.82	0.83	3.13	1.46	0.72	13.95	9.97	9.18	40.1	47.6
18D 13H	0.78	11.06	6.12	0.83	2.79	1.38	0.77	13.15	9.91	9.13	10.3	67.4
18D 14H	0.90	11.66	7.07	0.84	3.25	1.40	0.88	13.80	10.39	9.95	31.5	57.5
18D 15H	1.06	10.89	7.50	0.84	3.66	1.76	1.05	13.02	10.64	9.92	39.2	33.2
18D 16H	1.22	11.11	7.34	0.83	3.08	1.88	1.21	12.98	10.44	9.85	36.9	56.6
18D 17H	1.39	10.95	6.88	0.81	4.19	2.26	1.35	13.11	10.44	9.45	43.8	28.3
18D 18H	1.52	10.38	7.44	0.82	3.39	2.08	1.50	14.24	11.07	10.23	38.4	43.0
18D 19H	1.55	11.76	7.91	0.81	4.22	2.44	1.52	13.25	11.22	10.33	36.1	55.0
18D 20H	1.50	10.39	7.58	0.79	3.34	2.22	1.49	13.39	10.58	9.68	36.9	37.4
18D 21H	1.34	9.17	7.40	0.78	2.77	2.16	1.33	14.06	10.25	9.50	42.7	30.3
18D 22H	1.22	8.63	6.73	0.76	2.37	2.05	1.18	12.80	9.71	8.98	21.1	64.1
18D 23H	1.22	9.61	6.68	0.74	2.25	1.75	1.17	12.76	9.54	8.38	28.4	53.6
19D 0H	1.10	10.22	6.59	0.76	2.10	1.83	1.07	13.39	9.42	8.76	40.8	43.5
19D 1H	1.10	8.63	6.44	0.76	2.12	1.69	1.08	12.23	9.29	8.54	44.5	38.7
19D 2H	0.98	9.20	6.52	0.77	2.94	1.57	0.95	11.86	9.24	8.53	43.2	35.1
19D 3H	0.83	10.26	6.11	0.75	1.81	1.23	0.80	12.00	9.20	8.32	351.5	71.7
19D 4H	0.80	10.99	6.15	0.77	2.01	1.22	0.77	13.52	9.13	8.36	42.5	43.0

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
19D 5H	0.81	7.75	4.60	0.75	1.78	1.53	0.76	10.90	7.01	5.96	37.9	40.6
19D 6H	0.98	9.69	4.28	0.64	1.78	1.57	0.95	11.51	6.46	5.34	51.2	52.7
19D 7H	1.00	3.76	4.17	0.61	1.71	1.56	0.98	9.50	5.93	5.01	353.0	23.0
19D 8H	1.15	8.64	4.81	0.67	1.82	2.43	1.09	10.75	6.88	5.93	32.7	48.5
19D 9H	1.39	8.62	4.88	0.63	1.63	2.24	1.35	10.02	6.60	5.75	36.2	37.5
19D 10H	1.38	8.21	5.01	0.66	1.81	2.52	1.37	10.48	7.10	6.30	33.2	42.7
19D 11H	1.52	8.18	5.10	0.66	1.71	2.39	1.49	10.06	7.31	6.37	36.2	34.6
19D 12H	1.65	7.43	5.20	0.65	1.88	2.43	1.60	10.03	7.10	6.26	11.9	26.9
19D 13H	1.58	7.75	5.09	0.66	1.68	2.57	1.53	9.88	7.09	6.32	26.8	35.1
19D 14H	1.70	7.72	5.27	0.64	1.91	2.80	1.66	9.74	7.23	6.33	21.8	35.1
19D 15H	1.69	7.43	5.41	0.66	2.04	2.54	1.62	9.17	7.40	6.79	34.2	36.0
19D 16H	1.83	7.08	5.61	0.65	2.57	2.78	1.77	10.07	7.64	6.93	28.6	24.3
19D 17H	1.76	7.75	5.61	0.68	2.32	2.89	1.73	11.49	7.92	6.74	20.2	34.4
19D 18H	1.73	7.84	5.50	0.66	2.13	3.10	1.69	9.71	7.65	6.73	14.8	40.8
19D 19H	1.89	7.73	6.04	0.67	2.86	3.45	1.82	10.85	7.91	7.31	20.8	30.6
19D 20H	1.76	8.68	6.34	0.67	2.80	3.21	1.73	10.61	8.23	7.42	31.1	33.0
19D 21H	2.05	8.18	6.66	0.65	2.88	3.54	1.97	11.40	8.68	7.68	22.5	33.3
19D 22H	2.12	8.62	6.73	0.66	2.99	3.42	2.06	10.91	8.71	7.97	23.3	36.4
19D 23H	2.11	8.62	6.62	0.67	3.02	3.52	2.08	11.51	8.78	7.67	25.8	30.4
20D 0H	2.09	8.25	6.54	0.70	2.94	3.07	2.04	10.58	8.66	7.94	26.6	37.8
20D 1H	2.29	9.62	6.64	0.71	3.02	4.21	2.23	11.37	8.82	8.09	25.0	29.1
20D 2H	2.62	8.67	6.82	0.72	3.21	4.25	2.53	10.83	9.03	8.15	16.2	32.5
20D 3H	2.78	9.62	6.61	0.72	2.72	4.10	2.72	12.78	8.98	8.36	16.1	32.5
20D 4H	2.63	9.65	6.84	0.71	3.04	5.61	2.52	12.56	9.29	8.15	24.0	25.5
20D 5H	2.89	9.65	7.27	0.72	4.18	4.87	2.80	11.67	9.53	8.80	20.8	29.3
20D 6H	2.86	9.61	6.85	0.74	2.89	4.85	2.84	14.78	9.91	8.76	25.5	32.8
20D 7H	2.80	10.26	7.05	0.74	2.45	4.18	2.71	13.40	10.02	8.97	32.6	36.0
20D 8H	2.85	8.61	6.93	0.72	2.28	4.67	2.82	12.66	9.78	8.65	38.2	33.9
20D 11H	3.24	10.95	7.10	0.73	2.47	5.25	3.16	12.34	9.77	8.69	35.6	20.8
20D 12H	3.02	10.30	6.85	0.72	2.60	5.00	2.86	13.14	9.52	8.53	35.1	34.7
20D 13H	3.18	10.42	6.76	0.72	2.40	4.18	3.06	12.25	9.42	8.53	31.7	34.4
20D 20H	2.89	10.30	7.02	0.74	2.47	4.47	2.87	12.13	9.81	8.94	29.7	37.9
20D 21H	2.80	10.97	6.86	0.73	2.26	4.44	2.68	13.54	9.37	8.69	44.7	38.9
20D 22H	2.95	10.95	7.03	0.71	2.37	5.17	2.88	12.28	9.90	8.78	26.2	47.1

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
20D 23H	2.63	9.71	7.05	0.73	2.39	4.46	2.59	13.97	9.94	8.73	45.1	47.9
21D 0H	2.58	10.36	7.55	0.73	2.77	4.24	2.49	13.21	10.09	9.18	39.3	34.4
21D 1H	2.70	10.98	7.47	0.70	3.28	3.89	2.57	12.69	10.13	8.91	37.9	45.1
21D 2H	2.58	10.28	7.55	0.69	2.59	4.03	2.52	11.97	9.96	8.92	38.5	30.2
21D 3H	2.66	11.04	7.88	0.70	3.26	4.15	2.65	13.05	10.35	9.29	32.4	44.4
21D 4H	2.66	10.96	7.75	0.72	3.51	4.30	2.57	12.55	10.35	9.01	34.2	36.1
21D 5H	2.43	10.39	7.53	0.72	2.69	3.83	2.34	13.29	10.15	9.17	38.0	42.6
21D 6H	2.54	9.14	7.63	0.69	2.97	4.88	2.50	13.47	9.93	8.97	40.2	30.5
21D 7H	2.41	10.33	7.56	0.68	2.96	3.66	2.32	14.05	10.07	8.99	38.5	42.1
21D 8H	2.31	10.33	7.34	0.69	2.63	3.86	2.17	13.56	9.98	8.90	36.9	41.5
21D 9H	2.26	10.21	7.48	0.70	3.17	3.05	2.23	11.87	9.97	8.94	36.7	51.5
21D 10H	2.17	10.33	7.30	0.70	2.75	3.34	2.10	12.66	9.89	8.90	35.2	45.9
21D 11H	2.20	10.23	7.09	0.69	2.71	3.93	2.14	11.96	9.51	8.44	40.8	35.9
21D 12H	2.12	9.72	7.09	0.70	3.50	3.33	2.06	12.40	9.90	8.52	41.8	39.0
21D 13H	1.95	10.29	7.03	0.71	2.97	3.45	1.88	12.12	9.88	8.74	42.2	44.6
21D 14H	1.93	9.63	6.83	0.70	2.46	3.06	1.89	12.01	9.32	8.33	43.9	38.4
21D 15H	1.89	9.63	6.66	0.69	2.53	3.01	1.83	11.58	9.24	8.28	38.2	47.3
21D 16H	1.88	10.29	7.10	0.74	3.34	2.94	1.80	13.45	9.74	8.93	42.7	34.4
21D 17H	1.96	10.21	7.28	0.72	3.53	2.99	1.88	12.58	9.79	8.84	38.8	38.2
21D 18H	1.76	10.94	7.09	0.72	2.79	3.01	1.70	12.09	9.75	8.81	40.6	39.8
21D 19H	1.67	10.27	6.95	0.70	2.67	3.06	1.61	13.43	9.34	8.55	42.7	45.6
21D 20H	1.66	9.67	6.86	0.70	2.83	2.71	1.62	11.84	9.54	8.43	41.8	47.7
21D 21H	1.60	9.12	7.01	0.69	2.74	2.66	1.56	12.25	9.25	8.11	43.0	44.5
21D 22H	1.58	9.22	7.20	0.69	2.96	2.17	1.55	11.94	9.43	8.70	47.9	34.1
21D 23H	1.55	10.23	7.02	0.69	2.94	2.49	1.54	12.37	9.26	8.49	41.5	42.8
22D 0H	1.39	10.17	6.96	0.70	2.82	2.34	1.36	13.19	9.46	8.35	38.4	50.2
22D 1H	1.56	10.18	7.27	0.69	3.00	2.41	1.55	11.92	9.72	8.73	40.2	45.3
22D 2H	1.49	10.27	7.14	0.66	2.55	2.61	1.46	12.22	9.61	8.26	32.2	50.1
22D 3H	1.62	10.29	7.68	0.68	3.39	2.69	1.59	12.29	10.04	9.08	39.6	46.4
22D 4H	1.59	10.94	7.62	0.67	3.08	2.35	1.56	12.36	10.09	9.13	39.6	40.8
22D 5H	1.60	10.24	7.16	0.66	2.71	2.61	1.58	12.57	9.66	8.33	36.3	43.3
22D 6H	1.56	10.28	7.25	0.68	3.56	2.47	1.52	12.20	9.68	8.56	41.0	47.8
22D 7H	1.67	10.20	7.29	0.66	2.81	2.32	1.64	13.19	9.93	9.00	37.9	52.2

