

제3차년도
최종보고서

BSPN 00236-747-2

동해안의 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(Ⅲ)

A study on the Harbour Siltation and Shoreline Changes
in the Eastern Coast of Korea(Ⅲ)

1994. 9

연구기관

한국해양연구소

과학기술처

제 출 문

과학기술처장관 귀하

본 보고서를 “동해안의 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(Ⅲ)”과제의 최종보고서로 제출합니다.

1994년 9월 19일

주관연구기관 : 한국해양연구소

연구책임자 : 이광수

연구 원 : 염기대, 채장원

서경덕, 정경태

김효섭, 소재귀

진재율, 강관수

이호진, 박진순

연구 조원 : 김용권, 백원대

송한준, 김윤철

김미경, 박현수

최영미

요 약 문

I. 제 목

동해안의 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(Ⅲ)

II. 연구개발의 목적 및 중요성

동해안에는 크고 작은 지정항 및 어항이 산재해 있으며, 현재 동해안 대부분의 항만은 토사의 항내 퇴적으로 인한 항만매몰 문제로 인하여 항내 및 항로의 수심을 유지하기 위하여 거의 매년 준설을 실시하고 있다. 또한 항만의 대형화에 따른 방파제 연장 등으로 인하여 항만매몰의 가속화 또는 주변 해안의 심한 변형을 초래하는 문제가 야기되고 있다. 이러한 문제들을 예측 또는 해결하기 위해서는 동해안의 수리역학적, 퇴적학적 특성에 따른 해저퇴적물의 이동 현상을 파악하고 이를 이용하여 항만매몰 및 해안변형을 신뢰성 있게 계산할 수 있는 수치모형의 수립 등 첨단요소 기술의 개발이 필요하다.

본 연구의 목표는 연중 비교적 큰 파랑에 노출되어 있고 사질퇴적환경인 동해안의 항만매몰 현상에 대한 원인을 분석하고, 그 대책 수립에 필요한 첨단요소 기술을 개발하며, 주요 항만에 대한 매몰 방지대책 수립을 위한 기초자료를 제공하는 데 있다. 또한 방파제 등 연안구조물 건설시 수반

되는 주변 해안의 변형을 예측하고 그 대책을 수립하기 위한 첨단요소기술 개발도 포함하고 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

연중 비교적 큰 파랑에 노출되어 있고, 사질퇴적환경인 동해안의 항만 및 해안의 해저퇴적물이동 현상은 조석의 작으므로 주로 파랑에 의해 생성 발달된 파랑류에 의해 일어나게 된다. 따라서 이 해역의 해저퇴적이동에 의한 항만의 매몰 및 해안변형 현상을 파악하기 위하여는 우선 파랑에 의한 연안역 해수순환 현상을 규명해야 하며, 이를 바탕으로 해저퇴적물이동을 산정해야 한다. 제1, 2차년도 연구를 통하여 부분적인 현장조사와 관련 수치모형의 수립 및 보안을 실시하였으며, 3차년도에는 종합적인 현장관측을 실시하였으며, 또한 수치모형의 수립을 완료 검증하였으며, 부분적으로 기준모형항만 및 해안에 적용하였다. 제3차년도의 주요 연구개발 내용은 다음과 같다.

- 기준모형항만으로 선정된 죽변항에 대한 현장관측 및 분석
- 2차원 및 3차원 연안역 해수순환 수치모형 개발, 수립 및 적용
- 3차원 사질퇴적물 이동 수치모형 개발, 수립 및 적용
- 1-Line 해안선변형 수치모형 개발, 수립 및 적용

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 기준모형항만 및 해안에 대한 현장관측 및 분석

항만매몰 및 해안변형의 원인 분석과 대책 마련을 위한 현장실험연구 및 다양하게 개발 수립되는 수치모형의 입력 및 검증자료 수집을 위해 기준모형항만으로 선정된 경상북도 울진군의 죽변항에 대한 현장관측을 하계, 동계 및 춘계 각 1회씩 실시하였다. 관측항목은 단주기 파랑, 장주기파, 해안선 및 수심측량, 부표추적, 부유사 채취 등이었다. 관측 수집된 원시자료는 적절한 자료처리 과정을 거쳐 수치모형의 입력 및 검증자료의 형태로 또한 상호비교분석 형태로 정리 보관되었다. 관측항목간의 상호 관련성 비교, 계절적 비교, 그리고 기존 자료와의 비교 등의 분석이 실시되었다.

2. 연안역 해수순환 수치모형 수립

연안역 해저퇴적물이동 현상을 정확히 재현, 예측하기 위해서는 연안역 해수유동 현상의 정확한 예측 또는 산정이 필수적이다. 또한 연안역 해수유동은 3차원적 구조를 가지므로, 본 연구에서는 3차원 수치모형, WINC3D (3-Dimensional Wave-Induced Nearshore Circulation Model), 수립에 중점을 두었으며, 보완적으로 사용될 기존의 평면 2차원 수치모형 WINC2D를 부분적으로 수정 보완하였다. 이상의 해수순환 수치모형은 크게 세 부분, 즉 파랑변형 부분(wave transformation module), 해수유동 부분(current module) 및 난류마감 부분(turbulence closure module)으로 구성된다. 제1, 2차년도 연구를 통하여 그 기본형이 수립된 해수유동 및 난류마감 모형을 수정 보완하고 확장하였다. 파랑변형 수치모형, HCORD를 죽변항에 대해 수립하고 관측된 파랑을 입력자료로 현상태 및 계획안에 대하여 수치계산을 실시하였으며, 만족할 만한 결과를 얻어 수치모형의 실용성을 확인하였다. 그러나 애초 시도된 해수유동 및 난류모형과의 유기적 결합은 작은 격자와 작은 계산시간 간격이 요구되는 모형의 특성상 어려웠으며, 파랑변형

부분으로 WINC2D의 파랑변형모들을 WINC3D에도 그대로 이용하였다. 평면 2차원 연안역 해수순환 수치모형의 경우 WINC2D를 보완하고, 대상해역의 현상태 및 계획안에 대해 수치실험을 실시하고, 결과를 상호 비교하여 보았다. 계산결과는 대체로 만족할 만하였으며 그 실용성을 확보하였으며, 실험결과 해운항만청에서 계획하고 있는 방파제 연장 및 돌제 축조안이 죽변항의 항만매몰 및 주변해역의 해안변형이라는 측면에서 상당한 개선 효과를 보일 수 있다는 것을 추정할 수 있었다. 3차원 수치모형의 경우, 해저퇴적물이동과 관련하여 해저면 경계층 부근에서의 유속 분포가 매우 중요하므로 가변격자를 갖는 연직좌표 변환기법을 채용하여 해저면 근처에서의 분해능을 향상시켰으며, 계산시간을 줄이기 위해 그리고 계산과정의 편의를 위해 시간분리기법을 사용하였으며, 계산과정을 연직확산, 수평이류 및 수평확산의 3단계로 나누었으며, 각각의 계산과정에 대해 각각의 특성에 알맞는 수치기법을 사용하였다. 연직확산 단계에는 음해법 유한차분법을, 수평이류 단계에는 Angled Derivative Scheme을, 그리고 수평확산 단계에는 양해 유한차분법을 사용하였다. 또한 물리적 특성에 적합한 연직확산계수를 산정하기 위해 1-방정식 및 2-방정식 난류마감모형을 수립하였으며, 난류마감모형의 형태별 특성 및 관련계수의 검토 등을 위하여 3차원 모형과 별도로 용도가 다양하고 간편히 사용할 수 있는 연직 3차원 점모형(point model)을 수립하였다. 수립된 수치모형을 수리모형실험과 비교하여 대체로 만족할 만한 결과를 얻었다. 그러나 실제지형에 적용하기에는 그 범용성, 신뢰성 및 경제성을 확보하기 위해서는 앞으로도 많은 수정 및 보완이 필요하며, 특히 쇄파대에서의 쇄파에 의한 에너지 감쇄, 난류의 생성 등에 관한 다양한 경계조건 및 경험상수 등에 대한 수치실험 및 이 수치실험 결과의 정밀한 분석 그리고 이를 통한 특정지역에 적합한 상수의 도출 등에 관한 차후의 연구가 요구된다.

3. 사질퇴적물 이동 수치모형 수립

본 연구의 목적상 가장 중요한 부분인 해저퇴적물이동 연구의 경우, 동해안의 해저퇴적물이 입자가 큰 사질퇴적물이기 때문에 대부분 소류의 형태로 이동하며, 흐름 또한 전술한 바와 같이 3차원적 구조를 가지고 있으므로 해저퇴적물 이동량의 정량적 산출과 구조적 이해를 위해서는 3차원적 연구가 필수적이다. 따라서 본격 3차원 해저퇴적물이동 수치모형을 수립하였으며 이 때 필요한 소류량 계산을 위한 경험식의 조정상수를 관측자료를 이용하여 구하고 이를 적용하였다. 본 수치모형은 임의 지형에 적용하기 편리하도록 연직축 변환 기법을 사용하였으며, 계산시간의 절약 및 편의를 위해 3단계로 나누어 계산하는 방법을 적용하였다. 즉, 연직 확산 및 이류 단계는 음해법으로, 수평 이류 단계는 투영법으로, 그리고 수평 확산 단계는 양해법을 사용하였다. 수치모형의 정확도를 검토하기 위하여 연직 1차원의 비정상 확산 이류 문제에 대한 해석해와 비교 검토하였으며, 그 결과 공학적 활용을 위해서는 충분한 정확도를 가짐을 확인하였다. 또한 본 연구의 기준모형항만인 죽변항의 현상태에 대하여 시험적용하여 해저퇴적물과 해저지형변화를 비교적 만족스럽게 재현할 수 있었다. 이 결과 모형을 검증할 충분한 현장자료가 확보된다면 공학적 목적을 위한 사용에는 충분한 정도인 것으로 판단된다. 그러나 연안류 수치모형과 같이 그 범용성, 신뢰성 및 경제성을 높이기 위해서는 앞으로도 꾸준한 연구를 통한 수정 및 보완작업이 필요하며, 충분한 현장관측자료를 이용한 여러가지 경험상수의 조정 및 결정이 필요하다.

4. 해안변형 수치모형 수립

직교좌표계를 사용하는 해안선 변형 수치모형, 1LINE을 복잡한 해안선을 갖는 지역에 좀 더 효과적으로 적용할 수 있는 curvi-linear좌표계를 이용하는 모형으로 수정, 보완하였으며, 이를 대상해역에 적용하였다. 현장관측자료를 이용하여 현상태에 대해 검증하고, 포항지방해운항만청이 계획한 계획안에 대해서도 계산하였다. 동계의 파랑자료에 대해서 계산을 실시한 결과 동방파제를 연장하는 것 만으로도 충분히 이 지역의 해안변형을 최소화시킬 수 있으며, 돌제의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 계산 결과는 대체로 예상된 결과와 일치하여 그 적용성을 입증할 수 있었으며, 그 실용성을 확인할 수 있었다.

5. 활용에 대한 건의

본 연구기간 중 관측 분석된 측면향 해저지형 변화 및 해안선변형에 관한 자료는 해저퇴적물의 부유이동량 관측자료와 함께 항만매몰 및 해안변형 현상의 연구에 귀중한 자료로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구를 통해 개발 수립된 첨단요소기술, 즉 항만매몰 및 해안변형에 관련된 수치모형을 이용하여 현재 동해안의 많은 항만에서 문제가 되고 있는 매몰현상에 대한 근본적 원인 분석과 최적의 대책안 마련이 가능하게 되며, 또한 경제적 설계 및 시공이 가능하게 된다. 또한 이 수치모형은 항내의 수질오염 문제나 수질개선 문제에도 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 현장 적용성, 경제성 및 신뢰성 확보를 위하여 장기간에 걸친 정밀 현장관측자료를 이용한 검증 및 보완 연구 그리고 여러가지 경험상수의 결정에 대한 연구 등이 요구된다.

SUMMARY

(영문요약)

I. TITLE

A Study on the harbour siltation and shoreline changes in the eastern coast of Korea(III)

II. Objectives and Significance of the Study

There are a number of designated harbours and fishery ports of various sizes along the eastern coast of Korea, and many of them are suffering siltation problems, which necessitate maintenance dredging almost every year. Additionally, the extension of breakwaters according to the expansion of harbours often accelerates harbour siltation and causes neighbouring beaches to suffer serious erosion or deposition problems. In order to predict and resolve such problems, we have to understand the transport mechanism of sea-bottom sediment associated with the hydrodynamic and sedimentological characteristics in the coastal area, which then can be used for the development of state-of-the-art technology including reliable numerical models for calculating harbour siltation and shoreline changes.

The final goals of the present study were to examine into the harbour siltation problems in the eastern coast which is exposed to relatively high

wave climate and consists of sandy beaches, to develop state-of-the-art technology to resolve such problems, and finally to provide the coastal engineers with fundamental data necessary for establishing schemes to mitigate siltation in important harbours. This study also aimed to develop state-of-the-art technology for predicting the shoreline change associated with the construction of coastal structures such as breakwaters and for finding effective countermeasures.

III. Contents of the Study

Numerical models included in coastal processes had been partially developed and improved, and some field observations also had been conducted through the first- and second-year of the study. During this final year, the integrated field observations were conducted, the models were completely developed, verified, and partially applied to the reference harbour and beach. The major subjects of this final year are as follows :

- Field measurements around Chukpyon Harbour selected as the reference harbour, and data analysis.
- Developments, verifications, and applications of a two-dimensional and a three-dimensional numerical model for coastal hydrodynamics.
- Development, verification, and application of a three-dimensional non-cohesive sediment transport model.
- Development, verification, and application of a shoreline change model.

IV. Results and Recommendation

1. Field measurements and data analysis

In order to understand the coastal flow and sediment transport patterns and to obtain the input condition at the offshore boundary and model verification data, the field measurements were carried out in the vicinity of Chukpyon Harbour and its neighboring beaches at Uljin-Gun of Kyungsangbuk-Do, which had been selected as the model harbour and beach for the case study in the present research project. The measurements were conducted in winter, spring, and summer seasons. The items were short-period wave, long-period wave, shoreline and bathymetric survey, drogue tracking, and sampling of suspended and bed load sediments. The collected data were processed, compared in order to find out the relationships between them and seasonal variations, and then used as input and verification data of the models.

2. Development of the numerical models for coastal hydrodynamics

In order to simulate and predict the process of coastal sediment reliably, it is essential to estimate and predict the process of coastal hydrodynamics with reliable accuracy. This study focused on a three-dimensional model WINC3D (Wave-Induced Nearshore Circulation Model), because the structure of coastal hydrodynamics is three-dimensional. The existing horizontally two-dimensional model, WINC2D was also improved. These coastal hydrodynamic models consist of three parts ; wave transformation module, current module, and turbulence closure module. The basic forms of current and turbulence

closure module, which had been established through the first- and the second-year of this study, were improved and extended.

Wave transformation model, HCORD, was applied to the present state and the proposed expansion layout of Chukpyon Harbour, which showed agreeable results. The dynamic coupling of current and turbulence modules with HCORD, however, proved to be very difficult because HCORD requires fine grid and small time step. Therefore, the wave module for WINC2D was also used for WINC3D.

The two-dimensional model WINC2D was improved and applied to the present state and the proposed expansion layout of Chukpyon Harbour, which showed agreeable results. According to the results, KMPA's layout of the extension of the breakwater and the construction of a new groin proved to be very effective in mitigating the siltation of Chukpyon Harbour.

The three-dimensional model WINC3D adapted vertical coordinate transformation in order to improve the resolution of bottom-boundary layer because the current profile near the boundary layer is very important in the calculation of sediment transport. WINC3D also used a splitting technique for decreasing computation time and computational convenience, in which vertical diffusion is computed by implicit finite difference scheme, horizontal advection is by angled derivative scheme, and horizontal diffusion is by explicit finite difference scheme. One-equation and two-equation turbulence closure modules were established in order to obtain a physically adequate vertical diffusion

coefficient. Additionally a vertical three-dimensional point model was set up, which may be easily used in order to find out the characteristics of turbulence modules according to the forms, and to examine the coefficients. WINC3D was tested and showed good agreements with the results of hydraulic models. In order to apply WINC3D to real fields with agreeable applicability, reliability, however, further improvements are required, especially on the energy dissipation and turbulence production in surf zone, and various verification study are also needed with hydraulic models and field data regarding to boundary conditions and relating coefficients.

3. Development of the numerical model for sediment transport

In view of the purpose of this study, sediment transport model is the most important part. Three-dimensional approach is essential in order to understand the mechanism of sediment process and to assess its behaviour quantitatively. Therefore, a three-dimensional sediment transport model was developed. The coefficients in transport formula is given by field measurements. The model adapted vertical coordinate transformation, and a splitting technique as WINC3D. However, the schemes used in the splitting technique are some different with those of WINC3D. That is, implicit schemes are used in vertical diffusion and advection, characteristic method in horizontal advection, and explicit scheme in horizontal diffusion. The model was compared with the analytical solution for the vertically one-dimensional unsteady advection-diffusion problem, the results confirmed the sufficient accuracy of the model. The model was applied to the present state of Chukpyon Harbour, and the results showed good agreements with field measurements. According

to these results, it seems that the model has the sufficient applicability for the engineering purpose if field data are sufficiently given. However, in order to obtain general applicability with agreeable reliability, the determination of more general empirical coefficients are required through the comparisons with various field data.

4. Development of the numerical models for shoreline evolution

Shoreline evolution model, ILINE was modified and improved by the change of the reference coordinate system from rectangular system to curvilinear system. By this change of coordinate system, ILINE extended its applicability up to the shorelines with complex shapes. The model was verified with the measured field data at the reference shoreline, and then applied to the proposed expansion layout of Chukpyon Harbour. The results with wave climate of winter season showed that the extension of the breakwater would mitigate the shoreline changes, but the effect of the new groin was not obvious.

5. Recommendation

Various field data obtained through this research project will be used effectively in studying harbour siltation and shoreline changes. Numerical models developed through this project will make it possible to analyse the causes of harbour siltations and shoreline changes in the eastern coast of Korea, and to suggest the optimum countermeasures to the problems site specifically. Additionally, these models will be also used in examining the

water quality problems. However, accurately integrated long-term field measurements, more verifications of the models, and the determinations of more general coefficients are required in order to obtain the general applicabilities with reliability.

목 차

요약문	3
도목차	25
표목차	37
제1장 서 론	39
제1절 연구의 배경 및 목표	39
제2절 연구대상해역	40
제3절 주요 연구내용	43
제2장 현장관측 및 분석	49
제1절 서론	49
제2절 단주기 파랑	49
1. 개요	49
2. 자료처리	52
3. 연속관측	53
4. 동시관측	65
제3절 부표추적	79
제4절 해안선 및 수심 측량	89
1. 관측 및 수심도 작성	89
2. 분석 및 결과	90
제5절 부유이동량	104

제3장 연안역 해수순환 수치모형	117
제1절 서론	117
제2절 파랑변형 수치모형 HCORD	119
1. 개요	119
2. 기본방정식 및 수치계산	121
3. 수치모형의 적용	123
제3절 2차원 연안역 해수순환 수치모형, WINC2D	130
1. 개요	130
2. 기본방정식 및 수치계산	131
3. 수치모형의 적용	134
제4절 3차원 연안역 해수순환 수치모형, WINC3D	153
1. 개요	153
2. 기본방정식	154
3. 수치기법	158
4. 초기조건 및 경계조건	170
5. 난류마감 모형	175
6. 모델 계산	179
제5절 파랑류 연직분포 결정을 위한 점모형	182
1. 파랑류 운동방정식 및 수치계산식	182
2. 유한차분식	186
3. 난류모델 및 수치계산식	189
4. 모델 계산	194
제6절 결론 및 토의	202
제4장 사질퇴적물이동 수치모형	205
제1절 서론	205

제2절 3차원 퇴적물이동 수치모형	210
1. 부유사 농도의 기본방정식	210
2. 초기 및 경계조건	215
3. 해저면 높이 변화의 기본방정식	217
4. 해저기준면에서의 부유사 농도	218
5. 소류사량	220
6. 확산계수와 유속	223
제3절 수치기법	223
제4절 수치기법의 안정도 해석	232
제5절 부유사농도 계산 수치기법의 정확도	234
제6절 수치모형의 현장적용	237
1. 개요	237
2. 현장특성 및 검증자료	239
3. 파랑의 전파변형 계산	240
4. 파랑류의 계산	246
5. 부유사농도 및 해저지형 변화	252
제7절 결론 및 토의	259
제5장 해안선변형 수치모형	265
제1절 개요	265
제2절 기본방정식 및 경계조건	266
1. 기본방정식	266
2. 유한차분방정식 및 경계조건	270
3. 틸볼로 형성의 계산	273
제3절 수치모형의 입력자료	276

제4절 수치모형의 검증 및 적용	278
1. 모형의 검증	278
2. 모형의 적용	280
제5절 결론 및 토의	281
제6장 결론 및 토의	287
참고문헌	293
부록	307

CONTENTS

(영문목차)

Summary	3
List of Figures	25
List of Tables	37
Chapter 1. Introduction	39
Section 1. Background and objectives of the study	39
Section 2. Area for case study	40
Section 3. Contents of the study	43
Chapter 2. Field Measurements and Data Analysis	49
Section 1. Introduction	49
Section 2. Waves	49
1. Introduction	49
2. Data processing	52
3. Analysis of wave data measured at a fixed station	53
4. Analysis of wave data measured at different stations	65
Section 3. Drogue tracking	79
Section 4. Coastline and bathymetry survey	89
1. Surveys and bathymetric chart	89
2. Analysis of bottom changes	90
Section 5. Suspended sediments	104



Chapter 3. Wave-Induced Nearshore Circulation Models	117
Section 1. Introduction	117
Section 2. Wave transformation model HCORD	119
1. Introduction	119
2. Governing equations and numerical schemes	121
3. Application of the model	123
Section 3. 2-D wave-induced nearshore circulation model, WINC2D	130
1. Introduction	130
2. Governing equations and numerical schemes	131
3. Application of the model	134
Section 4. 3-D wave-induced nearshore circulation model, WINC3D	153
1. Introduction	153
2. Governing equations	154
3. Numerical schemes	158
4. Initial and boundary conditions	170
5. Turbulence closure model	175
6. Model computation	179
Section 5. Grid-box model for wave-induced current	182
1. Governing equations and numerical schemes	182
2. Finite difference formulation	186
3. Turbulence closure models and numerical schemes	189
4. Model computation	194
Section 6. Conclusions and Discussions	202
Chapter 4. Sediment Transport Model	205
Section 1. Introduction	205

Section 2. 3-D sediment transport model	210
1. Governing equations	210
2. Initial and boundary conditions	215
3. Governing equations on bottom change	217
4. Concentration at reference height	218
5. Bed load transport	220
6. Diffusion coefficient and currents	223
Section 3. Numerical schemes	223
Section 4. Stability of numerical scheme	232
Section 5. Accuracy of computed concentration	234
Section 6. Application of the model	237
1. Introduction	237
2. Data for model verification	239
3. Computation of wave transformation	240
4. Computation of wave-induced flows	246
5. Computation of concentration and bottom changes	252
Section 7. Conclusions and discussions	259
 Chapter 5. Shoreline Evolution Model	 265
Section 1. Introduction	265
Section 2. Governing equations and boundary conditions	266
1. Governing equations	266
2. Finite difference equations and boundary conditions	270
3. Computation of Tombolo formation	273
Section 3. Input data	276

Section 4. Verification and Application of the model	278
1. Verification	278
2. Application	280
Section 5. Conclusions and Discussions	281
Chapter 6. Conclusions and Discussions	287
References	293
Appendix	307

도 목 차

(List of Figures)

Fig. 1.2.1	General map of Chukpyon Harbor	43
Fig. 1.2.2	The planning layout of Chukpyon Harbor	44
Fig. 2.2.1	Location map of short-wave measurements around Chukpyon Harbor	51
Fig. 2.2.2	Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction N at station FW	57
Fig. 2.2.3	Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction NNE at station FW	57
Fig. 2.2.4	Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction NE at station FW	58
Fig. 2.2.5	Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction ENE at station FW	58
Fig. 2.2.6	Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at station FW of Chukpyon Harbor in October, 1993	59
Fig. 2.2.7	Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at station FW of Chukpyon Harbor in November, 1993	60
Fig. 2.2.8	Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at station FW of Chukpyon Harbor in December, 1993	60
Fig. 2.2.9	Time series of short-wave data measured at station FW of Chukpyon Harbor (1993. 11. 18)	62
Fig. 2.2.10	Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station FW of Chukpyon Harbor (1993. 11. 18)	63

Fig. 2.2.11	Directional wave spectra measured at FW station around Chukpyon Harbor(1993. 11. 18)	64
Fig. 2.2.12	Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at stations (a) WW1 and (b) WW2 of Chukpyon Harbor in December, 1993	66
Fig. 2.2.13	Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at stations (a) WW1 and (b) WW3 of Chukpyon Harbor in December, 1993	67
Fig. 2.2.14	Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW1 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 4)	69
Fig. 2.2.15	Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW2 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 4)	70
Fig. 2.2.16	Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW1 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 6)	72
Fig. 2.2.17	Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW3 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 6)	73
Fig. 2.2.18	Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at stations (a) SW1 and (b) SW2 of Chukpyon Harbor in April, 1994	75
Fig. 2.2.19	Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station SW1 of Chukpyon Harbor (1994. 4. 24)	77
Fig. 2.2.20	Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station SW2 of Chukpyon Harbor (1994. 4. 22)	78
Fig. 2.3.1	Results of drogue tracking in summer season	86
Fig. 2.3.2	Observed circulation pattern in summer season	88
Fig. 2.4.1	Reference lines for the comparison of bottom profiles	91

Fig. 2.4.2	Change of bottom profiles during May 1993 ~ Apr. 1994	92
Fig. 2.4.3	Change of bottom profiles during Oct. 1993 ~ Dec. 1994	95
Fig. 2.4.4	Change of bottom between May 1993 and Apr. 1994	100
Fig. 2.4.5	Change of bottom between May 1993 and Oct. 1993	101
Fig. 2.4.6	Change of bottom between Oct. 1993 and Dec. 1993	102
Fig. 2.4.7	Change of bottom between Dec. 1993 and Apr. 1994	103
Fig. 2.5.1	Location map of 4-directional suspended load sampling points in spring season	105
Fig. 2.5.2	Location map of 4-directional suspended load sampling points in summer season	106
Fig. 2.5.3	Directional sediment fluxes in spring season	107
Fig. 2.5.4	Directional sediment fluxes in summer season	108
Fig. 3.2.1	Finite difference grids for the present state	124
Fig. 3.2.2	Finite difference grids for the KMPA plan	125
Fig. 3.2.3	Distribution of wave height ratios computed by the model, HCORD (present state)	126
Fig. 3.2.4	Distribution of wave height ratios computed by the model, HCORD (KMPA plan)	127
Fig. 3.2.5	Three-dimensional snap shot of wave propagation computed by the model, HCORD (present state)	128
Fig. 3.2.6	Three-dimensional snap shot of wave propagation computed by the model, HCORD (KMPA plan)	129
Fig. 3.3.1	Finite difference grids for the present state	135
Fig. 3.3.2	Finite difference grids for the KMPA plan	136
Fig. 3.3.3	Water depth contours of the computation domain (present state)	137

Fig. 3.3.4	Water depth contours of the computation domain (KMPA plan)	138
Fig. 3.3.5	Distribution of the computed wave height ratios for the present state (wave direction of ENE)	140
Fig. 3.3.6	Distribution of the computed wave height ratios for the KMPA plan (wave direction of ENE)	141
Fig. 3.3.7	Distribution of the computed wave energy fluxes for the present state (wave direction of ENE)	142
Fig. 3.3.8	Distribution of the computed wave energy fluxes for the KMPA plan (wave direction of ENE)	143
Fig. 3.3.9	Computed wave-induced current vectors for the present state (wave direction of ENE)	144
Fig. 3.3.10	Computed wave-induced current vectors for the KMPA plan (wave direction of ENE)	145
Fig. 3.3.11	Distribution of the computed wave height ratios for the present state (wave direction of ESE)	147
Fig. 3.3.12	Distribution of the computed wave height ratios for the KMPA plan (wave direction of ESE)	148
Fig. 3.3.13	Distribution of the computed wave energy fluxes for the present state (wave direction of ESE)	149
Fig. 3.3.14	Distribution of the computed wave energy fluxes for the KMPA plan (wave direction of ESE)	150
Fig. 3.3.15	Computed wave-induced current vectors for the present state (wave direction of ESE)	151
Fig. 3.3.16	Computed wave-induced current vectors for the KMPA plan (wave direction of ESE)	152
Fig. 3.4.1	3-D wave induced current model grid system ; plan	165
Fig. 3.4.2	3-D wave induced current model grid system ; vertical	166
Fig. 3.4.3	Stive and Wind(1986) experimental set-up	180

Fig. 3.4.4	Computed wave amplitude, surface elevation and depth-mean current	181
Fig. 3.4.5	Comparison of velocity profiles between the computed results and the measurements of Stive and Wind(1986)	183
Fig. 3.5.1	Staggered grid system of the grid-box model	187
Fig. 3.5.2	Variation of the computed vertical profiles of (a) velocity and (b) shear stress during one wave period using zero-equation turbulence closure model	195
Fig. 3.5.3	Variation of the computed vertical profiles of (a) velocity, (b) shear stress, (c) turbulence kinetic energy, (d) turbulence kinetic energy dissipation rate, (e) turbulence viscosity, and (f) mixing length during one wave period using one-equation turbulence closure model	196
Fig. 3.5.4	Variation of the computed vertical profiles of (a) velocity, (b) shear stress, (c) turbulence kinetic energy, (d) turbulence kinetic energy dissipation rate, (e) turbulence viscosity, and (f) mixing length during one wave period using two-equation turbulence closure model	199
Fig. 4.2.1	Comparison of present formula and measurements ; suspended sediment concentration	221
Fig. 4.2.2	Comparison of present formula and measurements ; bed load	222
Fig. 4.3.1	Three-dimensional suspended sediment model grid ; plan	225
Fig. 4.3.2	Three-dimensional suspended sediment model grid ; vertical	226
Fig. 4.3.3	Definition of r_x and r_y	231
Fig. 4.3.4	Boundary condition for incoming open boundaries	231
Fig. 4.5.1	Comparison of present model results with Dobbins(1944) analytical solution	236

Fig. 4.5.2	Comparison of present model results with Hjelmfelt and Lenau(1970) solution	238
Fig. 4.6.1	Annual wave climate at Chukpyon harbor	241
Fig. 4.6.2	Measurement stations for wave height	242
Fig. 4.6.3a	Wave height distribution computed by the model, ECORD (wave direction of ENE)	243
Fig. 4.6.3b	Wave height distribution computed by the model, ECORD (wave direction of ESE)	244
Fig. 4.6.4a	Wave-induced current vectors computed by the model, WIFLOW (wave direction of ENE)	247
Fig. 4.6.4b	Wave-induced current vectors computed by the model, WIFLOW (wave direction of ESE)	248
Fig. 4.6.5	Measurement stations for wave-induced current	250
Fig. 4.6.6	A time-series of measured wave-induced current	251
Fig. 4.6.7	Measurement stations for suspended sediment concentration	254
Fig. 4.6.8a	Comparison of calculated and measured suspended sediment concentrations : station R2	255
Fig. 4.6.8b	Comparison of calculated and measured suspended sediment concentrations : station R4	256
Fig. 4.6.8c	Comparison of calculated and measured suspended sediment concentrations : station R6	257
Fig. 4.6.9	Measured depth change between Aug. 1987 and Nov. 1987	260
Fig. 4.6.10	Calculated depth change between Aug. 1987 and Nov. 1987	261
Fig. 5.2.1	Curvilinear coordinate system and definition of model variables	267

Fig. 5.2.2	Finite difference representation of shoreline and associated transport around i-th point	271
Fig. 5.2.3	Illustration of tombolo calculation	274
Fig. 5.4.1	Comparison between measurement and computation of shoreline change near Chukpyon Harbour	279
Fig. 5.4.2	Prediction of shoreline change near Chukpyon Harbour for the case of installation of a groin	282
Fig. 5.4.3	Prediction of shoreline change near Chukpyon Harbour for the case of extension of the breakwater	283
Fig. 5.4.4	Prediction of shoreline change near Chukpyon Harbour for the case of both installation of a groin and extension of the breakwater	284
Fig. A2.2.1	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/02 12:00)	334
Fig. A2.2.2	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/02 15:00)	335
Fig. A2.2.3	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/02 18:00)	336
Fig. A2.2.4	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/02 21:00)	337
Fig. A2.2.5	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/03 00:00)	338
Fig. A2.2.6	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/03 03:00)	339
Fig. A2.2.7	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/03 06:00)	340
Fig. A2.2.8	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/03 09:00)	341
Fig. A2.2.9	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/03 12:00)	342

Fig. A2.2.10	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/03 18:00)	343
Fig. A2.2.11	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/03 21:00)	344
Fig. A2.2.12	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 00:00)	345
Fig. A2.2.13	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 03:00)	346
Fig. A2.2.14	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 06:00)	347
Fig. A2.2.15	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 09:00)	348
Fig. A2.2.16	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 12:00)	349
Fig. A2.2.17	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 15:00)	350
Fig. A2.2.18	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 18:00)	351
Fig. A2.2.19	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/04 21:00)	352
Fig. A2.2.20	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/05 00:00)	353
Fig. A2.2.21	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/05 03:00)	354
Fig. A2.2.22	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/05 06:00)	355
Fig. A2.2.23	Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor (1993/12/05 09:00)	356
Fig. A2.2.24	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/05 15:00)	357

Fig. A2.2.25	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/05 18:00)	358
Fig. A2.2.26	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/05 21:00)	359
Fig. A2.2.27	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 00:00)	360
Fig. A2.2.28	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 03:00)	361
Fig. A2.2.29	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 06:00)	362
Fig. A2.2.30	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 09:00)	363
Fig. A2.2.31	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 12:00)	364
Fig. A2.2.32	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 15:00)	365
Fig. A2.2.33	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 18:00)	366
Fig. A2.2.34	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/06 21:00)	367
Fig. A2.2.35	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/07 00:00)	368
Fig. A2.2.36	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/07 03:00)	369
Fig. A2.2.37	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/07 06:00)	370
Fig. A2.2.38	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/07 09:00)	371
Fig. A2.2.39	Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor (1993/12/07 12:00)	372

Fig. A2.2.40	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/21 19:00)	373
Fig. A2.2.41	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/21 22:00)	374
Fig. A2.2.42	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 01:00)	375
Fig. A2.2.43	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 04:00)	376
Fig. A2.2.44	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 07:00)	377
Fig. A2.2.45	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 10:00)	378
Fig. A2.2.46	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 13:00)	379
Fig. A2.2.47	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 16:00)	380
Fig. A2.2.48	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 19:00)	381
Fig. A2.2.49	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/22 22:00)	382
Fig. A2.2.50	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 01:00)	383
Fig. A2.2.51	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 04:00)	384
Fig. A2.2.52	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 07:00)	385
Fig. A2.2.53	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 10:00)	386
Fig. A2.2.54	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 13:00)	387

Fig. A2.2.55	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 16:00)	388
Fig. A2.2.56	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 19:00)	389
Fig. A2.2.57	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/23 22:00)	390
Fig. A2.2.58	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/24 01:00)	391
Fig. A2.2.59	Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor (1994/04/24 04:00)	392
Fig. A2.4.1	Bathymetric chart from the survey in May 1993	393
Fig. A2.4.2	Bathymetric chart from the survey in Oct. 1993	394
Fig. A2.4.3	Bathymetric chart from the survey in Dec. 1993	395
Fig. A2.4.4	Bathymetric chart from the survey in Apr. 1994	396

표 목 차

(List of Tables)

Table 1.2.1	Annual dredging rate in Chukpyon Harbor	42
Table 2.2.1	Periods of short-wave measurements around Chukpyon Harbor	50
Table 2.2.2	Directional distribution of significant wave height (Chukpyon Harbor, 1993)	55
Table 2.2.3	Directional distribution of mean wave period (Chukpyon Harbor, 1993)	56
Table 2.3.1	Tide table at Muk'oo and P'ohang during drogoue tracking (Office of Hydrographic Affairs, 1994)	81
Table 2.3.2	Results of drogoue tracking in summer season	82
Table 2.4.1	Periods of shoreline and bathymetry surveys	90
Table 2.5.1	Directional sediment fluxes in spring season	110
Table 2.5.2	Directional sediment fluxes in summer season	115
Table 4.6.1	Details of wave measurements at Chukpyon (after KORDI, 1987)	245
Table 4.6.2	Comparison of calculated and measured wave heights	246
Table 4.6.3	Details of wave-induced current measurement at Chukpyon	252
Table 4.6.4	Details of suspended sediment concentration measurements	253
Table 4.6.5	Weighting times for the six wave conditions	259

Table A2.2.1	Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during continuous measurment (FW, 1993)	309
Table A2.2.2	Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurment (WW1, 1993)	322
Table A2.2.3	Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurment (WW2, 1993)	326
Table A2.2.4	Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurment (WW3, 1993)	328
Table A2.2.5	Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurment (SW1, 1994)	330
Table A2.2.6	Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurment (SW2, 1994)	332

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목표

동해안의 연중 비교적 큰 파랑에 노출되어 있고 큰 규모의 하천이 없을 뿐 아니라 조석간만의 차도 거의 없으며, 해저퇴적물은 거의 전해안을 통해 모래로 구성되어 있다. 또한 지역에 따라 약간의 차이는 있으나 해안 가까운 곳으로부터 수심이 갑자기 깊어지며, 또한 도서 및 암초도 거의 없다. 또한 대부분의 해안선은 그 지형이 대체로 단조로와 절벽과 절벽이 사질 해변으로 연결된 형태가 반복적으로 나타난다. 동해안에 위치한 항만의 입지적 지형적 특성은 대체로 유사하다. 즉, 절벽과 절벽을 연결하는 concave형 사질 해변의 북단 또는 남단에 위치하며, 주변의 해변과 접하고 있으며, 예외적인 경우를 제외하면 북동 내지는 동쪽으로 부티의 큰 파랑을 막기위해 항입구가 대체로 남쪽 또는 남동쪽으로 열려 있다. 또한 외해로부터의 파랑침입을 차단하는 동측 방파제와 인접 해변을 따라 이동하는 토사의 항내유입을 차단하는 남측 방파제로 구성된 평면 배치 형태로 되어 있다.