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
22D 8H	1.49	9.15	6.92	0.67	2.69	2.80	1.47	12.56	9.67	8.39	42.5	46.8
22D 9H	1.61	10.25	7.24	0.69	3.24	2.96	1.57	12.25	9.76	8.78	40.7	37.1
22D 10H	1.60	9.16	7.29	0.68	3.70	2.41	1.55	11.79	9.71	8.53	35.9	40.5
22D 11H	1.67	9.66	7.29	0.68	3.49	2.36	1.68	11.90	9.52	8.78	31.6	44.1
22D 12H	1.58	9.66	7.21	0.68	3.19	2.47	1.54	11.86	9.46	8.36	35.7	37.6
22D 13H	1.71	9.66	7.03	0.74	4.06	2.87	1.67	11.95	9.43	8.59	34.3	30.7
22D 14H	1.58	9.60	6.68	0.75	3.42	2.82	1.54	12.01	9.05	8.35	34.4	39.7
22D 15H	1.45	8.21	6.33	0.76	2.97	2.73	1.39	11.95	8.77	8.03	33.1	28.6
22D 16H	1.38	9.59	6.39	0.75	3.24	2.23	1.32	11.15	8.88	8.08	30.0	39.1
22D 17H	1.29	9.09	6.28	0.75	3.57	2.12	1.26	11.29	8.66	7.92	30.4	36.9
22D 18H	1.18	9.09	6.20	0.75	3.03	1.59	1.14	10.30	8.46	7.86	32.7	41.2
22D 19H	1.11	8.70	6.02	0.72	3.37	1.91	1.10	12.97	8.37	7.46	34.4	42.5
22D 20H	1.06	9.10	6.43	0.70	3.60	1.50	1.05	10.68	8.67	7.75	39.1	44.8
22D 21H	1.13	9.12	6.78	0.69	4.78	1.90	1.11	11.15	8.87	8.11	31.2	36.8
22D 22H	1.03	8.67	6.70	0.66	3.82	1.49	1.02	10.45	8.77	7.76	39.0	36.9
22D 23H	0.86	8.61	6.25	0.67	3.12	1.59	0.83	10.90	8.44	7.60	37.6	42.8
23D 0H	0.97	8.62	6.43	0.68	3.34	1.51	0.93	11.40	8.60	7.83	43.2	37.1
23D 1H	0.86	8.22	6.30	0.68	3.12	1.50	0.85	10.42	8.36	7.70	37.1	44.7
23D 2H	0.97	8.60	6.62	0.68	5.96	1.61	0.97	10.51	8.62	7.69	37.3	23.6
23D 3H	0.87	8.25	6.30	0.68	3.57	1.34	0.86	10.02	8.09	7.43	42.6	39.8
23D 4H	0.85	8.26	6.22	0.71	3.94	1.58	0.84	9.94	8.18	7.38	35.3	40.5
23D 5H	0.88	8.57	6.28	0.69	3.88	1.49	0.87	10.33	8.03	7.42	35.6	28.2
23D 6H	0.80	8.58	6.17	0.69	3.84	1.29	0.80	9.85	8.11	7.40	40.3	32.1
23D 7H	0.74	8.20	5.76	0.72	4.03	1.39	0.72	10.17	7.97	7.29	32.1	38.0
23D 8H	0.69	8.16	5.84	0.71	3.56	1.14	0.68	9.54	7.70	7.13	34.9	32.8
23D 9H	0.63	8.17	5.77	0.67	3.87	0.96	0.62	10.16	7.69	6.99	34.8	30.3
23D 10H	0.55	8.17	5.27	0.63	2.42	0.87	0.55	9.41	7.23	6.41	42.1	44.1
23D 11H	0.61	7.81	5.67	0.63	2.94	0.85	0.61	9.66	7.61	6.81	38.2	37.9
23D 12H	0.61	7.41	5.68	0.61	2.70	1.05	0.61	9.77	7.43	6.53	32.0	39.2
23D 13H	0.65	7.42	5.82	0.61	3.22	0.94	0.65	9.95	7.58	6.73	40.8	32.0
23D 14H	0.66	7.76	5.71	0.62	3.03	1.07	0.66	10.63	7.43	6.45	40.6	29.6
23D 15H	0.71	7.44	5.40	0.64	2.95	1.11	0.70	9.47	7.27	6.54	39.6	38.8
23D 16H	0.68	7.45	5.41	0.63	2.73	1.32	0.66	10.05	7.14	6.41	27.5	38.0
23D 17H	0.73	7.42	5.76	0.62	4.22	1.12	0.73	9.50	7.42	6.65	39.1	39.0

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
23D 18H	0.69	7.73	5.63	0.59	3.12	1.14	0.68	8.81	7.29	6.41	38.5	44.8
23D 19H	0.60	7.13	5.46	0.62	3.13	0.93	0.60	9.41	7.17	6.39	44.1	31.8
23D 20H	0.58	7.38	5.07	0.63	2.53	0.98	0.56	9.60	6.79	6.14	50.9	42.3
23D 21H	0.54	7.13	4.86	0.61	2.59	0.89	0.53	9.35	6.81	5.93	44.2	44.9
23D 22H	0.54	7.43	4.58	0.61	2.17	0.84	0.52	8.62	6.37	5.47	39.2	42.7
23D 23H	0.58	7.07	4.30	0.56	2.06	0.92	0.58	8.58	6.11	5.28	38.1	34.9
24D 0H	0.59	7.37	4.40	0.56	2.13	0.87	0.58	9.13	6.15	5.24	45.3	36.8
24D 1H	0.59	7.09	4.56	0.58	2.50	0.89	0.58	8.99	6.17	5.34	37.6	28.9
24D 2H	0.53	7.08	4.51	0.58	2.27	0.99	0.53	8.58	6.43	5.27	29.5	38.1
24D 3H	0.54	7.05	4.83	0.58	2.74	0.98	0.53	8.21	6.42	5.56	27.5	32.5
24D 4H	0.58	7.04	5.10	0.56	2.89	0.99	0.57	8.75	6.76	5.88	24.5	35.6
24D 5H	0.67	5.42	4.86	0.49	2.69	1.42	0.66	9.45	6.41	5.32	8.2	33.4
24D 6H	0.66	6.80	4.82	0.51	2.55	1.08	0.65	8.27	6.28	5.40	40.2	33.7
24D 7H	0.72	6.78	4.95	0.53	2.87	1.08	0.70	8.47	6.41	5.74	29.9	31.9
24D 8H	0.66	6.04	4.78	0.53	2.78	1.18	0.66	8.27	6.34	5.40	35.9	39.1
24D 9H	0.65	6.26	5.04	0.53	3.23	1.13	0.64	7.90	6.48	5.59	19.6	38.9
24D 10H	0.61	6.51	4.93	0.58	3.19	1.09	0.61	8.20	6.33	5.56	20.2	41.1
24D 11H	0.81	7.09	5.51	0.59	2.88	1.41	0.80	8.96	7.03	6.29	348.9	24.1
24D 12H	1.42	7.78	6.16	0.54	3.63	2.18	1.39	10.00	7.83	6.89	352.7	22.8
24D 13H	1.75	8.60	6.51	0.59	3.31	2.90	1.70	10.11	8.26	7.25	353.5	26.7
24D 14H	2.02	7.81	6.27	0.57	2.97	3.24	1.98	10.84	7.83	6.86	0.0	17.7
24D 15H	2.00	8.58	6.17	0.61	2.82	3.04	1.99	11.25	8.04	7.04	4.8	18.7
24D 16H	2.09	8.56	6.18	0.64	2.75	3.36	2.06	9.95	8.20	7.34	4.0	23.5
24D 17H	2.07	7.85	5.92	0.64	2.48	3.76	2.01	10.40	7.97	7.05	5.8	18.8
24D 18H	2.30	9.06	5.51	0.62	2.03	3.86	2.24	9.82	7.50	6.74	6.0	21.7
24D 19H	2.39	8.70	5.77	0.63	2.08	4.81	2.33	10.91	7.88	6.87	354.1	18.2
24D 20H	2.37	7.76	5.85	0.67	2.35	3.70	2.32	9.85	7.85	7.03	3.3	18.6
24D 21H	2.60	7.09	5.91	0.65	2.29	4.23	2.53	11.33	8.15	7.17	2.6	24.8
24D 22H	2.38	7.84	5.95	0.67	2.32	3.83	2.34	9.91	8.00	7.32	8.8	28.7
24D 23H	2.46	9.10	6.11	0.70	3.25	3.97	2.42	10.92	8.51	7.67	9.9	26.1
25D 0H	2.45	8.63	6.26	0.68	3.78	4.18	2.39	11.26	8.50	7.81	5.0	26.2
25D 1H	2.00	8.68	5.84	0.68	2.41	3.26	1.94	10.13	8.11	7.25	8.0	34.1
25D 2H	2.06	8.22	5.84	0.67	2.39	3.42	2.01	10.58	8.12	7.17	17.3	31.2

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
25D 3H	2.25	8.64	6.01	0.66	2.80	3.84	2.21	10.10	8.39	7.33	18.7	26.2
25D 4H	2.00	8.20	6.06	0.67	2.98	3.08	1.93	10.08	8.12	7.46	20.7	32.1
25D 5H	1.98	7.78	6.20	0.67	3.09	3.19	1.93	10.85	8.09	7.48	20.7	24.7
25D 6H	1.93	7.73	6.24	0.64	3.45	3.17	1.88	10.25	8.10	7.24	16.6	28.7
25D 7H	1.77	8.17	6.02	0.65	3.16	2.74	1.74	10.08	7.87	7.11	11.7	26.4
25D 8H	1.91	8.14	6.37	0.65	3.61	3.14	1.88	9.60	8.20	7.51	16.3	30.9
25D 9H	2.00	8.17	6.62	0.65	4.35	4.64	1.95	10.81	8.54	7.60	16.5	31.1
25D 10H	1.91	7.80	6.48	0.65	4.16	2.92	1.87	10.02	8.40	7.55	19.1	28.4
25D 11H	1.75	7.77	6.33	0.66	3.64	2.43	1.66	10.55	8.33	7.60	19.7	28.8
25D 12H	1.66	7.80	6.24	0.67	3.22	2.90	1.59	10.39	8.37	7.35	16.5	43.2
25D 13H	1.76	8.63	6.54	0.66	4.02	2.66	1.70	10.34	8.39	7.66	22.1	28.6
25D 14H	1.52	7.78	6.38	0.66	3.01	2.38	1.47	11.34	8.11	7.31	14.3	31.2
26D 9H	1.46	8.15	5.80	0.69	2.21	2.30	1.43	11.28	8.15	7.06	31.5	39.3
26D 10H	1.47	7.41	5.79	0.70	2.44	2.24	1.45	10.31	7.87	7.18	23.0	35.7
26D 11H	1.55	7.44	5.51	0.68	2.22	2.67	1.52	10.87	7.77	7.11	15.4	30.6
26D 12H	1.43	7.08	5.30	0.68	2.05	2.27	1.36	10.17	7.38	6.65	22.7	37.0
26D 13H	1.52	7.44	5.28	0.68	2.20	2.49	1.48	9.91	7.41	6.68	24.9	30.8
26D 14H	1.50	9.65	5.18	0.67	1.79	2.45	1.47	9.99	7.38	6.62	27.9	47.1
26D 15H	1.47	7.44	5.18	0.67	1.90	2.37	1.46	11.32	7.51	6.52	26.6	41.2
26D 16H	1.59	7.13	5.46	0.68	2.04	3.18	1.55	10.86	7.60	6.80	22.0	32.7
26D 17H	1.58	6.83	5.39	0.66	2.09	3.02	1.55	9.73	7.55	6.89	27.4	34.5
26D 18H	1.52	9.10	5.47	0.68	2.24	2.93	1.45	10.09	7.54	6.67	27.9	35.1
26D 19H	1.47	7.10	5.46	0.68	2.27	2.39	1.43	9.89	7.65	6.78	26.7	37.0
26D 20H	1.54	8.64	5.37	0.69	2.42	2.77	1.50	10.57	7.46	6.68	30.1	32.5
26D 21H	1.28	8.58	5.50	0.69	2.63	1.84	1.27	10.00	7.70	6.88	31.8	38.9
26D 22H	1.35	8.59	5.69	0.68	2.67	2.77	1.32	10.59	7.87	7.21	26.7	33.3
26D 23H	1.20	8.21	5.60	0.67	2.90	1.82	1.19	10.22	7.79	6.95	13.9	44.9
27D 0H	1.24	8.12	5.47	0.68	2.89	1.92	1.21	10.01	7.64	6.95	40.5	34.2
27D 1H	1.09	7.79	5.48	0.68	3.05	1.67	1.05	9.75	7.43	6.64	36.9	40.2
27D 2H	1.22	7.81	5.45	0.68	2.86	2.04	1.21	9.94	7.45	6.70	29.5	33.5
27D 3H	1.23	8.17	5.55	0.65	2.85	2.00	1.22	9.35	7.49	6.59	29.6	32.4
27D 4H	1.10	7.73	5.49	0.65	3.02	1.80	1.10	9.64	7.37	6.53	25.9	44.7
27D 5H	1.16	7.11	5.63	0.63	3.16	1.65	1.15	10.02	7.48	6.51	38.5	40.3