이상과 같은 자연적 지형적 조건으로 인해 동해안의 항만 및 해안의 해저퇴적물 이동은 비교적 활발하며 계절적으로도 큰 차이를 보인다. 현재 동해안 대부분의 항만에서는 자연적 이유로 인해 이동된 해저퇴적물이 입

지적 지형적 영향으로 항입구 또는 항 주변지역에 퇴적되는 현상으로 인하여 항입구 및 접근항로의 매몰 현상이 나타나고 있으며, 곳에 따라서는 이 현상이 심각한 문제점으로 대두되고 있으며 항내 및 항로의 수심을 유지하기 위한 준설이 매년 실시되고 있다. 또한 기존 항만의 확장 공사 및 항내 정온도 유지를 위한 방파제 연장 공사 등에 따른 퇴적환경 변화로 인한 문제점도 노출되고 있다. 이러한 문제점의 예측 또는 적절한 해결책 마련을 위해 동해안의 지형적, 자연적 특성에 적합한 사질퇴적물의 이동량 산정식을 수립하고, 이를 적용하는 정확하고 범용성 있는 사질퇴적물이동 수치모형의 수립 등 첨단요소기술의 개발이 시급하다.

본연구의 최종목표는 외해 파랑에 노출되어 있고 사질퇴적환경인 동해안 항만의 매몰현상에 대한 원인을 분석하고, 그 대책수립에 필요한 첨단요소 기술을 개발하며, 주요 항만에 대한 매몰 방지대책 수립을 위한 기초자료를 제공하는 데 있다. 또한 연안구조물 건설시 (예, 임해발전소 건설 등) 수반되는 해안 침식 및 퇴적현상을 예측하고, 이에 대한 보호 대책 수립을 위한 수치모형 개발 수립 및 이를 이용한 기초자료 제공에 있다.

제2절 연구대상해역

연구대상해역으로는 본연구의 제1차년도 연구를 통하여 기준모형항만으로는 경상북도 울진군에 위치한 죽변항이, 기준모형해안으로는 울진 원자력 발전소에 인접한 해빈을 포함하는 죽변항 인근 해역이 선정된 바 있다.

기준모형항만으로 선정된 죽변항은 동해 중부 해안에 위치한 연안항으

로서 동해안에 위치한 항만을 대표할 수 있는 전형적 입지와 평면배치를 가지고 있으며, 현재 심각할 정도로 항입구 및 항내 매몰 현상이 진행 중인 것으로 나타나고 있다. 이는 거의 매년 실시된 유지준설(Table 1.2.1 참조)로 그 단면을 파악할 수 있다. 이 해역은 인근에 위치한 후포항 주변 해역과 함께 우리나라에서 큰 파랑의 내습 빈도가 가장 높은 지역으로 잠재적 동적에너지가 크다할 수 있으며, 이에 따라 많은 조사가 실시되어 기존의 현장관측자료가 가장 풍부한 지역이기도 하다. 또한 주민의 관심도가 높고 대형선박의 입출항이 비교적 적어 현장관측 여건이 타 항만에 비해 양호하며, 특히 항만 및 인접 해안의 규모가 현장실험 및 수치모형실험에 적당한 것으로 판단되었다.

Fig.1.2.1에서 보는 바와 같이 등대 동측의 용추갑과 남서쪽 동대암을 연결한 선내의 해면을 항계로 하는 죽변항의 1990년 현재 항내 수면적은 234천㎡이며, 229천톤의 하역 능력을 갖고 있다. 부두시설로는 105m의 안벽, 871m의 물양장이 있으며, 708m의 방파제와 308m의 방사제가 각각 동쪽과 남쪽으로 배치되어 있다. 현재 Fig. 1.2.2에서 보는 바와 같이 동방파제 200m, 남쪽 해빈에 200m의 돌제 그리고 기존의 남방사제와 계획 중인 돌제 사이의 해안에 안벽이 건설될 예정이다. 따라서 본 연구를 통하여 현재 상태의 해수유동 및 퇴적물 이동 양상을 파악한 후 계획된 시설이 완공된 후의 변화 양상을 파악하는 것도 중요하다 하겠다.

또한 본연구의 기준모형해안으로 선정된 죽변항 인근 해역은 현재 해안 침식 현상을 보이고 있는 울진 원자력발전소와 인접해 있어 이 해역을 포함하도록 설정하여 외해 파랑 경계조건 등의 기본 자료를 공유할 수 있고, 일부 수치모형의 동시 적용이 가능하여 시간과 경비의 절감 효과도 있을

Table 1.2.1 Annual dredging rate in Chukpyon harbour.

연 도	준설량(m ³)	비고
1963	16,000	
1964	20,000	
1965	29,000	
1966	47,000	
1970	9,000	
1971	30,000	
1972	9,000	
1974	11,000	
1977	5,020	
1979	42,850	
1980	30,100	
1981	20,250	
1982	12,650	
1983	11,650	
1984	8,910	
1985	23,290	1차 6,380m ³ , 2차 16,910m ³
1986	28,950	
1987	42,000	
1988	5,480	압파쇄 및 압준설 3,880m ³ 포함
1991	9,200	

* 1974년 이전 : 국립건설연구소 자료

** 1977년 이후 : 포항지방 해운항만청 자료

것으로 기대되었으나 원자력발전소라는 특수성으로 인하여 현장관측을 위한 접근이 용이하지 못하다는 제약과 시간 및 장비 등의 문제로 본연구의 해안변형에 관한 연구는 측면항 및 그 인근 해역에 초점이 맞추어 졌다.

제3절 주요 연구내용

본연구의 최우선 목표는 본연구에서 기준모형항만 및 해안으로 선정된 죽변항 및 인근해역의 항만매몰 및 해안변형을 파악하고 그 대안을 제시하는 것이 아니라 동해안 항만 및 해안에 범용성을 가지고 적용하여 그

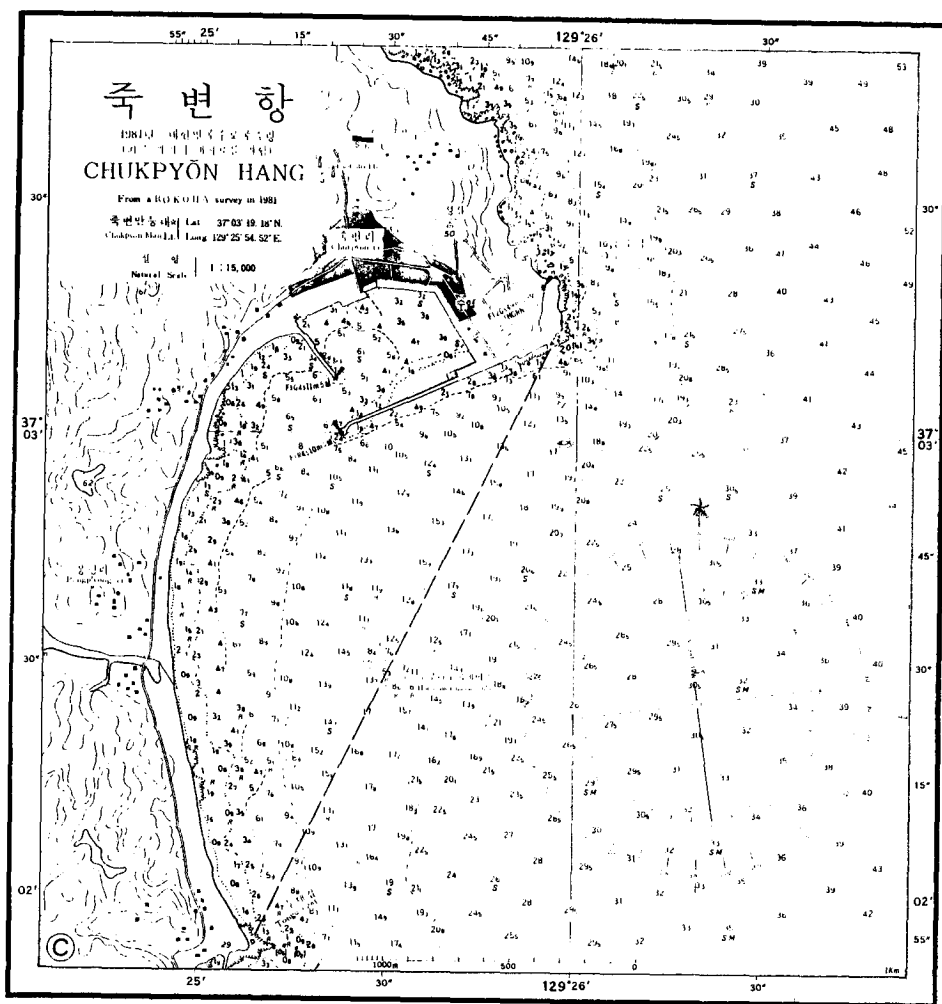


Fig. 1.2.1. General map of Chukpyon Harbor.

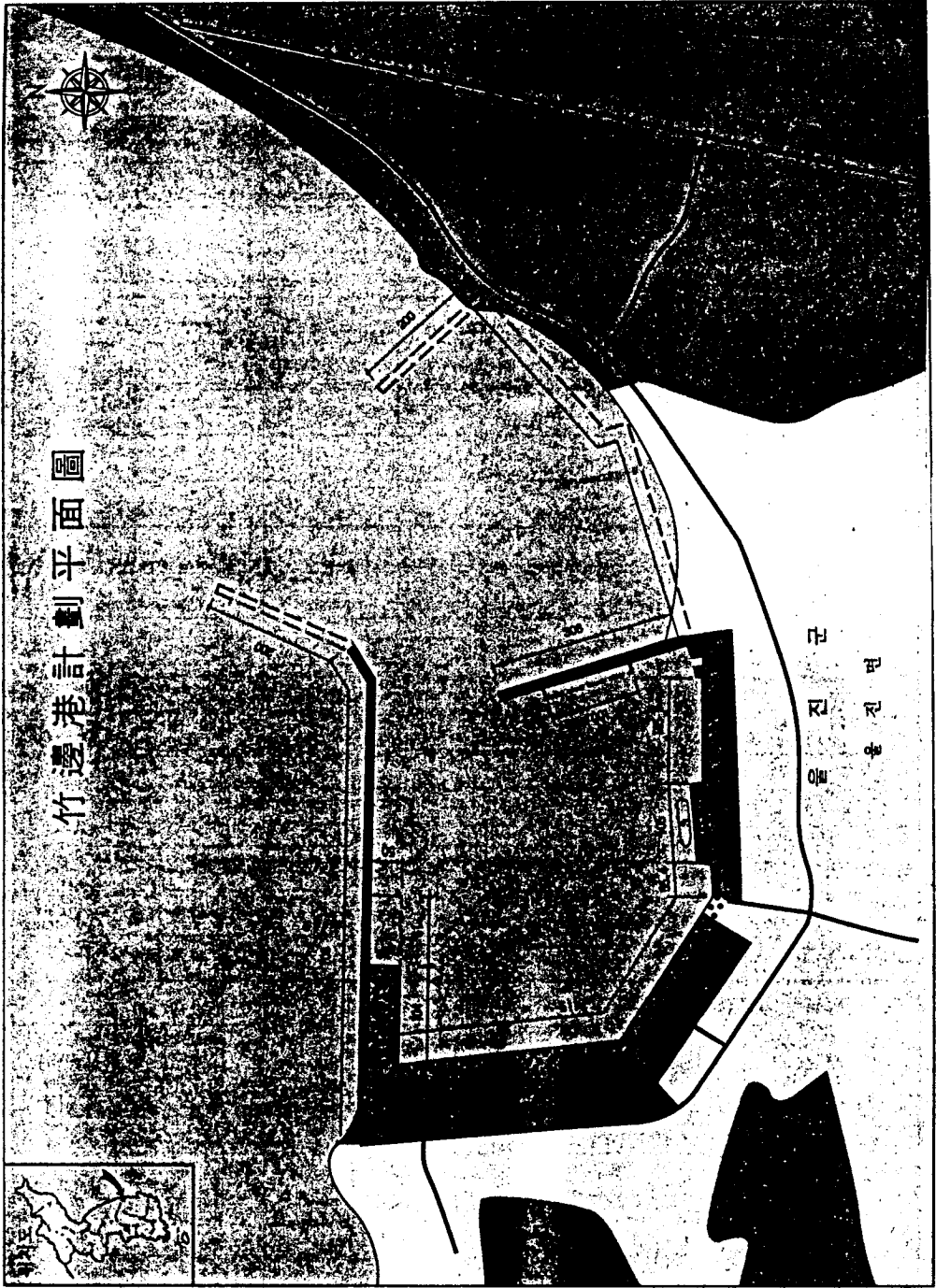


Fig. 1.2.2. The planning layout of Chukpyon Harbor.

문제를 해결할 수 있는 수치모형 등의 요소기술을 개발하고 이를 이용한 기본 자료를 확보하는 데 있으므로 본연구에서는 이에 필수적이고도 핵심적인 수치모형 개발 수립에 중점을 두고 실시되었다. 또한 개발 수립된 수치모형을 기준모형항만 및 해안에 적용, 검증하고 이를 보완하여 그 적용성 및 정확도 등을 검토하였다.

이러한 연구목적에 부합되도록 연구를 수행하였으며, 이에 따른 제1차년도에 수행된 주요 연구내용을 열거하면 아래와 같다.

- 현장조사, 기존자료 수집 및 검토를 통한 동해안 항만 및 해안의 현황 파악 및 기준모형항만 및 해안의 선정
- 항만매몰 및 해안변형의 이론적 배경에 대한 고찰
- 천해역에서의 파랑변형 수치모형 수립
- 파랑에 의한 연안류 발생 및 순환 수치모형 수립
- 사질퇴적물 이동 수치모형 수립
- 해안변형 수치모형 수립

제2차년도 연구에서는 기준모형항만에 대한 현장관측을 계절별로 실시하고 그 자료를 분석하였으며, 제1차년도 연구를 통해 수립된 수치모형을 개선 보완하고 이를 부분적으로 시험 적용하였다. 그 내용을 열거하면 다음과 같다.

연안역 해저퇴적물이동 현상을 정확히 재현 예측하기 위해서 필수적인 해수유동 현상의 정확한 산정을 위하여 연안역 해수순환 수치모형을 2차원과 3차원 모형으로 구분하여 수립하였다. 파랑변형 수치모형으로는 타원형 파랑변형 수치모형 ECORD와 쌍곡형 파랑변형 수치모형 HCORD를

수립하고 죽변항 해역에 시험 적용하였다. 각각 그 특성이 다른 2차원 해수유동 수치모형, WIFLOW와 WINC2D를 수립하고 시험 적용하였으며 그 결과를 상호 비교하여 보았다. 3차원 해수순환 수치모형은 해수유동 및 난류마감모형 부분에 중점을 두고 수립하였으며 기존의 수리모형실험 자료에 시험 적용하였으며, 이와 별도로 난류마감모형의 적용성 및 수치계산 기법을 검토하기 위하여 연직 1차원 점모형을 수립하고 유형별 특성을 검토하였다. 동해안에는 입자가 큰 사질퇴적물이 주로 분포해 있어 대부분 소류의 형태로 이동하지만 보다 현상에 가깝게 재현 예측하기 위하여 확산-이류 방정식에 근거한 3차원 해저퇴적물이동 수치모형을 수립하고 이의 시험계산을 통해 그 정확성 및 적용성을 검토하였다. 해안선 및 해저지형의 장기간에 걸친 변화를 파악하기 위한 해안선변형 수치모형 1LINE을 대상해역에 대해 수립하고 시험 계산을 실시하였다.

본연구의 최종년도인 당해년도의 연구에서는 기준모형항만에 대한 보다 심도있는 현장관측을 실시하고 그 자료를 분석하였으며, 1,2차년도 연구를 통해 수립된 수치모형을 개선 보완하여 검증하였으며, 이를 부분적으로 현장에 적용하였다.

연안역 해수순환 수치모형을 2차원과 3차원 모형으로 구분하여 수립하였다. 연안역 해수순환 수치모형의 기본 입력자료를 제공해 주는 파랑변형 수치모형으로 쌍곡형 파랑변형 수치모형 HCORD를 부분적 개선 보완하였으며, 이를 죽변항에 적용하여 그 실용성을 확인하였다. 2차원 해수유동 수치모형 WINC2D는 현상태와 포항지방 해운항만청에서 계획중인 대책안에 대해서도 적용하여 그 결과를 상호 비교하여 보았다. 3차원 해수순환 수치모형은 난류마감모형 부분에 문제점이 남아 있으나 수립된 수치모형을

수치모형실험 자료에 적용하여 만족할 만한 결과를 얻었다. 이와 별도로 난류마감모형의 적용성 및 수치계산 기법을 검토하기 위하여 연직 1차원 점모형을 난류마감모형에 중점을 두고 수립하였으며, 시험계산을 통해 유형별 특성을 검토하였다. 확산-이류 방정식에 근거한 3차원 해저퇴적물이동 수치모형을 수립하고, 수치모형에 필요한 경험상수 등을 현장관측치를 이용하여 결정하였으며, 현상태의 측면향에 적용하였으며, 관측치와 비교하여 그 정확성 및 적용성을 검토하였으며, 공학적 활용에 충분한 정도의 결과를 얻었다. 보완 수립된 해안선변형 수치모형 1LINE을 대상해역에서의 관측치와 비교하여 검증하였으며, 계획된 대책안에 대해서도 수치모형실험을 실시하였다.

본보고서의 구성내용은 다음과 같다. 제2장에서는 기준모형항만인 측면향 및 인근 해역에 대한 현장관측, 자료 분석 및 분석 결과에 대해 기술하였으며, 제3장에서는 연안역 해수순환 수치모형을 파랑변형 수치모형, 2차원 및 3차원 해수순환 수치모형으로 구분하여 이론적 배경, 시험계산 및 검증 및 적용결과 등에 대하여 기술하였다. 제4장에서는 3차원 해저퇴적물이동 수치모형의 이론적 배경, 수치계산 기법 그리고 수치모형의 검증 및 적용에 대해 기술하였으며, 제5장에는 해안선변형 수치모형의 이론적 배경, 검증 및 적용 결과에 대해 수록하였다. 마지막으로 제6장에서는 현재까지의 연구 결과 및 차후의 연구과제에 대해 간략히 기술하였다.

제2장 현장관측 및 분석

제1절 서론

대상해역인 죽변항 주변의 수리 및 퇴적 환경 파악을 위하여 제1~2차년도에 이어 현장관측을 실시하였다. 관측은 추계(1993년 10~12월)와 춘계(1994년 4월)의 2회에 걸쳐 실시하였으며, 관측항목은 파랑, 연안류, 수심 및 해안선 측량, 그리고 해저퇴적물 채취 및 퇴적물이동량 관측이었다. 또한 대상해역 주변 해역의 해수순환 양상을 파악하기 위하여 1994년 8월 보완관측을 실시하였다. 관측된 자료중 비교가 가능한 것은 제1~2차년도의 동일한 시기의 관측치와 비교하였다.

제2절 단주기 파랑

1. 개요

항의 입사경계에서의 단주기파의 통계적 및 구조적 특성, 그리고 파

랑의 천해역으로의 전파 특성을 파악하고 단주기파 수치모형의 입력·검증 자료를 제공하기 위하여 외해측에 위치한 1개 정점에서 약 2개월간의 연속 관측(추계, 1회)과 외해 및 내해측에 위치한 2개 정점에서 3~5일간의 동시 관측(동계 2회; 춘계, 1회)을 실시하였다.

추계(1993년 10~12월)에 수치모형의 입력경계 부근의 항의 1개 정점에서 동 기간중의 파랑 특성을 파악하기 위하여 불규칙파 연속관측을 실시하였다. 연속관측 정점으로는 죽변항 주변해역의 파를 대표할 수 있는 곳으로 주방파제 선단에서 동남동쪽으로 약 1.8 km 떨어진 지점(Fig. 2.2.1에서 FW; 129° 26' 29"E, 37° 02' 36"N)을 선정하였다. 한편, 관측기간 및 관측성과는 Table 2.2.1에 제시되어 있다.

Table 2.2.1 Periods of short-wave measurements around Chukpyon Harbor.

Item	Season	Periods of Measurement	Numbers of Data	Remarks
Fixed	Autumn	1993. 10.12~12. 7	431	Every 3 hours
Moving	Winter	1993. 12. 2~12. 5	69	Every hours
		1993. 12. 5~12. 7	50	Every hours
	Spring	1994. 4.21 ~ 4.24	59	Every hours

또한, 동계(1993년 12월)에 2회, 춘계(1994년 4월)에 1회에 걸쳐 외해측의 1개 정점(수치모형의 입력경계 부근)과 해안측의 1개 정점(수치모형의 측면경계 부근)에서 동 기간중의 파랑 특성을 파악하기 위하여 불규칙파 동시관측을 실시하였다. 동시관측 정점으로는 퇴적물이동 수치모형의 입력자료 제공을 위한 파랑장 계산 수치모형의 입력 및 검증자료를 제공하는 데 적합한 위치가 선정되었다.

동계의 입사경계 정점으로는 연속관측 정점과 동일한 위치(Fig. 2.2.1에서 WW1; $129^{\circ} 26' 29'' E$, $37^{\circ} 02' 36'' N$)가 선정되었으며, 측면경계 정점으로는 1차 관측시 측면만등대에서 동북동쪽으로 약 0.8 km 떨어진 지점(Fig. 2.2.1에서 WW2; $129^{\circ} 26' 23'' E$, $37^{\circ} 03' 28'' N$), 그리고 2차 관측시 주방파제 선단에서 남쪽으로 약 0.5 km 떨어진 지점(Fig. 2.2.1에서 WW3; $129^{\circ} 25' 22'' E$, $37^{\circ} 02' 46'' N$)이 각각 선정되었다.

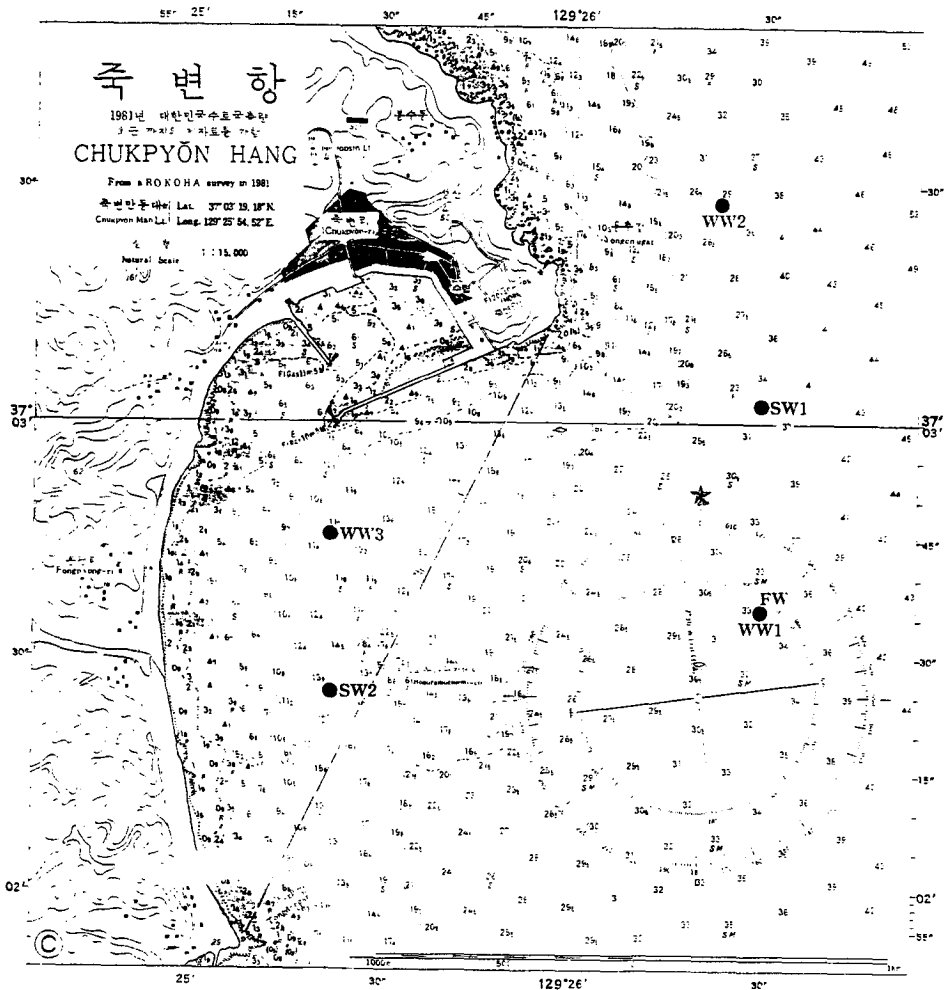


Fig. 2.2.1. Location map of short-wave measurements around Chukpyon Harbor.

한편, 춘계의 입사경계 정점으로는 주방파제 선단에서 동쪽으로 약 1.7 km 떨어진 지점(Fig. 2.2.1에서 SW1; 129° 26' 29" E, 37° 03' 02" N)이 선정되었으며, 측면경계 정점으로는 주방파제 선단에서 남쪽으로 약 1.1 km 떨어진 지점(Fig. 2.2.1에서 SW2; 129° 25' 22" E, 37° 02' 25" N)이 선정되었다. 동시관측기간 및 관측성과도 역시 Table 2.2.1에 제시되었다.

관측은 매 3시간(연속관측) 또는 매시간(동시관측)마다 0.78125초 간격으로 2,048개(약 26.7분)씩의 해수위 자료 및 2개의 파향에 관한 자료가 수집되도록 실시되었다. 매회의 관측치들은 WAREC에 수신된 후 자료전송 케이블을 통하여 컴퓨터의 하드 디스크에 디지털 형태로 저장되었다. 관측자료들은 모두 파랑자료 분석용 프로그램 DIWAP(Directional Wave Analysis Program)에 의해 분석, 정리되었다.

2. 자료 처리

파랑기록중 파고와 주기 등의 분석방법은 해양관측편람(한국과학기술원 해양연구소, 1984)에 자세히 수록되어 있다. 자료의 분석시에는 개인용 컴퓨터에 저장된 1회 26.7분간의 연속된 2,048개씩의 해수위 및 파향에 관한 자료를 사용하였다. 파랑 자료는 波別分析法(wave by wave analysis method)과 spectral method에 의하여 분석되었다.

파별분석법은 시계열의 파랑 자료를 zero-up crossing method로 분석한 개개의 파를 통계적으로 처리하여 파랑 특성 parameter를 산출하는 방법이다. 이 방법에 의해서는 평균파고(\bar{H}), 평균주기(\bar{T}), 유의파고($H_{1/3}$),

유의주기($T_{1/3}$, $T_{H_{1/3}}$), 최대파고(H_{max}), 최대주기(T_{max}), 자승평균평방근 파고(H_{rms}) 등의 파랑특성자료들이 산출된다. Spectral method는 관측된 파의 시계열 자료를 FFT (Fast Fourier Transform) 기법으로 분석하여 파랑의 에너지 스펙트럼을 구하여 파랑 특성을 파악하는 방법이다. 이는 불규칙파를 분석하는 일반적인 방법으로 불규칙성을 가진 자료의 분석에 매우 유용하다. 파의 스펙트럼 형상에 대한 다양한 연구중 대표적인 것으로는 충분히 발달된 심해파에 적용하는 PM 스펙트럼(Pierson and Moskowitz, 1964), 발달과정의 심해파에 적용하는 JONSWAP 스펙트럼(Hasselmann et al., 1973) 및 BM 스펙트럼(Bretschneider and Mitsuyasu spectrum) 등을 들 수 있다.

본 연구에서 구해진 파랑자료의 파고 및 주기의 분석에는 평균파법인 zero up-crossing method를 이용한 통계적인 波別分析法과 spectral method를 모두 사용하였다. 스펙트럼 분석시에는 rectangular window function에 1/8 cosine taper를 사용하였으며 자유도는 20으로 하였다. 그리고, 파향에 대해서는 연속관측자료에는 2차년도에 사용한 바 있는 LHM(Longuet-Higgins et al., 1963)을, 그리고 동시관측자료에 대해서는 LHM 대신 Kobune와 Hashimoto (1986), 오 등(1992)에 의한 MEM(Maximum Entropy Method)을 이용하여 분석, 정리하였다.

3. 연속관측

가. 주파향 및 파고-주기 관계 검토

추계의 연속관측 결과를 16 방위별로 유의파고 $H_{1/3}$ 에 대해 분석한 결과를 Table 2.2.2에, 그리고 유의파주기 $T_{H_{1/3}}$ 에 대해 분석한 결과를 Table 2.2.3에 각각 제시하였다. 16 방위중에서 출현율이 가장 높은 파향은 41.8%의 NNE이며, 다음에 N(24.4%), NE(14.8%), ENE(7.4%) 등의 순서로 출현율이 높은 것으로 나타났다. 이들을 모두 합하면 88.4%로서 추계에는 파향이 거의 대부분 N~ENE 사이에 분포하고 있음을 알 수 있다. 출현빈도가 높은 4개 파향(N, NNE, NE 및 ENE)별 파랑자료의 $H_{1/3}$ 과 $T_{H_{1/3}}$ 의 관계를 알아보기 위하여 가로축을 $T_{H_{1/3}}(\text{sec})$, 세로축을 $H_{1/3}(m)$ 로 하여 Fig. 2.2.2~2.2.5에 각각 도시하였다. 이들은 대체로 가운데가 출현빈도가 높은 타원형의 분포를 나타내고 있다.

나. 파랑특성 분석

조사지역의 주변해역에서 발생되었던 파는 대부분 바람에 의해 지역적으로 생성, 발달되어 전파해온 풍파(wind-generated gravity waves)로 판단된다. 추계에 FW지점에서 3시간 간격으로 26.7분씩 관측된 자료들을 분석하여 유의파고($H_{1/3}$)와 유의파주기($T_{H_{1/3}}$)의 시간적 변화를 Figs. 2.2.6~2.2.8에, 그리고 주요 파랑특성계수들을 부록의 Table A2.2.1에 제시하였다. Table A2.2.1에서 H_s (유의파고), T_p (침두주기) 및 T_z (평균주기)는 spectral method, H_{\max} (최대파고), H_{rms} (자승평균평방근 파고), $H_{1/3}$ (유의파고), T_{\max} (최대주기), $T_{1/3}$ (유의주기) 및 $T_{H_{1/3}}$ (유의파주기)은 파별분석법, 그리고 θ (평균파향)와 s (파향의 분산도)는 LHM을 통하여 산출된 파랑특

Table 2.22 Directional distribution of significant wave height(Chukpyon harbor, 1993).

Dir. Hs	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0.0 - 0.2	2		2	4	1		1										10
0.2 - 0.4	18	26	10	4	7	2	14	3	1							2	87
0.4 - 0.6	18	29	10	3	6		1									1	68
0.6 - 0.8	15	24	13	6	3		1										62
0.8 - 1.0	23	22	10	5	1	1											62
1.0 - 1.2	15	19	6	8	3												51
1.2 - 1.4	5	17	5		1												28
1.4 - 1.6	4	10	5	1													20
1.6 - 1.8	5	5	2	1													13
1.8 - 2.0		5															5
2.0 - 2.2		4	1				1										6
2.2 - 2.4		2															2
2.4 - 2.6			3														3
2.6 - 2.8			5														5
2.8 - 3.0			4														4
3.0 - 3.2			4														4
3.2 - 3.4			1														1
3.4 - 3.6																	
3.6 - 3.8																	
3.8 - 4.0																	
Total	105	180	64	32	22	3	18	3	1							3	431
Permillage	244	418	148	74	51	7	42	7	2							7	1000

(Numerals : numbers of occurrence)

Table 2.2.3 Directional distribution of mean wave period(Chukpyon harbor, 1993).

Dir. Tz	Dir.																Total
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0.0 - 2.0																	
2.0 - 2.5									1								
2.5 - 3.0						1	1	1									
3.0 - 3.5	1						1	2									
3.5 - 4.0	7	1	2	2	2	1	7									2	
4.0 - 4.5	2	5	1	2	5	1	3										
4.5 - 5.0	9	5	4	3	2		5										
5.0 - 5.5	10	15	13	12	2											1	
5.5 - 6.0	24	23	17	6	6												
6.0 - 6.5	12	32	9	4	1												
6.5 - 7.0	19	25	8	1	3												
7.0 - 7.5	13	16	3	1	1		1										
7.5 - 8.0	5	17	3	1													
8.0 - 8.5	3	13	2														
8.5 - 9.0		14	1														
9.0 - 9.5		8	1														
9.5 -10.0		5															
10.0 -10.5		1															
10.5 -11.0																	
11.0 -11.5																	
11.5 -12.0																	
Total	105	180	64	32	22	3	18	3	1							3	431
Permillage	244	418	148	74	51	7	42	7	2							7	1000

(Numerals : numbers of occurrence)

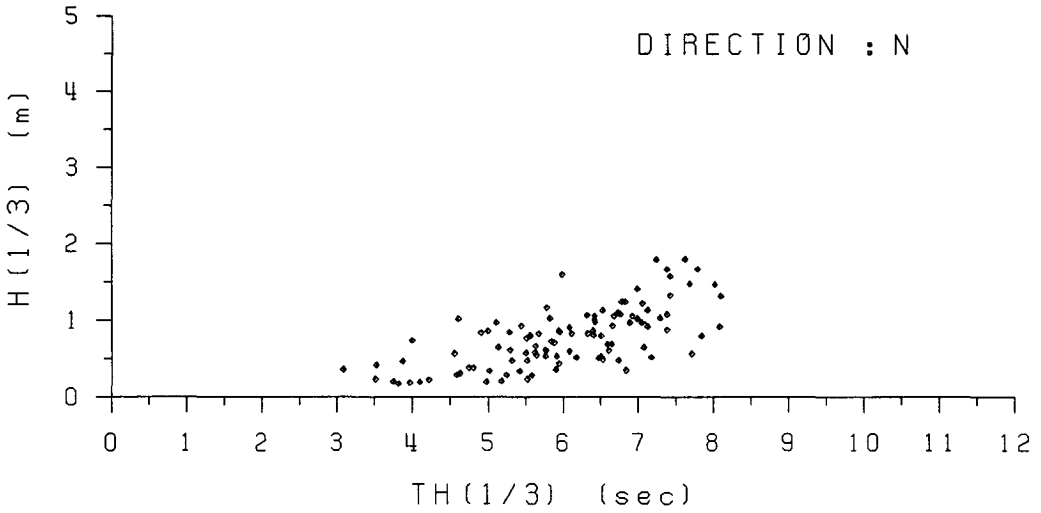


Fig. 2.2.2. Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction N at station FW.

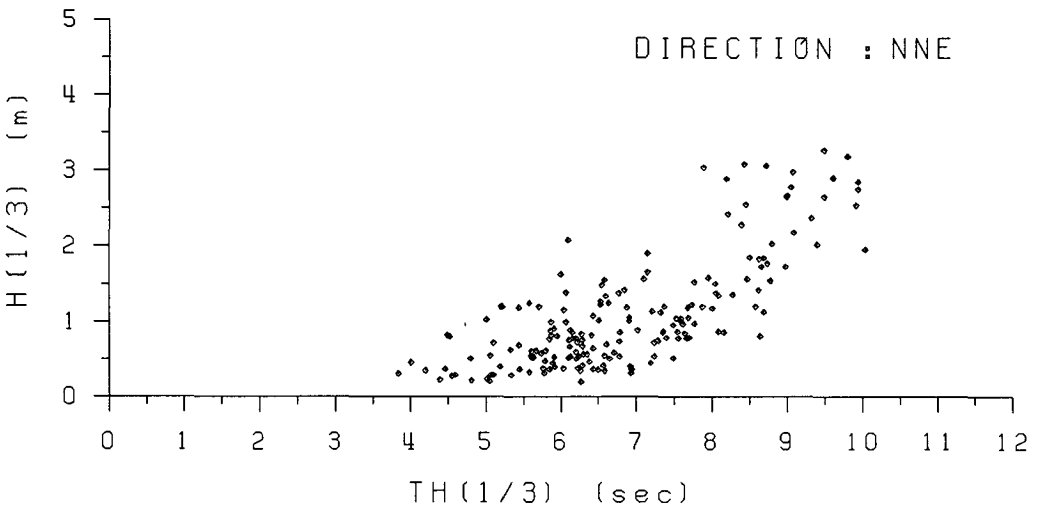


Fig. 2.2.3. Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction NNE at station FW.

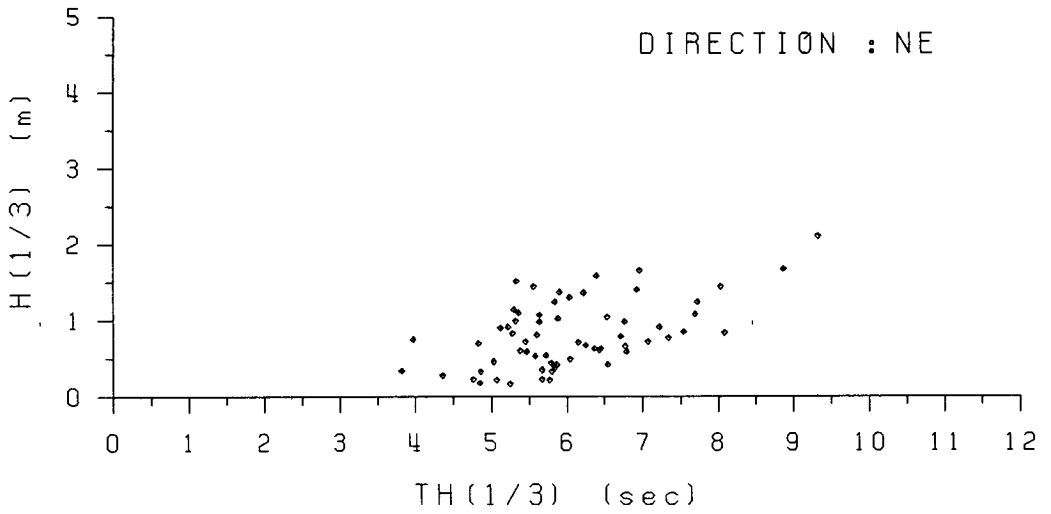


Fig. 2.2.4. Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction NE at station FW.

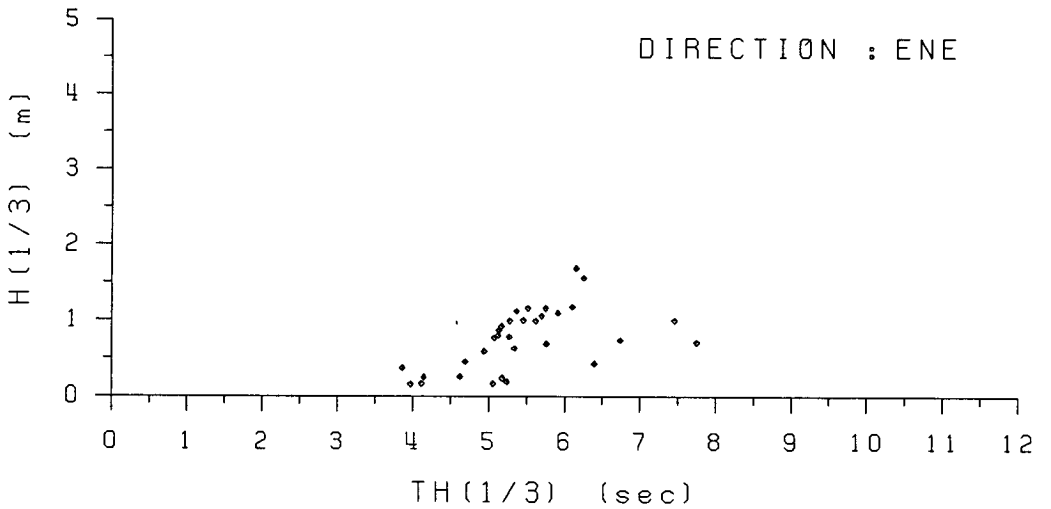


Fig. 2.2.5. Scatter plot of $H_{1/3}$ versus $T_{H_{1/3}}$ in wave direction ENE at station FW.

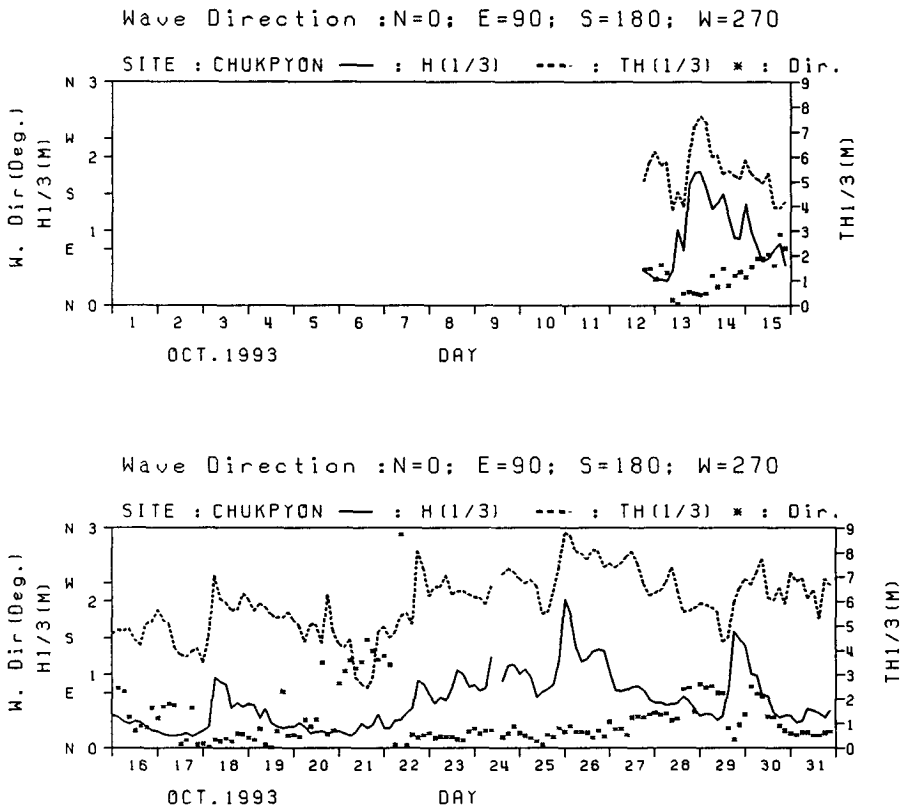


Fig. 2.2.6. Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at station FW of Chukpyon Harbor in October, 1993.

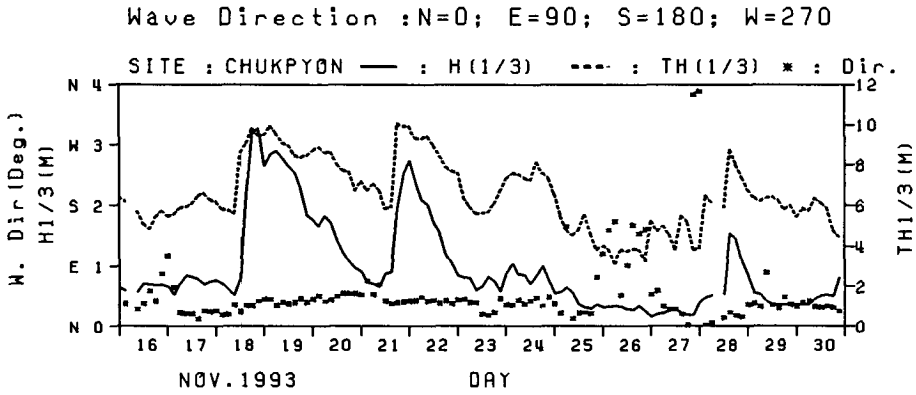
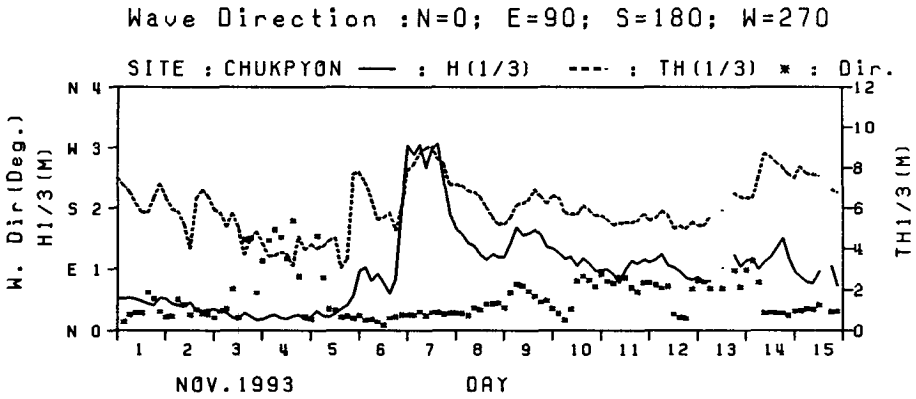


Fig. 2.2.7. Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at station FW of Chukpyon Harbor in November, 1993.

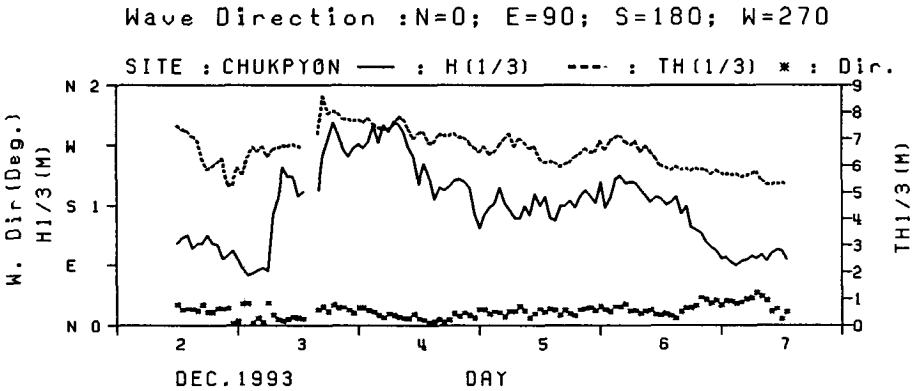


Fig. 2.2.8. Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at station FW of Chukpyon Harbor in December, 1993.

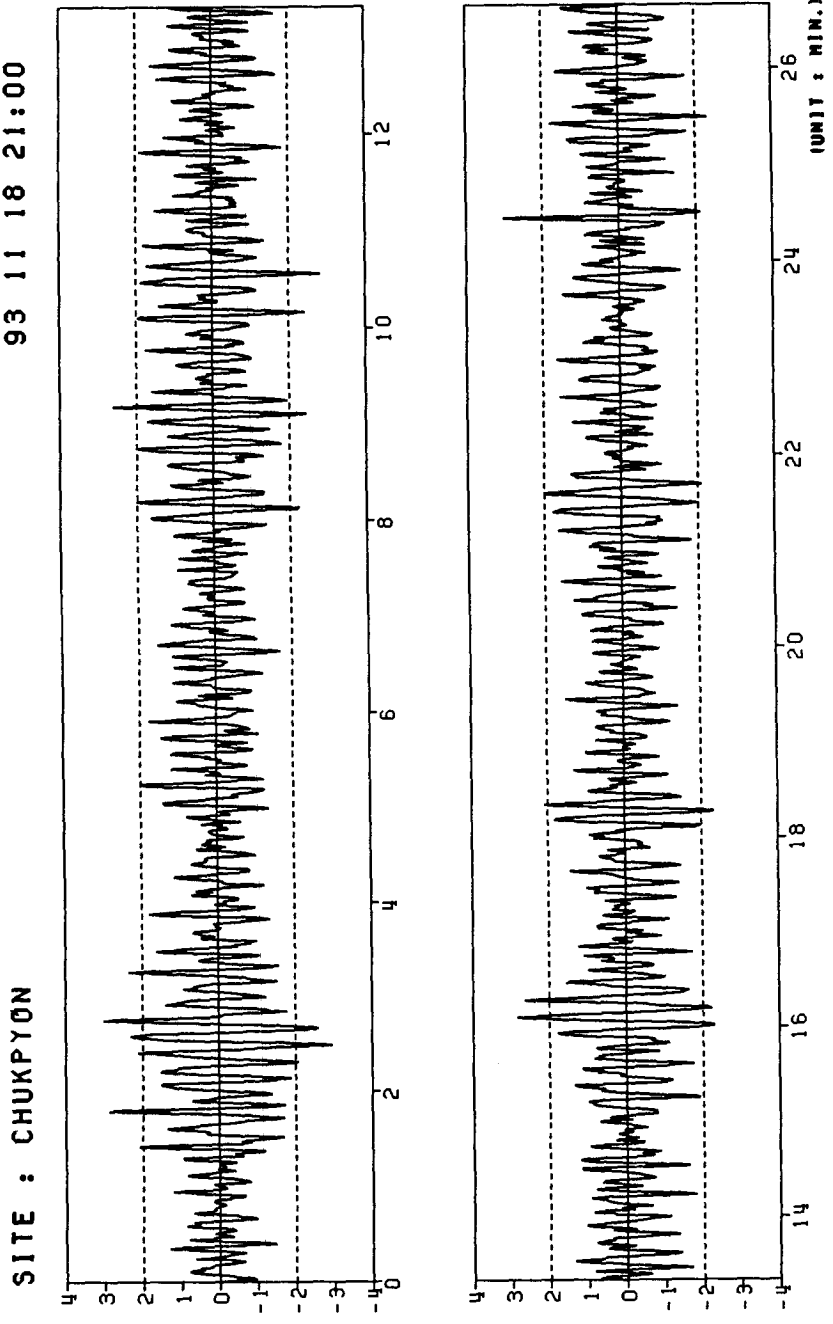
성계수들이다. 한편, Figs. 2.2.6~2.2.8을 살펴보면 유의파고가 약 3m 내외인 폭풍파는 3회(11월 6일 17시~8일 17시, 11월 18일 09시~21일 06시 및 11월 21일 09시~23일 11시) 내습하였다.

부록의 Table A2.2.1에 따르면 관측기간중의 최대파고는 11월 19일 09시의 5.78 m였으며, 이 때의 $H_s = 2.93$ m, $T_z = 7.22$ sec였다. 한편, 유의파고가 최대인 때는 11월 18일 21시로서 $H_s = 3.36$ m, $H_{1/3} = 3.27$ m, $T_z = 7.61$ sec, $T_{H_{1/3}} = 9.49$ sec로 나타났다.

현재까지는 항만구조물 설계파 산정시 유의파를 사용하고 있으므로 공학적인 측면에서 생각하면 최대파고보다 유의파고가 더 큰 의미를 가진다고 볼 수 있다. 따라서, 11월 18일 21시에 관측된 26.7분간의 파랑자료에 대한 상세한 분석 결과를 제시하였다. 먼저, 해수면의 시계열 변화를 Fig. 2.2.9에 도시하였으며, 이 자료를 DIWAP으로 처리한 결과중 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 2.2.10에 도시하였다. 이 그림중 (a)는 각각의 파고를 그 기록의 자승평균평방근 파고(root mean square wave height)로 무차원화시키고 이 무차원화된 파고들의 분포를 Rayleigh 분포곡선과 함께 도시한 것인데 그림에서 보는 바와 같이 심해파에 적용되는 Rayleigh 분포와는 잘 맞지 않는 것으로 나타났다. 그림중 (b)는 JONSWAP 스펙트럼과 비교한 것으로 이와도 상당한 차이를 나타낸다.

상기 자료를 MEM으로 분석한 방향 스펙트럼을 Fig. 2.2.11에 도시하였다. 이 그림에는 상부에 방향 스펙트럼, 그리고 하부에 주파수 스펙트럼이 동시에 제시되었다. 방향 스펙트럼에 실선으로 제시된 contour들은 방

SITE : CHUKPYON 93 11 18 21:00



TIME SERIES OF WAVE DATA

Fig. 2.2.9. Time series of short-wave data measured at station FW of Chukpyon Harbor (1993. 11. 18).

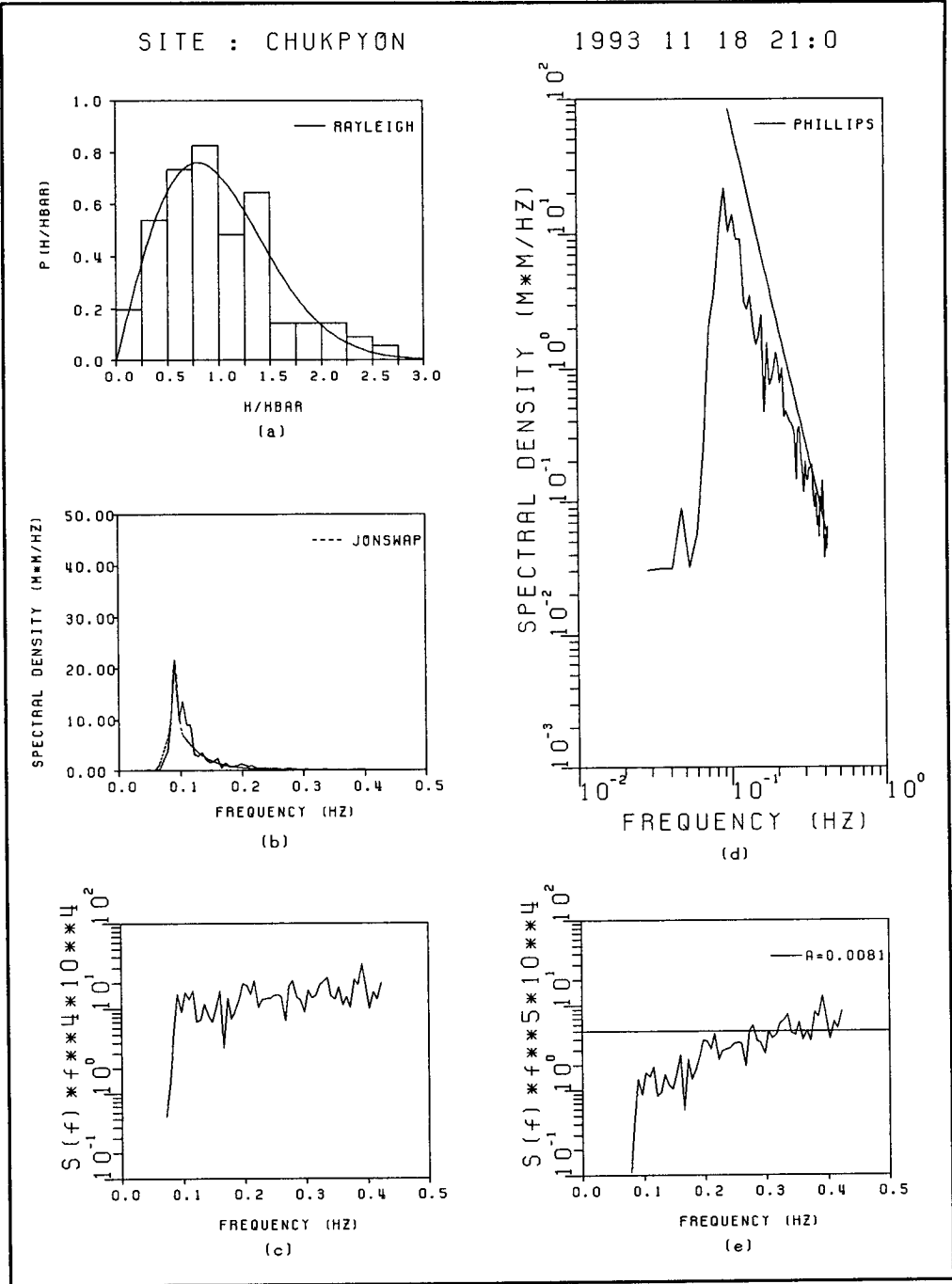


Fig. 2.2.10. Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station FW of Chukpyon Harbor (1993. 11. 18).

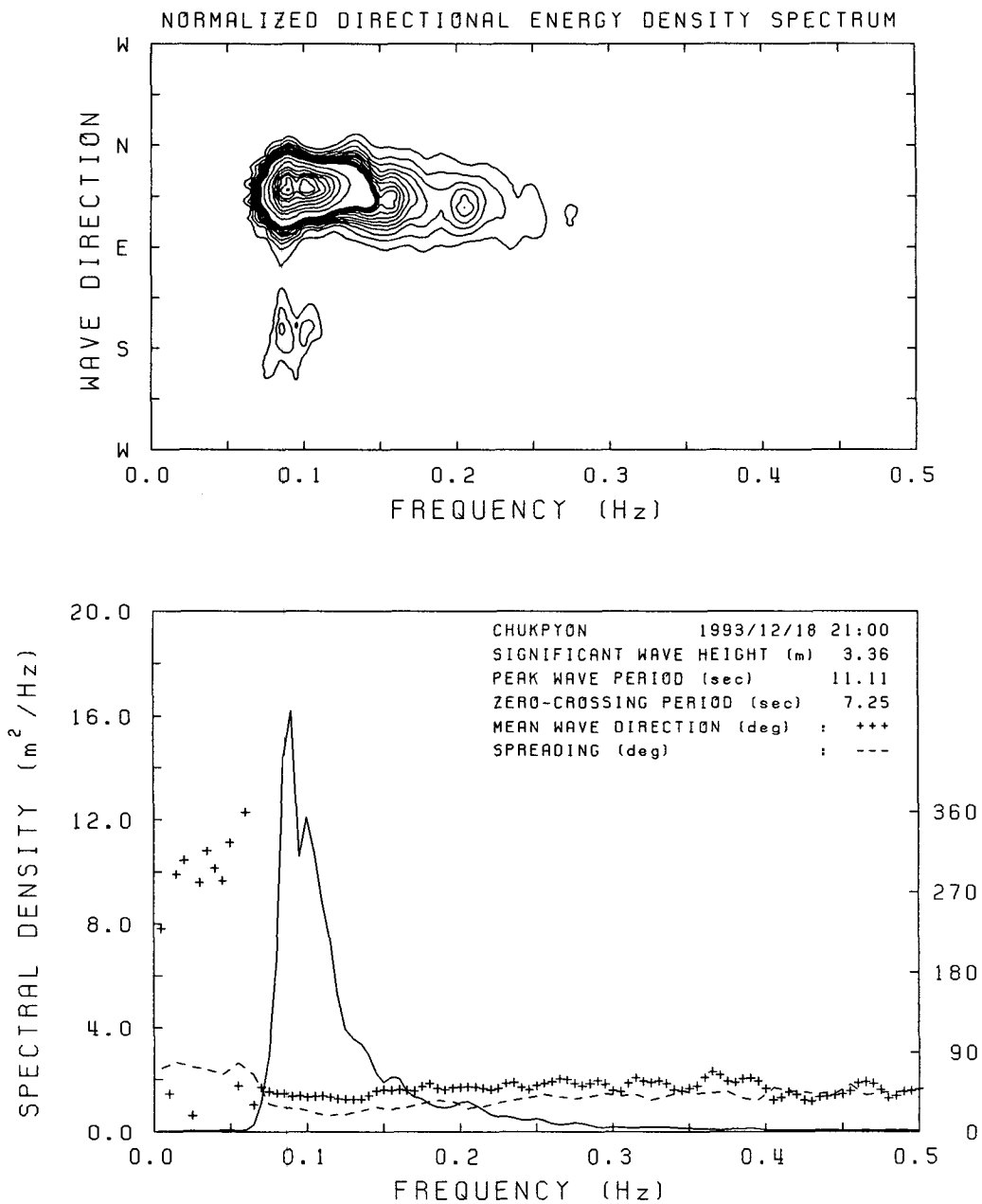


Fig. 2.2.11. Directional wave spectra measured at FW station around Chukpyon Harbor(1993. 11. 18).

향-주파수 스펙트럼의 최대 에너지에 대하여 무차원화한 것으로 굵은 실선은 0.1을 나타내고, 그 안의 가는 실선들이 각각 0.1씩 증가하며, 그리고 굵은 실선 외부의 가는 실선들이 각각 0.01씩 감소한다. 주파수 스펙트럼의 그림에 제시된 평균파향(mean wave direction)과 방향 분산도(directional spreading)는 Longuet-Higgins 등(1963)이 제시한 LHM으로 분석되었다. 그림중 +++로 표시된 평균파향은 파랑이 전파해오는 방향을 나타내며 0°가 N을 나타내고 시계방향으로 증가한다(예를 들면 E = 90°). 이 그림을 살펴보면 침두주파수(peak wave frequency) 부근에서의 평균파향(mean wave direction)이 MEM 및 LHM에 의한 결과가 모두 NE로 나타나고 있다. 즉, 구조물이 없고 수심 변화가 심하지 않은 해역을 전파하는 파의 평균파향 분석시에는 양자에 의한 결과가 비슷함을 알 수 있다.

4. 동시관측

가. 동 계

죽변항 동계의 경우도 조사지역의 주변해역에서 발생되었던 파는 대부분 바람에 의해 지역적으로 생성, 발달되어 전파해온 풍파로 판단된다. 동계에 정점 WW1~WW3에서 1시간 간격으로 26.7분씩 관측된 자료들을 분석하여 정점 WW1과 WW2에서의 유의파고($H_{1/3}$)와 유의파주기($T_{H_{1/3}}$)의 시간적 변화를 Fig. 2.2.12에, 그리고 WW1과 WW3에서의 결과를 Fig. 2.2.13에 각각 도시하였다. 한편, 정점 WW1~WW3에서의 주요 파랑특성 계수들을 부록의 Table A2.2.2~A2.2.4에 각각 제시하였다.

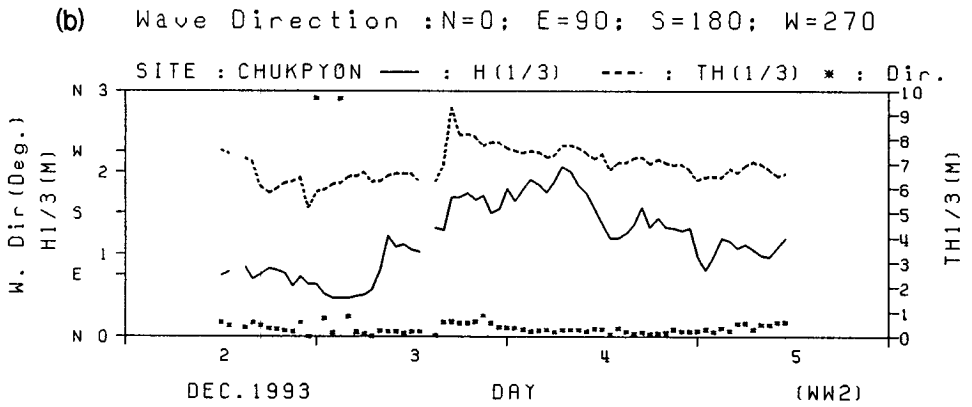
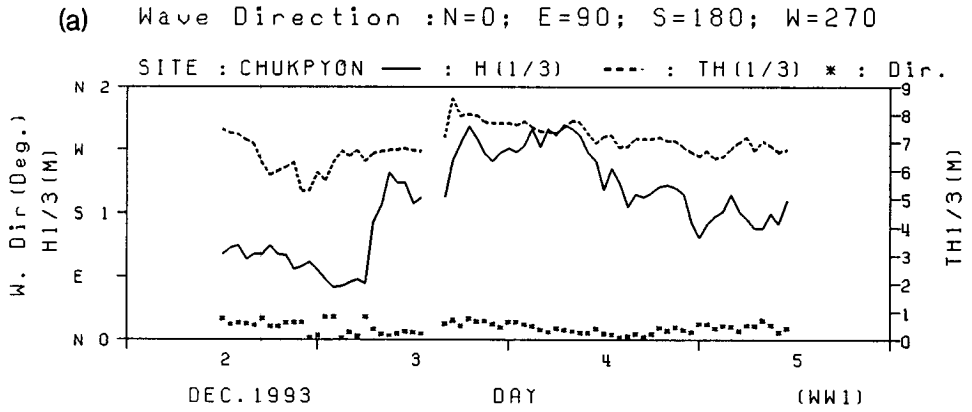


Fig. 2.2.12. Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at stations (a) WW1 and (b) WW2 of Chukpyon Harbor in December, 1993.

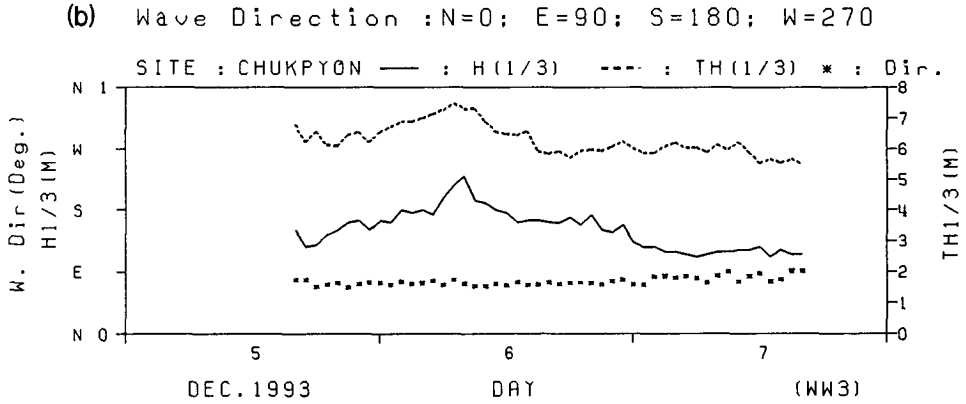
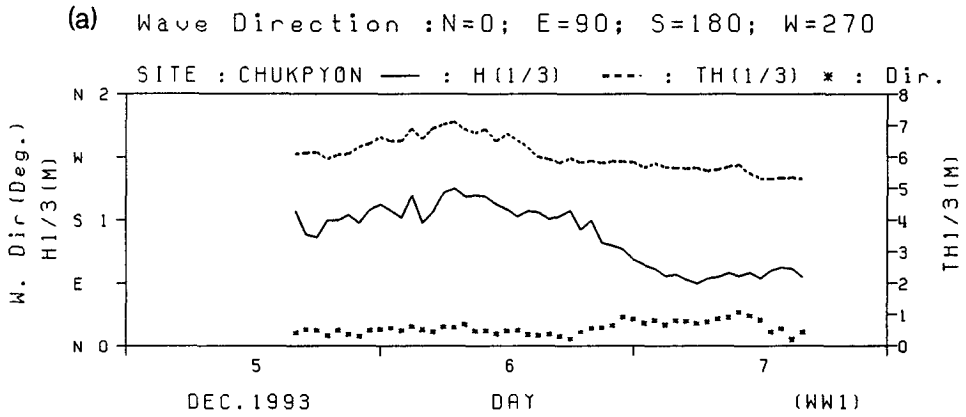


Fig. 2.2.13. Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at stations (a) WW1 and (b) WW3 of Chukpyon Harbor in December, 1993.

(1) 1차 관측

부록의 Table A2.2.2와 A2.2.3을 살펴보면 정점 WW1와 WW2의 관측 위치가 개방 해역에 존재하여 파향이 대체로 N~NNE 사이에 분포하는 비슷한 특성을 나타낸다. 부록의 Table A2.2.2를 살펴보면 관측기간중의 정점 WW1에서의 최대 유의파고는 12월 4일 07시의 1.73 m였으며, 이 때의 $H_{max} = 2.57$ m, $T_z = 6.96$ sec였다. 한편, 부록의 Table A2.2.3에 따르면 정점 WW2에서의 최대 유의파고도 12월 4일 07시의 2.10 m로 정점 WW1에서와 동일한 시각에 출현하였으며 이 때의 $H_{max} = 3.65$ m, $T_z = 7.06$ sec였다.

상기 결과에 따르면 정점 WW2에서 관측된 유의파고가 동일한 시각에 정점 WW1에서 관측된 것보다 약 20 % 정도 크며, Table A2.2.2와 A2.2.3을 살펴보면 동시관측자료중 대부분이 이러한 경향을 나타내고 있다. 참고로 정점 WW1와 WW2의 수심은 각각 약 33 m 및 29 m로 서로 비슷하며 평면적으로는 WW2가 WW1보다 약 1.6 km 북쪽에 위치하고 있다. 상기 결과에 대한 정확한 이유를 제시하는 것은 곤란하나 정점 WW1의 외해 쪽 수심이 상당히 불규칙한 점에서 기인된 것으로 생각할 수 있다.

12월 4일 07시의 양 정점에서의 관측자료를 DIWAP으로 처리한 결과 중 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 2.2.14와 2.2.15에 각각 도시하였다. 이 그림 중 (a)를 살펴보면 연속관측시의 최대 유의파고 자료의 분석 결과(Fig. 2.2.10 참조)와 마찬가지로 Rayleigh 분포와 비교적 잘 맞지 않는다. 그러나, JONSWAP 스펙트럼과 비교한 그림중의 (b)는 비교적 양호한 일치를 나타낸다. 단, 관측자료의 분석에서 출현하는 double peak는 상기 경험식

SITE : CHUKPYON (WW1)

1993 12 4 7:0

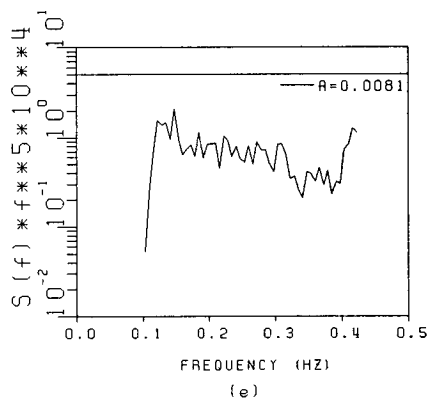
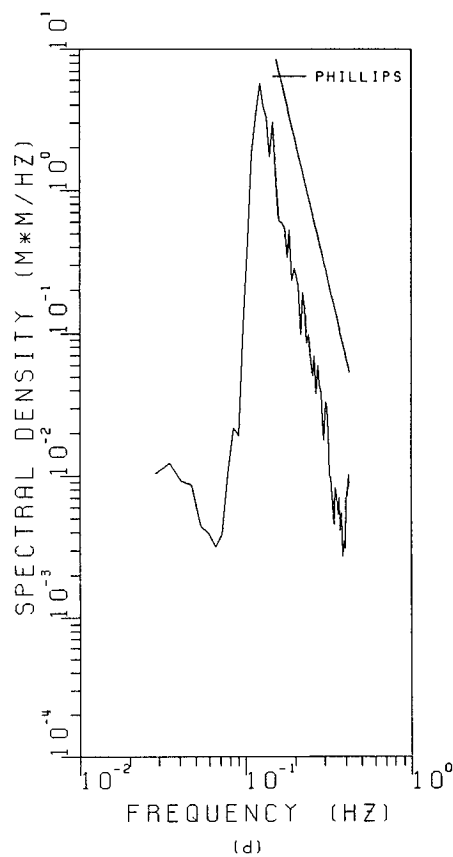
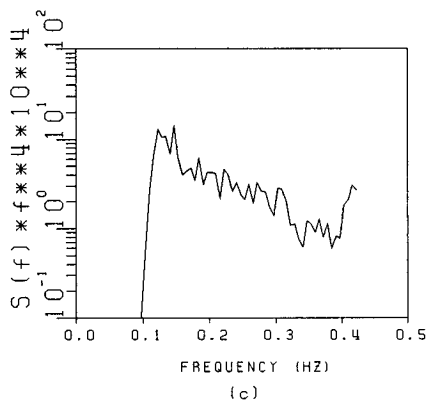
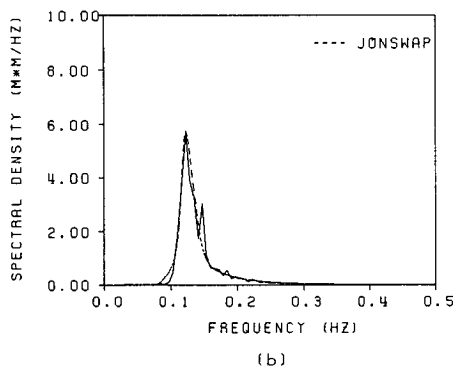
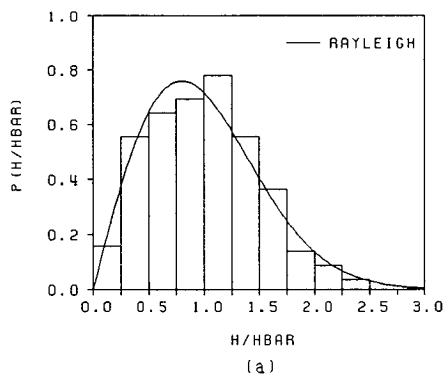


Fig. 2.2.14. Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW1 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 4).

SITE : CHUKPYON (WW2)

1993 12 4 7:0

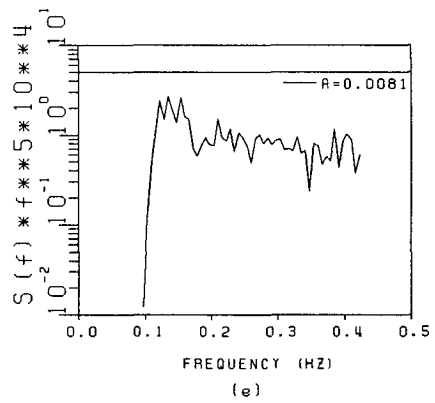
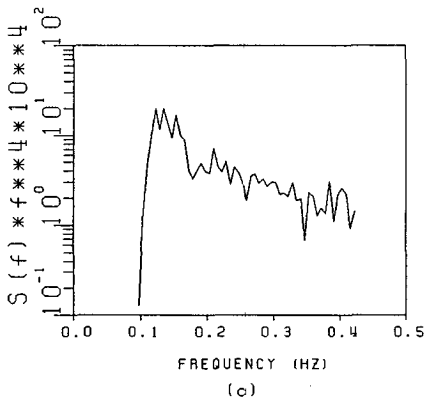
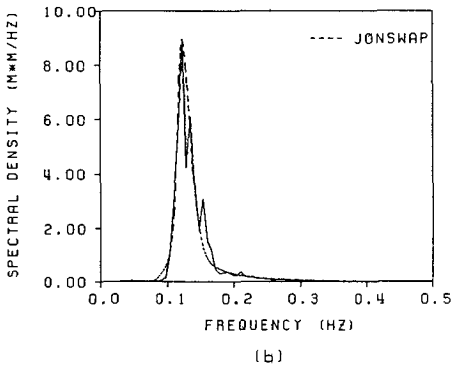
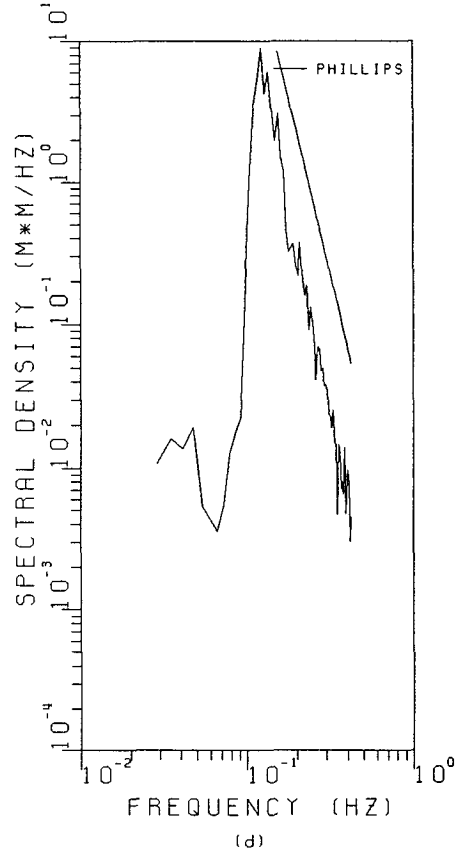
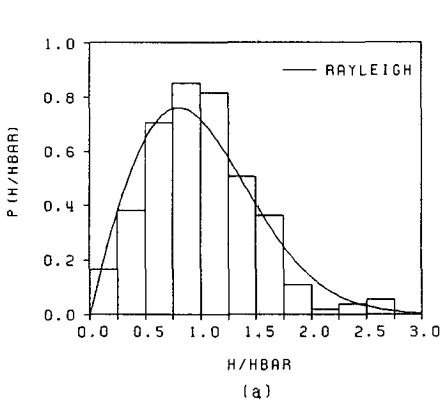


Fig. 2.2.15. Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW2 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 4).

에서는 고려되지 못하여서 이 부분에서는 상당한 차이를 나타내었다.

12월 2일 12시부터 매 3시간 간격의 자료를 선택하여 MEM으로 분석한 결과를 방향-주파수 스펙트럼으로서 부록의 Figs. A2.2.1~A2.2.23에 제시하였다. 이 그림들에서 왼쪽이 WW1, 그리고 오른쪽이 WW2에서의 관측자료를 분석한 결과를 각각 나타낸다. 이 그림들을 살펴보면 주파수 스펙트럼의 경우와 동일하게 방향 스펙트럼도 2개 정점에서 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

(2) 2차 관측

2차 관측시에는 해안쪽 정점(WW3)의 위치를 상당히 천해역으로 이동시켰다. Table A2.2.2와 A2.2.4를 살펴보면 정점 WW1에서 관측된 파향은 대체로 NNE~NE 사이에 분포하는 반면 정점 WW3에서 관측된 파향은 대부분 ENE~E 사이에 분포하고 있다. 이는 수심 약 33 m의 WW1에서 수심이 불과 12 m인 WW3로 전파하는 동안 입사파가 수심의 영향으로 거의 45° 정도 해안선에 수직한 방향으로 굴절되었음을 나타낸다. 부록의 Table A2.2.2를 살펴보면 관측기간중 정점 WW1의 최대 유의파고는 12월 6일 04시의 1.30 m였으며, 이 때의 $H_{max} = 2.10$ m, $T_z = 6.34$ sec였다. 한편, 부록의 Table A2.2.4에 따르면 정점 WW3에서의 최대 유의파고는 12월 6일 05시의 0.64 m였으며 이 때의 $H_{max} = 0.95$ m, $T_z = 6.33$ sec였다.