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
27D 6H	1.26	7.42	5.70	0.64	3.88	2.31	1.23	9.44	7.36	6.85	33.9	35.7
27D 7H	1.10	7.08	5.30	0.61	2.84	1.76	1.09	8.75	6.97	6.09	37.6	37.8
27D 8H	0.99	6.03	5.35	0.58	2.82	1.54	0.96	9.43	6.77	5.94	35.1	37.1
27D 9H	1.00	6.80	5.27	0.60	3.03	1.79	0.99	8.87	6.92	6.08	38.4	39.1
27D 10H	0.95	6.78	5.17	0.60	3.24	1.41	0.94	9.01	6.86	6.11	31.0	32.1
27D 11H	0.87	6.83	5.30	0.62	3.37	1.41	0.86	8.68	6.84	6.20	36.5	36.6
27D 12H	0.80	7.09	4.99	0.62	3.03	1.38	0.80	9.54	6.80	5.90	43.4	37.5
27D 13H	0.74	7.09	4.86	0.63	2.98	1.43	0.74	8.69	6.47	5.80	34.5	41.0
27D 14H	0.68	7.06	4.94	0.64	2.72	1.13	0.68	9.30	6.70	6.04	44.0	38.6
27D 15H	0.68	6.56	5.18	0.62	2.72	1.15	0.68	9.19	6.86	5.97	44.0	38.2
27D 16H	0.65	7.39	5.27	0.63	2.77	1.06	0.64	8.66	6.88	6.19	43.7	48.7
27D 17H	0.65	7.09	5.15	0.61	2.93	1.22	0.64	9.16	6.81	6.11	40.3	40.9
27D 18H	0.73	7.09	5.23	0.61	3.17	1.11	0.71	8.97	6.89	6.12	42.2	38.1
27D 19H	0.68	7.09	5.18	0.60	2.91	1.28	0.68	8.73	6.71	5.95	43.5	37.7
27D 20H	0.65	7.11	5.29	0.59	3.20	1.04	0.65	9.45	6.62	6.00	42.0	35.3
27D 21H	0.67	6.75	5.11	0.58	2.96	1.25	0.67	8.01	6.58	5.86	51.0	31.4
27D 22H	0.67	6.77	5.14	0.55	3.01	1.10	0.65	8.67	6.49	5.80	40.8	37.6
27D 23H	0.65	6.31	5.29	0.55	3.81	0.90	0.64	7.95	6.65	6.00	37.5	44.8
28D 0H	0.70	6.76	5.27	0.54	4.01	1.44	0.69	9.53	6.69	5.91	38.7	34.0
28D 1H	0.66	6.54	5.36	0.52	3.80	1.11	0.65	8.47	6.67	5.99	40.1	37.8
28D 2H	0.61	6.23	5.18	0.54	3.42	1.17	0.61	8.46	6.65	5.90	43.5	34.5
28D 3H	0.61	6.28	5.28	0.51	3.64	0.89	0.60	8.59	6.69	5.94	48.5	36.8
28D 4H	0.54	6.05	5.19	0.53	3.53	0.87	0.53	9.18	6.63	5.74	48.7	37.9
28D 5H	0.61	6.26	5.37	0.55	4.30	1.09	0.61	9.29	6.78	5.99	49.2	31.8
28D 6H	0.59	5.81	5.22	0.54	4.04	0.94	0.59	8.72	6.55	5.71	49.0	31.4
28D 7H	0.49	6.02	4.97	0.55	3.13	0.99	0.49	8.20	6.35	5.64	55.0	36.6
28D 8H	0.53	5.84	4.91	0.51	3.10	0.86	0.54	8.14	6.26	5.45	46.6	28.4
28D 9H	0.52	6.02	4.76	0.55	2.84	1.24	0.53	7.73	6.30	5.48	51.1	33.5
28D 10H	0.44	6.26	4.69	0.58	2.66	0.81	0.44	7.71	6.10	5.27	58.0	33.2
28D 11H	0.51	6.57	3.86	0.59	1.98	0.97	0.52	7.28	5.34	4.38	54.8	34.1
28D 12H	0.56	3.10	3.58	0.51	2.44	1.01	0.57	7.70	4.96	4.06	141.4	26.1
28D 13H	0.60	3.28	3.47	0.43	2.87	1.20	0.61	6.77	4.46	3.77	142.9	24.7
28D 14H	0.67	3.95	3.57	0.43	2.58	1.19	0.67	7.02	4.51	3.73	135.0	38.2
28D 15H	0.68	4.04	3.62	0.43	2.74	1.33	0.71	6.65	4.50	3.87	132.0	33.0

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
28D 16H	0.70	3.68	3.64	0.44	2.45	1.16	0.71	6.35	4.62	3.95	129.8	38.8
28D 17H	0.79	4.14	3.64	0.43	2.81	1.35	0.79	7.15	4.62	3.88	131.1	31.4
28D 18H	0.81	4.49	3.77	0.43	2.94	1.69	0.81	6.98	4.62	3.97	127.5	29.3
28D 19H	0.76	4.26	3.86	0.43	3.48	1.56	0.76	6.50	4.81	4.12	125.2	34.0
28D 20H	0.60	4.36	3.92	0.47	2.68	0.96	0.61	7.21	5.01	4.24	109.8	40.0
28D 21H	0.58	4.51	4.07	0.48	2.60	1.09	0.58	7.88	5.20	4.48	111.5	32.5
28D 22H	0.63	4.40	4.09	0.46	3.13	1.27	0.63	6.85	5.20	4.39	111.2	29.0
28D 23H	0.65	4.63	4.15	0.46	2.93	1.34	0.64	6.80	5.22	4.59	116.1	34.7
29D 0H	0.64	5.09	4.28	0.46	3.66	1.04	0.64	7.43	5.39	4.71	113.4	27.6
29D 1H	0.63	4.93	4.29	0.47	3.37	1.09	0.63	7.33	5.42	4.72	114.9	29.1
29D 2H	0.62	4.91	4.24	0.49	2.92	1.01	0.62	7.42	5.41	4.77	117.3	31.9
29D 3H	0.71	4.78	4.33	0.47	3.27	1.28	0.71	7.05	5.47	4.79	118.4	25.0
29D 4H	0.67	4.93	4.32	0.49	3.07	1.24	0.66	7.47	5.41	4.63	115.0	31.8
29D 5H	0.62	5.60	4.23	0.52	2.75	1.07	0.62	7.45	5.42	4.80	115.9	36.4
29D 6H	0.64	4.77	4.23	0.52	3.06	1.09	0.63	7.42	5.50	4.77	119.7	29.1
29D 7H	0.67	5.06	4.33	0.51	3.01	1.08	0.67	6.88	5.54	4.83	120.2	33.2
29D 8H	0.69	4.90	4.41	0.48	3.57	0.99	0.69	7.21	5.45	4.83	112.5	26.5
29D 9H	0.74	5.25	4.24	0.52	3.46	1.28	0.75	7.30	5.45	4.82	107.6	29.4
29D 10H	0.70	5.41	4.37	0.51	3.72	1.22	0.71	7.09	5.41	4.82	106.3	32.5
29D 11H	0.75	5.43	4.29	0.53	3.59	1.49	0.74	6.58	5.45	4.88	103.4	28.2
29D 12H	0.63	5.24	4.25	0.51	2.95	1.00	0.63	6.73	5.47	4.75	102.9	34.4
29D 13H	0.65	5.43	4.36	0.52	3.51	1.14	0.64	7.34	5.49	4.88	107.2	25.4
29D 14H	0.59	4.91	4.29	0.52	3.06	1.25	0.59	7.29	5.55	4.88	114.6	35.1
29D 15H	0.60	5.43	4.27	0.51	3.01	1.02	0.60	6.84	5.43	4.81	98.7	31.8
29D 16H	0.56	5.43	4.16	0.52	2.76	1.08	0.54	7.47	5.29	4.68	107.1	36.4
29D 17H	0.59	5.43	4.31	0.52	3.19	1.03	0.61	7.14	5.56	4.91	97.5	24.2
29D 18H	0.63	5.58	4.25	0.50	3.03	1.07	0.63	7.06	5.37	4.78	94.7	29.5
29D 19H	0.65	5.61	4.34	0.53	3.25	1.20	0.66	7.03	5.61	4.94	95.7	21.9
29D 20H	0.63	5.59	4.35	0.47	3.06	1.17	0.63	7.48	5.47	4.81	98.8	33.8
29D 21H	0.54	5.25	4.41	0.48	3.62	0.90	0.55	7.90	5.51	4.88	97.5	32.3
29D 22H	0.49	5.09	4.28	0.48	3.07	0.76	0.49	6.81	5.45	4.82	98.1	30.6
29D 23H	0.43	5.59	4.22	0.49	3.01	0.80	0.43	7.23	5.39	4.75	110.6	33.6
30D 0H	0.45	5.60	4.12	0.48	2.86	0.76	0.45	7.49	5.26	4.58	107.0	34.6

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
30D 1H	0.41	4.91	4.14	0.48	3.41	0.65	0.41	7.00	5.33	4.64	108.2	29.3
30D 2H	0.39	4.63	4.17	0.47	3.32	0.65	0.40	7.34	5.22	4.57	109.5	30.6
30D 3H	0.40	5.06	4.20	0.46	3.51	0.66	0.40	8.09	5.18	4.57	113.4	34.9
30D 4H	0.36	4.65	4.09	0.46	3.53	0.67	0.37	7.90	5.06	4.49	116.7	32.8
30D 5H	0.34	4.76	3.93	0.45	3.33	0.60	0.35	6.25	4.93	4.26	103.3	34.1
30D 6H	0.33	4.76	3.82	0.43	3.03	0.54	0.33	5.92	4.79	4.12	109.0	39.3
30D 7H	0.33	4.38	3.83	0.44	3.06	0.59	0.33	6.26	4.74	4.15	116.9	35.3
30D 8H	0.33	4.38	3.83	0.43	3.42	0.55	0.33	7.02	4.78	4.04	112.8	38.4
30D 9H	0.29	4.63	3.80	0.44	3.08	0.45	0.29	6.59	4.84	4.06	96.4	40.8
30D 10H	0.29	4.26	3.74	0.44	3.00	0.50	0.29	7.10	4.69	4.11	102.9	31.7
30D 11H	0.28	4.77	3.62	0.45	2.56	0.48	0.29	6.65	4.63	4.02	104.8	36.6
30D 12H	0.55	3.44	3.23	0.34	3.31	1.03	0.57	5.60	3.96	3.29	128.0	23.8
30D 13H	0.84	3.94	3.52	0.34	4.07	1.53	0.86	6.05	4.21	3.69	126.8	27.6
30D 14H	0.90	3.95	3.79	0.41	3.51	1.48	0.91	6.64	4.67	4.04	133.4	28.7
30D 15H	0.87	4.39	3.86	0.44	2.81	1.68	0.87	6.79	4.87	4.28	140.0	31.3
30D 16H	0.59	4.63	3.90	0.42	2.93	1.00	0.59	7.32	4.93	4.27	127.9	36.0
30D 17H	0.54	4.64	3.84	0.47	2.60	0.96	0.55	7.45	4.88	4.20	135.5	31.3
30D 18H	0.50	4.92	3.85	0.49	2.57	0.84	0.51	6.62	4.92	4.21	124.4	40.2
30D 19H	0.55	4.26	3.86	0.46	2.74	0.78	0.54	7.68	4.96	4.31	127.5	28.2
30D 20H	0.47	4.64	3.96	0.46	3.01	0.86	0.47	7.10	5.04	4.37	123.9	27.9
30D 21H	0.50	4.91	4.05	0.48	3.21	0.97	0.50	6.72	5.23	4.43	119.6	30.4
30D 22H	0.49	5.09	4.16	0.48	3.27	0.84	0.49	6.54	5.24	4.64	107.2	32.0
30D 23H	0.50	5.07	4.30	0.43	3.51	0.83	0.51	6.75	5.31	4.63	112.6	42.5
31D 0H	0.43	4.92	4.39	0.46	3.59	0.70	0.43	6.57	5.33	4.66	116.3	35.1
31D 1H	0.45	4.78	4.34	0.48	3.05	0.85	0.47	7.73	5.27	4.57	97.7	38.9
31D 2H	0.42	4.76	4.09	0.52	2.97	0.78	0.43	7.30	5.28	4.54	107.1	43.1
31D 3H	0.38	4.90	4.11	0.52	2.59	0.78	0.38	7.24	5.38	4.69	87.9	52.1
31D 4H	0.45	5.80	4.39	0.56	2.44	0.71	0.46	8.36	5.93	5.24	17.9	31.5
31D 5H	0.49	6.02	4.00	0.55	1.98	0.82	0.49	8.58	5.50	4.66	11.6	36.4
31D 6H	0.61	5.61	4.46	0.55	2.54	1.32	0.60	7.69	5.75	5.01	9.8	32.3
31D 7H	0.75	5.63	4.72	0.54	2.99	1.31	0.74	7.81	6.07	5.38	6.3	21.3
31D 8H	0.74	5.24	4.58	0.54	2.80	1.31	0.72	7.91	6.09	5.20	5.1	22.5
31D 9H	0.67	6.27	4.64	0.54	2.86	1.02	0.66	8.14	6.23	5.29	5.1	22.4
31D 10H	0.67	6.25	4.80	0.56	4.12	1.23	0.67	8.75	6.16	5.61	2.5	19.9