12월 6일 04시와 05시의 양 정점에서의 관측자료를 DIWAP으로 처리한 결과중 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 2.2.16과 2.2.17에 각각 도시하였다.

SITE : CHUKPYON(WW1)

1993 12 6 4:0

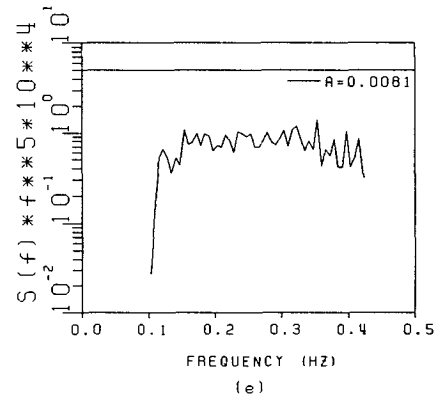
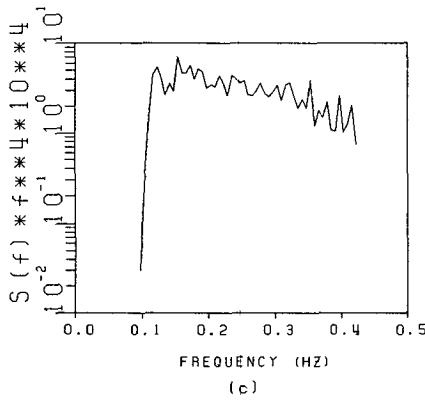
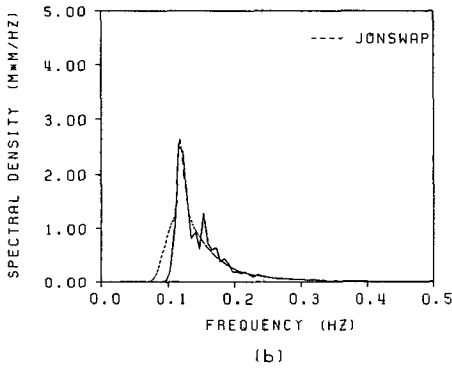
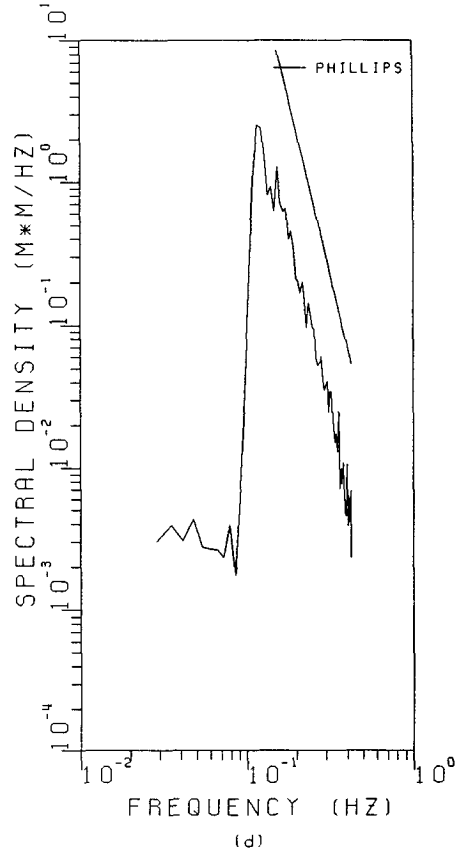
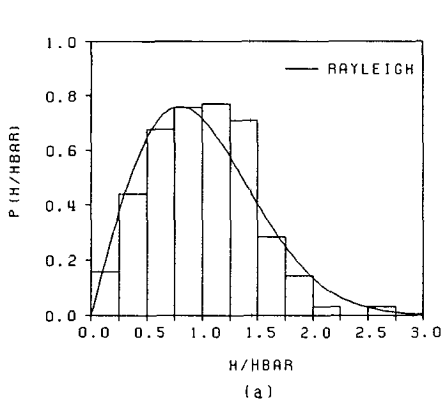


Fig. 2.2.16. Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW1 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 6).

SITE : CHUKPYON (WW3)

1993 12 6 5:0

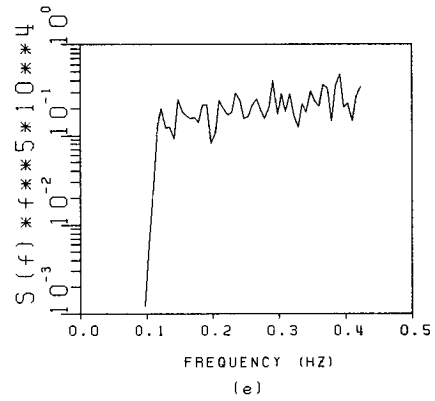
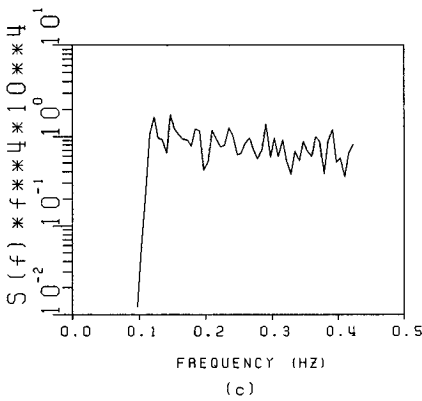
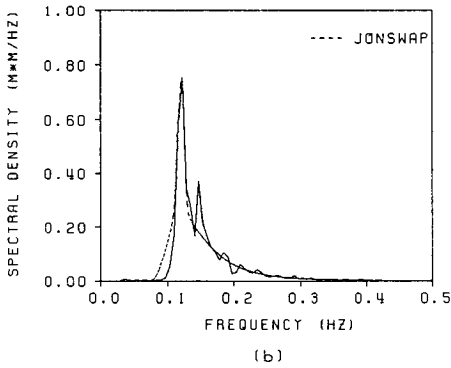
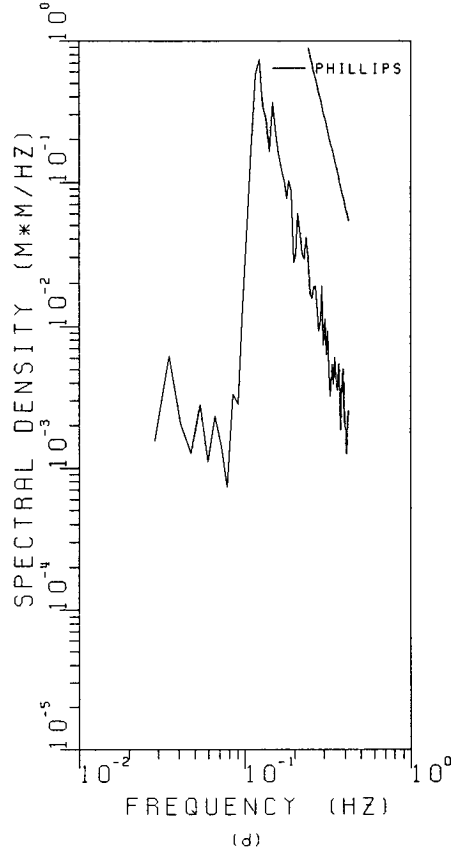
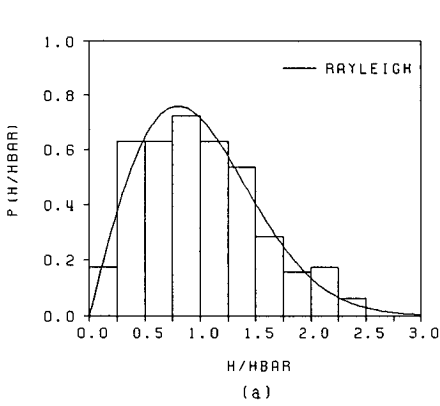


Fig. 2.2.17. Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station WW3 of Chukpyon Harbor (1993. 12. 6).

이 그림들에서는 Rayleigh 분포 및 JONSWAP 스펙트럼과 상당한 차이를 나타내고 있으며, 관측자료에서 출현하는 double peak의 차이도 동일하다.

12월 5일 15시부터 매 3시간 간격의 자료를 선택하여 MEM으로 분석한 결과를 방향-주파수 스펙트럼으로서 부록의 Figs. A2.2.24~A2.2.39에 제시하였다. 이 그림들에서 왼쪽이 WW1, 그리고 오른쪽이 WW3에서의 관측자료를 분석한 결과를 각각 나타낸다. 이 그림들을 살펴보면 방향 스펙트럼의 무차원화된 에너지 분포는 2개 정점에서 거의 유사하나 평균파향의 경우와 마찬가지로 방향 스펙트럼의 경우에도 WW3에서의 결과가 전반적으로 E 방향으로 45° 이동되어 있음을 알 수 있다.

나. 춘 계

죽변항 춘계의 경우도 조사지역의 주변해역에서 발생되었던 파는 대부분 바람에 의해 지역적으로 생성, 발달되어 전파해온 풍파로 판단된다. 춘계에 정점 SW1 및 SW2에서 1시간 간격으로 26.7분씩 관측된 자료들을 분석하여 유의파고($H_{1/3}$)와 유의파주기($T_{H_{1/3}}$)의 시간적 변화를 Fig. 2.2.18에, 그리고 주요 파랑특성계수들을 부록의 Table A2.2.5~A2.2.6에 각각 제시하였다.

이 표를 살펴보면 정점 SW1에서의 평균파향이 4월 21일 19시부터 22일 21시까지는 거의 E 방향이나 22일 22시부터는 N~NE(주로 NNE)로 크게 변화한 것으로 나타났다. 그러나, 호부라무치에미초 후면에 위치한 정점 SW2에서는 평균파향이 NNE~NE 사이에 분포하고 있어서 양자가 큰

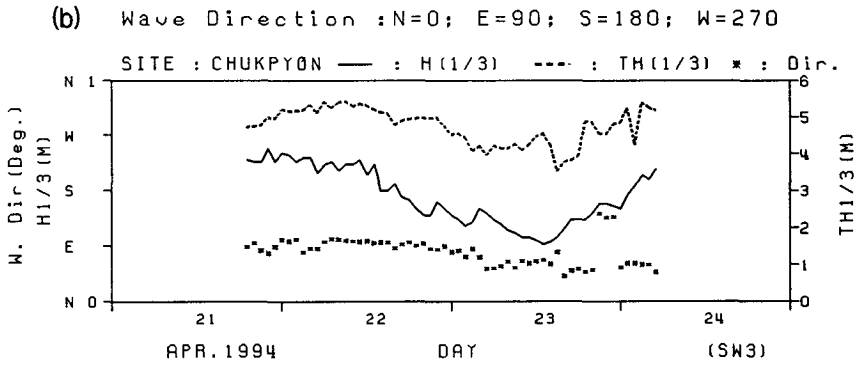
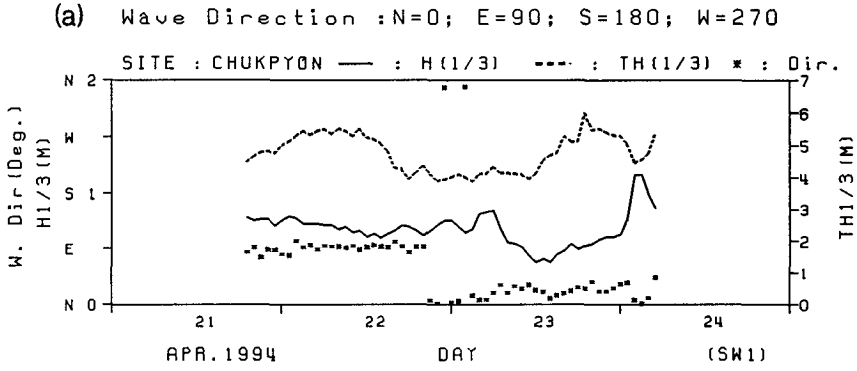


Fig. 2.2.18. Time series of $H_{1/3}$ and $T_{H_{1/3}}$ measured at stations (a) SW1 and (b) SW2 of Chukpyon Harbor in April, 1994.

차이를 나타내었다. 이 점에 대해서는 후술하는 방향 스펙트럼의 분석 결과에서 언급하였다.

부록의 Table A2.2.5를 살펴보면 관측기간중 정점 SW1에서의 최대 유의파고는 4월 24일 02시의 1.20 m였으며, 이 때의 $H_{max} = 1.82$ m, $T_z = 4.08$ sec였다. 한편, 부록의 Table A2.2.6에 따르면 정점 SW2에서의 최대 유의파고는 4월 22일 00시의 0.70 m였으며 이 때의 $H_{max} = 0.99$ m, $T_z = 4.60$ sec였다.

4월 24일 02시와 4월 22일 00시의 양 정점에서의 관측자료를 DIWAP으로 처리한 결과중 스펙트럼 분석 결과를 Fig. 2.2.19와 2.2.20에 각각 도시하였다. 이 그림들에서는 Rayleigh 분포 및 JONSWAP 스펙트럼과 상당한 차이를 나타내고 있으며, 관측자료에서 출현하는 double peak의 차이 동일하다.

4월 21일 19시부터 매 3시간 간격의 자료를 선택하여 MEM으로 분석한 결과를 방향-주파수 스펙트럼으로서 부록의 Figs. A2.2.41~A2.2.59에 제시하였다. 이 그림들에서 왼쪽이 SW1, 그리고 오른쪽이 SW2에서의 관측자료를 분석한 결과를 각각 나타낸다. 이 그림들에 따르면 전술한 4월 22일 22시부터는 주파수 스펙트럼에서 나타나는 여러 개의 peak중 short period에서의 spectral density가 long period에서의 spectral density보다 큰 경우가 상당히 존재한다. 이러한 경우에는 peak frequency에서의 파향이 거의 N을 나타내며 나머지 경우에도 정점 SW1에서의 파향(대부분 E)와는 상당히 큰 차이(대부분 NNE)를 보인다. 정점 SW2에서의 주파수 및 방향

SITE : CHUKPYON (SW1)

1994 4 24 2:0

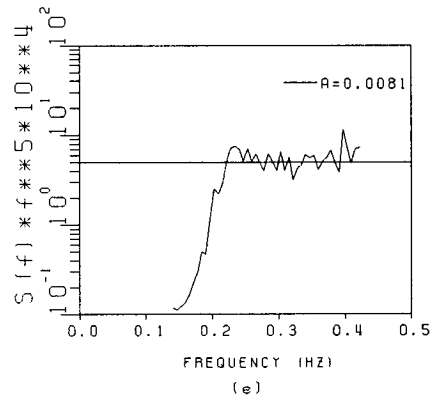
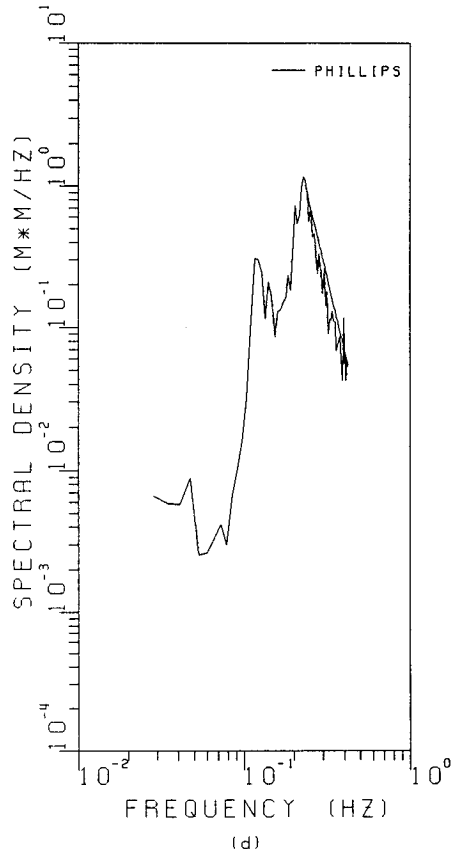
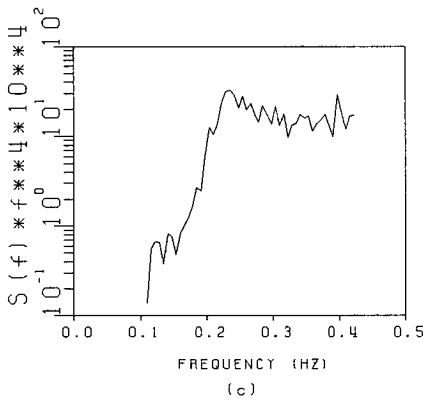
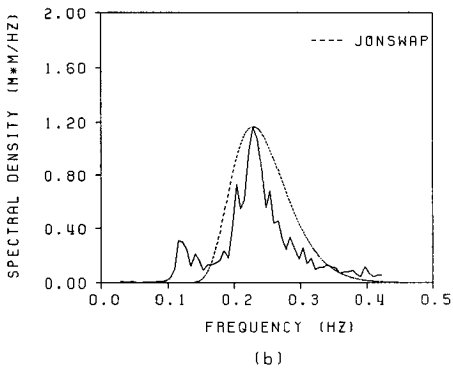
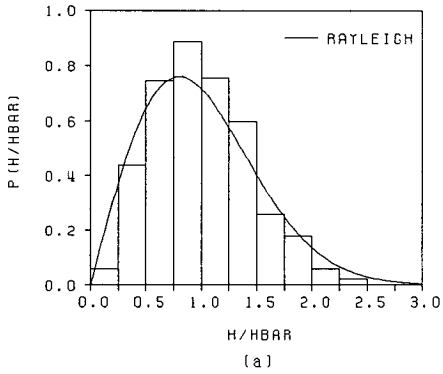


Fig. 2.2.19. Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station SW1 of Chukpyon Harbor (1994. 4. 24).

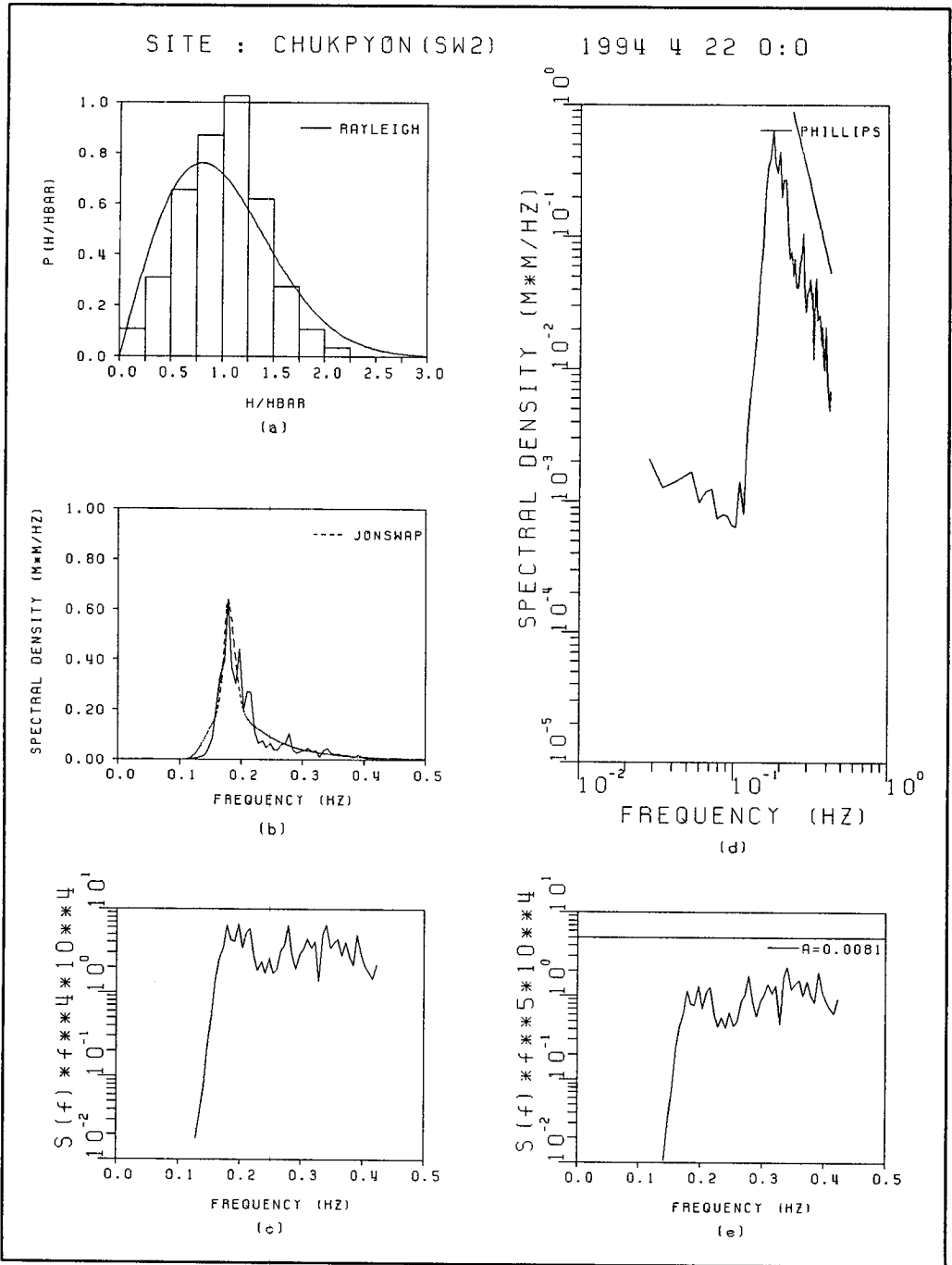


Fig. 2.2.20. Wave height distribution and frequency spectra for waves measured at station SW2 of Chukpyon Harbor (1994. 4. 22).

스펙트럼도 여러 개의 peak를 보이나 peak frequency에서의 파향은 대부분 NNE~NE 사이에 존재한다. 이러한 현상을 나타낸 이유로는 관측된 파가 다른 경우에 비해 상당히 작았던 점을 감안하면 취송거리 또는 바람의 지속시간이 짧아서 충분히 발달하지 못한 파가 관측되었기 때문으로 추측된다.

제3절 부표추적

대상해역 주변의 해수순환 양상을 파악하기 위하여 3일간(1994. 8.25 ~27)에 걸쳐 14 회의 부표추적을 실시하였다. 관측시의 바람 및 해상상태는 매우 정온하였으므로, 본 부표추적에 의한 해수유동 양상은 조류와 항류성분의 합해진 결과로 해석할 수 있다.

대상해역과 같이 조석 혹은 항류에 비해 파랑에너지가 높은 사실퇴적 환경에서 퇴적물이동의 주된 외력은 파랑 및 파랑류(wave-induced currents)이다. 따라서, 현재까지 이와 같은 환경에서의 퇴적물이동을 모의하기 위한 대부분의 연구에서는, 그 외력계산을 위한 입력자료로서 파랑 특성(파고, 파향 및 주기)에 전적으로 의존하였다. 물론 짧은 폭풍기간(storm period) 동안의 지형변화를 모의할 경우에는, 파랑특성을 입력자료로 이용하여 계산하는 파랑류만을 퇴적물이동의 기인력으로 사용하여도 대부분의 현상을 만족스럽게 재현한다. 그러나, 한 계절 이상의 장기간에 걸친 지형변화를 모의하고자 할 때는 조류 혹은 항류의 세기가 파랑류에 버금갈 경우가 있다. 이에 따라 결과적으로 나타나는 흐름의 세기는 흐름들 간의 상호작용에 의해 파랑류보다 크거나 작아질 수가 있다. 이러한 측면

에서 사질퇴적환경에서의 장기간에 걸친 퇴적물이동 및 그에 따른 지형변화를 모의할 때, 파랑특성과 아울러 해당해역 고유의 조류 및 항류의 순환양상을 파악함이 필요하다. 물론 파랑류를 제외한 흐름성분중에는 바람에 의한 흐름도 포함되지만, 이는 파랑류계산시 외력항에 바람응력을 추가하여 계산할 수 있을 것이다. 따라서, 본 관측에서는, 흐름의 정확한 산정을 위해 필요한 파랑에 의한 잉여응력(radiation stress), 바람응력, 조류 및 항류성분중에서, 바람 및 파랑이 흐름에 미치는 영향이 미약할 경우에 조류 및 항류에 의한 대상해역 주변의 해수순환양상 파악에 초점을 맞추었다.

관측된 순환에 미치는 조류 및 항류의 상대적인 기여도 파악을 위해서는 조위 및 정점조류관측을 병행하여야 하지만 이를 수행치 않은 관계로 Table 2.3.1과 같은 관측 당일 목호와 포항의 조석을 참조하여 대상해역의 창·낙조 지속시간을 추정하였다. 관측성과는 Table 2.3.2 및 Fig.2.3.1에 제시하였다.

먼저 용추갑 남동방 약 300 m 해상에서부터 추적한 부표 1의 경우, 낙조시임에도 불구하고 부표가 평균 약 50 cm/s의 속도로 북상하였다. 또한 같은 낙조시에 봉평해수욕장 동방 약 570 m 해상에 투하한 부표 2 역시 약 15 cm/s의 속도로 북상하였다. 따라서, 대상해역에서 외해측으로 약간만 벗어나더라도 조시에 상관없이 북상하는 항류가 존재함을 알 수 있다. 특히 부표 2에서 주목할 점은, 비록 지속적인 추적을 통해 확인하지는 않았지만, 부표가 방파제를 따라 용추갑으로 향하지 않고 항입구 방향으로 북상한다는 것이다.

Table 2.3.1 Tide table at Muk'o and P'ohang during drogoue tracking(Office of Hydrographic Affairs, 1994).

Date	MUK'O		P'OHANG	
	Time	Water Level(cm)	Time	Water Level(cm)
25 Aug.	05:15	40	01:04	22
	11:39	23	06:53	30
	17:34	39	13:21	22
	23:46	24	19:08	29
26 Aug.	05:46	40	01:28	23
	12:24	23	07:14	30
	18:22	37	14:06	21
			20:14	27
27 Aug.	00:11	27	01:48	23
	06:16	40	07:39	30
	13:14	24	14:53	19
	19:24	35	21:27	26

봉평해수욕장 남측의 순환을 파악하기 위한 부표 3, 4 및 5는 각각 약 16, 7 및 10 cm/s의 속도로 남하하였다. 그러나 이들 관측은 낙조시에 수행하였으므로, 항류성분의 기여도를 파악하기 위해서는 조류·조석관측 자료가 요구된다. 방사제와 봉평해수욕장 사이의 간출암 전면부에서의 순환을 파악하기 위해 창조시에 투하한 부표 6 및 7은 각각 약 20, 15 cm/s의 속도로 모두 남진하였다. 창조시임에도 모두 남진함은 항류성분에 의한 것으로 판단된다.

Table 2.3.2. Results of drogue tracking in summer season.

Drogue No.	Date	Time	Depth(m)	Latitude	Longitude
1	25 Aug. '94	10:47:29	19.0	37° 03.008'	129° 26.140'
		53:20	18.0	03.096'	26.189'
		57:45	18.2	03.172'	26.206'
		11:01:54	23.1	03.265'	26.288'
		06:25	27.9	03.383'	26.277'
		11:02	30.0	03.495'	26.295'
		16:37	29.2	03.660'	26.288'
2	25 Aug. '94	11:33:56	14.2	37° 02.715'	129° 25.491'
		39:10	13.9	02.770'	25.513'
		44:08	13.8	02.812'	25.512'
		48:37	13.5	02.826'	25.506'
		53:44	12.8	02.835'	25.506'
		58:55	12.8	02.866'	25.510'
		12:03:45	12.2	02.861'	25.513'
08:51	12.2	02.894'	25.502'		
3	26 Aug. '94	10:15:11	10.0	37° 02.105'	129° 25.244'
		20:25	9.9	02.082'	25.242'
		25:31	9.9	02.087'	25.266'
		30:42	10.0	02.053'	25.290'
4	26 Aug. '94	10:40:16	11.3	37° 02.493'	129° 25.226'
		45:22	11.2	02.469'	25.224'
		50:07	11.2	02.476'	25.226'
		54:32	11.1	02.473'	25.198'
		59:33	11.2	02.463'	25.206'
		11:04:02	11.2	02.450'	25.215'
		09:40	10.9	02.418'	25.200'
14:12	10.6	02.427'	25.193'		
5	26 Aug. '94	10:41:15	6.3	37° 02.492'	129° 25.098'
		47:48	5.8	02.473'	25.120'
		51:09	5.5	02.444'	25.100'
		56:26	5.0	02.428'	25.090'
		11:01:21	4.7	02.420'	25.089'
		06:19	4.6	02.400'	25.085'
		12:32	4.6	02.374'	25.070'
17:18	4.2	02.374'	25.087'		

Table 2.3.2. (Cont'd).

Drogue No.	Date	Time	Depth(m)	Latitude	Longitude
6	26 Aug. '94	14:13:10	5.3	37° 02.954'	129° 25.155'
		19:45	4.5	02.946'	25.142'
		23:35	4.1	02.917'	25.107'
		29:20	5.3	02.943'	25.107'
		34:20	3.5	02.924'	25.101'
		39:20	6.0	02.917'	25.070'
		44:15	4.3	02.886'	25.096'
		49:38	3.1	02.904'	25.070'
		54:10	2.5	02.902'	25.074'
		58:35	3.1	02.861'	25.078'
		15:02:45	2.7	02.860'	25.076'
		07:16	2.7	02.848'	25.036'
		7	26 Aug. '94	14:17:30	7.5
21:15	7.7			02.909'	25.231'
27:00	7.9			02.888'	25.224'
31:35	8.0			02.917'	25.219'
37:00	7.7			02.886'	25.226'
41:50	7.6			02.891'	25.180'
47:15	7.3			02.848'	25.169'
51:58	6.8			02.886'	25.149'
56:26	6.8			02.858'	25.182'
15:00:49	6.8			02.829'	25.178'
05:05	6.7			02.866'	25.131'
09:40	7.0	02.836'	25.143'		
8	26 Aug. '94	15:15:50	4.2	37° 03.024'	129° 25.350'
		21:35	4.6	03.023'	25.352'
		26:08	3.5	03.027'	25.336'
		30:54	4.1	02.993'	25.339'
		35:30	4.3	02.996'	25.336'
		40:05	4.1	02.996'	25.327'
		45:08	4.4	02.989'	25.295'
		50:23	4.4	03.007'	25.277'
		56:20	4.8	02.996'	25.274'
		16:03:05	5.8	02.992'	25.248'
		10:13	6.3	02.982'	25.198'
		18:08	5.7	02.935'	25.149'
		25:37	5.0	02.989'	25.151'
		36:30	*	02.960'	25.109'
42:43	*	02.978'	25.100'		

Table 2.3.2. (Cont'd).

Drogue No.	Date	Time	Depth(m)	Latitude	Longitude
9	26 Aug. '94	15:19:40	5.5	37° 03.137'	129° 25.349'
		23:52	6.3	03.086'	25.361'
		28:16	6.0	03.127'	25.360'
		33:05	6.4	03.068'	25.361'
		37:52	6.4	03.082'	25.389'
		42:22	6.4	03.062'	25.393'
		47:37	5.0	03.079'	25.372'
		53:18	4.0	03.062'	25.393'
		59:43	3.6	03.073'	25.431'
		16:06:43	3.3	03.048'	25.402'
		14:18	2.9	03.042'	25.426'
		21:48	3.1	03.043'	25.418'
		29:59	2.9	03.054'	25.433'
10	26 Aug. '94	16:33:58	4.8	37° 03.070'	129° 25.169'
		39:11		03.040'	25.169'
		45:45		03.064'	25.187'
		50:34		03.094'	25.175'
		55:19		03.072'	25.187'
		17:00:24		03.103'	25.189'
11	27 Aug. '94	9:51:20		37° 03.001'	129° 25.469'
		55:16		03.020'	25.457'
		59:08		03.018'	25.440'
		10:03:33		03.011'	25.427'
		07:57		02.971'	25.449'
		12:25		02.986'	25.424'
		16:43		02.975'	25.420'
		21:35		02.979'	25.376'
		26:32		02.974'	25.343'
		31:08		02.974'	25.341'
		36:20		02.968'	25.299'
12	27 Aug. '94	10:38:30		37° 02.985'	129° 25.352'
		42:50		02.999'	25.343'
		51:38		03.000'	25.336'

Table 2.3.2. (Cont'd).

Drogue No.	Date	Time	Depth(m)	Latitude	Longitude
13	27 Aug. '94	11:01:31		37° 03.137'	129° 25.316'
		07:20		03.128'	25.310'
		12:15		03.116'	25.305'
		17:20		03.132'	25.314'
		21:23		03.128'	25.310'
		26:30		03.125'	25.314'
14	27 Aug. '94	9:20:15		37° 03.032'	129° 25.563'
		24:53		03.038'	25.548'
		29:18		03.040'	25.534'
		34:08		03.040'	25.519'
		38:58		03.042'	25.537'
		43:40		03.040'	25.521'
		49:38		03.034'	25.510'
		53:18		03.043'	25.495'
		57:00		03.034'	25.495'
		10:01:00		03.046'	25.495'
		05:12		03.014'	25.495'
		09:40		03.029'	25.506'
		14:20		03.008'	25.482'
		18:32		03.004'	25.449'
		23:50		03.001'	25.433'
		28:32		03.010'	25.387'
		33:40		02.970'	25.400'
		40:22		02.951'	25.369'

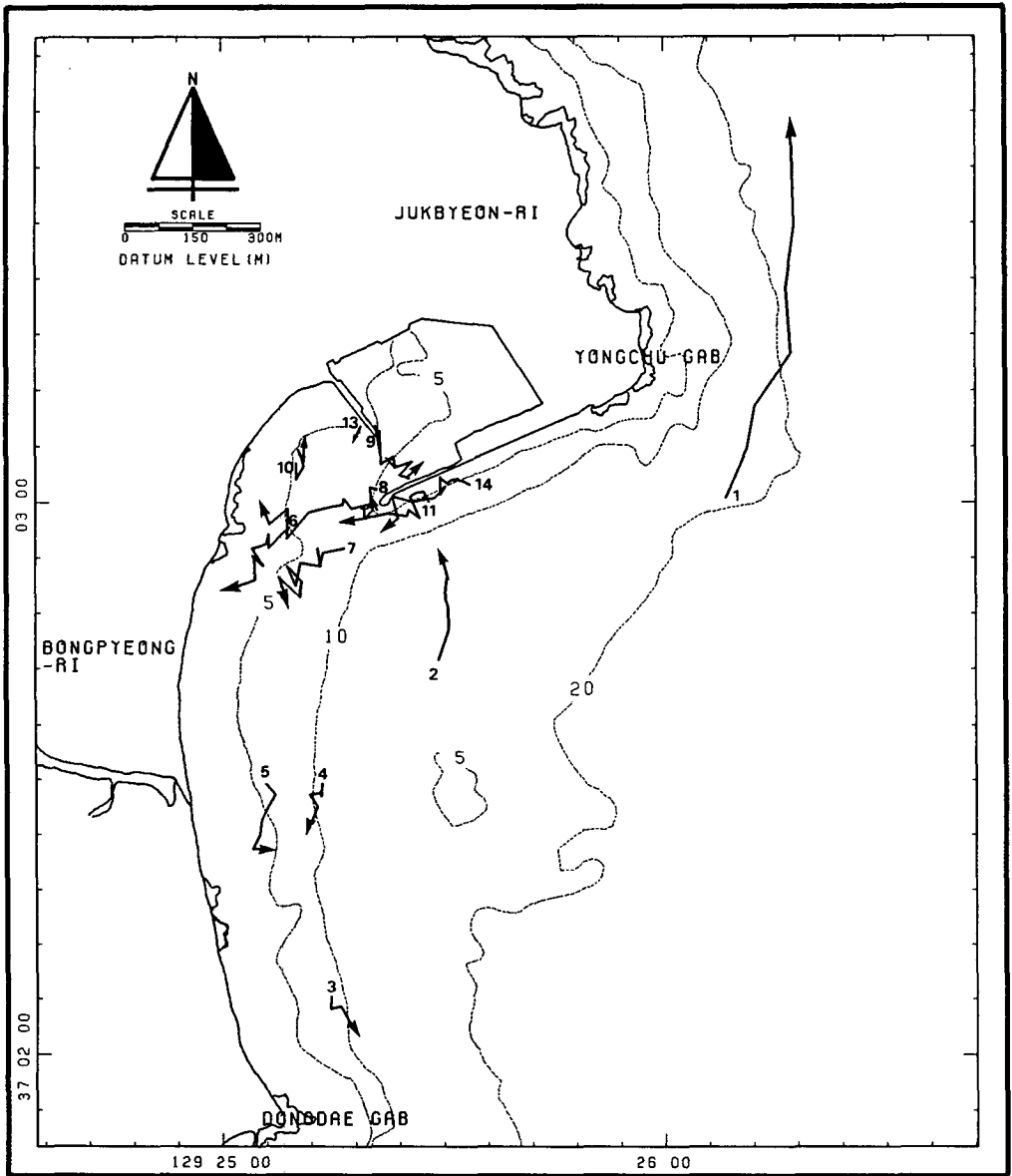


Fig. 2.3.1. Results of drogue tracking in summer season.

방파제 선단 내측과 방사제 선단 외측을 지나는 순환을 파악하기 위해 창조시에 부표 8 및 9를 투하하였다. 방파제 선단 내측의 부표 8은 평균 8 cm/s의 속도로 간출암 전면으로 이동한 후 다시 북상하는 양상을 보였다. 부표는 9는 당초 항내로 진입할 것으로 예상하였으나, 6 cm/s의 속도로 방파제쪽으로 이동하였다.

부표 10 및 13은 간출암과 방사제 사이의 순환 파악을 위하여 각각 창조시와 낙조시에 투하되었다. 부표 10은 남진과 북진을 반복하지만 결과적으로는 북진하는 양상을 보이며 평균속도는 약 13 cm/s이었다. 반면 부표 13은 약 3 cm/s의 속도로 남진하였다.

방파제 외측을 따른 흐름양상을 파악하기 위하여 낙조시에 부표 11 및 14를 투하하였으며, 두 부표 모두 간출암쪽을 향해 각각 약 10 및 6 cm/s의 속도로 이동하였다.

이상으로 조류 및 항류성분이 합해진 대상해역 주변에서의 하계절 순환을 부표추적 결과로부터 살펴보았다. 보다 정확한 해석을 위해서는 중요한 몇몇 지점에서의 조류·조위관측을 병행하여야 하지만, 관측결과로부터의 대략적인 순환양상은 Fig.2.3.2와 같을 것으로 추론된다. 즉, 죽변항 외측 수심 약 10 m 이상인 곳에서는 북향의 항류가 우세하며, 이 항류는 방파제 부근에서 방향을 바꾸어 항입구쪽으로 이동하다가 간출암 전면에서 북향성분과 남향성분으로 분리되어, 일부는 수심 5 m 이하의 연안역을 따라 남진하고, 일부는 항내로 유입되는 것으로 판단된다. 방파제 전면에서는 일단 항입구쪽으로 흐름이 형성되는 것으로 추론하였으나, 이의 확증을 위해서는 창조시의 부표추적이 필요하다.

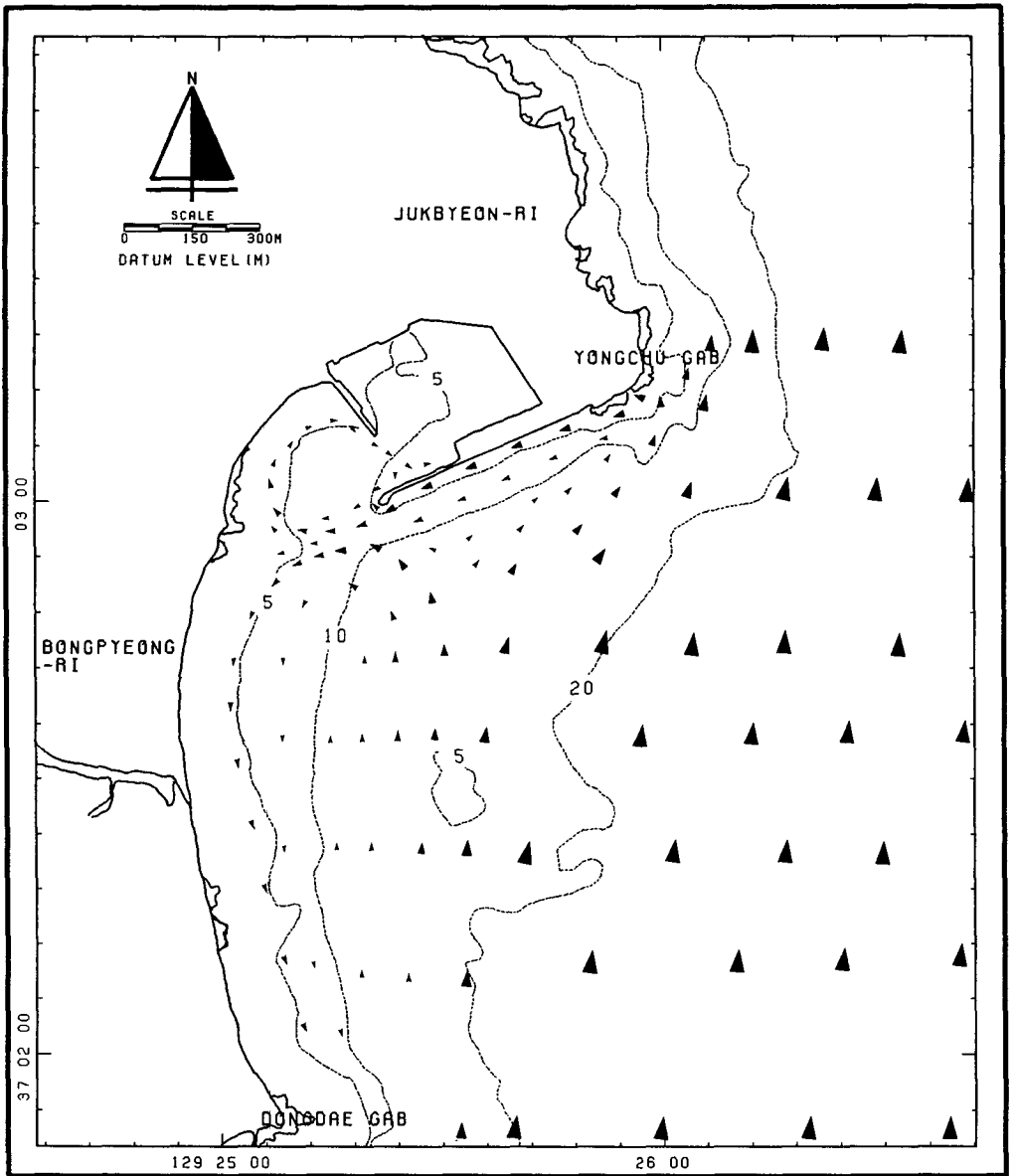


Fig. 2.3.2. Observed circulation pattern in summer season.

제4절 해안선 및 수심측량

1. 관측 및 수심도 작성

장기간에 걸친 해저지형 변화와 해안선의 전진 및 후퇴 등의 변화를 파악하기 위해 해안선 측량과 수심측량을 파랑관측기간 전후인 1993년 10월과 12월 그리고 및 1994년 4월 등 3회 실시하였다. 해안선 측량에는 광파측거의를 사용하였으며, 수준측량도 병행하였다. 수심측량에는 천해용 정밀 음향측심기, PS-10E Echo Sounder를 사용하였으며, 선위측정은 육분의를 이용한 3점 양각법을 사용하였다. 이와 같이 실시된 육상 및 해상측량 자료를 평균하면 자료로 환산한 후 하나의 지도에 등고선과 등수심선을 동시에 표기하여 이 후의 분석에 편리하도록 편집하였다. 이와 같이 편집된 수심도는 축소하여 제2차년도 관측분인 1993년 5월의 수심도와 함께 Figs. A2.4.1 - A2.4.4에 수록하였으며, 관측일시에 관한 자세한 사항을 Table 2.4.1에 수록하였다. 제2차년도 관측분인 1993년 8월 수심도는 날씨 관계로 7월과 8월에 걸쳐 실시되었기 때문에 분석에서는 제외하였으며, 1993년 12월과 1994년 4월 관측시에는 불량한 기상조건과 잦은 기기고장으로 단속적으로 그리고 관측기기를 교체하며 관측이 실시되어 수집된 자료를 최대한 보정하여 사용하였으나 관측 기록된 자료의 신빙성이 의문시되어 분석에 어려움이 있었다. 이와 같이 제작된 수심도를 이용하여 해저지형 변화 및 해안선 변화에 대한 분석을 실시하였으며, 해안선변형에 대해서는 본보고서 제5장에서 기술하였으며, 본 절에서는 해저지형변화에 대한 분석결과에 대해서만 기술하였다.

Table 2.4.1 Periods of shoreline and bathymetry surveys.

No.	Shoreline Survey		Bathymetry Survey		Remarks
1	12	May 1993	15	May 1993	Fig.A2.4.1
2	21	Jul. 1993	24 14,16	Jul. 1993 Aug. 1993	-
3	11,12	Oct. 1993	13,15	Oct. 1993	Fig.A2.4.2
4	3,4	Dec. 1993	5,6,7	Dec. 1993	Fig.A2.4.3
5	20	Apr. 1994	21,23	Apr. 1994	Fig.A2.4.4

2. 분석 및 결과

해저지형 및 해안선의 변화양상을 파악하기 위해 죽변항 및 주변 해안선이 형태상 원형을 이루고 있음을 감안하여 수심측량구역 외해 쪽에 기준점을 설정하고 이 기준점을 중심으로 Fig.2.4.1에 제시된 바와 같이 6° 간격으로 15개 기준선을 방사선형으로 설정하였다. 각 기준선에서의 수심변화를 파악하기 위하여 각 기준선을 따라 각각의 수심도에서 수심을 독취하였다. 약 1년간의 변화량으로 간주할 수 있는 1993년 5월과 1994년 4월의 수심도에서 독취된 수심변화를 Fig.2.4.2에 수록하였으며, 파랑관측기간 전후인 1993년 10월과 1993년 12월의 수심도에서 독취된 수심변화를 Fig.2.4.3에 제시하였다.

Fig.2.4.2를 보면 1993년 5월 부터 1994년 4월 까지 약 1년간 대상해역은 침식이 우세하였음을 보여주며 특히 10m 이상의 비교적 수심이 깊은 곳이 더 많이 침식되었음을 알 수 있다. 그러나 북동계열의 파랑이 우세

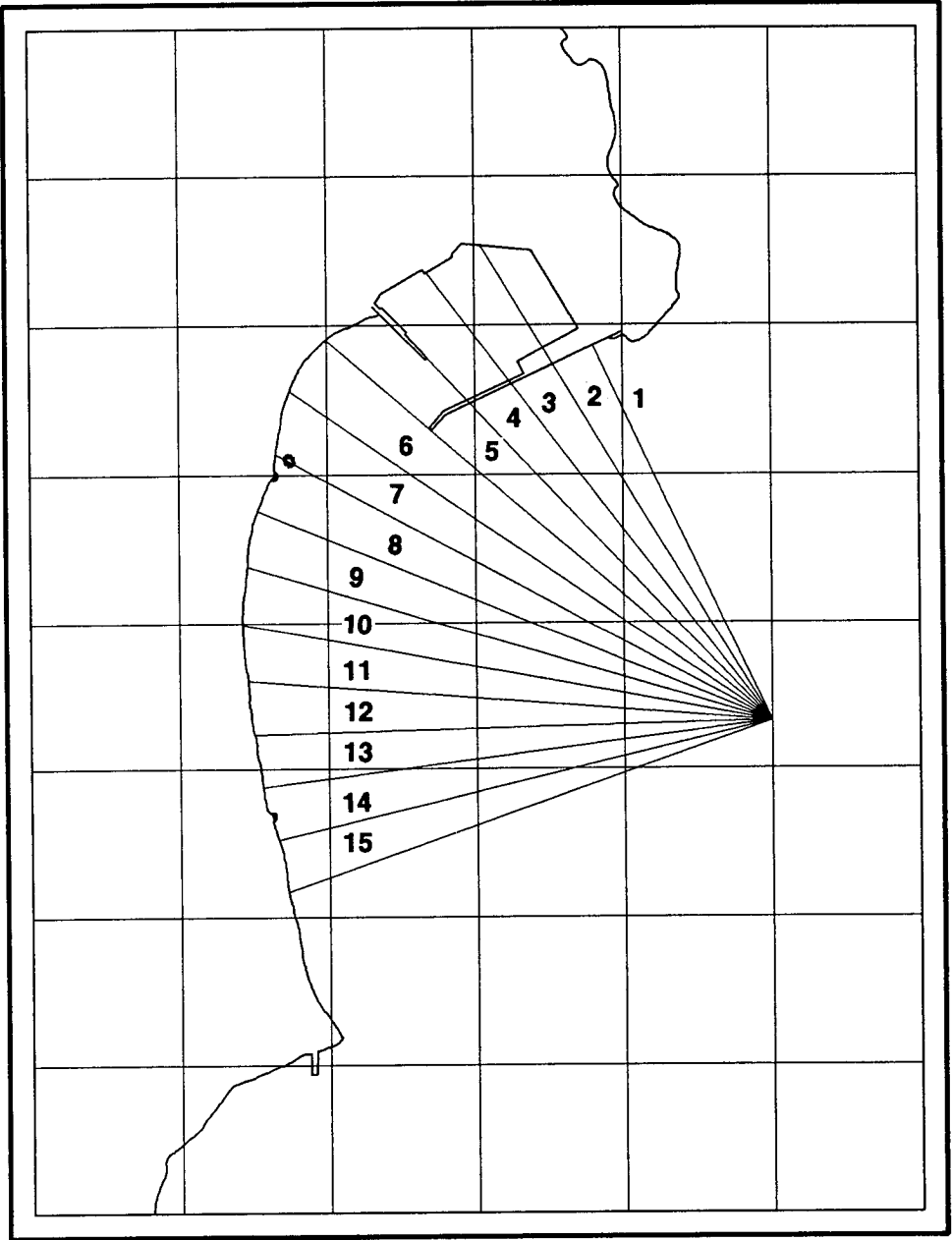


Fig. 2.4.1. Reference lines for the comparison of bottom profiles .

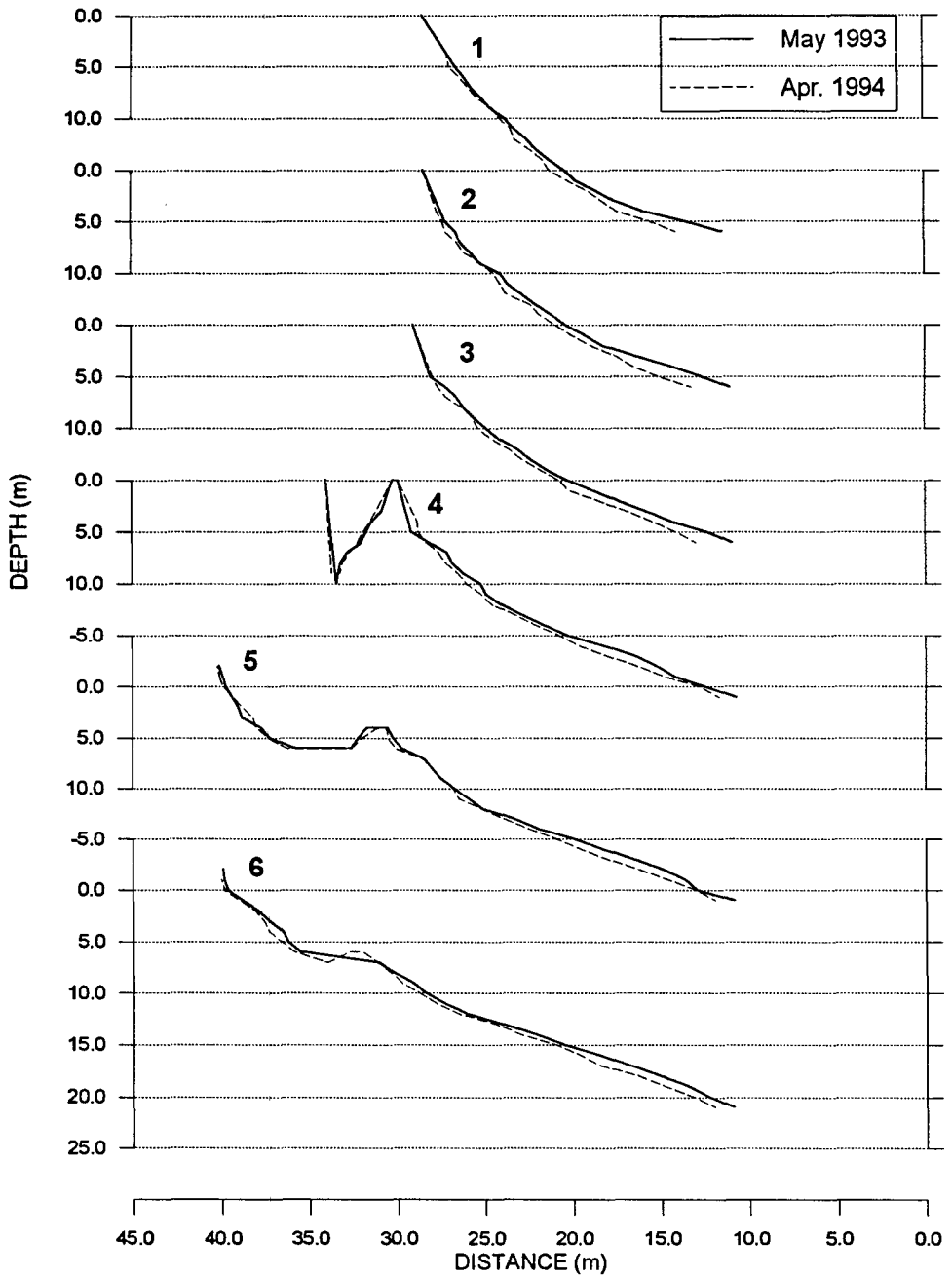


Fig. 2.4.2. Change of bottom profiles during May 1993 ~ Apr. 1994.

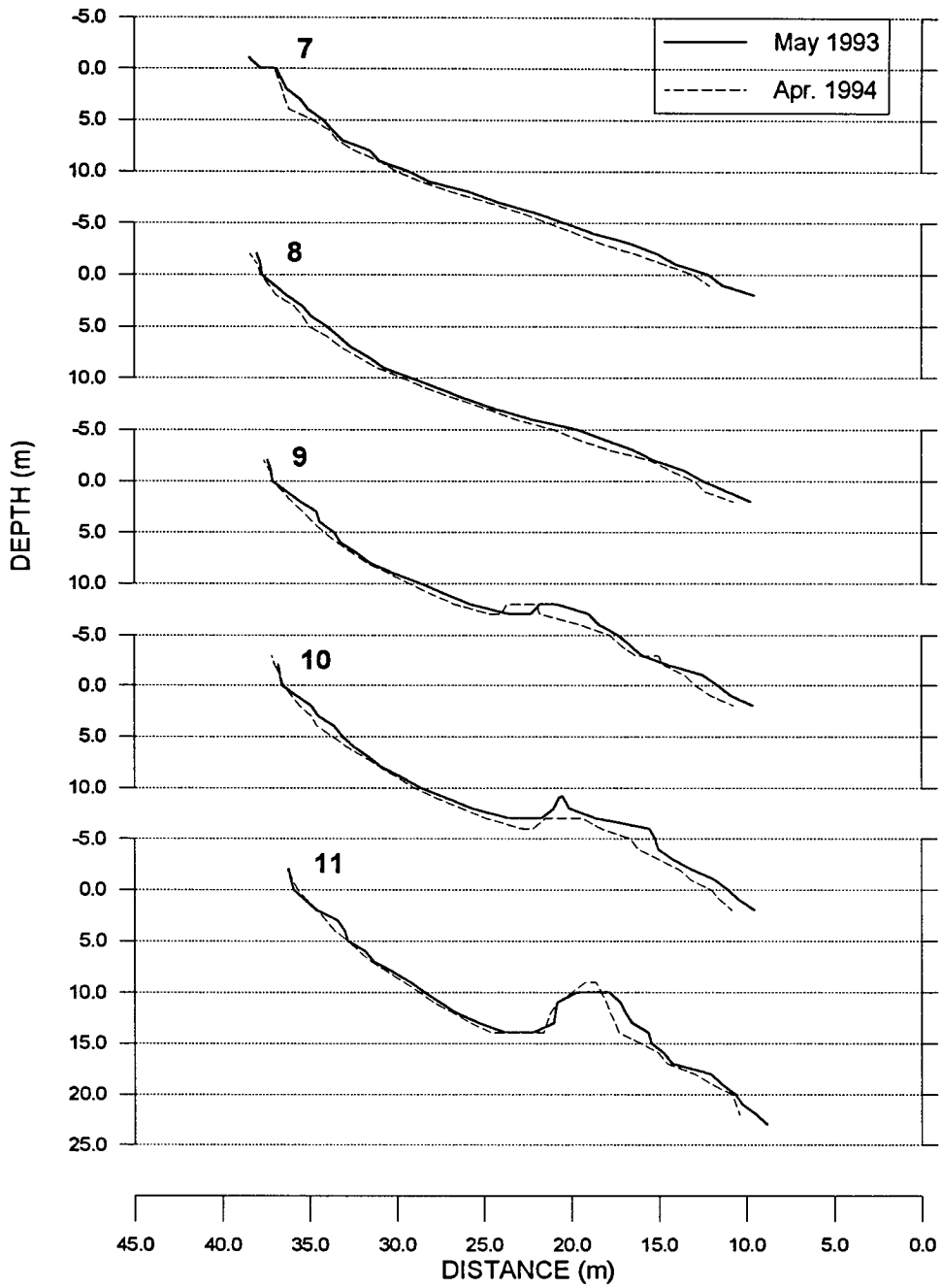


Fig. 2.4.2. (Cont'd).

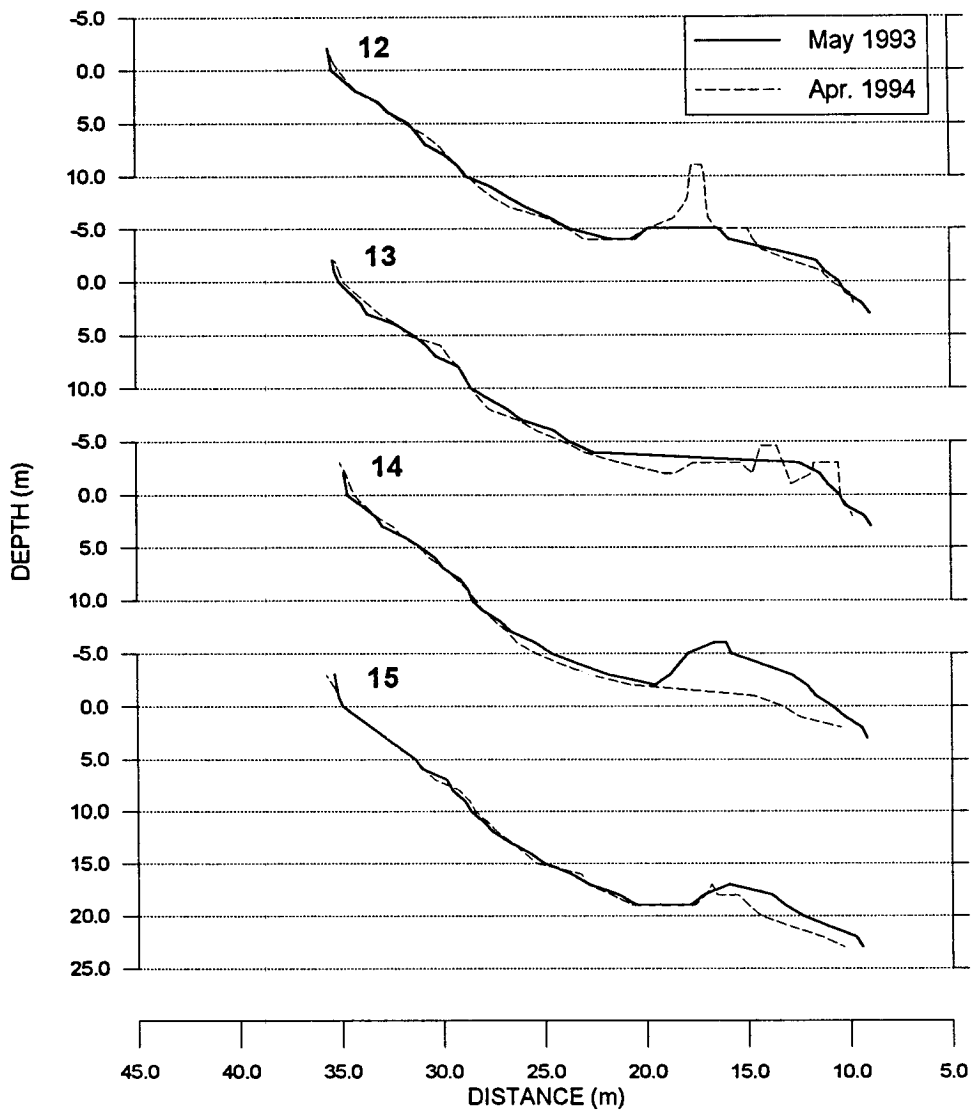


Fig. 2.4.2. (Cont'd).

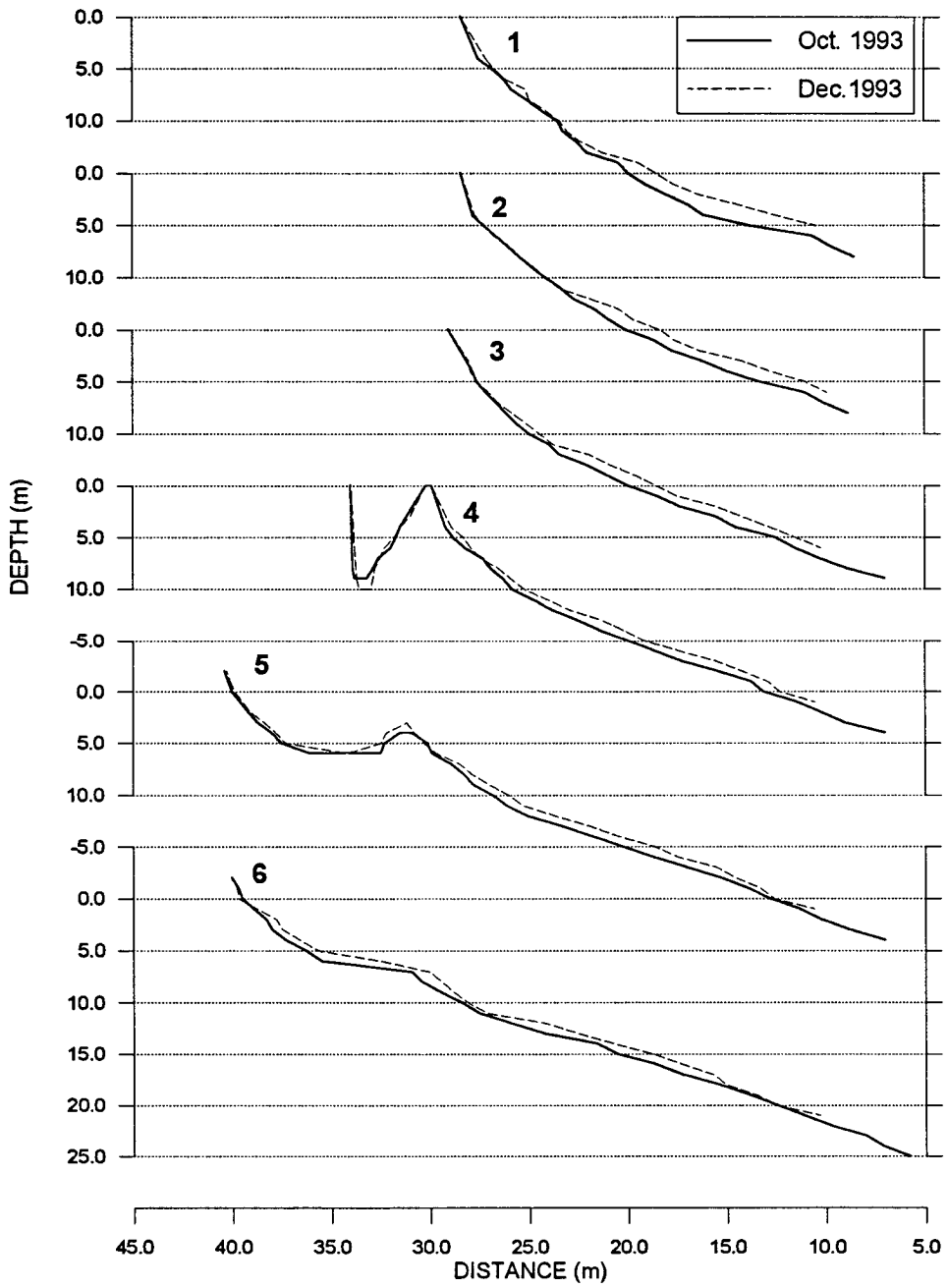


Fig. 2.4.3. Change of bottom profiles during Oct. 1993 ~ Dec. 1994.

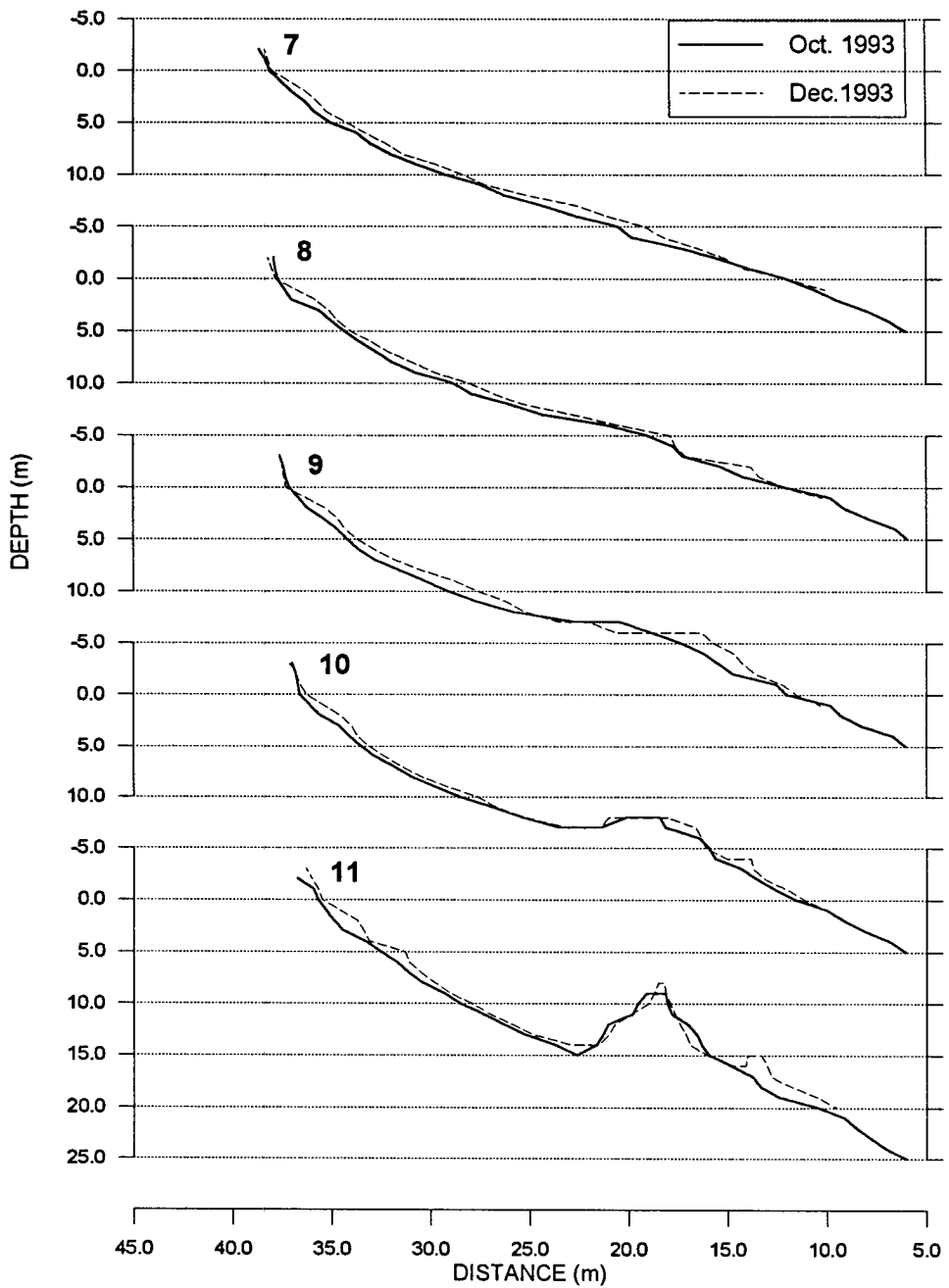


Fig. 2.4.3. (Cont'd).

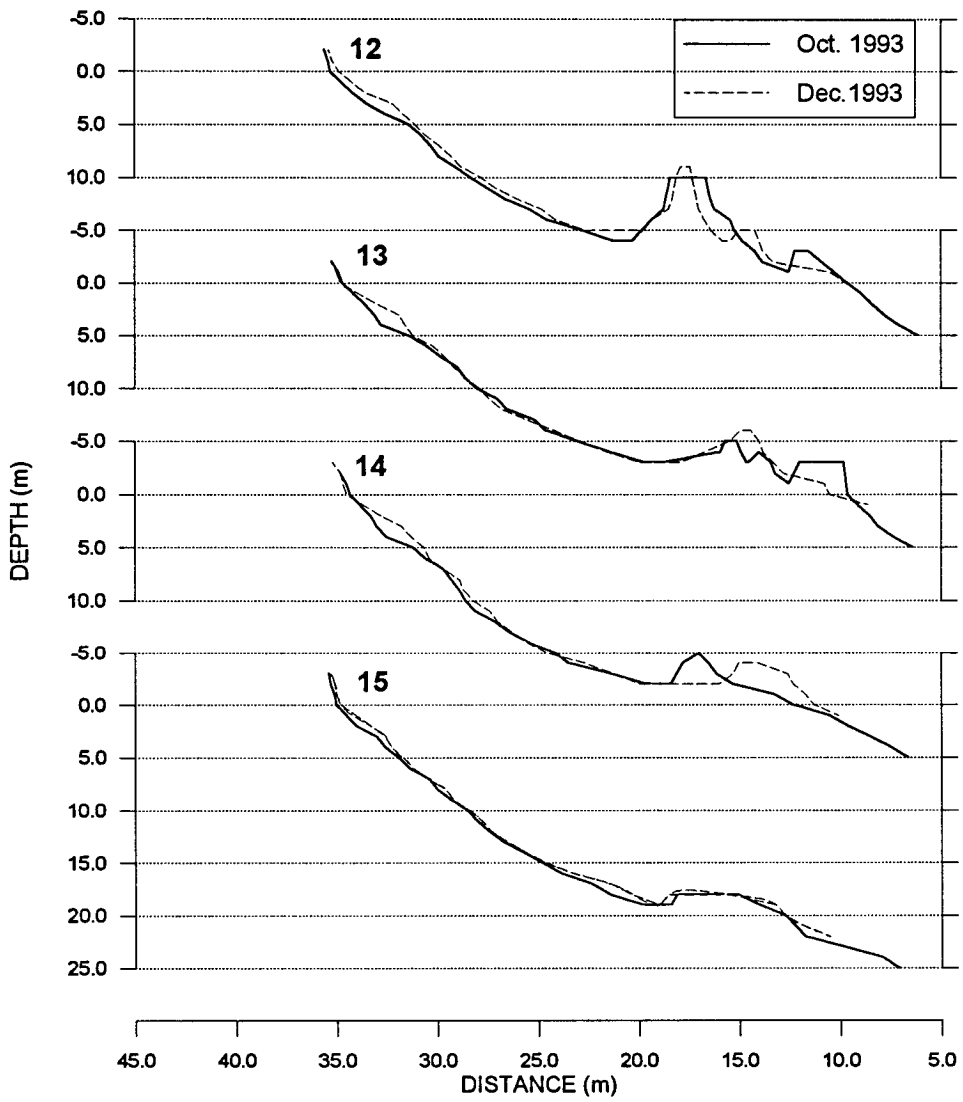


Fig. 2.4.3. (Cont'd).

하였던 1993년 10월 부터 12월 까지의 2개월간은 Fig.2.4.3에서 보는 바와 같이 퇴적이 우세하였을 보여준다. 대상해역을 기준선 1~5가 지나는 방파제 외측, 기준선 6~10이 지나는 항외측, 그리고 기준선 11~15로 표시되는 항 남측해역의 3구역으로 나누어 각 구역의 해저지형변화특성을 보면, 방파제 외측에서는 수심이 10m 이하인 곳에서는 큰 변화가 없으나 수심이 10m 이상으로 비교적 깊은 곳에서는 1년간으로 보면 많은 침식이 있었으나 10~12월의 기간에는 반대로 상당량이 퇴적되었음을 알 수 있다. 항외측의 기준선 6~10을 보면 기준선 전체에서 비슷한 양상을 보이고 있으며, 방파제 외측과는 달리 10m 이하의 낮은 곳에서도 상당한 변화를 보임을 알 수 있다. 이는 방파제 외측의 경우 해저경사가 급격하고 방파제 가까이 까지 비교적 수심이 깊어 파랑류의 발생이 약하며, 발생한 파랑류도 방파제를 따라 흐르기 때문인 것으로 판단되며, 항 외측의 경우 해저경사가 완만하고 파랑 변형이 심해 이로 부터 발달된 강한 이안류 및 연안류로 인해 수심이 낮은 곳에서도 많은 변화가 있었던 것으로 판단된다. 기준선 11~15의 항 남측구역을 보면 수심 10m 이하인 곳은 10월~12월의 기간에는 상당량이 퇴적된 것으로 나타났으나 1년간으로 보면 거의 변화가 없었다. 이 구역의 수심 10m 이상인 곳은 상당히 급격하게 변하는 것으로 나타나고 있으나, 이곳은 봉평해수욕장 외해측의 호부라무지에미초 부근으로 해저의 상당한 크기의 암초로 인해 주변지역에 비해 수심변화가 심한 곳이고 대상해역의 대략적인 해저지형변화 파악을 목적으로 실시된 본 관측의 정밀도를 고려할 때 별의미가 없는 것으로 판단된다.

또한 대상해역의 해저지형의 평면적 변화를 파악하기 위해 각 수심도에서 수심측량구역을 50m×50m의 격자로 나누고 격자점에서 수심을 독취하였으며, 독취된 수심이 있는 곳에서만 기간별로 그 변화를 산출하고 이

를 도시하였다. 1993년 5월 부터 1994년 4월 까지의 해저지형변화를 Fig.2.4.4에, 그리고 1993년 5월~1993년 10월, 1993년 10월~1993년 12월 및 1993년 12월~1994년 4월의 해저지형변화를 각각 Fig.2.4.5, Fig.2.4.6 그리고 Fig.2.4.7에 수록하였다.

이 그림을 살펴보면 방사선형 기준선을 이용한 분석과 거의 같은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 우선 Fig.2.4.4를 보면 1년간 대상해역은 봉평해수욕장 부근, 방파제 외측 등 제한된 구역을 제외하고는 거의 전역에 걸쳐 침식되었음을 보여준다. 이를 계절별로 나누어 보면 여름철이라 할 수 있는 5월~10월의 Fig.2.4.5를 보면 수심이 비교적 깊은 일부 구역을 제외하고 대체적으로 침식이 우세함을 알 수 있으며, 동북계열의 비교적 큰 파랑이 내습하는 10월~12월에는 Fig.2.4.6에서 보는 바와 같이 항내 일부 구역을 제외하면 전역에서 상당한 량이 퇴적되었음을 알 수 있다. 또한 겨울철에서 봄철로 이어지는 12월~4월의 Fig.2.4.7은 극히 일부를 제외하고 대상해역 전역에서 상당량이 침식되었음을 보여준다. 이를 1993년 5월의 수심도를 기준으로 수심 10m 이하인 곳을 대상으로 침식 및 퇴적된 양을 개략적으로 계산해 보면 5월~10월 사이에는 약 $-235,000\text{m}^3$, 10월~12월 사이에는 $+600,500\text{m}^3$, 12월~4월 사이에는 $-594,000\text{m}^3$ 이 침식 또는 퇴적된 것으로 나타났으며, 이들을 합산한 5월~4월의 변화량을 보면 $229,000\text{m}^3$ 이 침식된 것으로 나타났다. 이를 수심변화량으로 환산해 보면 각각 -22cm , $+56\text{cm}$, -55cm , 그리고 -21cm 로 연중 해저지형변화가 상당하며, 특히 겨울철 및 봄철의 변화가 심한 것으로 나타났다. 그러나 1993년 여름철에는 비교적 태풍 등에 의한 폭풍의 내습이 적었고, 또한 앞에서 기술한 바와 같이 1993년 12월과 1994년 4월의 관측치에는 상당한 기오차가 내포되어 있을 가능성이 큰 점을 감안해 볼 때, 이 결과가 연중



Fig. 2.4.4. Change of bottom between May 1993 and Apr. 1994.