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

MAY, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
31D 11H	0.65	6.27	5.02	0.56	3.71	0.99	0.65	9.76	6.48	5.79	1.9	19.2
31D 12H	0.57	6.28	5.07	0.56	3.64	0.91	0.57	8.77	6.37	5.70	357.4	19.2
31D 13H	0.61	6.27	5.26	0.55	4.56	0.97	0.63	8.96	6.50	5.88	358.3	17.4
31D 14H	0.74	6.49	5.29	0.60	4.18	1.52	0.75	7.99	6.38	5.89	358.8	15.4
31D 15H	0.74	6.49	4.98	0.64	3.82	1.48	0.75	9.99	6.42	5.72	352.6	14.7
31D 16H	0.70	6.49	4.55	0.64	3.22	1.25	0.71	8.19	6.13	5.37	354.5	20.8
31D 17H	0.70	6.25	4.08	0.59	2.00	1.11	0.70	9.66	5.96	4.91	0.6	23.8
31D 18H	0.78	3.76	3.88	0.52	2.00	1.43	0.78	9.14	5.39	4.42	117.9	41.4
31D 19H	0.68	3.44	3.81	0.54	1.84	1.18	0.67	7.87	5.13	4.27	18.3	36.6
31D 20H	0.68	6.54	4.16	0.59	1.90	0.97	0.67	9.11	5.86	4.84	21.5	30.6
31D 21H	0.62	7.06	5.00	0.66	2.25	0.93	0.61	11.46	7.24	6.47	14.5	24.1
31D 22H	0.72	7.09	5.27	0.67	2.30	1.05	0.69	10.39	7.29	6.26	12.8	26.2
31D 23H	0.90	8.21	5.87	0.68	2.30	1.83	0.87	10.74	7.99	7.23	16.3	28.0

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
1D 0H	1.06	7.08	6.21	0.67	2.36	1.80	1.03	11.42	8.39	7.61	18.0	23.0
1D 1H	1.28	9.09	6.61	0.68	2.31	2.00	1.24	11.95	9.14	7.94	23.7	24.2
1D 2H	1.54	9.13	7.03	0.69	3.51	2.82	1.51	11.43	9.29	8.36	25.5	33.3
1D 3H	1.71	9.60	7.40	0.69	3.65	2.44	1.66	11.13	9.57	8.80	25.4	28.5
1D 4H	1.66	10.31	6.11	0.76	2.19	2.78	1.61	11.61	9.14	8.26	30.0	26.1
1D 5H	1.77	9.70	6.55	0.76	2.93	2.64	1.71	13.02	9.39	8.66	22.9	31.7
1D 6H	1.86	10.20	5.88	0.73	2.45	2.99	1.82	11.63	8.97	8.01	28.6	31.7
1D 7H	1.72	9.68	5.62	0.70	1.92	2.86	1.65	11.31	8.42	7.52	31.0	39.2
1D 8H	1.76	8.63	5.75	0.72	2.18	2.89	1.71	12.16	8.63	7.64	24.7	26.8
1D 9H	1.67	10.21	6.10	0.72	2.18	2.96	1.61	11.76	8.69	7.65	35.4	42.7
1D 10H	1.65	9.70	6.33	0.72	2.59	2.23	1.58	11.84	9.09	8.12	25.7	32.2
1D 11H	1.47	10.23	6.07	0.70	2.13	2.32	1.42	11.52	8.74	7.59	26.2	37.5
1D 12H	1.51	9.13	6.28	0.72	3.03	2.37	1.47	11.03	8.91	8.02	28.3	27.5
1D 13H	1.42	9.14	6.43	0.71	2.83	2.71	1.36	11.78	8.60	7.74	24.3	32.7

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
1D 14H	1.59	9.71	6.93	0.69	2.83	2.26	1.57	12.78	9.43	8.51	21.7	38.5
1D 15H	1.73	10.26	7.17	0.69	3.01	2.89	1.69	13.07	9.41	8.36	22.0	36.8
1D 16H	1.68	9.68	6.93	0.68	2.86	3.03	1.65	11.74	9.31	8.29	27.5	35.0
1D 17H	1.60	10.17	7.21	0.72	3.24	2.18	1.56	12.94	9.69	8.89	32.2	35.9
1D 18H	1.76	10.23	6.03	0.76	2.56	2.84	1.69	11.98	8.96	8.07	36.1	41.1
1D 19H	1.97	9.70	7.07	0.76	4.30	3.21	1.89	11.76	9.73	8.77	34.2	30.6
1D 20H	2.06	10.23	7.01	0.72	3.33	3.07	2.01	11.88	9.91	9.02	27.9	31.7
1D 21H	1.93	9.73	7.00	0.71	2.85	2.66	1.87	12.84	9.70	8.52	30.8	36.1
1D 22H	1.61	9.61	6.64	0.71	2.36	2.80	1.54	11.23	9.03	8.25	26.3	48.3
1D 23H	1.57	9.70	6.51	0.70	2.43	2.22	1.49	11.94	9.18	8.04	30.7	44.5
2D 0H	1.48	9.77	6.45	0.70	2.16	1.99	1.44	13.39	8.89	7.84	38.0	42.2
2D 1H	1.39	10.25	6.68	0.72	2.63	2.34	1.35	12.22	9.20	8.28	31.9	50.8
2D 2H	1.39	9.68	6.42	0.67	2.18	2.01	1.37	12.01	8.74	7.93	38.0	46.0
2D 3H	1.46	9.09	6.87	0.69	2.74	2.47	1.41	11.84	9.49	8.44	35.0	38.4
2D 4H	1.33	10.21	6.93	0.69	2.64	2.27	1.31	12.30	9.26	8.20	32.2	48.7
2D 5H	1.36	9.63	6.91	0.67	2.83	2.34	1.33	11.45	8.88	8.10	39.3	45.4
2D 6H	1.24	9.61	6.59	0.69	2.74	2.01	1.22	11.22	8.88	7.89	34.7	39.1
2D 7H	1.14	8.67	6.49	0.68	2.32	1.79	1.12	11.47	8.82	7.81	31.5	37.2
2D 8H	1.23	8.25	6.73	0.69	2.83	1.76	1.21	12.26	8.79	7.83	26.7	31.1
2D 9H	1.25	9.65	6.73	0.67	2.57	1.92	1.22	11.24	9.17	8.01	35.5	36.9
2D 10H	1.33	9.15	6.83	0.68	2.50	2.18	1.27	12.27	9.01	8.02	27.0	45.7
2D 11H	1.48	8.66	7.07	0.67	2.89	2.19	1.44	12.61	9.49	8.28	29.3	26.8
2D 12H	1.43	10.17	7.10	0.68	2.89	2.07	1.40	12.78	9.36	8.21	30.9	43.6
2D 13H	1.48	9.77	7.31	0.70	3.51	2.74	1.42	12.85	9.61	8.53	34.4	47.0
2D 14H	1.37	9.63	7.02	0.68	2.72	2.59	1.33	12.42	9.39	8.35	17.0	48.2
2D 15H	1.40	8.68	6.92	0.69	2.76	2.58	1.37	12.91	9.24	8.19	31.5	36.0
2D 16H	1.58	7.84	7.10	0.70	2.75	3.16	1.57	12.50	9.53	8.41	33.3	26.4
2D 17H	1.39	9.59	6.96	0.74	2.89	2.80	1.36	11.60	8.88	8.24	26.7	31.5
2D 18H	1.38	10.25	7.19	0.74	2.98	2.48	1.36	12.70	9.45	8.68	27.2	34.4
2D 19H	1.35	9.03	6.91	0.73	2.79	2.14	1.33	12.57	9.14	8.25	33.3	35.5
2D 20H	1.38	9.66	7.37	0.74	3.17	2.43	1.35	12.18	9.68	8.67	32.8	33.8
2D 21H	1.54	10.23	7.62	0.72	3.48	2.89	1.53	12.16	10.06	8.99	28.3	39.2
2D 22H	1.46	9.14	7.46	0.70	3.23	2.55	1.41	12.05	9.53	8.56	34.2	34.8
2D 23H	1.55	9.66	7.83	0.66	3.91	2.41	1.53	13.34	9.87	8.83	27.6	30.7

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
3D 0H	1.34	9.21	7.57	0.66	3.13	1.92	1.28	11.88	9.60	8.62	28.8	38.7
3D 1H	1.31	9.74	7.66	0.68	3.62	2.20	1.28	12.42	9.76	8.83	26.3	25.9
3D 2H	1.34	9.14	7.63	0.64	4.03	2.38	1.32	12.76	9.57	8.58	24.4	37.8
3D 3H	1.27	9.62	7.50	0.65	3.84	2.15	1.24	13.61	9.59	8.51	28.4	31.7
3D 4H	1.16	8.62	7.21	0.65	3.91	2.16	1.15	12.79	8.93	8.10	28.9	29.4
3D 5H	1.18	9.14	7.04	0.73	3.49	2.04	1.19	10.81	9.10	8.23	28.3	31.9
3D 6H	1.29	9.12	7.21	0.70	3.93	2.13	1.29	11.80	9.16	8.26	29.0	37.9
3D 8H	1.14	8.63	7.13	0.69	4.82	1.76	1.13	10.76	8.96	8.32	32.4	31.8
3D 9H	1.26	9.06	7.39	0.68	5.20	2.29	1.28	11.66	9.06	8.15	26.0	32.1
3D 10H	1.30	8.63	7.53	0.65	5.68	2.37	1.24	11.01	9.20	8.34	23.9	29.9
3D 11H	1.17	9.13	7.02	0.65	3.88	1.97	1.15	11.93	9.04	8.05	25.6	38.2
3D 12H	1.14	9.67	7.04	0.66	3.25	1.81	1.13	11.02	8.77	8.18	23.8	33.1
3D 13H	1.19	8.62	7.26	0.63	5.00	1.83	1.17	10.97	8.81	8.03	27.2	34.5
3D 14H	1.07	8.11	6.88	0.63	4.13	1.65	1.07	11.01	8.63	7.72	26.2	25.5
3D 15H	1.03	7.44	6.58	0.68	3.65	1.62	1.03	10.15	8.25	7.62	19.8	42.6
3D 16H	1.03	9.06	6.51	0.71	3.67	1.63	1.01	10.67	8.65	7.82	20.6	33.2
3D 17H	0.93	8.27	6.26	0.70	3.32	1.68	0.91	11.72	8.36	7.58	25.9	41.0
3D 18H	0.89	8.19	6.07	0.71	3.04	1.38	0.87	10.42	8.06	7.38	27.7	34.5
3D 19H	0.96	7.82	6.28	0.70	3.50	1.57	0.96	10.49	8.32	7.41	33.2	35.2
3D 20H	0.92	8.17	6.50	0.71	3.76	1.77	0.90	11.16	8.41	7.77	29.2	37.7
3D 21H	0.99	8.62	6.87	0.70	5.19	1.72	0.99	11.29	8.67	7.84	37.3	31.2
3D 22H	0.92	8.63	6.69	0.71	4.44	1.78	0.91	10.30	8.63	7.84	34.1	39.5
3D 23H	0.96	8.20	6.76	0.70	4.82	1.85	0.97	12.07	8.81	7.92	31.5	31.8
4D 0H	1.00	8.19	6.72	0.69	4.62	1.56	0.98	10.73	8.67	7.83	40.0	33.4
4D 1H	1.07	8.18	6.89	0.66	5.75	1.74	1.07	10.50	8.60	7.74	33.0	30.3
4D 2H	1.13	8.19	6.66	0.65	4.51	1.72	1.13	10.62	8.58	7.60	31.3	29.3
4D 3H	1.10	7.85	6.72	0.66	6.12	1.85	1.09	10.26	8.34	7.65	38.7	23.6
4D 4H	1.09	8.20	6.73	0.67	5.19	1.88	1.08	10.65	8.43	7.70	38.0	31.0
4D 5H	1.15	8.16	6.44	0.69	5.70	2.07	1.13	9.64	8.14	7.53	33.3	26.1
4D 6H	1.02	8.14	6.14	0.66	4.04	1.99	1.02	9.94	7.97	7.25	39.6	38.1
4D 7H	1.09	7.80	6.34	0.65	3.62	2.01	1.08	9.81	8.12	7.37	36.7	34.3
4D 8H	1.04	8.20	6.46	0.65	4.12	1.70	1.02	9.95	8.19	7.49	34.3	36.4
4D 9H	0.97	7.80	6.23	0.65	3.47	1.61	0.96	9.75	7.85	7.05	31.9	42.7
4D 10H	0.96	8.17	6.16	0.66	3.85	1.62	0.93	10.00	7.94	7.16	39.6	44.7