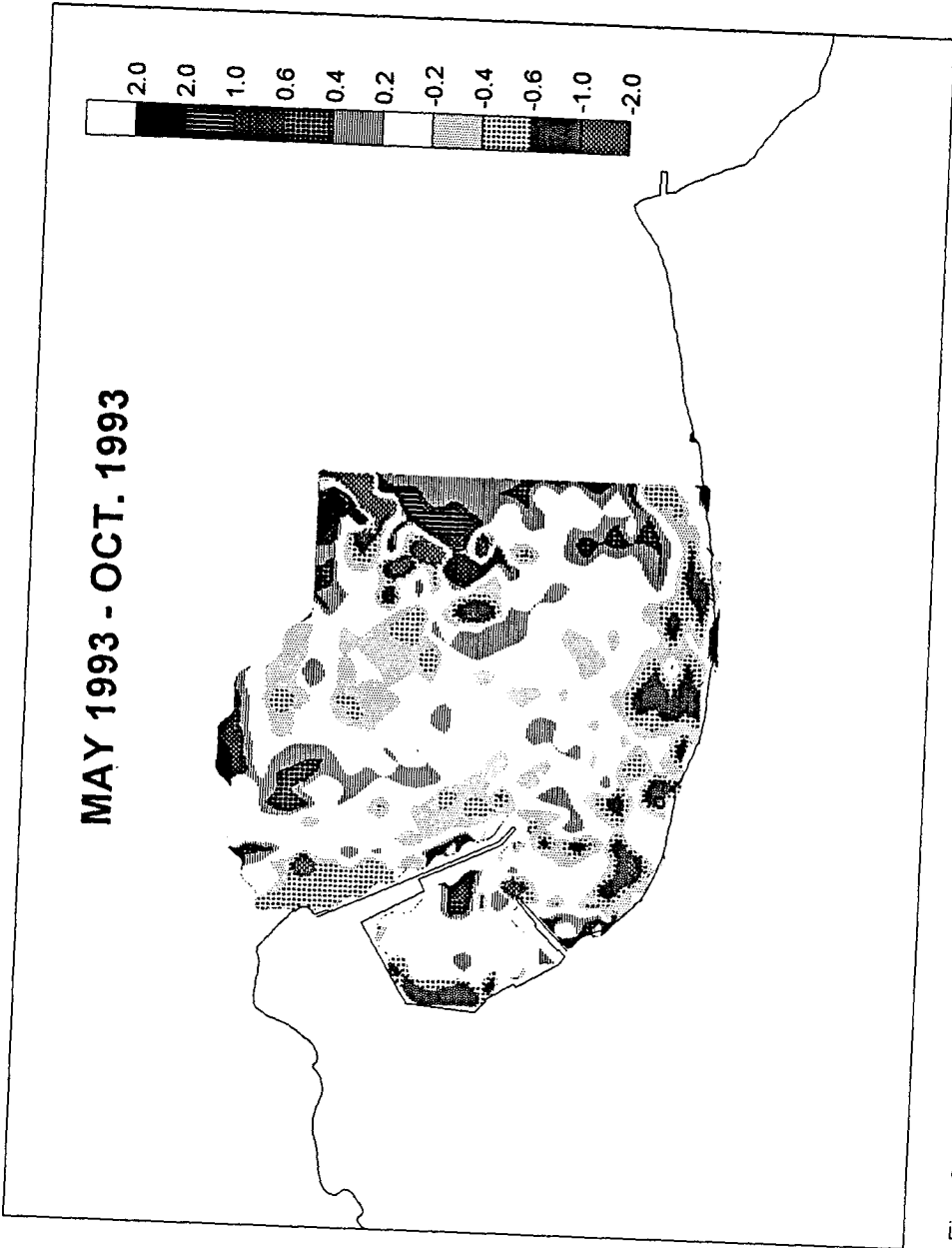


Fig. 2.4.5. Change of bottom between May 1993 and Oct. 1993.

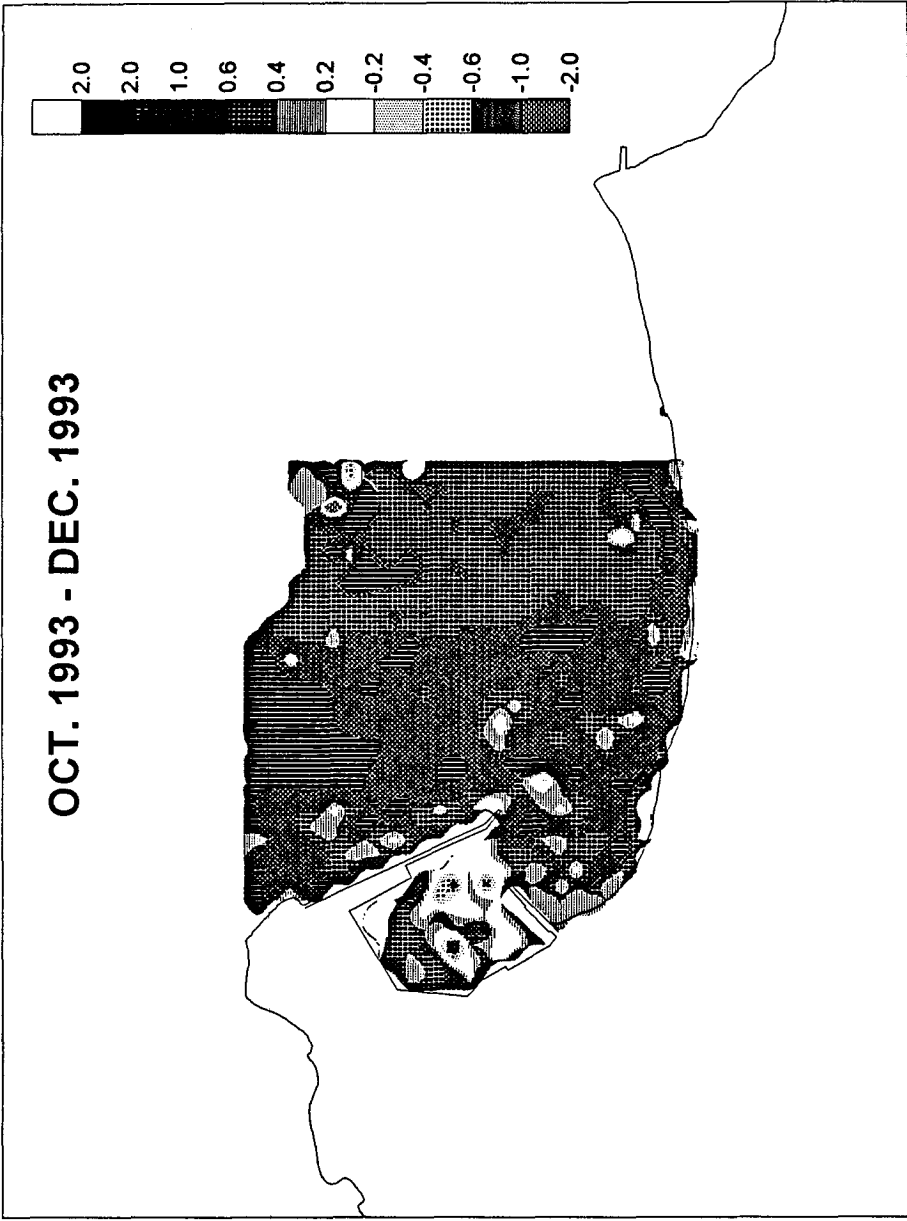


Fig. 2.4.6. Change of bottom between Oct. 1993 and Dec. 1993.



Fig. 2.4.7. Change of bottom between Dec. 1993 and Apr. 1994.

변화를 대표한다고 정량적으로 사용하기는 어려운 것으로 판단되나 그 양상은 대체로 이 결과와 비슷할 것으로 판단되며, 정량적이 변화를 파악하기 위해서는 좀더 장기간에 걸친 정밀한 관측이 요구된다.

제5절 부유이동량

2차년도에 수행한 대상해역 주변의 동계 퇴적물이동량 파악에 이어 춘계와 하계의 이동량 파악을 위하여 각각 Fig. 2.5.1의 14개 정점과 Fig.2.5.2의 5개 정점에 4방향 부유사 채취기를 일정시간 설치하였다. 채취기 각 방향의 trap은 저면으로부터 5, 15 및 30 cm의 3개층에 고정하였다.

춘계관측 성과는 Fig.2.5.3 및 Table 2.5.1에 그리고 하계관측 성과는 Fig.2.5.4 및 Table 2.5.2에 각각 수록하였다. 표에 나타낸 방향별 이동을 (directional flux)은 각 방향별로 3 개층에 포획된 퇴적물량을 총설치시간과 trap 입구면적으로 나눈 값이다. 그림은 연안(longshore) 방향 및 외해(cross-shore)방향의 순이동을(net flux)을 나타낸 것이다. 또한 길이가 가장 길고 arrowhead가 채워진 화살표는 10^{-1} g/hr/cm²의 order를 갖고, arrowhead가 빈 중간 길이의 화살표와 가장 짧고 open arrowhead를 갖는 화살표는 각각 10^{-2} 및 10^{-3} g/hr/cm²의 order를 갖는다. 기준 trap을 해안에 평행하게 설치하려 하였으나 그림에서 보는 바와 같이 연안 및 외해 방향 trap이 설치점을 지나는 해안법선에 직각 및 평행이 아닌 곳이 많았다. 이는 해상에서의 방향추정이 많은 오차를 야기할 수 있음을 보여 추후의 보완이 필요한 부분이다.

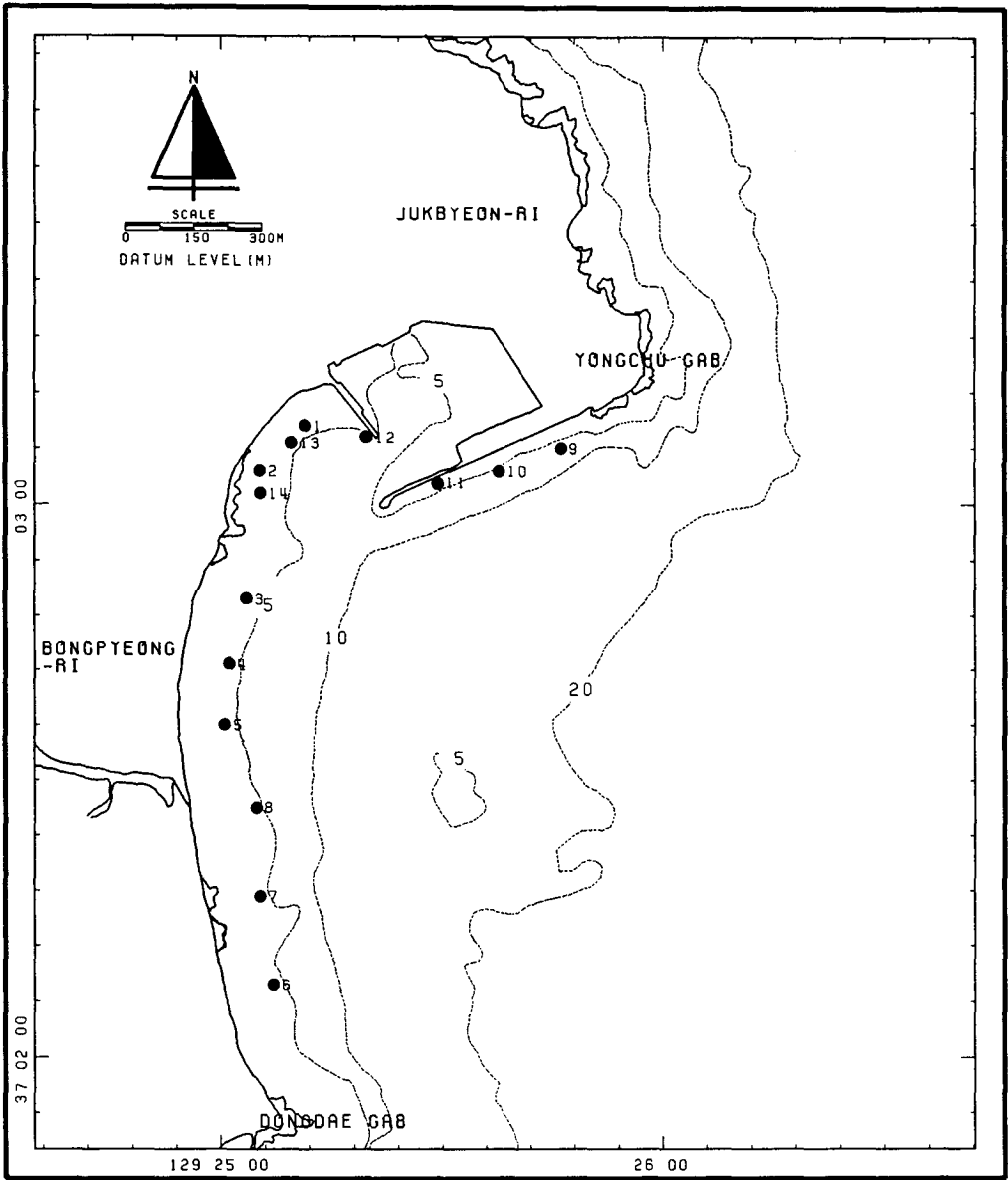


Fig. 2.5.1. Location map of 4-directional suspended load sampling points in spring season.

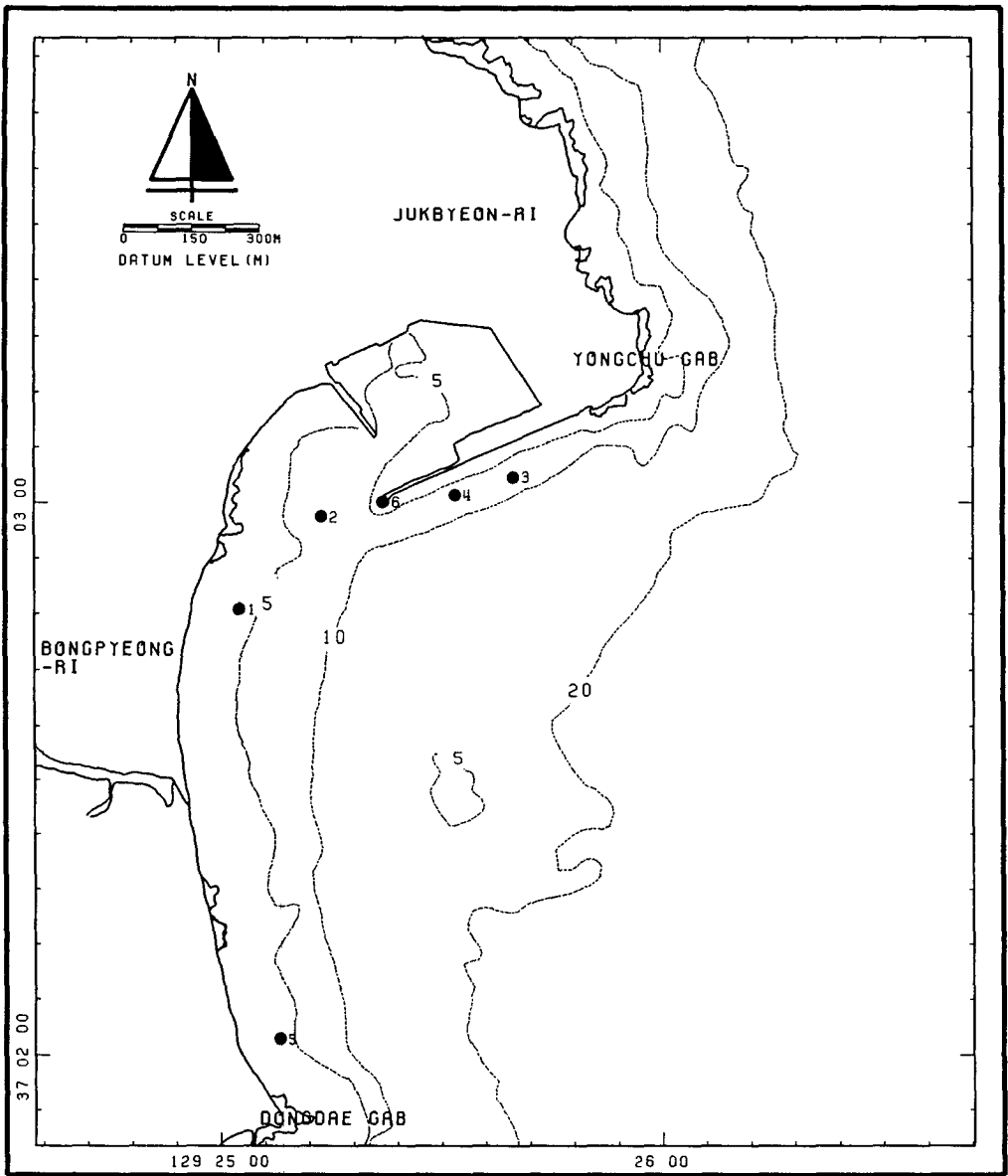


Fig. 2.5.2. Location map of 4-directional suspended load sampling points in summer season.

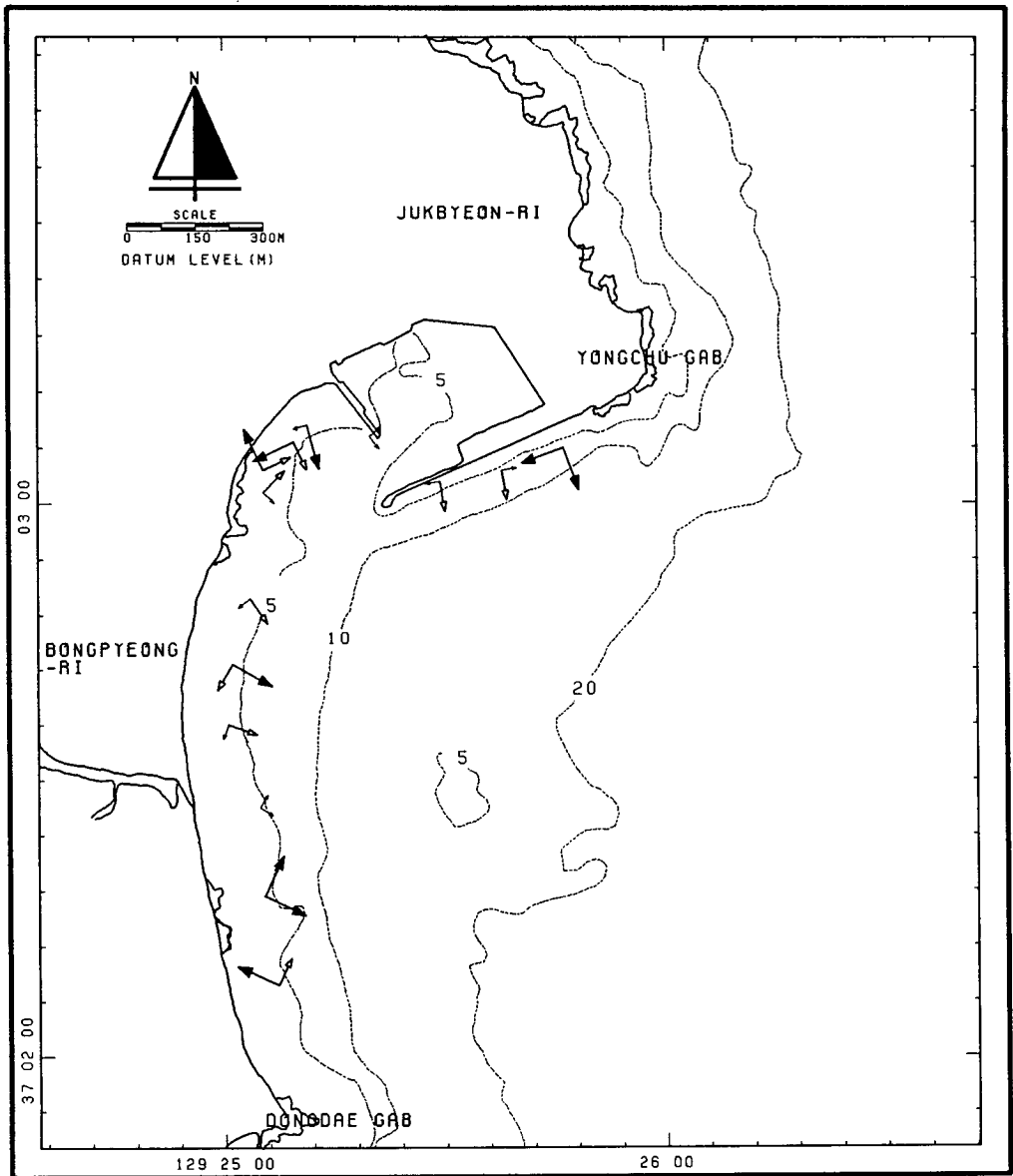


Fig. 2.5.3. Directional sediment fluxes in spring season.

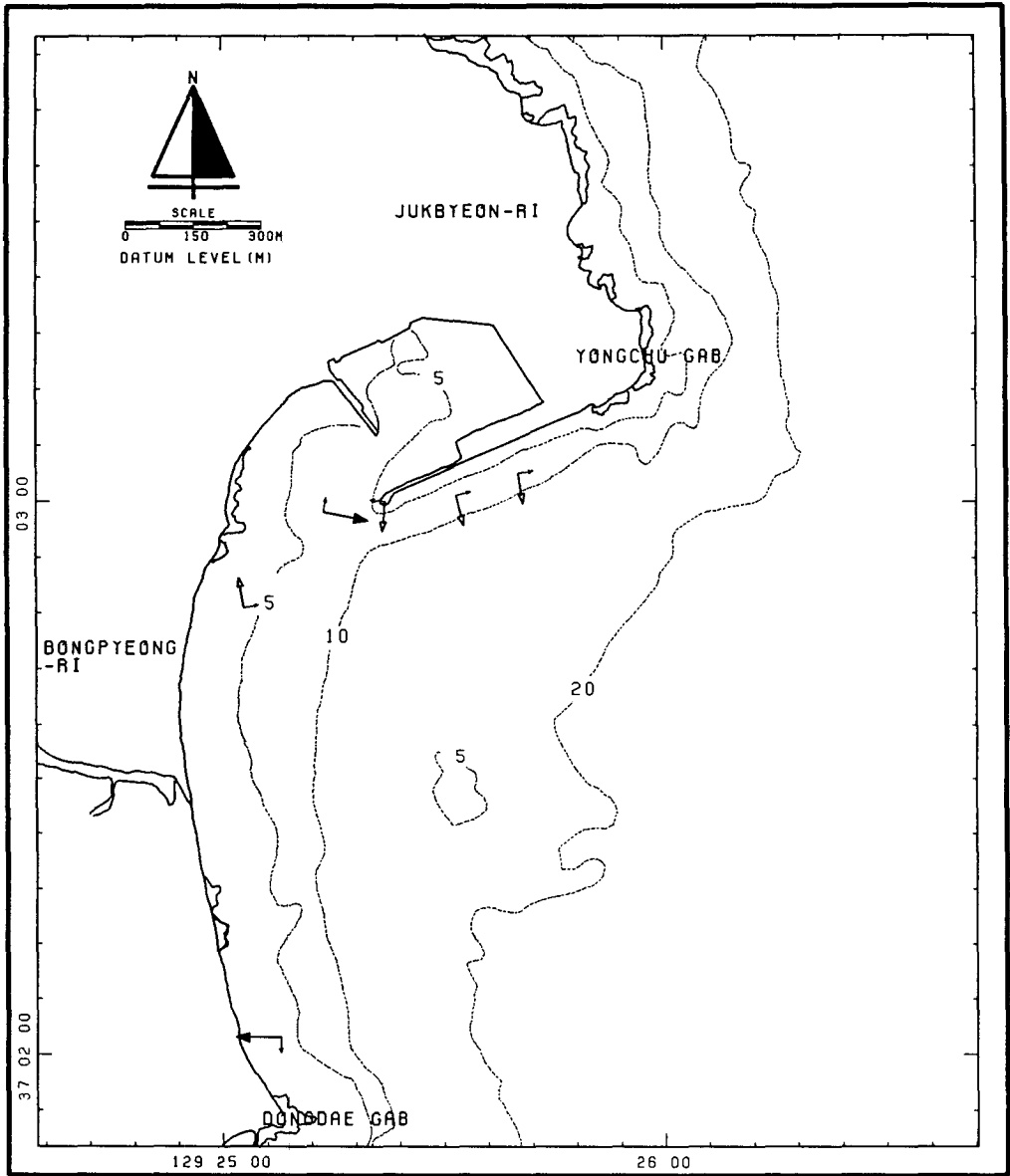


Fig. 2.5.4. Directional sediment fluxes in summer season.

먼저 방사제와 간출암 사이의 퇴적물이동을 파악하기 위한 정점 1, 2, 13 및 14는 일정한 이동양상을 보이지 않았다. 즉, 연안표사의 경우에 간출암 부근의 정점 2와 14에서는 방사제를 향한 순이동을 보이지만 정점 1 및 13에서는 간출암을 향한 순이동을 보인다. 또한 단면표사도 정점 1, 13 및 14에서는 offshore 방향이었지만, 정점 2에서는 onshore 방향이었다. 방사제 선단 외측의 정점 14에서는 항입구 방향의 이동이 우세하다. 봉평리 전면 정점 3, 4 및 5에서는 모든 정점에서 남향의 연안표사와 offshore 방향의 단면표사가 우세하였다. 그러나 봉평리 남측 정점 6, 7 및 8에서의 연안표사는 모두 북향이 우세하여 정점 3, 4 및 5와는 반대의 경향을 보였다. 방파제 외측의 정점 9, 10 및 11에서는 방파제 선단을 향한 표사와 off-shore 표사가 대체로 우세하였다.

이상의 준계관측 결과는 관측이 과량이 표사이동에 필요한 충분한 연류를 발생시키지 못하는 정온한 상태에 실시하였기 때문에 항내매물의 해석에 필요한 충분한 정보를 제공하지 못하는 것으로 판단된다. 우선 채취기에 포획된 퇴적물의 양이 전반적으로 작았으며, 관측된 순이동율의 최대 order도 10^{-1} g/hr/cm²에 불과하며, 그 방향도 동일 영역내에서 일관성을 보이지 않는다.

이와 같은 결과는 하계관측에서도 마찬가지이었다. 따라서, 4방향 채취기를 이용한 평상시의 관측으로 대상해역에서의 표사특성을 해석하기에는 무리가 있는 것으로 판단되며, 이를 위해서는 보다 정밀한 관측이 요구된다.

Table 2.5.1. Directional sediment fluxes in spring season.

St.	Location	Duration	Water Depth (m)	Trans. Dir. (°)	Trap Height (cm)	Trapped Quantity (g)	Directional Flux (g/hr/cm ²)		
1	129° 25.19' 37° 03.14'	14:36 19/ 4/94 8:48 20/ 4/94 (18.20hrs)	3.0	75	30	0.0	0.0		
					15	0.0			
					5	0.0			

					165	30		0.358 × 10 ¹	0.180 × 10 ⁰
						15		0.130 × 10 ²	
						5		0.164 × 10 ²	

					255	30		0.740 × 10 ⁰	0.510 × 10 ⁻²
						15		0.610 × 10 ⁰	
						5		0.376 × 10 ¹	

345	30	0.370 × 10 ¹	0.453 × 10 ⁻¹						
	15	0.755 × 10 ¹							
	5	0.341 × 10 ²							

2	129° 25.09' 37° 03.06'	14:42 19/ 4/94 8:53 20/ 4/94 (18.18hrs)	2.0	65	30	0.0	0.896 × 10 ⁻¹		
					15	0.0			
					5	0.896 × 10 ²			

					155	30		0.0	0.514 × 10 ⁻¹
						15		0.0	
						5		0.514 × 10 ²	

					245	30		0.0	0.422 × 10 ⁻¹
						15		0.0	
						5		0.423 × 10 ²	

335	30	0.0	0.154 × 10 ⁰						
	15	0.0							
	5	0.154 × 10 ³							

3	129° 25.06' 37° 02.83'	9:30 20/ 4/94 9: 1 21/ 4/94 (23.52hrs)	4.0	55	30	0.0	0.221 × 10 ⁻¹		
					15	0.0			
					5	0.286 × 10 ²			

					145	30		0.0	0.138 × 10 ¹
						15		0.0	
						5		0.179 × 10 ⁴	

					235	30		0.750 × 10 ⁰	0.300 × 10 ⁻¹
						15		0.242 × 10 ¹	
						5		0.356 × 10 ²	

325	30	0.0	0.136 × 10 ¹						
	15	0.383 × 10 ³							
	5	0.137 × 10 ⁴							

Table 2.5.1 (Cont'd).

St.	Location	Duration	Water Depth (m)	Trans. Dir. (°)	Trap Height (cm)	Trapped Quantity (g)	Directional Flux (g/hr/cm ²)
4	129° 25.02' 37° 02.71'	9:34 20/ 4/94 9: 4 21/ 4/94 (23.50hrs)	4.1	30	30	0.137 × 10 ¹	0.117 × 10 ⁻¹
					15	0.0	
					5	0.137 × 10 ²	
			120	30	0.135 × 10 ²	0.119 × 10 ¹	
				15	0.159 × 10 ³		
				5	0.137 × 10 ⁴		
			210	30	0.118 × 10 ¹	0.241 × 10 ⁻¹	
				15	0.567 × 10 ¹		
				5	0.243 × 10 ²		
			300	30	0.133 × 10 ²	0.249 × 10 ⁰	
				15	0.742 × 10 ²		
				5	0.234 × 10 ³		
5	129° 25.01' 37° 02.60'	9:37 20/ 4/94 9: 7 21/ 4/94 (23.50hrs)	4.0	20	30	0.0	0.730 × 10 ⁻²
					15	0.239 × 10 ¹	
					5	0.704 × 10 ¹	
			110	30	0.113 × 10 ²	0.893 × 10 ⁰	
				15	0.488 × 10 ³		
				5	0.655 × 10 ³		
			200	30	0.890 × 10 ⁰	0.770 × 10 ⁻²	
				15	0.188 × 10 ¹		
				5	0.718 × 10 ¹		
			290	30	0.975 × 10 ¹	0.810 × 10 ⁰	
				15	0.422 × 10 ²		
				5	0.994 × 10 ³		
6	129° 25.12' 37° 02.13'	9:45 21/ 4/94 9: 5 22/ 4/94 (23.33hrs)	4.0	205	30	0.520 × 10 ⁰	0.277 × 10 ⁻²
					15	0.860 × 10 ⁰	
					5	0.218 × 10 ¹	
			295	30	0.194 × 10 ¹	0.351 × 10 ⁰	
				15	0.833 × 10 ²		
				5	0.366 × 10 ³		
			25	30	0.174 × 10 ¹	0.687 × 10 ⁻¹	
				15	0.270 × 10 ¹		
				5	0.838 × 10 ²		
			115	30	0.217 × 10 ¹	0.234 × 10 ⁻¹	
				15	0.578 × 10 ¹		
				5	0.220 × 10 ²		

Table 2.5.1 (Cont'd).

St.	Location	Duration	Water Depth (m)	Trans. Dir. (°)	Trap Height (cm)	Trapped Quantity (g)	Directional Flux (g/hr/cm ²)	
7	129° 25.09' 37° 02.29'	9:49 21/ 4/94 9: 8 22/ 4/94 (23.32hrs)	4.0	205	30	0.266 × 10 ²	0.186 × 10 ³	
					15	0.119 × 10 ²		
					5	0.200 × 10 ³		
					295	30	0.104 × 10 ¹	0.801 × 10 ³
						15	0.120 × 10 ³	
						5	0.907 × 10 ³	
					25	30	0.183 × 10 ¹	0.558 × 10 ³
						15	0.186 × 10 ²	
						5	0.695 × 10 ³	
					115	30	0.0	0.120 × 10 ¹
						15	0.299 × 10 ³	
						5	0.125 × 10 ³	
8	129° 25.08' 37° 02.45'	9:52 21/ 4/94 9:11 22/ 4/94 (23.32hrs)	4.0	210	30	0.900 × 10 ⁻¹	0.123 × 10 ⁻²	
					15	0.460 × 10 ⁰		
					5	0.103 × 10 ¹		
					300	30	0.0	0.173 × 10 ⁻²
						15	0.810 × 10 ⁰	
						5	0.141 × 10 ¹	
					30	30	0.260 × 10 ⁰	0.193 × 10 ⁻²
						15	0.480 × 10 ⁰	
						5	0.173 × 10 ¹	
					120	30	0.460 × 10 ⁰	0.339 × 10 ⁻²
						15	0.150 × 10 ¹	
						5	0.239 × 10 ¹	
9	129° 25.77' 37° 03.10'	9:54 22/ 4/94 9: 0 23/ 4/94 (23.10hrs)	4.5	70	30	0.419 × 10 ¹	0.543 × 10 ⁻¹	
					15	0.285 × 10 ¹		
					5	0.620 × 10 ²		
					160	30	0.456 × 10 ¹	0.654 × 10 ³
						15	0.174 × 10 ²	
						5	0.808 × 10 ³	
					250	30	0.134 × 10 ¹	0.405 × 10 ⁰
						15	0.365 × 10 ¹	
						5	0.510 × 10 ³	
					340	30	0.175 × 10 ¹	0.725 × 10 ⁻¹
						15	0.232 × 10 ¹	
						5	0.880 × 10 ²	

Table 2.5.1 (Cont'd).

St.	Location	Duration	Water Depth (m)	Trans. Dir. (°)	Trap Height (cm)	Trapped Quantity (g)	Directional Flux (g/hr/cm ²)	
10	129° 25.63' 37° 03.06'	9:51 22/ 4/94 9: 6 23/ 4/94 (23.25hrs)	4.5	80	30	0.220 × 10 ⁰	0.105 × 10 ⁻¹	
					15	0.150 × 10 ¹		
					5	0.117 × 10 ²		
	170					30	0.900 × 10 ⁰	0.589 × 10 ⁻¹
						15	0.218 × 10 ¹	
						5	0.722 × 10 ²	
	260					30	0.110 × 10 ⁰	0.489 × 10 ⁻²
						15	0.610 × 10 ⁰	
						5	0.553 × 10 ¹	
	350					30	0.620 × 10 ⁰	0.445 × 10 ⁻¹
						15	0.475 × 10 ¹	
						5	0.515 × 10 ²	
11	129° 25.49' 37° 02.04'	9:58 22/ 4/94 9:11 23/ 4/94 (23.22hrs)	4.7	80	30	0.330 × 10 ⁰	0.162 × 10 ⁻²	
					15	0.300 × 10 ⁻¹		
					5	0.171 × 10 ¹		
	170					30	0.700 × 10 ⁰	0.370 × 10 ⁰
						15	0.399 × 10 ¹	
						5	0.468 × 10 ³	
	260					30	0.130 × 10 ⁰	0.382 × 10 ⁻²
						15	0.780 × 10 ⁰	
						5	0.397 × 10 ¹	
	350					30	0.164 × 10 ¹	0.323 × 10 ⁰
						15	0.479 × 10 ²	
						5	0.363 × 10 ³	
12	129° 25.33' 37° 03.12'	9:41 23/ 4/94 7:37 24/ 4/94 (21.93hrs)	5.8	140	30	0.130 × 10 ⁰	0.191 × 10 ⁻³	
					15	0.100 × 10 ⁻¹		
					5	0.900 × 10 ⁻¹		
	230					30	0.200 × 10 ⁻¹	0.182 × 10 ⁻³
						15	0.900 × 10 ⁻¹	
						5	0.110 × 10 ⁰	
	320					30	0.500 × 10 ⁻¹	0.182 × 10 ³
						15	0.700 × 10 ⁻¹	
						5	0.100 × 10 ⁰	
	50					30	0.700 × 10 ⁻¹	0.191 × 10 ⁻³
						15	0.100 × 10 ⁻¹	
						5	0.150 × 10 ⁰	

Table 2.5.1 (Cont'd).

St.	Location	Duration	Water Depth (m)	Trans. Dir. (°)	Trap Height (cm)	Trapped Quantity (g)	Directional Flux (g/hr/cm ²)
13	129° 25.16' 37° 03.11'	9:46 23/ 4/94 7:42 24/ 4/94 (21.93hrs)	3.4	65	30	0.190 × 10 ⁰	0.112 × 10 ⁻²
					15	0.220 × 10 ⁰	
					5	0.940 × 10 ⁰	
	155	30	0.430 × 10 ⁰	0.154 × 10 ⁻¹			
			15		0.107 × 10 ¹		
			5		0.171 × 10 ²		
	245	30	0.320 × 10 ⁰	0.156 × 10 ⁰			
			15		0.710 × 10 ⁰		
			5		0.187 × 10 ³		
	335	30	0.190 × 10 ⁰	0.671 × 10 ⁻³			
			15		0.240 × 10 ⁰		
			5		0.380 × 10 ⁰		
14	129° 25.09' 37° 03.02'	9:50 23/ 4/94 7:47 24/ 4/94 (21.95hrs)	3.4	45	30	0.240 × 10 ⁰	0.625 × 10 ⁻¹
					15	0.450 × 10 ⁰	
					5	0.748 × 10 ²	
	135	30	0.390 × 10 ⁰	0.133 × 10 ⁻¹			
			15		0.103 × 10 ¹		
			5		0.146 × 10 ²		
	225	30	0.620 × 10 ⁰	0.273 × 10 ⁻²			
			15		0.750 × 10 ⁰		
			5		0.192 × 10 ¹		
	315	30	0.490 × 10 ⁰	0.782 × 10 ⁻²			
			15		0.380 × 10 ⁰		
			5		0.857 × 10 ¹		

Table 2.5.2. Directional sediment fluxes in summer season.

St.	Location	Duration	Water Depth (m)	Trans. Dir. (°)	Trap Height (cm)	Trapped Quantity (g)	Directional Flux (g/hr/cm ²)
1	129° 25.05' 37° 02.81'	9:53 26/ 8/94 9: 0 27/ 8/94 (23.12hrs)	4.0	350	30	0.400 × 10 ⁻¹	0.790 × 10 ⁻¹
						0.120 × 10 ⁰	
						0.100 × 10 ³	
					80	0.200 × 10 ⁻¹	0.219 × 10 ⁻²
						0.380 × 10 ⁰	
						0.238 × 10 ¹	
					170	0.120 × 10 ⁰	0.897 × 10 ⁻³
						0.740 × 10 ⁰	
						0.280 × 10 ⁰	
					260	0.100 × 10 ⁰	0.700 × 10 ⁻³
						0.220 × 10 ⁰	
						0.570 × 10 ⁰	
2	129° 25.23' 37° 02.98'	9:40 26/ 8/94 8:53 27/ 8/94 (23.22hrs)	5.2	10	30	0.850 × 10 ⁰	0.243 × 10 ⁻²
						0.116 × 10 ¹	
						0.109 × 10 ¹	
					100	0.900 × 10 ⁻¹	0.109 × 10 ⁰
						0.120 × 10 ⁰	
						0.139 × 10 ³	
					190	0.230 × 10 ⁰	0.168 × 10 ⁻²
						0.420 × 10 ⁰	
						0.149 × 10 ¹	
					280	0.900 × 10 ⁻¹	0.398 × 10 ⁻²
						0.155 × 10 ¹	
						0.344 × 10 ¹	
3	129° 25.67' 37° 03.05'	10:29 25/ 8/94 8:54 26/ 8/94 (22.42hrs)	5.9	80	30	0.190 × 10 ⁰	0.346 × 10 ⁻²
						0.105 × 10 ¹	
						0.303 × 10 ¹	
					170	0.300 × 10 ⁰	0.950 × 10 ⁻¹
						0.577 × 10 ¹	
						0.111 × 10 ³	
					260	0.220 × 10 ⁰	0.179 × 10 ⁻²
						0.620 × 10 ⁰	
						0.137 × 10 ¹	
					350	0.690 × 10 ⁰	0.292 × 10 ⁻¹
						0.249 × 10 ¹	
						0.328 × 10 ²	

Table 2.5.2 (Cont'd).

St.	Location	Duration	Water Depth (m)	Trans. Dir. (°)	Trap Height (cm)	Trapped Quantity (g)	Directional Flux (g/hr/cm ²)	
4	129° 25.53' 37° 03.01'	10:31 25/ 8/94 8:58 26/ 8/94 (22.45hrs)	5.3	75	30	0.149 × 10 ¹	0.436 × 10 ⁻²	
					15	0.157 × 10 ¹		
					5	0.232 × 10 ¹		
					165	30	0.554 × 10 ¹	0.378 × 10 ⁻¹
						15	0.192 × 10 ²	
						5	0.220 × 10 ²	
					255	30	0.890 × 10 ⁰	0.178 × 10 ⁻²
						15	0.710 × 10 ⁰	
						5	0.600 × 10 ⁰	
					345	30	0.107 × 10 ¹	0.168 × 10 ⁻²
						15	0.130 × 10 ⁰	
						5	0.880 × 10 ⁰	
5	129° 25.13' 37° 02.03'	9:45 26/ 8/94 8:56 27/ 8/94 (23.18hrs)	4.5	360	30	0.120 × 10 ⁰	0.455 × 10 ⁻³	
					15	0.340 × 10 ⁰		
					5	0.120 × 10 ⁰		
					90	30	0.300 × 10 ⁻¹	0.706 × 10 ⁻³
						15	0.130 × 10 ⁰	
						5	0.740 × 10 ⁰	
					180	30	0.360 × 10 ⁰	0.104 × 10 ⁻²
						15	0.230 × 10 ⁰	
						5	0.730 × 10 ⁰	
					270	30	0.200 × 10 ⁻¹	0.106 × 10 ⁰
						15	0.300 × 10 ⁻¹	
						5	0.135 × 10 ³	
6	129° 25.37' 37° 03.00'	10:35 25/ 8/94 9: 1 26/ 8/94 (22.43hrs)	4.5	95	30	0.600 × 10 ⁻¹	0.289 × 10 ⁻²	
					15	0.310 × 10 ⁰		
					5	0.320 × 10 ¹		
					185	30	0.140 × 10 ⁰	0.142 × 10 ⁰
						15	0.148 × 10 ¹	
						5	0.173 × 10 ³	
					275	30	0.530 × 10 ⁰	0.522 × 10 ⁻²
						15	0.850 × 10 ⁰	
						5	0.506 × 10 ¹	
					5	30	0.110 × 10 ⁰	0.468 × 10 ⁻¹
						15	0.174 × 10 ¹	
						5	0.559 × 10 ²	

제3장 연안역 해수순환 수치모형

제1절 서론

연안역에는 기인력이 서로 다른 해류, 조류, 취송류, 파랑류 등 다양한 흐름이 존재하며, 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 해수순환현상이 나타난다. 이러한 해안류(nearshore current)는 1950년 Shepard와 Inman에 의해 처음 정의되었다(Shepard and Inman, 1950). 즉, 연안역의 흐름(coastal currents)과 구분되는 개념으로서 파랑의 직접적 영향에 의해 생성, 발달된 흐름으로, 연안역 흐름성분의 대부분을 차지하며, 해안을 따라 흐르는 연안류(longshore current), 외해에서 해안쪽으로 흐르는 향안류(shoreward-directed current) 또는 질량수송(mass transport), 그리고 이안류(rip current)로 구성된다.

단순화된 자연해빈 주변 연안역의 해수순환 현상을 재현하고자하는 연구가 지난 20년 동안 광범위하게 진행되어 왔다. 이에 대한 관련 문헌 조사 및 평가가 Basco(1983) 및 Battjes(1988)에 의해 수행된 바 있다. 이러한 대부분의 연구들이 수심적분(depth-integrated)된 형태이거나 수심평균(depth-averaged)된 형태의 방정식을 기초로 수행되었으며, 이는 수심에 따라 유속이 일정하다는 가정을 내포하고 있다. 때로는 해안류의 수심에

따른 유속분포가 개수로 정상류의 경우에 적용되는 로그함수적 분포를 갖는다는 가정하에 수행되기도 하였다. 최근 이론적으로, 그리고 수치모형 실험을 통한 연구결과, 연안역에서의 향안류 또는 이안류에 대한 구조 및 해석방법에 많은 발전이 이루어졌다. 즉 수면부근에서는 해안을 향해 흐르나 해저면에서는 반대 방향(외해방향)으로 흐르는 흐름, 저층이안류(undertow)의 생성이유 및 발달과정 등을 이해할 수 있게 되었으며, 연안역 해저퇴적물이동 분석시 수심평균된 이안류 등을 이용하는 것은 큰 오류를 범할 수 있으며, 3차원적 해석을 통해 보다 정확한 유속분포를 파악하는 것이 중요하다는 것이 입증되었다(De Vriend, 1986).

이에 따라 현재 연안역 해수순환 현상을 3차원적으로 해석, 재현하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. Stive and De Vriend(1987)는 흐름을 1차성분(primary component)와 2차성분(secondary component)로 나누어 해석하는 유사3차원 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(hydrostatic mean flow) 수치모형에 파랑의 영향을 고려하는 수치모형을 수립하였다.

본연구에서는 3차원 해저퇴적물이동 수치모형의 입력자료 제공 및 연안역 흐름의 3차원적 구조파악을 위해 De Vriend and Kitou(1990)와 비슷한 방법을 이용하여 연안역에서 범용성을 갖고 적용할 수 있는 3차원 연안역 해수순환 수치모형(3-dimensional Wave-Induced Nearshore Circulation Model, WINC3D)을 수립하였다. 모델 유형으로는 비선형 효

과가 우세하게 나타나는 점을 감안하여 관련 비선형항을 모두 포함하는 Grid-box모형을 채택하였다.

본 수치모형은 각각 독립성을 가질 수 있는 3개의 수치모형, 즉 파랑 변형 수치모형, 연안류 발생 및 순환 수치모형, 그리고 난류마감 수치모형이 유기적으로 결합된 형태를 갖는다. 본연구에서는 기존의 파랑변형 수치모형을 보완하여 파랑변형 부분을 대치하였으며, 해수순환 부분 및 난류마감 부분의 수립에 중점을 두었다. 수립된 수치모형을 수리모형 실험결과에 적용하여 검증하였으며, 비교적 만족할 만한 결과를 얻었다. 특히 난류마감 모형으로는 1-방정식 및 2-방정식 난류모형을 도입하였으며, 이의 적용성을 검토하기 위해 별도의 점모형(point model)을 수립하고 난류모형 기법에 대해 시험계산을 실시하고 상호 비교하였다.

제2절 파랑변형 수치모형 HCORD

1. 개 요

연안역에는 그 기인력이 서로 다른 다양한 흐름(coastal currents)이 존재한다. 이러한 흐름으로는 조석현상에 의한 조류, 계절적으로 변화하며 공간적으로도 그 scale이 비교적 큰 해류, 바람의 영향에 의한 취송류, 그리고 파랑의 직접적 영향으로 발달되는 해안류 등을 들 수 있다. 이 중 단기간에 지역적으로 연안역에 가장 큰 영향을 미치는 것은 파랑의 변형으로 부터 비롯되는 해안류(nearshore current)라 할 수 있다. 즉, 심해에서

주로 바람에 의해 발생 발달된 파랑은 연안역에 전파해 옴에 따라 상대적으로 급격히 변하는 수심 및 흐름에 의해 천수, 굴절, 회절 변형되고, 그리고 해안선에 다달아 쇠파되어 결국 소멸되는 과정을 거치게 된다. 이러한 파랑의 변형과정에서 수반되는 파랑의 잉여용력의 변화에 따라 해안류도 발생 발달하게 된다. 따라서 연안역 해수순환 현상 및 연안역 해저퇴적물 이동 현상을 연구하기 위해서는 보다 정확한 파랑장 재현 및 해석이 필수적이다.

연안역에서의 파랑변형에 따른 파랑장 재현을 위해 많은 연구자들이 오래전부터 노력을 기울여 여러가지 방법을 제안하였으나(Munk and Arthur, 1952 ; Penny and Price, 1952 ; Keller, 1958 ; Keller, 1962 ; Dobson, 1967 ; Battjes, 1968 ; Ito and Tanimoto, 1972 등 참조), 1972년 네델란드의 Berkhoff가 완경사방정식(Mild-slope equation)을 발표한 후 비약적인 발전이 이루어졌다. 즉, 이후의 연구는 효과적으로 광범위하게 사용할 수 있는 완경사방정식의 해를 구하는 데 집중되었으며 이 결과 다양한 방법 및 이를 이용한 수치모형이 제시되었다(Berkhoff, 1972 ; Bettess and Zienkiewicz, 1977 ; Radder, 1979 ; Williams et al., 1980 ; Houston, 1981 ; Booij, 1981 ; Berkhoff et al., 1982 ; Tsay and Liu, 1982 ; Liu and Tsay, 1983a, b ; Tsay and Liu, 1983 ; Kirby, 1983 ; Kirby and Dalrymple, 1983 ; Ebersole, 1985 ; Kirby and Dalrymple, 1986 ; Warren et al., 1985 ; Copeland, 1985a, b ; Watanabe and Maruyama, 1986 등 참조). 당 연구소에서는 1987년부터 본격적 연구를 통해 여러 경우의 지역적 조건에 대해 보다 정확한 파랑장을 재현할 수 있는 수치모형을 개발, 수립 보유하게 되었으며, 일부는 실용화 단계를 거쳐 현재 연안공학적 문제의 해결에 실제 적용 중이다.

연안역 해수순환 현상을 효과적으로 재현 해석하느냐 하는 문제는 전 파변형된 파랑장을 얼마나 정확히 재현하느냐에 달려있을 정도로 파랑장에 대한 정확한 자료가 필수적으로 요구된다. 따라서 적용목적에 따라 또는 적용대상해역의 크기에 따라 파랑변형 수치모형을 개별적으로 적용하거나 또는 2개 이상의 수치모형을 조합 적용하여 계산된 파랑장을 이용할 수 있다. 복잡한 지형과 항만 등 구조물이 설치된 연안역에서 파랑의 변형을 예측하기 위해서는 파랑의 천수, 굴절 및 회절 현상 뿐 아니라 구조물에 의한 반사 현상 및 쇄파에 의한 파랑의 감쇄 현상이 매우 중요하다. 본연구에서는 다양한 경계조건 처리가 가능하여 지형이 복잡한 곳 또는 구조물에 의한 반사현상이 중요한 지역에서의 적용성이 비교적 우수한 수치모형 HCORD가 지역에 따라서는 유용하게 적용될 수 있음을 감안하여, 이를 수정 보완하였으며, 죽변항의 현상태 및 포항지방 해운항만청의 계획안에 대해 적용하여 그 적용성을 검토하였다. 본절에서는 수치모형 HCORD의 이론적 배경 및 수치기법에 대해 간략히 기술하고, 죽변항 및 인근해역에 적용한 결과에 대하여 간략히 기술한다.

2. 기본방정식 및 수치계산

수치모형 HCORD는 완경사 방정식을 1차 선형방정식계로 변환시킨 기본방정식을 사용한다. 완경사 방정식은 평면 2차원 모델로 다음 식으로 표현된다(Berkhoff, 1972).

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \phi) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \phi = 0 \quad (3.2.1)$$

여기서,

- ϕ : 속도 포텐셜
- C : 파속
- C_g : 파의 군속도
- σ : 각주파수

이 식을 Booij(1981)가 제안한 변형식으로 표시하면

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + (k^2 CC_g - \sigma^2) \eta - \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2.2)$$

와 같이 표현되고 여기서 η 는 해수면 변위이다. 이 식을 Copeland(1985)는 x, y 방향의 선유량 P, Q 를 이용하여 다음의 1차 선형방정식계로 전개하였으며, 이에 대한 자세한 유도과정은 과학기술처(1987)에 수록되어 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \eta}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + CC_g \frac{\partial \eta}{\partial y} &= 0 \\ \frac{C_g}{C} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

이상의 식(3.2.3)을 기본방정식으로 양해법 유한차분화하고, 입사 경계, 투과 경계 및 임의의 반사율을 갖는 반사 경계 등 다양한 경계조건을 처리할 수 있도록 수치모형 HCORD를 수립하였으며, 자세한 격자체계, 유한차분식, 그리고 계산과정 등은 초기 및 경계조건 처리기법과 함께 과학기술처(1987)에 수록되어 있다. 본 수치모형은 다양한 경우의 수치모형 실험 및 현장 적용을 통하여 검증 보완하고 실용화되었으며, 본 연구에서는 그 적용성, 신뢰도 및 계산의 효율성 향상을 위해 부분적으로 수정 및 보완을 실시하였다.

3. 수치모형의 적용

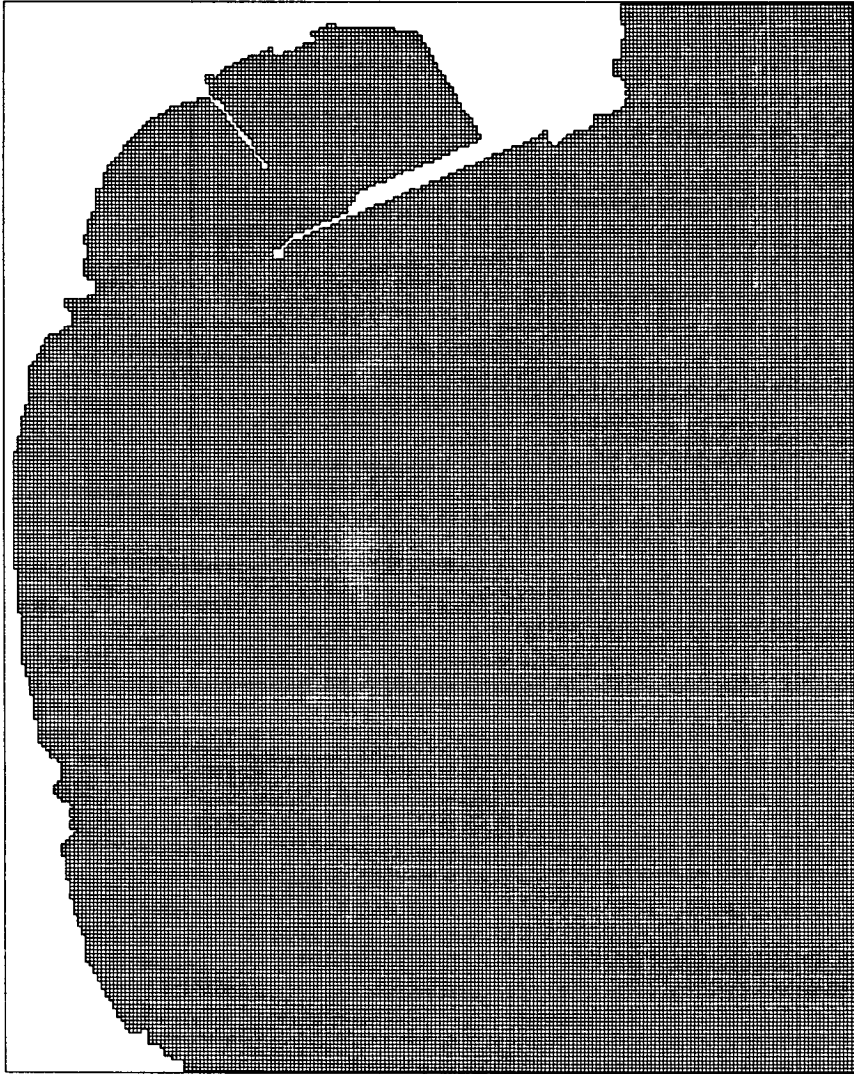
본연구에서는 기준모형항만으로 선정된 죽변항 및 인근해역에서의 파랑전파변형 현상을 파악하기 위하여 본수치모형을 적용, 시험계산을 실시하였다. 파랑 조건으로는 1993년 1월 15일 10시 51분 - 1월 17일 09시 21분 사이의 관측기간 중에 수집된 파랑 현장관측자료(3시간 간격, 26.7분간의 자료 15 Sets)의 분석 결과 중 유의파고, 유의파 주기 및 대표파향을 산술평균하여 사용하였으며 이를 정리하면 아래와 같다.

$$(H_{1/3})_{mean} = 3.52 \text{ m}$$

$$(T_{H_{1/3}})_{mean} = 9.40 \text{ sec.}$$

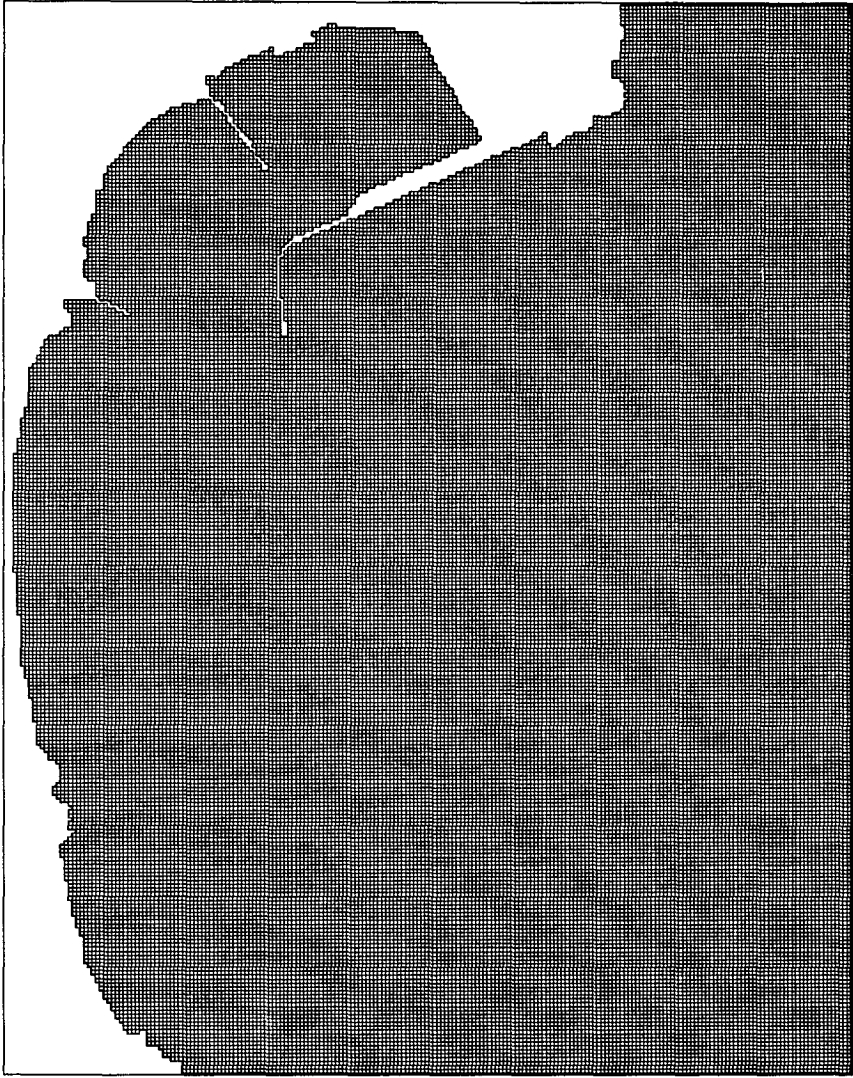
$$(Dir.)_{mean} = N63^\circ E$$

본 수치모형의 적용을 위해 대상해역을 10m×10m의 크기를 같은 216×272=58,752개의 격자로 구성하였다. 실제 계산에 사용된 격자수는 51,542개 였으며, 현상태와 계획안에 대한 격자체계를 Fig.3.2.1과 Fig.3.2.2에 각각 수록하였다. 이상의 파랑조건 및 격자체계를 이용하여 실시된 수치모형 계산결과 입사파의 비로 환산된 파고분포도는 각각 Fig.3.2.3과 Fig.3.2.4와 같으며, 파랑 전파에 따른 해수면 변위는 각각 Fig.3.2.5와 Fig.3.2.6에 수록하였다. Fig.3.2.3과 Fig.3.2.4를 보면 동방파제의 연장이 현상태에 비하여 항입구 전면에서의 파랑의 감소가 두드러짐을 알 수 있으며, 계획 방사제 외측에서 발생한 연안류에 의한 해저퇴적물의 항입구쪽으로의 이동을 계획 방사제가 적절히 막아줄 것이 예상된다. 수치실험 결과 본 수치모형이 상당한 정확도를 가지고 파랑장을 재현 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 본 수치모형은 적은 크기의 격자가 요구되어 해



$n_x = 216$ $n_y = 272$ $n_{in} = 51452$

Fig. 3.2.1. Finite difference grids for the present state.



$n_x = 216$ $n_y = 272$ $n_{in} = 51418$

Fig. 3.2.2. Finite difference grids for the KMPA plan.

(DIRECTION=N63.0W; HEIGHT=3.52m; PERIOD= 9.4sec)

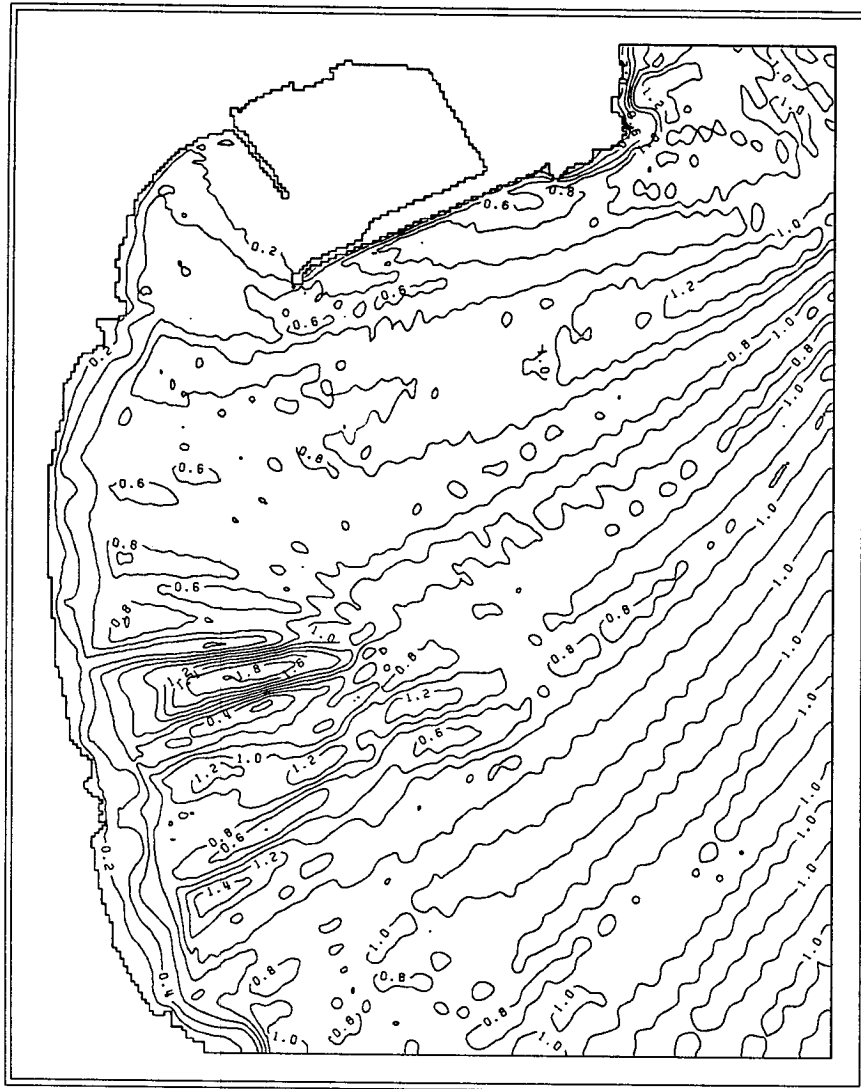


Fig. 3.2.3. Distribution of wave height ratios computed by the model, HCORD (present state).

(DIRECTION=N63.0W; HEIGHT=3.52m; PERIOD= 9.4sec)

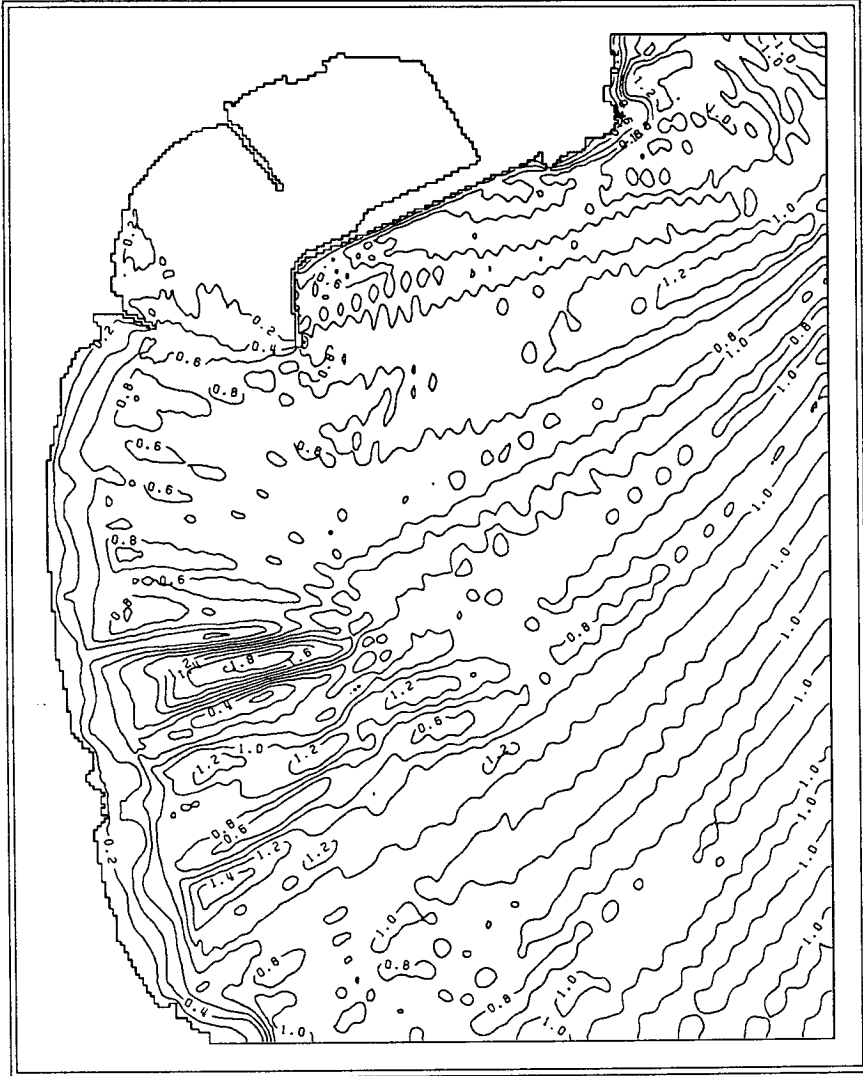


Fig. 3.2.4. Distribution of wave height ratios computed by the model, HCORD (KMPA plan).

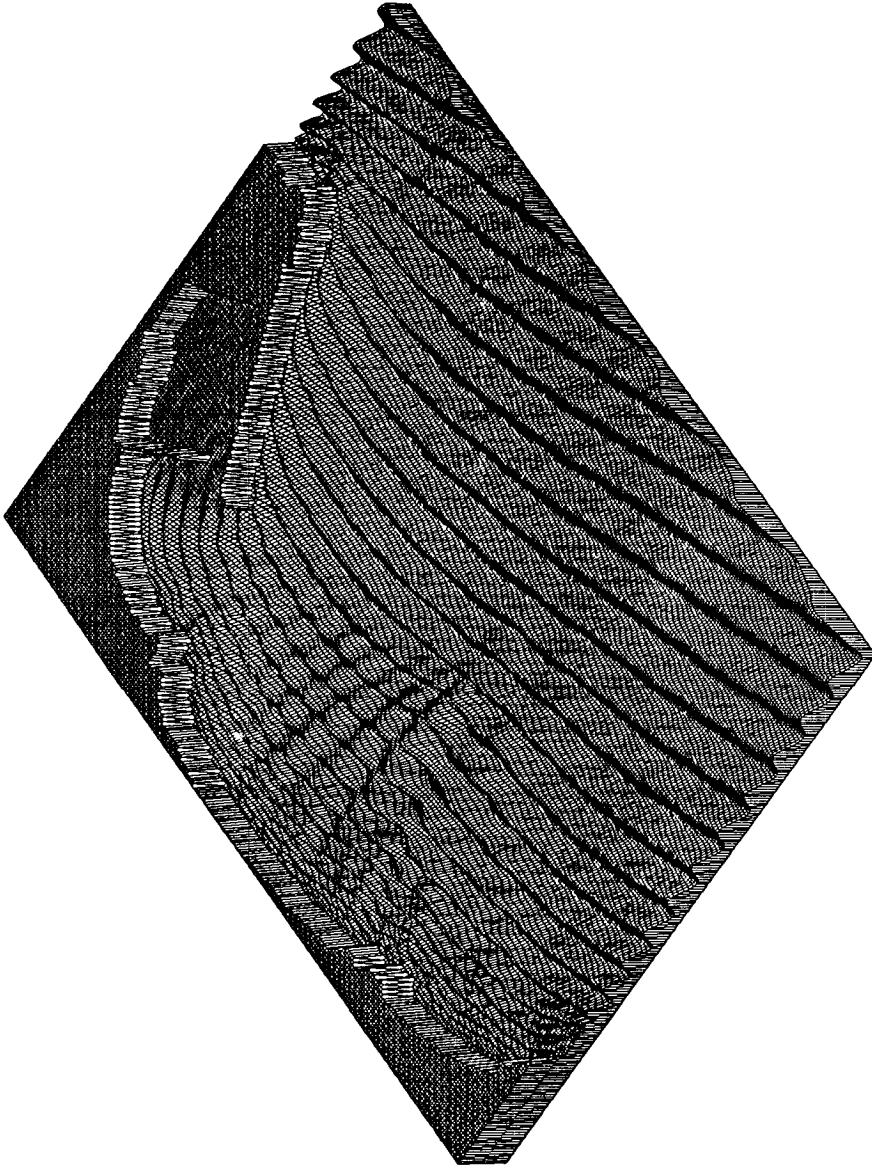


Fig. 3.2.5. Three-dimensional snap shot of wave propagation computed by the model, HCORD (present state).

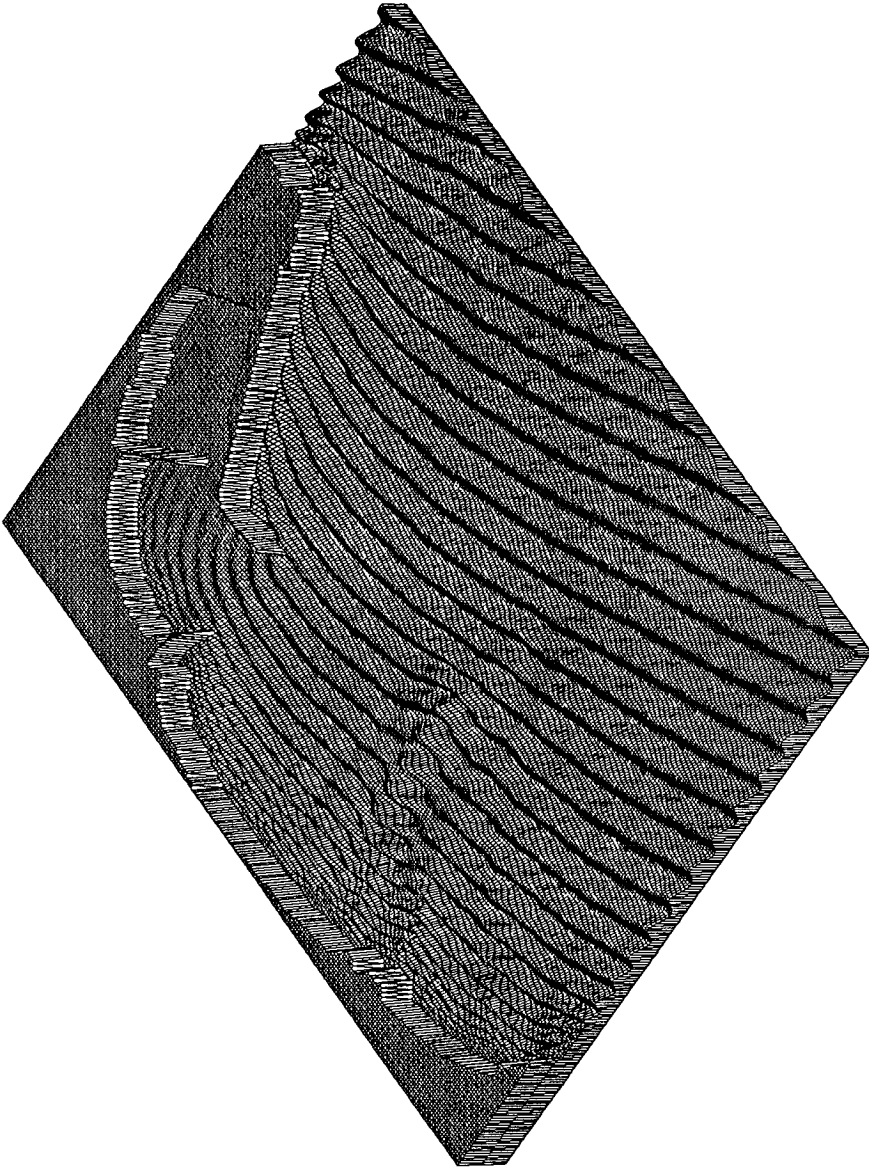


Fig. 3.2.6. Three-dimensional snap shot of wave propagation computed by the model, HCORD (KMFA plan).

수유동모형과 그대로 결합할 경우 막대한 계산시간이 요구되는 등 문제점이 있으며, 해수유동모형의 격자체계에 따라 적당한 간격으로 평균치 또는 대표치를 사용할 경우 또한 문제점이 발생할 것으로 예상된다. 따라서 이 수치모형의 계산결과를 해수유동 수치모형의 입력자료로 이용할 경우에 대한 심도있는 연구가 필요하다. 또한 본 수치모형이 파랑과 흐름과의 상호작용을 고려할 수 있도록 개선하는 것도 차후의 연구과제라 하겠다.

제3절 2차원 연안역 해수순환 수치모형, WINC2D

1. 개 요

본수치모형의 가장 큰 특징은 파랑장과 흐름장을 분리하여 계산하는 타 수치모형과 달리 파랑과 흐름을 동시에 동일한 격자점에서 유기적으로 연결하여 계산한다는 점이다. 또한 파랑장 계산에 있어 대부분의 수치모형이 환경사 방정식을 기본방정식으로 사용하는 데 반해 파랑평균된 파수 보존 방정식과 파랑 에너지 보존방정식을 기본방정식으로 사용 파랑변형 계산한다. 파향선이론에 기초를 두었으나 종래의 파향선 모형과 달리 회절현상을 고려할 수 있도록 함으로써 파향선 중첩지역 뿐아니라 방파제 배후지등에서도 적용할 수 있다. 흐름장 계산에는 파랑평균 및 수심평균된 연속방정식과 운동방정식 사용하며 해류, 조류 및 파랑류를 동시에 고려할 수 있도록 하였으며, 파랑과 흐름의 상호작용도 동시 계산이 가능하다는 장점을 갖는다. 반면, 파랑 평균된 파랑계수 및 기본방정식을 사용함으로써 반사파의 영향이 큰 곳에서는 적용상 난점이 있다. 본연구에서는 연안

역 특히 쇄파대에서 그 영향이 큰 것으로 알려진 난류(turbulence) 현상 및 그에 의한 혼합 등의 계산 부분 및 파랑의 회절현상 계산 부분을 수정, 보완하였다. 본수치모형을 죽변항 및 인근해역의 현상태와 계획안에 대하여 적용 계산하여, 그 결과를 서로 비교하여 보았다.