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
4D 11H	0.97	8.15	6.30	0.65	3.66	1.51	0.95	10.60	7.93	7.17	46.7	32.9
4D 12H	0.83	8.17	5.99	0.63	3.28	1.36	0.82	9.24	7.69	6.93	41.4	38.3
4D 13H	0.81	7.79	6.04	0.62	3.49	1.32	0.80	10.40	7.85	6.94	52.4	35.2
4D 14H	0.78	8.13	5.81	0.64	3.14	1.35	0.76	9.34	7.61	6.88	39.2	35.5
4D 15H	0.70	7.78	5.37	0.69	2.96	1.13	0.70	9.26	7.22	6.66	31.1	38.4
4D 16H	0.71	8.12	5.55	0.69	3.21	1.25	0.71	9.06	7.48	6.87	46.6	31.8
4D 17H	0.67	7.45	5.58	0.66	2.71	1.03	0.66	9.72	7.40	6.60	56.7	35.5
4D 18H	0.66	7.75	5.75	0.65	3.12	1.02	0.65	9.23	7.51	6.78	52.2	36.7
4D 19H	0.65	7.76	5.73	0.62	2.62	1.12	0.64	9.50	7.52	6.76	37.5	34.9
4D 20H	0.70	7.43	5.82	0.64	3.03	1.15	0.69	9.29	7.67	6.85	34.5	30.9
4D 21H	0.65	7.08	5.85	0.63	3.10	1.09	0.64	11.31	7.77	6.87	37.2	34.8
4D 22H	0.64	7.43	6.01	0.61	3.11	1.07	0.63	10.35	7.81	7.00	40.4	40.7
4D 23H	0.62	8.17	5.94	0.62	3.11	1.04	0.61	9.25	7.82	6.81	33.6	44.6
5D 0H	0.72	7.10	6.16	0.61	3.77	1.19	0.70	9.43	7.79	6.98	42.1	39.6
5D 1H	0.63	6.81	5.88	0.62	3.01	1.02	0.62	9.79	7.57	6.77	41.3	37.2
5D 2H	0.66	6.52	5.97	0.60	3.64	1.03	0.65	10.39	7.39	6.73	36.4	35.0
5D 3H	0.65	6.53	5.91	0.61	3.78	1.14	0.63	10.49	7.73	6.74	36.1	40.5
5D 4H	0.62	6.52	5.83	0.59	3.64	1.08	0.63	9.57	7.33	6.51	38.1	30.2
5D 5H	0.57	6.80	5.38	0.65	3.09	0.95	0.56	9.38	7.04	6.36	37.3	36.4
5D 6H	0.61	7.10	5.47	0.64	3.41	1.00	0.61	8.67	7.13	6.34	35.4	33.1
5D 7H	0.52	6.57	5.45	0.60	3.06	0.85	0.52	9.46	6.95	6.24	47.4	35.1
5D 8H	0.50	6.78	5.40	0.66	2.93	0.84	0.50	9.11	7.10	6.46	39.7	36.2
5D 9H	0.53	6.51	5.41	0.60	3.01	0.89	0.52	8.89	6.79	6.03	42.3	38.9
5D 10H	0.47	6.53	5.32	0.61	2.71	0.88	0.47	9.39	7.01	6.19	36.9	43.5
5D 11H	0.48	6.53	5.32	0.63	2.59	0.84	0.48	9.96	6.74	6.09	19.3	43.9
5D 12H	0.49	7.42	5.25	0.59	2.45	0.74	0.48	8.88	6.85	6.13	37.2	40.7
5D 13H	0.50	7.44	4.84	0.59	2.18	0.74	0.50	8.81	6.69	5.93	39.3	37.0
5D 14H	0.55	6.25	4.30	0.56	2.08	0.80	0.54	8.38	6.18	5.21	38.3	35.5
5D 15H	0.62	6.26	4.48	0.56	2.26	1.21	0.61	8.88	6.21	5.41	20.3	31.0
5D 16H	0.62	3.76	4.12	0.52	2.00	1.12	0.61	8.76	5.64	4.76	25.1	41.1
5D 17H	0.62	6.55	4.00	0.55	1.98	1.08	0.63	7.48	5.26	4.48	22.7	42.3
5D 18H	0.63	7.15	3.99	0.55	1.92	1.00	0.63	8.44	5.62	4.59	25.5	42.2
5D 20H	0.74	4.03	4.04	0.51	2.28	1.13	0.74	7.73	5.32	4.42	57.5	33.7
5D 21H	0.75	4.15	4.08	0.50	2.33	1.39	0.75	7.60	5.35	4.57	64.0	40.8

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
5D 22H	0.73	4.26	4.05	0.50	2.50	1.14	0.72	8.28	5.32	4.61	74.1	42.8
5D 23H	0.61	6.29	4.06	0.53	2.07	0.94	0.61	8.10	5.74	4.77	29.2	36.0
6D 0H	0.57	6.79	4.15	0.54	2.24	0.91	0.55	8.53	5.63	4.75	47.1	36.3
6D 1H	0.47	6.81	4.31	0.57	2.17	0.70	0.47	8.46	5.95	5.20	38.6	37.0
6D 2H	0.57	7.12	3.64	0.52	2.04	0.99	0.58	7.87	4.99	4.21	358.7	31.0
6D 3H	0.50	6.52	3.88	0.57	1.85	0.85	0.50	8.38	5.19	4.43	44.5	36.9
6D 4H	0.50	6.81	4.03	0.57	1.93	0.93	0.51	8.34	5.42	4.63	38.4	34.9
6D 5H	0.46	5.82	3.94	0.55	1.88	0.79	0.46	8.10	5.24	4.41	37.8	31.7
6D 6H	0.49	4.50	3.88	0.51	2.17	0.87	0.51	8.10	5.16	4.20	64.7	43.2
6D 7H	0.51	4.37	3.73	0.51	1.97	0.94	0.53	6.95	4.85	4.02	59.8	44.6
6D 8H	0.48	4.15	3.64	0.48	2.09	0.95	0.50	8.32	4.89	4.08	52.2	61.4
6D 9H	0.46	3.85	3.66	0.49	2.00	0.77	0.47	7.52	4.78	3.92	49.3	41.4
6D 10H	0.44	4.03	3.70	0.46	2.24	0.72	0.45	7.07	4.69	4.05	61.8	43.1
6D 11H	0.45	3.95	3.84	0.50	2.28	0.74	0.46	7.55	5.08	4.36	58.2	30.8
6D 12H	0.45	3.94	3.85	0.49	2.18	0.73	0.46	8.90	4.98	4.26	54.3	42.5
6D 13H	0.45	4.15	3.80	0.47	2.40	0.81	0.45	7.20	4.86	4.16	56.8	45.8
6D 14H	0.43	3.85	3.67	0.47	2.31	0.82	0.43	7.49	4.94	4.13	60.2	41.8
6D 15H	0.39	4.50	3.84	0.50	2.09	0.75	0.40	6.77	4.79	4.10	77.6	40.2
6D 16H	0.42	6.28	3.84	0.51	2.07	0.75	0.44	7.49	4.92	4.16	43.8	36.0
6D 17H	0.40	6.25	3.78	0.53	2.12	0.72	0.41	7.40	4.98	4.18	94.0	35.7
6D 18H	0.40	5.23	3.79	0.52	1.99	0.64	0.42	6.73	5.03	4.26	80.6	37.2
6D 19H	0.39	5.07	3.59	0.51	2.09	0.65	0.41	9.22	4.80	3.90	86.1	36.9
6D 20H	0.41	6.03	3.59	0.49	2.15	0.73	0.42	6.83	4.79	3.98	90.6	38.5
6D 21H	0.41	5.40	3.64	0.47	2.39	0.72	0.41	6.83	4.86	4.00	89.4	44.3
6D 22H	0.41	3.23	3.68	0.44	2.42	0.76	0.41	6.79	4.93	3.98	122.9	33.8
6D 23H	0.43	4.51	3.68	0.42	2.50	0.75	0.43	6.85	4.71	3.91	94.0	35.6
7D 0H	0.47	3.77	3.75	0.40	3.13	0.91	0.48	6.92	4.65	3.98	128.1	27.0
7D 1H	0.57	4.15	3.98	0.39	3.69	1.08	0.57	6.54	4.75	4.23	129.8	27.7
7D 2H	0.55	4.36	3.99	0.40	3.59	1.08	0.55	6.97	4.75	4.22	126.8	30.3
7D 3H	0.53	4.26	4.05	0.40	4.40	0.83	0.54	7.47	4.88	4.24	131.9	28.0
7D 4H	0.48	4.52	3.96	0.42	3.51	0.95	0.48	6.48	4.92	4.29	125.6	26.5
7D 5H	0.41	4.77	3.86	0.46	2.70	0.72	0.42	6.99	4.97	4.33	116.1	37.7
7D 6H	0.41	4.49	3.95	0.45	3.23	0.64	0.42	6.48	4.98	4.30	117.1	28.8

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
7D 7H	0.39	4.92	4.09	0.47	2.98	0.69	0.39	7.23	5.21	4.52	112.5	30.2
7D 8H	0.40	5.05	4.19	0.48	3.32	0.74	0.41	7.35	5.23	4.52	115.0	27.1
7D 9H	0.40	5.39	4.12	0.48	3.30	0.75	0.40	6.92	5.15	4.53	118.6	24.8
7D 10H	0.46	4.62	3.94	0.47	3.26	0.88	0.48	6.60	4.90	4.32	119.9	32.9
7D 11H	0.53	4.92	3.72	0.47	2.98	0.87	0.55	6.37	4.70	4.02	112.6	26.8
7D 12H	0.60	4.51	3.82	0.44	3.19	1.02	0.60	5.80	4.68	4.15	120.5	23.2
7D 13H	0.67	4.37	3.88	0.43	3.44	1.30	0.68	6.09	4.79	4.13	124.8	39.6
7D 14H	0.70	4.62	3.89	0.43	3.77	1.18	0.70	6.50	4.83	4.15	127.1	24.9
7D 15H	0.63	4.77	3.69	0.43	2.93	1.14	0.64	6.19	4.70	3.99	118.9	33.3
7D 16H	0.70	4.50	3.76	0.44	3.33	1.14	0.71	6.70	4.66	4.01	125.4	25.4
7D 17H	0.72	4.51	3.61	0.44	2.81	1.20	0.73	6.05	4.58	3.92	122.8	33.2
7D 18H	0.84	4.36	3.80	0.43	2.91	1.48	0.83	6.97	4.64	4.06	133.5	29.8
7D 19H	0.71	4.52	3.61	0.41	2.88	1.17	0.72	6.64	4.45	3.84	124.7	33.5
7D 20H	0.68	4.62	3.84	0.45	3.14	1.30	0.70	6.38	4.80	4.21	113.3	32.0
7D 21H	0.57	4.90	3.88	0.45	3.19	1.01	0.58	7.22	4.91	4.26	112.9	28.6
7D 22H	0.52	4.78	3.93	0.45	3.04	1.00	0.52	6.78	4.93	4.28	119.4	28.4
7D 23H	0.51	4.50	3.93	0.46	3.08	0.84	0.52	6.65	4.99	4.37	110.7	27.7
8D 0H	0.47	4.93	3.93	0.47	2.59	0.71	0.48	7.19	5.04	4.32	123.0	29.0
8D 1H	0.53	4.91	4.01	0.47	3.03	0.87	0.53	7.33	4.96	4.36	129.6	23.7
8D 2H	0.56	4.92	4.02	0.46	3.35	1.19	0.57	7.21	4.91	4.33	128.7	33.1
8D 3H	0.71	5.04	3.67	0.45	2.51	1.22	0.73	6.33	4.64	4.00	132.6	26.1
8D 4H	0.71	3.67	3.65	0.44	2.61	1.38	0.72	7.10	4.78	4.02	134.4	34.4
8D 5H	0.65	4.76	3.73	0.47	2.51	1.05	0.67	6.67	4.75	3.96	112.0	49.5
8D 6H	0.72	4.26	3.60	0.42	2.66	1.23	0.74	6.44	4.57	3.88	6.0	51.7
8D 7H	0.63	4.27	3.68	0.43	2.93	1.15	0.65	6.54	4.56	3.89	83.6	61.5
8D 8H	0.70	4.62	3.76	0.45	2.76	1.17	0.72	7.68	4.71	4.06	21.9	61.2
8D 9H	0.66	4.38	3.66	0.45	2.76	1.01	0.68	8.14	4.72	4.05	6.4	66.7
8D 10H	0.63	4.25	3.73	0.47	2.31	1.07	0.63	7.44	4.73	3.98	359.6	47.3
8D 11H	0.61	4.49	3.80	0.51	2.17	1.02	0.62	8.46	5.01	4.32	353.2	47.3
8D 12H	0.52	4.37	4.00	0.55	1.76	0.94	0.53	8.17	5.34	4.44	43.1	39.7
8D 13H	0.51	6.02	4.19	0.56	1.95	1.13	0.51	9.58	5.53	4.63	20.2	48.9
8D 14H	0.51	8.54	4.17	0.57	1.74	0.83	0.52	9.24	5.81	4.90	48.8	46.3
8D 15H	0.55	4.15	4.38	0.54	2.08	0.85	0.54	9.18	5.90	4.97	3.2	41.1
8D 16H	0.59	4.50	4.17	0.54	2.01	1.03	0.61	7.95	5.35	4.66	343.5	59.4

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
8D 17H	0.58	8.11	4.22	0.57	1.91	0.91	0.58	7.72	5.76	4.90	51.7	39.1
8D 18H	0.58	4.64	4.45	0.55	2.18	0.93	0.59	8.51	6.06	4.93	3.0	30.7
8D 19H	0.60	4.40	4.41	0.55	1.96	1.06	0.59	8.53	5.94	5.00	12.9	36.0
8D 20H	0.67	6.04	4.60	0.53	2.35	0.92	0.65	8.48	6.05	5.26	11.5	24.0
8D 21H	0.64	6.02	4.57	0.56	2.05	1.02	0.64	8.15	6.24	5.35	20.9	32.2
8D 22H	0.66	5.22	4.54	0.55	2.05	1.21	0.64	8.59	6.02	5.28	25.1	50.3
8D 23H	0.63	5.61	4.83	0.56	2.29	1.17	0.62	8.89	6.20	5.51	15.7	40.3
9D 0H	0.63	5.80	4.84	0.56	2.63	1.03	0.63	8.39	6.17	5.44	12.4	33.9
9D 1H	0.61	5.25	4.71	0.55	2.36	1.37	0.62	9.07	6.02	5.45	21.4	48.5
9D 2H	0.63	5.43	4.60	0.53	2.84	1.03	0.62	7.71	5.96	5.14	80.5	55.2
9D 3H	0.62	5.39	4.76	0.54	2.54	0.95	0.62	9.01	6.27	5.40	32.6	45.4
9D 4H	0.65	5.44	4.83	0.53	2.93	1.60	0.66	8.63	5.99	5.28	23.7	38.1
9D 5H	0.71	5.25	4.72	0.58	2.61	1.21	0.73	9.29	6.02	5.41	39.4	55.1
9D 6H	0.67	5.43	4.15	0.61	1.81	1.16	0.66	8.38	5.71	4.72	42.0	51.0
9D 7H	0.67	6.82	4.57	0.63	2.00	1.44	0.66	8.76	6.12	5.48	36.1	34.6
9D 8H	0.69	6.79	4.56	0.62	2.30	1.32	0.70	8.36	6.05	5.30	29.2	43.1
9D 9H	0.70	6.51	4.60	0.62	2.28	1.29	0.68	8.40	6.24	5.41	26.6	36.3
9D 10H	0.79	7.43	4.10	0.59	1.84	1.26	0.77	8.26	5.66	4.92	11.8	40.9
9D 11H	0.84	7.11	4.38	0.60	1.87	1.30	0.83	8.07	6.11	5.23	25.9	37.7
9D 12H	0.84	6.24	4.25	0.57	2.15	1.31	0.83	8.03	5.85	5.09	31.2	37.0
9D 13H	0.91	6.50	4.53	0.59	2.41	1.56	0.90	8.68	6.25	5.38	23.3	33.3
9D 14H	0.91	6.49	4.52	0.59	2.12	1.48	0.90	9.82	6.01	5.36	30.4	38.2
9D 15H	0.93	6.52	4.74	0.57	2.24	1.50	0.91	8.66	6.15	5.45	23.7	56.9
9D 16H	0.91	6.47	4.81	0.58	2.75	1.45	0.89	7.65	6.13	5.46	35.4	38.0
9D 17H	0.90	5.81	4.96	0.59	2.72	1.58	0.88	8.42	6.62	5.90	38.6	32.1
9D 18H	0.86	6.51	5.08	0.59	2.87	1.85	0.85	8.25	6.69	5.93	42.3	41.6
9D 19H	0.94	7.07	5.26	0.57	3.29	1.68	0.92	8.79	6.69	5.99	42.0	36.7
9D 20H	0.84	6.30	5.21	0.56	2.99	1.31	0.82	9.07	6.74	5.94	41.8	46.5
9D 21H	0.85	6.26	5.35	0.55	2.91	1.44	0.84	9.53	6.81	6.05	54.7	46.5
9D 22H	0.76	6.01	5.40	0.55	3.18	1.24	0.74	9.09	6.71	5.98	36.4	41.2
9D 23H	0.86	6.05	5.29	0.62	3.21	1.37	0.84	9.24	6.71	6.19	38.0	38.3
10D 0H	0.89	7.06	5.33	0.63	3.55	1.51	0.89	8.85	6.89	6.28	32.3	33.1
10D 1H	0.82	6.27	5.12	0.62	3.40	1.29	0.80	9.97	6.74	6.09	42.5	36.1

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
10D 2H	0.89	6.26	5.36	0.58	3.95	1.63	0.89	10.25	6.95	6.15	45.0	29.9
10D 3H	0.86	6.77	5.47	0.59	4.53	1.50	0.84	8.62	6.92	6.33	34.5	31.8
10D 4H	0.78	6.52	5.51	0.59	3.88	1.19	0.76	8.92	7.02	6.32	46.5	36.9
10D 5H	0.83	6.50	5.58	0.59	3.92	1.31	0.82	9.74	7.09	6.33	51.6	36.9
10D 6H	0.84	6.49	5.58	0.57	3.48	1.32	0.83	9.99	6.95	6.27	44.1	40.4
10D 7H	0.79	6.80	5.72	0.58	3.84	1.26	0.78	8.92	7.22	6.43	39.0	36.0
10D 8H	0.81	6.04	5.79	0.57	3.73	1.29	0.80	8.86	7.31	6.54	58.7	34.3
10D 9H	0.85	7.16	5.84	0.58	3.65	1.39	0.83	8.97	7.21	6.48	35.6	39.1
10D 10H	0.79	7.10	5.96	0.57	4.14	1.34	0.79	9.38	7.37	6.56	36.9	34.2
10D 11H	0.83	7.09	6.05	0.57	3.97	1.76	0.82	9.58	7.49	6.63	26.5	36.3
10D 12H	0.89	6.82	6.01	0.56	4.29	1.68	0.89	9.56	7.34	6.66	31.5	35.9
10D 13H	0.86	6.53	5.96	0.55	4.85	1.65	0.85	9.72	7.32	6.59	34.2	32.0
10D 14H	0.83	6.81	5.73	0.56	4.05	1.36	0.82	9.15	7.26	6.41	37.3	34.6
10D 15H	0.74	7.06	5.72	0.55	4.22	1.32	0.74	9.17	7.19	6.32	30.6	40.9
10D 16H	0.81	7.40	5.70	0.61	3.30	1.19	0.80	9.69	7.57	6.49	29.1	33.2
10D 17H	0.89	7.42	5.92	0.59	3.68	1.35	0.89	9.51	7.58	6.80	29.0	28.2
10D 18H	0.89	6.79	6.01	0.60	3.95	1.57	0.90	9.13	7.42	6.75	29.7	31.8
10D 19H	0.93	7.08	5.96	0.61	3.87	1.54	0.91	11.36	7.44	6.55	30.5	38.3
10D 20H	0.89	7.10	6.02	0.60	3.83	1.39	0.87	9.94	7.54	6.79	30.5	27.7
10D 21H	0.81	7.79	6.05	0.62	3.32	1.39	0.82	10.52	7.77	6.88	38.0	29.9
10D 22H	0.86	6.81	6.36	0.61	3.10	1.19	0.85	10.01	8.18	7.29	44.9	32.6
10D 23H	0.76	7.79	6.38	0.60	3.42	1.31	0.75	10.50	8.06	7.08	34.1	35.6
11D 0H	0.82	7.79	6.68	0.59	3.82	1.37	0.81	11.23	8.36	7.36	35.7	29.4
11D 1H	0.84	8.17	6.81	0.60	4.90	1.29	0.82	10.55	8.60	7.61	41.1	29.7
11D 2H	0.83	8.25	6.86	0.61	4.17	1.27	0.81	11.07	8.55	7.69	31.7	34.5
11D 3H	0.80	7.84	6.91	0.61	5.02	1.19	0.80	10.81	8.46	7.61	41.8	35.6
11D 4H	0.79	7.81	6.49	0.62	3.53	1.45	0.78	10.35	8.15	7.40	39.6	42.2
11D 5H	0.82	7.76	6.43	0.65	4.02	1.39	0.80	9.90	8.02	7.32	44.5	33.4
11D 6H	0.79	7.38	6.41	0.63	3.38	1.33	0.78	11.48	8.21	7.39	55.0	32.0
11D 7H	0.88	7.73	6.75	0.57	4.57	1.32	0.87	10.60	8.17	7.27	38.2	35.4
11D 8H	0.79	7.79	6.37	0.63	4.01	1.26	0.76	10.64	8.17	7.32	39.1	35.6
11D 9H	0.83	7.38	6.31	0.64	3.94	1.35	0.82	10.36	8.08	7.10	44.4	39.3
11D 10H	0.85	7.15	6.43	0.60	3.86	1.29	0.84	10.53	7.92	7.21	41.4	37.6
11D 11H	0.90	7.72	6.40	0.61	3.87	1.34	0.88	10.46	8.04	7.13	45.7	32.5

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
11D 12H	0.84	8.16	6.35	0.57	3.41	1.41	0.83	10.48	7.93	7.17	37.5	35.5
11D 13H	0.84	7.11	6.27	0.59	3.35	1.37	0.83	9.46	7.64	6.90	42.9	34.4
11D 14H	0.76	7.76	6.04	0.59	3.22	1.27	0.74	9.11	7.73	6.82	45.9	44.4
11D 16H	0.67	7.42	5.91	0.63	3.23	0.98	0.66	10.25	7.67	6.70	41.3	41.4
11D 17H	0.68	7.79	6.31	0.61	4.29	1.09	0.67	10.40	8.03	7.20	43.0	31.5
11D 18H	0.62	7.78	6.29	0.63	4.02	0.98	0.61	9.61	7.83	7.11	37.4	37.6
11D 19H	0.57	7.75	6.45	0.62	4.60	1.06	0.57	9.68	7.90	7.22	27.8	32.4
11D 20H	0.53	7.11	5.97	0.68	3.62	0.92	0.52	9.46	7.88	6.91	40.9	40.2
11D 21H	0.52	7.37	6.22	0.62	4.31	0.89	0.52	9.69	7.82	7.11	33.1	41.8
11D 22H	0.88	3.44	3.90	0.52	2.19	1.38	0.86	8.67	5.43	4.47	41.1	45.4
11D 23H	0.84	7.42	4.26	0.58	2.00	1.24	0.82	8.81	6.09	5.11	27.6	44.6
12D 0H	0.73	7.75	4.50	0.61	1.95	1.38	0.73	8.38	6.24	5.53	28.6	41.6
12D 1H	0.88	4.51	4.71	0.55	2.73	1.69	0.87	8.72	6.38	5.40	356.3	17.2
12D 2H	0.86	7.08	4.64	0.55	2.33	1.43	0.86	8.41	6.29	5.57	35.8	37.4
12D 3H	0.84	7.09	4.78	0.57	2.43	1.34	0.82	9.05	6.53	5.58	39.5	32.7
12D 4H	0.83	5.23	4.66	0.54	2.45	1.30	0.81	9.00	6.24	5.30	11.4	26.1
12D 5H	0.76	5.24	4.78	0.55	2.66	1.42	0.76	7.98	6.19	5.47	11.4	32.7
12D 6H	0.73	5.81	4.72	0.52	2.55	1.80	0.74	9.80	6.20	5.37	46.5	30.5
12D 7H	0.63	4.91	4.68	0.54	2.60	1.10	0.62	8.28	6.07	5.45	22.6	40.9
12D 8H	0.58	6.53	4.75	0.53	2.72	0.92	0.56	8.71	6.08	5.31	42.5	30.9
12D 9H	0.53	4.50	4.46	0.50	2.69	0.90	0.53	8.05	5.68	4.94	21.1	36.0
12D 10H	0.50	5.61	4.45	0.51	2.12	0.78	0.50	8.26	5.89	4.91	40.1	37.1
12D 11H	0.45	4.39	4.42	0.53	2.07	0.72	0.45	7.99	5.75	4.97	25.7	32.9
12D 12H	0.42	4.26	4.33	0.52	2.10	0.77	0.41	8.78	5.88	4.94	32.9	43.2
12D 13H	0.41	7.09	4.43	0.55	2.14	0.64	0.41	8.49	6.13	5.23	43.4	40.8
12D 14H	0.41	7.08	4.58	0.57	2.51	0.70	0.40	8.80	6.44	5.47	43.7	36.5
12D 15H	0.37	6.53	4.22	0.54	1.93	0.66	0.37	7.88	5.69	4.71	42.1	33.3
12D 16H	0.35	6.76	4.33	0.56	2.08	0.55	0.34	8.15	6.13	5.02	37.4	44.3
12D 17H	0.36	6.27	4.52	0.57	2.29	0.73	0.35	8.15	6.09	5.09	32.9	36.7
12D 18H	0.30	6.52	4.72	0.57	2.63	0.48	0.29	9.05	6.64	5.63	36.2	34.4
12D 19H	0.31	6.50	4.65	0.58	2.69	0.47	0.31	8.05	6.48	5.62	33.8	37.1
12D 20H	0.30	5.80	4.36	0.56	2.00	0.53	0.29	8.15	6.02	5.13	20.7	40.4
12D 21H	0.31	6.28	4.36	0.56	2.05	0.64	0.31	9.16	5.99	4.95	35.9	39.4
12D 22H	0.33	5.84	4.50	0.55	2.25	0.55	0.32	10.25	6.20	5.19	40.3	34.6

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
12D 23H	0.34	6.05	4.47	0.57	2.10	0.50	0.33	8.50	6.30	5.37	34.2	43.7
13D 0H	0.33	6.02	4.47	0.58	2.08	0.60	0.33	8.27	6.21	5.35	37.9	39.8
13D 1H	0.32	6.03	4.54	0.58	2.09	0.53	0.32	8.59	6.18	5.30	41.6	40.6
13D 2H	0.35	6.04	4.55	0.58	2.31	0.61	0.35	8.28	6.20	5.30	36.5	43.2
13D 3H	0.33	6.00	4.29	0.56	2.01	0.53	0.33	8.48	5.91	4.88	47.7	36.2
13D 4H	0.31	5.61	4.37	0.54	2.07	0.48	0.32	9.29	5.91	4.98	47.4	44.6
13D 5H	0.30	5.42	4.19	0.57	1.96	0.47	0.29	8.16	5.71	4.93	52.1	41.6
13D 6H	0.29	6.27	4.30	0.55	1.95	0.53	0.29	8.38	5.99	5.00	43.0	46.4
13D 7H	0.25	5.60	4.30	0.53	1.95	0.51	0.25	8.43	5.86	4.96	37.8	40.3
13D 8H	0.24	4.76	4.34	0.55	1.92	0.36	0.24	9.18	5.94	5.07	38.9	34.1
13D 9H	0.24	6.52	3.94	0.56	1.80	0.54	0.24	9.59	5.81	4.58	57.2	41.3
13D 10H	0.25	6.50	4.12	0.56	1.93	0.47	0.25	8.38	5.84	4.80	53.3	40.2
13D 11H	0.22	6.49	4.44	0.59	2.47	0.35	0.22	8.83	5.99	5.09	60.8	35.7
13D 12H	0.23	6.50	4.12	0.56	1.81	0.54	0.23	9.14	5.90	4.97	44.7	46.0
13D 13H	0.20	6.30	4.15	0.59	1.94	0.30	0.21	8.66	5.78	4.73	55.7	38.5
13D 14H	0.23	6.50	4.21	0.58	2.06	0.43	0.23	11.30	6.09	4.92	80.4	40.9
13D 15H	0.23	5.98	3.92	0.54	1.88	0.78	0.24	8.40	5.41	4.48	49.7	47.1
13D 16H	0.22	5.81	3.81	0.55	1.96	0.39	0.24	7.88	5.02	3.99	45.4	47.1
13D 17H	0.26	6.01	3.69	0.59	2.17	0.50	0.27	7.53	5.15	4.20	32.4	35.7
13D 18H	0.30	2.73	3.18	0.46	3.41	0.61	0.31	7.07	4.42	3.36	128.0	30.5
13D 19H	0.35	2.99	3.21	0.43	3.35	0.60	0.36	7.49	4.13	3.43	126.5	29.2
13D 20H	0.33	2.99	3.24	0.43	3.17	0.55	0.34	7.28	4.36	3.35	131.2	35.9
13D 21H	0.30	2.78	3.26	0.46	3.26	0.55	0.30	6.95	4.29	3.46	127.8	36.5
13D 22H	0.24	5.24	3.45	0.52	2.47	0.41	0.26	8.00	4.78	3.67	41.4	41.9
13D 23H	0.21	5.08	3.75	0.60	1.95	0.38	0.22	9.48	5.15	4.32	48.6	40.4
14D 0H	0.19	4.38	3.80	0.60	2.04	0.32	0.20	10.00	5.25	4.27	56.4	53.8
14D 1H	0.18	5.27	3.86	0.59	2.25	0.30	0.20	7.96	5.13	4.11	54.2	46.9
14D 2H	0.18	2.52	3.49	0.55	2.24	0.30	0.19	8.41	4.87	3.85	108.1	37.3
14D 3H	0.20	2.52	3.38	0.52	2.37	0.37	0.21	7.28	4.64	3.68	57.7	56.2
14D 4H	0.21	2.64	3.30	0.48	2.81	0.39	0.22	6.81	4.53	3.61	107.3	38.4
14D 5H	0.21	3.10	3.27	0.43	2.87	0.37	0.23	6.60	4.06	3.20	112.1	32.6
14D 6H	0.20	3.10	3.30	0.43	2.69	0.41	0.22	7.91	4.21	3.40	109.5	41.9
14D 7H	0.21	3.17	3.25	0.45	2.71	0.38	0.21	11.30	4.28	3.42	102.6	52.2

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ε	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
14D 8H	0.22	3.15	3.27	0.44	2.77	0.35	0.23	8.50	4.21	3.25	111.4	36.4
14D 9H	0.21	3.36	3.27	0.41	3.03	0.43	0.23	8.17	4.18	3.32	112.8	43.0
14D 10H	0.21	3.16	3.32	0.45	2.83	0.40	0.23	7.47	4.23	3.37	110.3	51.5
14D 11H	0.19	3.17	3.35	0.45	3.15	0.38	0.21	8.65	4.12	3.33	107.8	41.9
14D 12H	0.19	3.30	3.32	0.43	2.93	0.40	0.21	7.10	4.02	3.22	100.3	44.5
14D 13H	0.20	3.16	3.29	0.40	3.25	0.44	0.22	6.88	4.13	3.45	88.8	49.8
14D 14H	0.21	3.10	3.28	0.37	3.76	0.39	0.22	7.42	4.03	3.38	106.8	55.0
14D 15H	0.21	3.04	3.19	0.36	3.74	0.40	0.23	8.54	3.98	3.17	88.5	60.8
14D 16H	0.20	3.29	3.27	0.37	3.85	0.38	0.22	7.38	4.05	3.22	75.4	63.5
14D 17H	0.18	3.11	3.17	0.38	3.44	0.40	0.20	7.25	4.06	3.10	101.9	47.9
14D 18H	0.18	3.10	3.12	0.38	3.49	0.38	0.19	7.35	4.02	3.11	87.5	53.0
14D 19H	0.18	2.98	3.09	0.37	3.79	0.31	0.19	7.81	4.21	3.13	98.5	41.9
14D 20H	0.17	3.10	3.27	0.43	2.59	0.26	0.17	7.66	4.42	3.46	94.7	53.2
14D 21H	0.17	4.76	3.37	0.44	3.01	0.34	0.18	7.42	4.52	3.70	98.3	24.0
14D 22H	0.16	2.98	3.23	0.40	3.54	0.32	0.17	8.97	4.31	3.39	111.4	41.1
14D 23H	0.18	3.05	3.38	0.44	3.30	0.34	0.19	7.29	4.63	3.62	113.7	38.6
15D 0H	0.18	2.99	3.23	0.39	3.38	0.33	0.18	7.55	4.35	3.42	106.8	39.3
15D 1H	0.20	3.00	3.23	0.37	3.84	0.31	0.20	7.14	4.19	3.29	106.9	51.3
15D 2H	0.19	3.30	3.19	0.36	3.34	0.38	0.20	6.58	3.88	3.25	116.0	46.3
15D 3H	0.19	3.30	3.21	0.35	4.15	0.34	0.20	7.54	3.92	3.24	95.2	50.2
15D 4H	0.19	3.17	3.24	0.39	3.10	0.38	0.20	6.93	4.11	3.36	105.2	57.3
15D 5H	0.19	3.43	3.36	0.42	3.36	0.43	0.20	10.15	4.38	3.53	112.1	38.9
15D 6H	0.18	3.05	3.28	0.39	3.42	0.34	0.19	8.59	4.14	3.31	70.2	61.7
15D 7H	0.18	3.16	3.32	0.41	3.49	0.32	0.19	7.55	4.23	3.34	69.6	52.9
15D 8H	0.19	2.94	3.20	0.40	3.40	0.32	0.19	8.91	4.25	3.34	86.9	46.6
15D 9H	0.18	3.22	3.11	0.37	3.69	0.37	0.19	8.39	4.19	3.23	95.5	56.9
15D 10H	0.16	3.04	3.16	0.40	3.39	0.27	0.17	9.38	4.22	3.25	97.7	40.3
15D 11H	0.18	3.09	3.08	0.35	4.38	0.32	0.19	7.32	3.96	3.06	118.7	42.7
15D 12H	0.15	3.04	3.11	0.37	4.00	0.31	0.17	6.44	3.90	2.99	102.4	52.9
15D 13H	0.13	3.04	3.17	0.44	2.76	0.26	0.15	7.42	4.00	3.11	117.4	42.6
15D 14H	0.13	3.04	3.23	0.42	2.93	0.27	0.15	8.38	4.12	3.19	106.6	48.4
15D 15H	0.13	2.89	3.08	0.36	3.82	0.28	0.16	6.77	3.71	2.84	92.3	53.3
15D 16H	0.14	2.99	3.11	0.38	3.36	0.27	0.16	7.03	3.90	3.05	105.5	39.5
15D 17H	0.17	2.88	2.97	0.33	4.17	0.40	0.19	6.41	3.54	2.80	119.5	37.9

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
15D 18H	0.17	3.04	3.04	0.38	3.44	0.36	0.20	7.11	3.82	2.97	104.3	51.6
15D 19H	0.18	3.16	3.08	0.38	3.25	0.38	0.20	6.68	3.77	2.90	100.3	43.8
15D 20H	0.17	2.83	3.07	0.38	3.10	0.37	0.20	6.81	3.83	3.03	104.5	40.8
15D 21H	0.19	3.11	3.27	0.39	2.72	0.38	0.20	6.33	4.06	3.29	119.4	42.3
15D 22H	0.18	4.50	3.48	0.41	2.90	0.40	0.20	8.37	4.34	3.59	126.1	33.6
15D 23H	0.18	4.38	3.48	0.43	2.50	0.40	0.18	6.25	4.43	3.66	128.6	42.1
16D 0H	0.17	3.44	3.64	0.45	2.44	0.35	0.17	8.75	4.63	3.83	110.6	51.7
16D 1H	0.16	3.44	3.50	0.44	2.48	0.28	0.17	8.11	4.57	3.77	111.4	42.0
16D 2H	0.15	4.25	3.68	0.43	2.78	0.30	0.15	8.91	4.87	4.02	111.9	29.3
16D 3H	0.15	4.15	3.52	0.43	2.79	0.30	0.16	7.59	4.56	3.77	107.2	32.1
16D 4H	0.16	3.94	3.58	0.41	2.82	0.36	0.17	7.46	4.63	3.73	102.4	34.3
16D 5H	0.17	4.16	3.56	0.48	2.21	0.27	0.18	7.81	4.78	3.86	117.3	35.6
16D 6H	0.19	3.38	3.48	0.42	2.79	0.35	0.20	6.64	4.49	3.75	81.7	48.1
16D 7H	0.19	3.85	3.65	0.43	2.72	0.35	0.21	7.03	4.29	3.54	123.7	27.6
16D 8H	0.29	2.44	2.96	0.38	3.88	0.60	0.33	5.86	3.54	2.85	351.1	22.8
16D 9H	0.40	2.98	3.00	0.31	4.32	0.78	0.42	7.06	3.49	2.96	336.9	24.4
16D 10H	0.34	3.23	3.13	0.32	4.21	0.88	0.37	6.00	3.67	3.02	347.9	41.6
16D 11H	0.31	3.16	3.23	0.36	3.15	0.55	0.32	5.29	3.94	3.32	346.1	42.5
16D 12H	0.26	3.04	3.25	0.35	3.14	0.51	0.28	7.65	3.96	3.29	345.1	43.7
16D 13H	0.24	3.94	3.50	0.41	2.92	0.40	0.25	7.29	4.43	3.66	120.3	58.9
16D 14H	0.22	4.15	3.50	0.39	3.17	0.40	0.22	7.46	4.44	3.75	87.1	42.7
16D 15H	0.24	4.13	3.79	0.45	2.71	0.48	0.25	7.94	4.75	4.06	92.8	50.1
16D 16H	0.27	8.18	4.05	0.53	3.34	0.49	0.27	8.67	5.51	4.58	39.9	23.7
16D 17H	0.26	4.15	3.66	0.42	3.34	0.53	0.27	6.93	4.55	3.90	77.7	39.3
16D 18H	0.27	4.37	3.93	0.43	3.83	0.48	0.28	7.77	4.75	4.14	83.9	41.1
16D 19H	0.29	4.05	3.45	0.43	3.06	0.69	0.31	5.87	4.26	3.53	83.5	38.2
16D 20H	0.31	4.48	3.44	0.45	2.90	0.66	0.33	6.15	4.35	3.64	81.8	56.5
16D 21H	0.24	4.37	3.33	0.43	2.80	0.48	0.26	5.96	4.14	3.42	83.4	41.6
16D 22H	0.27	4.06	3.42	0.45	2.65	0.50	0.29	6.12	4.38	3.56	89.7	41.5
16D 23H	0.26	4.51	3.50	0.49	2.55	0.47	0.28	7.36	4.55	3.70	102.6	25.9
17D 0H	0.23	4.63	3.61	0.49	2.38	0.42	0.24	7.27	4.87	3.88	100.6	28.1
17D 1H	0.28	3.94	3.50	0.45	2.48	0.56	0.29	6.21	4.49	3.79	98.3	42.9
17D 2H	0.34	4.26	3.50	0.44	2.66	0.72	0.36	7.22	4.42	3.64	101.4	42.7

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{\max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{\max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
17D 3H	0.33	4.50	3.47	0.46	2.46	0.61	0.36	6.86	4.35	3.56	88.9	39.8
17D 4H	0.34	4.26	3.61	0.47	2.63	0.63	0.34	7.25	4.60	3.87	92.6	41.7
17D 5H	0.35	4.28	3.60	0.43	2.66	0.59	0.36	8.56	4.57	3.78	90.4	49.5
17D 6H	0.36	4.36	3.54	0.44	2.41	0.76	0.38	7.56	4.63	3.86	134.8	69.3
17D 7H	0.34	4.50	3.72	0.48	2.44	0.61	0.35	7.56	4.77	4.06	69.8	53.1
17D 8H	0.36	4.05	3.86	0.48	2.66	0.56	0.36	7.68	5.00	4.24	63.4	56.3
17D 9H	0.36	4.15	3.75	0.45	2.62	0.75	0.36	6.70	4.77	4.07	60.1	55.8
17D 10H	0.39	4.05	3.82	0.46	2.51	0.83	0.39	7.91	4.98	4.21	72.1	45.6
17D 11H	0.34	3.76	3.76	0.46	2.34	0.60	0.34	7.08	5.02	4.09	80.7	44.7
17D 12H	0.35	4.37	3.99	0.47	2.49	0.58	0.35	8.12	5.00	4.35	80.0	54.2
17D 13H	0.34	4.37	4.01	0.47	2.28	0.59	0.35	7.48	5.14	4.27	51.0	54.5
17D 14H	0.33	4.16	3.89	0.46	2.28	0.50	0.33	7.42	5.10	4.32	34.8	47.1
17D 15H	0.33	5.07	4.05	0.50	2.61	0.54	0.34	7.52	5.23	4.50	59.8	46.6
17D 16H	0.34	4.93	3.99	0.50	2.33	0.57	0.35	7.33	5.08	4.40	49.6	55.6
17D 17H	0.31	4.93	4.04	0.51	2.58	0.57	0.32	7.31	5.13	4.48	93.2	40.3
17D 18H	0.30	4.89	4.27	0.51	2.75	0.48	0.30	7.26	5.32	4.77	72.8	48.5
17D 19H	0.27	5.06	4.28	0.50	2.87	0.50	0.28	7.55	5.44	4.67	67.2	52.1
17D 20H	0.28	5.05	4.06	0.50	2.71	0.55	0.28	7.55	5.34	4.52	65.9	42.8
17D 21H	0.26	5.42	4.04	0.50	2.65	0.48	0.26	7.45	5.24	4.50	56.2	41.8
17D 22H	0.29	5.40	3.77	0.50	2.33	0.45	0.29	7.13	5.00	4.19	65.9	48.2
17D 23H	0.33	4.92	3.56	0.49	2.09	0.59	0.34	7.20	4.82	3.88	77.6	48.4
18D 0H	0.37	3.51	3.49	0.42	2.43	0.65	0.37	6.34	4.51	3.76	115.7	30.1
18D 1H	0.33	5.41	3.63	0.45	2.42	0.51	0.34	7.42	4.78	3.91	81.9	38.2
18D 2H	0.30	5.05	4.00	0.45	2.61	0.59	0.31	6.84	5.07	4.27	74.3	49.1
18D 3H	0.28	3.86	4.00	0.43	2.94	0.48	0.28	7.42	5.16	4.32	114.0	45.4
18D 4H	0.30	4.04	3.87	0.42	3.03	0.53	0.29	7.29	4.81	4.15	106.5	25.1
18D 5H	0.33	3.87	3.74	0.43	2.73	0.67	0.34	7.53	4.70	4.01	110.6	41.5
18D 6H	0.31	4.05	3.88	0.48	2.30	0.54	0.31	8.00	5.07	4.35	74.9	41.6
18D 7H	0.31	3.68	3.66	0.44	2.60	0.64	0.34	7.36	4.40	3.77	112.2	28.0
18D 8H	0.35	3.68	3.41	0.45	2.30	0.56	0.37	6.32	4.28	3.46	114.3	50.8
18D 9H	0.37	3.04	3.36	0.41	2.54	0.62	0.38	6.27	4.23	3.51	352.3	41.1
18D 10H	0.34	3.59	3.47	0.42	2.57	0.76	0.37	7.31	4.53	3.64	53.7	58.7
18D 11H	0.31	4.76	3.38	0.42	2.48	0.58	0.32	6.92	4.40	3.56	48.5	63.1
18D 12H	0.31	3.45	3.54	0.43	2.51	0.50	0.32	6.61	4.56	3.83	99.4	65.6

Table A1.1 (Cont'd).

SITE : Donghae Harbor

JUNE, 1997

Time	H_s (m)	T_p (sec)	T_z (sec)	ϵ	Q_p	H_{max} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (sec)	$T_{1/3}$ (sec)	$T_{H1/3}$ (sec)	θ (deg)	s (deg)
18D 13H	0.31	3.23	3.44	0.44	2.31	0.59	0.32	7.94	4.45	3.53	87.6	54.2
18D 14H	0.31	3.05	3.34	0.42	2.50	0.91	0.32	7.25	4.40	3.53	98.2	47.4
18D 15H	0.31	4.62	3.59	0.46	2.23	0.57	0.32	6.95	4.53	3.81	45.4	42.5
18D 16H	0.25	3.51	3.62	0.48	2.17	0.40	0.26	6.90	4.73	3.89	62.9	31.3
18D 17H	0.26	4.39	3.73	0.47	2.22	0.45	0.27	8.29	4.95	4.13	49.9	43.1
18D 18H	0.23	7.04	3.91	0.55	1.90	0.38	0.23	7.97	5.36	4.51	63.4	34.9
18D 19H	0.22	7.10	3.98	0.56	2.01	0.40	0.22	9.37	5.70	4.67	66.2	33.5
18D 20H	0.21	6.29	4.08	0.55	2.08	0.43	0.22	7.76	5.52	4.69	55.1	38.5
18D 21H	0.26	3.60	3.73	0.49	2.55	0.53	0.26	7.59	5.12	4.09	265.6	69.9
18D 22H	0.27	4.52	3.87	0.50	2.17	0.43	0.27	7.74	5.38	4.40	103.8	27.1
18D 23H	0.25	6.52	4.22	0.56	2.45	0.43	0.25	9.36	6.28	5.15	58.5	41.8
19D 0H	0.24	6.54	4.29	0.58	2.62	0.42	0.25	7.48	5.82	5.06	55.8	42.9
19D 1H	0.27	6.51	3.86	0.58	2.51	0.46	0.29	7.88	5.01	3.90	59.9	35.4
19D 2H	0.36	3.05	3.29	0.45	2.79	0.65	0.39	6.57	4.38	3.40	6.0	31.5
19D 3H	0.36	6.03	3.41	0.48	2.26	0.59	0.36	7.37	4.36	3.49	50.6	38.1
19D 4H	0.34	3.29	3.38	0.46	2.59	0.56	0.35	6.90	4.43	3.62	13.1	41.6
19D 5H	0.32	6.27	3.40	0.46	2.83	0.62	0.34	7.58	4.51	3.73	72.0	39.7
19D 6H	0.29	2.99	3.40	0.47	2.77	0.61	0.30	6.72	4.59	3.74	354.0	39.2
19D 7H	0.26	6.25	3.39	0.46	2.58	0.49	0.27	6.81	4.63	3.69	77.5	44.3
19D 8H	0.25	6.01	3.34	0.45	2.58	0.50	0.27	7.18	4.53	3.62	52.4	57.5
19D 9H	0.28	3.00	3.39	0.45	2.56	0.54	0.29	7.98	4.69	3.73	356.3	60.8
19D 12H	0.22	5.81	3.47	0.50	2.47	0.37	0.23	7.73	4.93	3.85	59.8	37.5
19D 15H	0.22	5.23	3.77	0.51	2.23	0.36	0.22	7.10	5.06	4.24	37.1	50.3
19D 16H	0.22	5.77	3.71	0.50	2.14	0.36	0.23	7.65	4.87	4.05	54.6	44.3