2. 기본방정식 및 수치계산

본 수치모형에서 사용된 파랑주기 평균, 그리고 수심 평균된 기본방정식은 다음과 같다. 자세한 전개과정은 Yoo(1986)에 수록되어 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + R_x \frac{\partial P}{\partial x} + R_y \frac{\partial P}{\partial y} + P \frac{\partial U}{\partial x} + Q \frac{\partial V}{\partial x} + S_h \frac{\partial d}{\partial x} \\ = \frac{G^k}{2a} \left(\frac{\partial^3 a}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 a}{\partial x \partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + R_x \frac{\partial Q}{\partial x} + R_y \frac{\partial Q}{\partial y} + P \frac{\partial U}{\partial y} + Q \frac{\partial V}{\partial y} + S_h \frac{\partial d}{\partial y} \\ = \frac{G^k}{2a} \left(\frac{\partial^3 a}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 a}{\partial x^2 \partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial t} + \frac{1}{2a} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (R_x a^2) + \frac{\partial}{\partial y} (R_y a^2) \right\} \\ + \frac{1}{a} \left(X^{xx} \frac{\partial U}{\partial x} + X^{xy} \frac{\partial U}{\partial y} + X^{yx} \frac{\partial V}{\partial x} + X^{yy} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \\ + C^a a^2 = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_x \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 a}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{g}{d} \left(\frac{\partial X^{xx}}{\partial x} + \frac{\partial X^{xy}}{\partial y} \right) \\ + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{C^u}{d} U \sqrt{U^2 + V^2} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (3.3.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{g}{d} \left(\frac{\partial X^{xy}}{\partial x} + \frac{\partial X^{xy}}{\partial y} \right) \\ + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{C^v}{d} V \sqrt{U^2 + V^2} = \varepsilon_x \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \varepsilon_y \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (dU) + \frac{\partial}{\partial y} (dV) = 0 \quad (3.3.6)$$

이 식에서,

- P = x 방향 파수벡터
- Q = y 방향 파수벡터
- U = x 방향 유속성분
- V = y 방향 유속성분
- d = 수심
- η = 파랑주기 평균 해수위
- a = 파랑의 진폭
- $R_x = U + PG^k$
- $R_y = V + QG^k$
- $G^k = C_g/k = 0.5(1+G) \frac{\sigma_0}{k} \frac{1}{k}$
- k = 분리계수 (Separation factor)
- C_g = 파랑의 군속도
- σ_0 = 본래의 (또는 Doppler 효과가 보정된) 각주파수
- $G = 2kd/\sinh(2kd)$
- $S_h = \frac{G}{2} \frac{\sigma_0}{d}$
- $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ = 확산계수
- C^u, C^v = 유속 (U, V)에 관련된 해저면 마찰계수
- X_{ij} = 파랑의 잉여응력 (Radiation stresses)
- $X_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ (1+G) \frac{K_i}{K} \frac{K_j}{K} + G\delta_{ij} \right\} \left(\frac{1}{2} \rho g a^2 \right)$
- $\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & i \neq j \\ 1 & i = j \end{cases}$
- K_i, K_j = i 또는 j 방향 파수벡터
- $K = \sqrt{K_i^2 + K_j^2}$
- i, j = x, y
- ρ = 해수밀도

이상의 6개로 구성된 기본방정식에 대한 자세한 설명은 Yoo(1986) 및 과학기술처(1987)에 수록되어 있으므로 본보고서에서는 위 기본식의 특성

에 대해서만 간략히 기술한다. 6개의 기본방정식은 파랑장을 계산하는 식(3.3.1)~(3.3.3)과 흐름장을 계산하는 식(3.3.4)~(3.3.6)의 두 부분으로 크게 나눌 수 있다. 즉, 식(3.3.1)과 (3.3.2)는 파수벡타의 운동학적 보존식이며, 식(3.3.3)은 파랑에너지식으로 부터 유도된 것으로 파고의 변화를 나타낸다. 식(3.3.4)와 (3.3.5)는 파랑에 의한 해안류 또는 조류 등을 묘사하는 유속식이며, 평균해수위의 변화를 나타내는 식(3.3.6)과 함께 1파랑주기당 흐름의 평균변화율을 나타낸다. 이상의 두 부분이 유기적으로 연결되어 있어 파랑의 전파변형과 연안류 발달에 대한 동시해석이 가능하다. 특히 식(3.3.1)과 (3.3.2)의 우변 항은 회절에 의한 파수의 변이도를 표현한 것으로, 본 모형이 파향선 이론에 기초를 두고 있으나, 파랑에너지가 집중되는 파향선 중첩지역(Caustic region)에서 파수의 감소효과를 가져오므로 에너지분산 역할을 하며, 방파제 배후지 등에서도 파봉선을 따라 에너지 전도를 가능케 해 준다.

이상의 방정식은 복잡한 비선형항을 포함하고 있고, 6개의 방정식을 동시에 유기적으로 풀어야 하므로, 본모형에서는 비교적 컴퓨터 프로그램의 수립과 수정, 보완이 쉽고, 경계면의 처리가 용이한 양해 유한차분법을 사용하여 차별화하였다. 이에 대한 자세한 유한차분식, 격자체계, 초기 및 경계조건 등은 Yoo(1986) 및 과학기술처(1987)에 기술되어 있으므로, 본보고서에서는 사용된 수치기법에 대해서만 간략히 기술한다.

파랑의 굴절, 회절, 천수, 해저면 마찰에 의한 에너지 감쇄, 흐름과의 상호작용 등에 의한 파랑의 전파변형을 계산하는 전반부는 파랑을 진행파로 간주하고 식(3.3.1)과 (3.3.2)는 Upstream 차분법을, 식(3.3.3)은 Donor cell 차분법을 각각 적용하였다. 해수위의 경사와 파랑의 잉여응력에 의한

영향, 해저면 마찰, 쇄파대에서의 확산 및 비선형 이류 등에 의한 흐름의 변화를 계산하는 후반부는 두단계로 나누어, 첫단계에서는 식(3.3.4), (3.3.5)의 비선형 이류항을 제외하고 식(3.3.6)과 함께 FTCS(Forward Time Centered Space) 차분법을 적용하여 중간시간, 즉 $(n+1/2)\Delta t$ 시간의 유속 성분을 계산한 후, 두번째 단계에서 비선형 이류항을 포함하는 식을 첫단계에서 계산된 유속을 이용하는 ADE(Angled derivative explicit) 차분법을 사용하여 $(n+1)\Delta t$ 시간의 유속을 계산하였다. 이상의 수치기법에 대한 자세한 사항은 Roache(1972)를 참조하였다.

3. 수치모형의 적용

이상과 같이 수립된 수치모형 WINC2D를 본연구의 기준모형항만인 죽변항 및 인근해역의 현상태와 Fig.1.2.2에 보인 해운항만청의 계획안에 대하여 적용하였다. 대상해역을 116×136개의 정방형 격자로 구성하였으며, 이 때 격자간격 Δx 와 Δy 는 각각 20m였다. 현상태와 계획안에 대한 격자체계는 각각 Fig.3.3.1과 Fig.3.3.2와 같으며, 각각에 대한 수심도를 Fig.3.3.3과 Fig.3.3.4에 수록하였다. 방파제를 연장하거나 돌제를 축조하는 경우 건설 직후 기존의 자연조건의 변화로 인하여 단기간에 급속히 해저지형이 변하게 되며, 이러한 구조물 축조 이후의 해저지형변화를 예측하기 위해서는 파랑 및 조석 등의 변화양상을 예측하고 이를 근거로 일정기간의 해저지형 변화를 산출한 후 변화된 해저지형에 대해 파랑 등의 변화양상을 예측하고 이를 이용하여 새로운 해저지형 변화를 산출하는 등 상호 영향을 주는 두 요소를 유기적으로 연결하여 반복 적용이 요구되나, 본연구에서는 수치모형 등 요소기술 개발이라는 연구목적상 방파제 연장 및 돌제 축조후

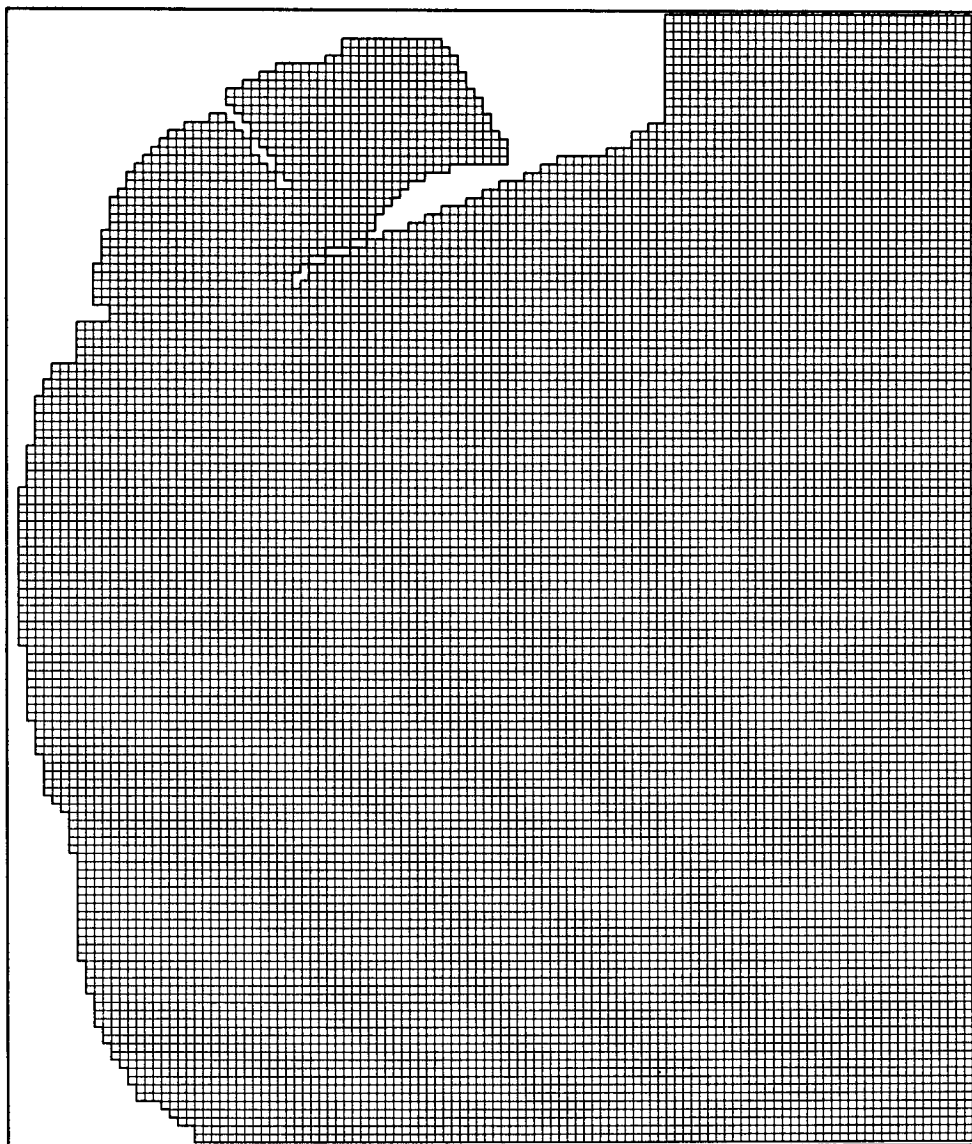


Fig. 3.3.1. Finite difference grids for the present state.

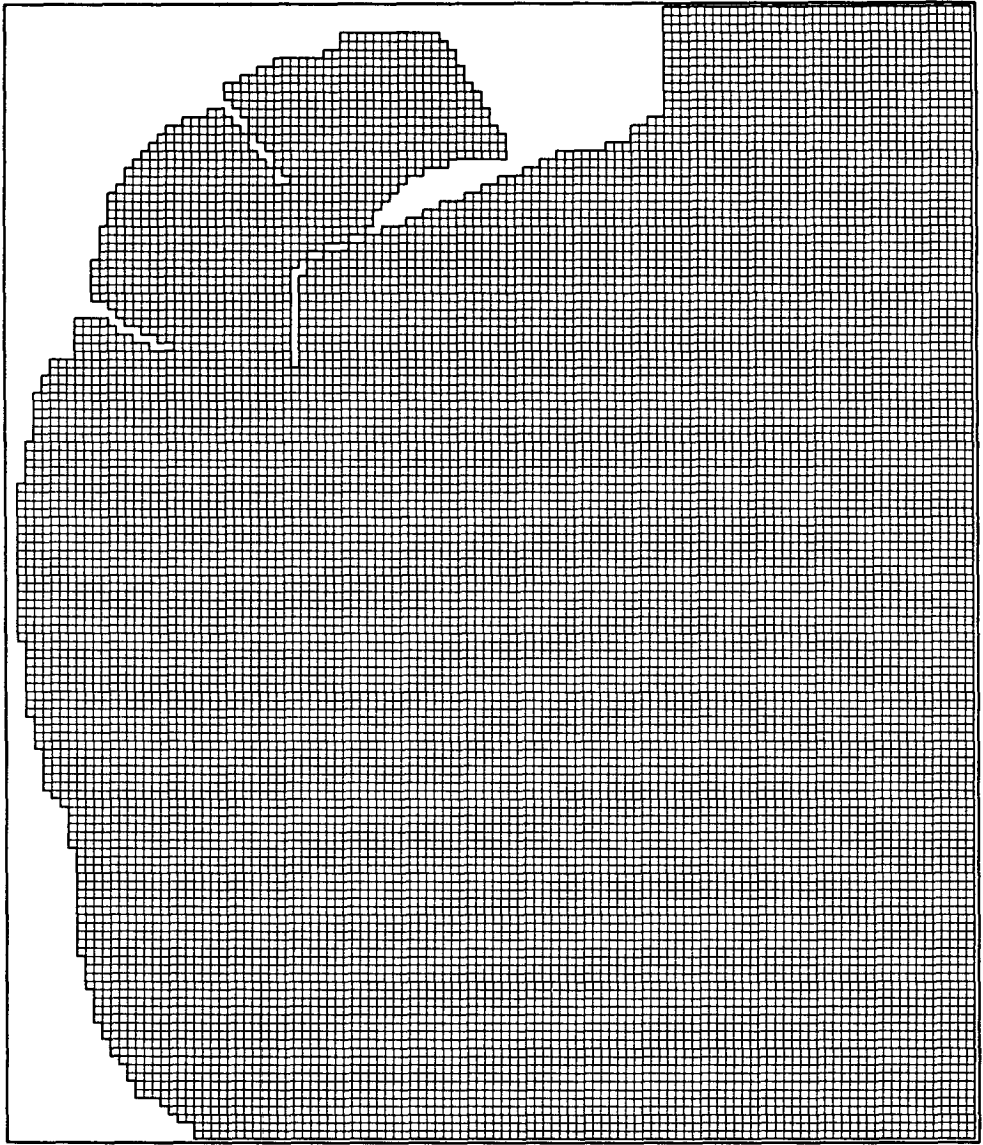


Fig. 3.3.2. Finite difference grids for the KMPA plan.

DEPTH CONTOUR OF JUKBYØN HARBOUR (UNIT : M)

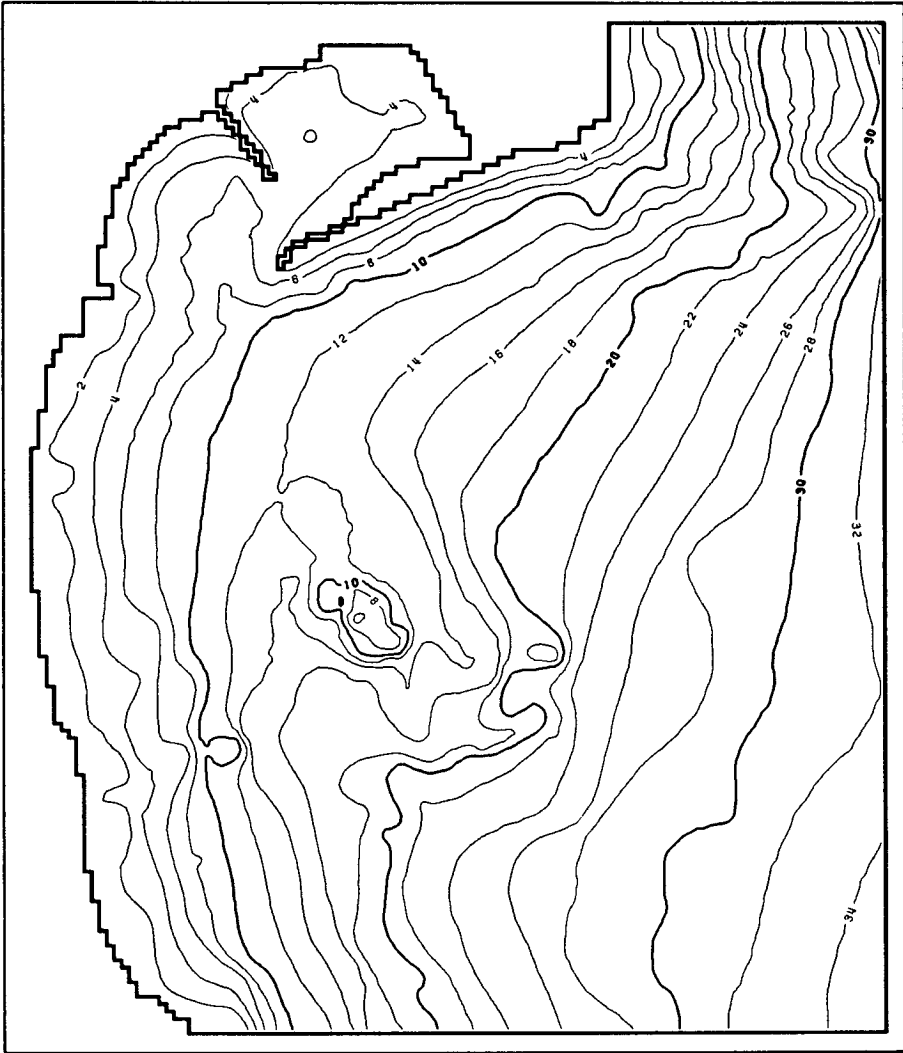


Fig. 3.3.3. Water depth contours of the computation domain (present state).

DEPTH CONTOUR OF JUKBYON HARBOUR (UNIT : M)

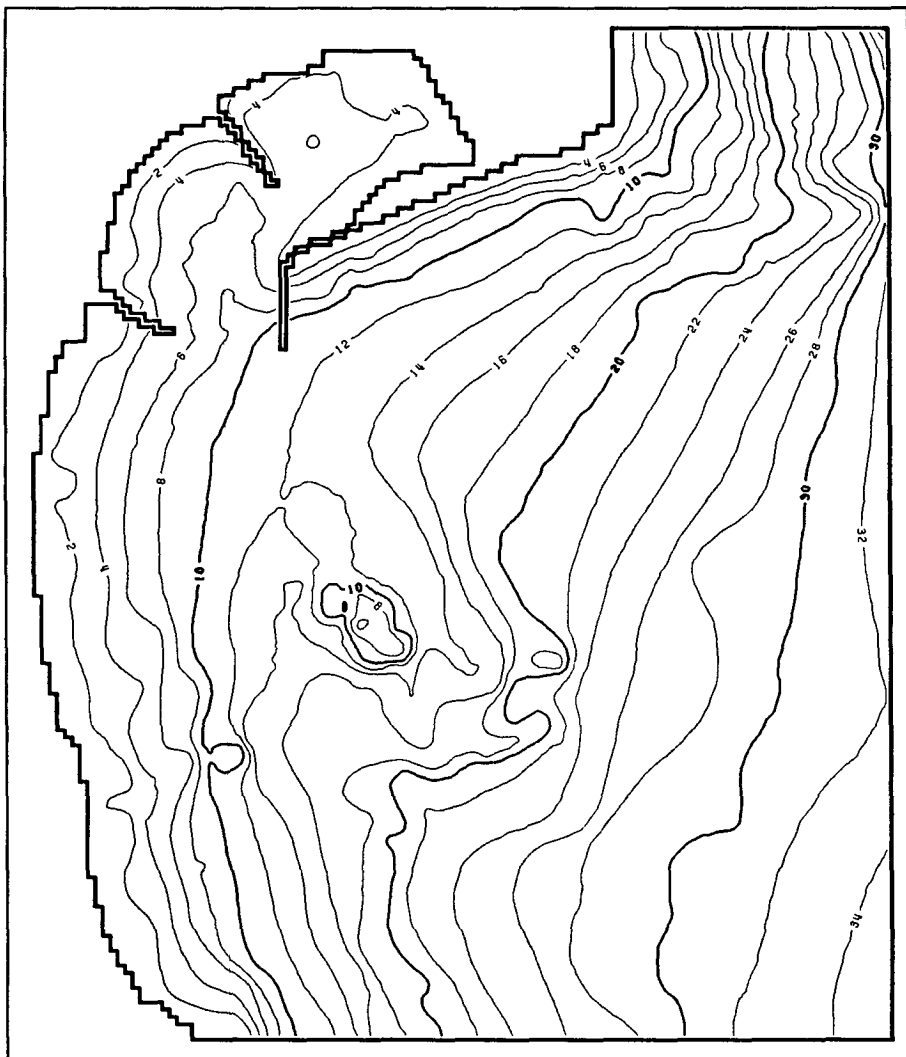


Fig. 3.3.4. Water depth contours of the computation domain (KMPA plan).

에도 수심이 Fig.3.3.3과 Fig.3.3.4에서 보는 바와 같이 변하지 않는다고 가정하고 계산을 수행하였다. 따라서 방파제 연장선단의 경우 수심이 11m 정도로 깊어 실제와는 많은 차이를 보일 수 있으나, 적용성 및 예측성 검토에는 큰 문제가 없는 것으로 판단된다. 파랑의 입력조건으로는 제2장에서 보는 바와 같이 1993년 10월 부터 12월 사이에 관측된 파랑을 보면 폭풍시 유의파고 3m, 유의주기 9초 정도의 북동계열의 파랑이 가장 빈번하게 내습하는 것으로 나타났으므로, 파고 3m, 주기 9초의 파랑을 외해경계에서의 입력조건으로 하였고, 이 파랑이 ENE 및 ESE 방향에서 전파올 경우 각각에 대해 현상태 및 계획안에 대하여 적용하였다.

ENE 방향에서 전파해 올 경우, 현상태 및 계획안의 입사파랑에 대한 파고비분포도를 각각 Fig.3.3.5 및 Fig.3.3.6에, 그리고 파랑에너지 flux의 분포도를 각각 Fig.3.3.7 및 Fig.3.3.8에 수록하였다. 이 그림을 보면 해저지형이 변하지 않는다는 가정으로 인해 방파제 및 돌제 주변을 제외하고는 파고변화 및 파랑전파변형은 거의 같은 양상을 보임을 알 수 있으며, 방파제 배후지역에서 약간 파고가 작아짐을 알 수 있어, 방파제 연장으로 인해 차폐역이 늘어남을 명확히 보여준다. 또한 해안류의 발달 및 변화양상이 각각 Fig.3.3.9 및 Fig.3.3.10에 제시되었다. 이 그림으로 부터 동북동 계열 파랑의 경우 방파제 및 돌제 주변을 제외하면 현재와 거의 같음을 알 수 있으며, 현재는 방파제 방파제 외해측 및 선단에서 다소 강한 연안류가 발생하여 방파제 선단쪽으로 흐르다 방파제 선단 부근에서 약해지는 것을 알 수 있으며, 이로 부터 방파제를 따라 해저퇴적물이 방파제를 따라 이동하여 방파제 선단 부근에 퇴적시킬 수 있음을 보여준다. 그러나 계획안의 경우 방파제를 따라 연안류가 발생하는 것은 비슷하나 상대적으로 그 강도가 약해지고, 방파제 연장 부근에서는 많이 약해지는 것을 보여준다. 이는

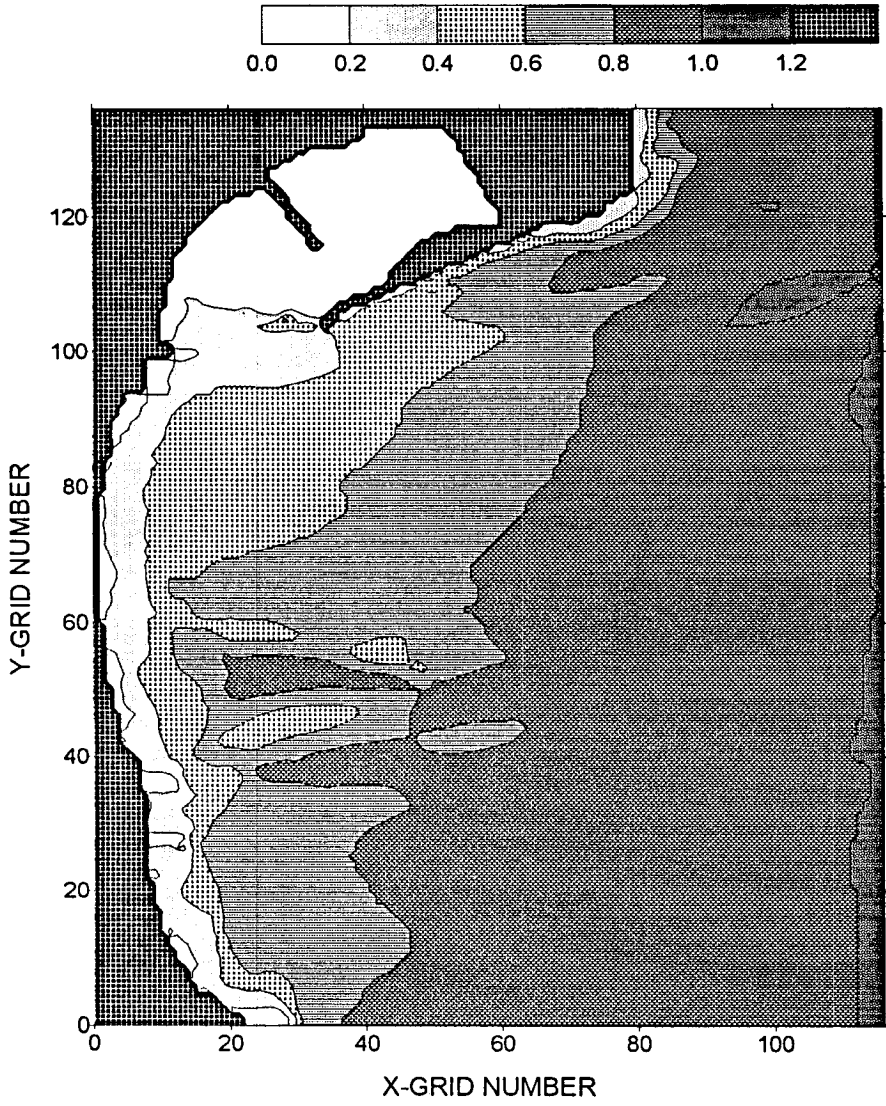


Fig. 3.3.5. Distribution of the computed wave height ratios for the present state (wave direction of ENE).

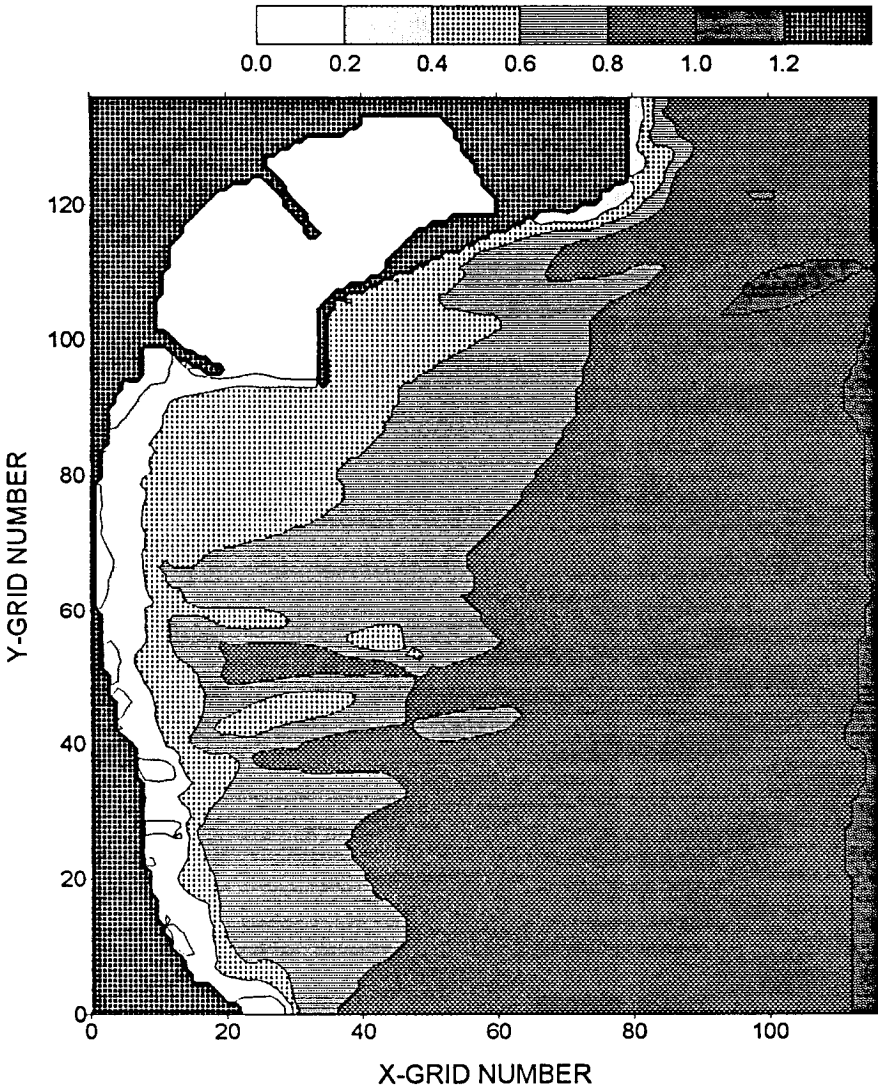


Fig. 3.3.6. Distribution of the computed wave height ratios for the KMPA plan (wave direction of ENE).

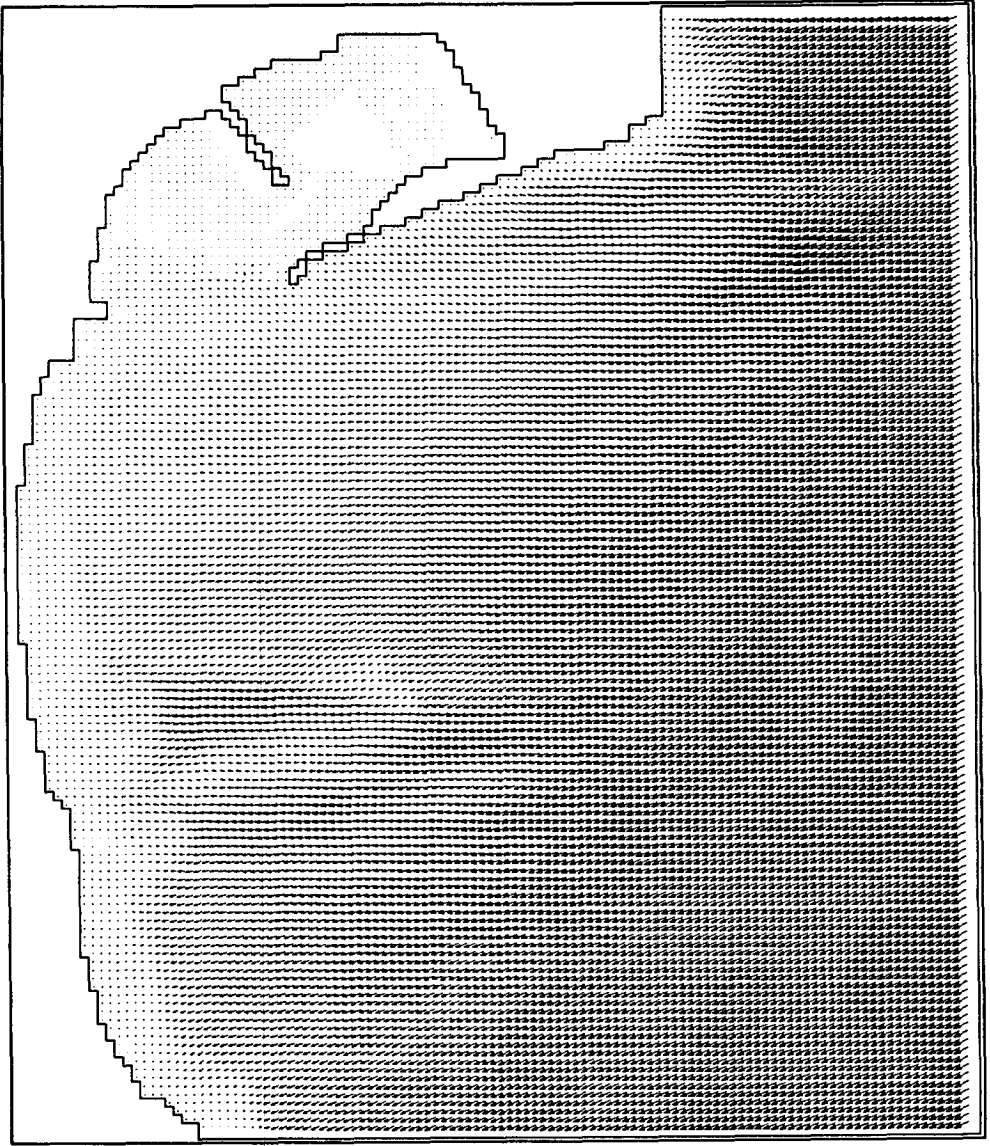


Fig. 3.3.7. Distribution of the computed wave energy fluxes for the present state (wave direction of ENE).

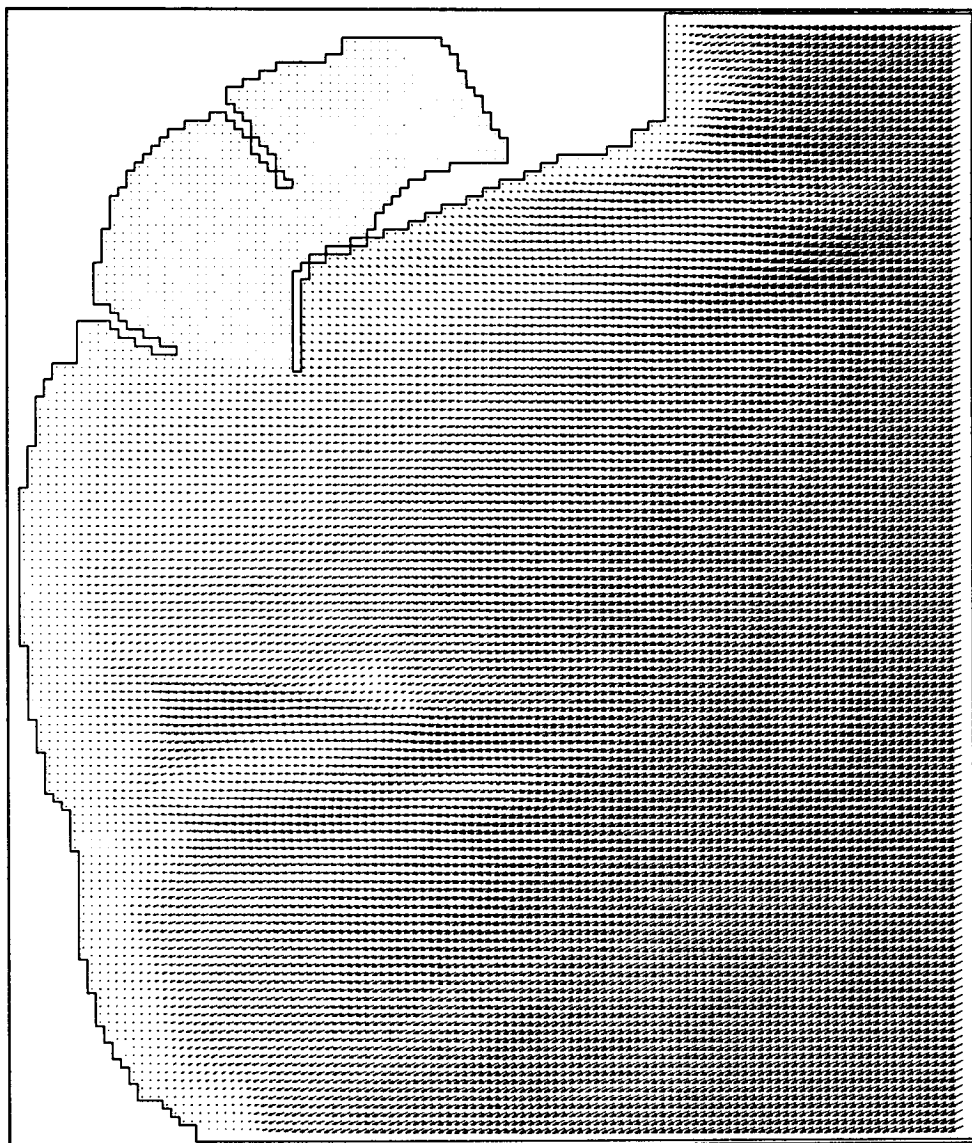


Fig. 3.3.8. Distribution of the computed wave energy fluxes for the KMPA plan (wave direction of ENE).



Fig. 3.3.9. Computed wave-induced current vectors for the present state (wave direction of ENE).



Fig. 3.3.10. Computed wave-induced current vectors for the KMPA plan (wave direction of ENE).

입력된 수심이 깊기 때문인 이유도 있겠으나 방파제 연장으로 인한 이유가 더 큰 것으로 판단된다. 또한 돌제 주변을 보면 현재는 암초 전면에서 항입구쪽으로 발달된 연안류를 볼 수 있으나 계획안에서는 방파제 연장으로 인해 이 지역이 차폐역이 되었고, 돌제로 인해 외해쪽에서 발달한 연안류가 항입구쪽으로 전진하지 못하고 돌제를 따라 이안류로 흐름을 알 수 있다.

한편, 입사파랑이 ESE 방향에서 전파된 경우에 대한 계산 결과, 현상태 및 계획안의 입사파랑에 대한 파고비 분포도가 각각 Fig.3.3.11 및 Fig.3.3.12에, 파랑에너지 flux 분포도가 각각 Fig.3.3.13 및 Fig.3.3.14에 수록되었으며, 해안류 발달 및 변화양상이 각각 Fig.3.3.15 및 Fig.3.3.16에 제시되었다. Fig.3.3.11~14를 보면 동북동 계열의 입사파랑의 경우와 같이 해저지형이 변하지 않는다는 가정으로 인해 방파제 및 돌제 주변을 제외하고는 파고변화 및 파랑전파변형은 거의 같은 양상을 보임을 알 수 있으며, 방파제 배후지역에서 약간 파고가 작아짐을 알 수 있어, 이 경우에도 방파제 연장으로 인해 차폐역이 늘어남을 보여준다. 해안류 발달 및 변화양상을 보여주는 Fig.3.3.15 및 Fig.3.3.16을 보면 동북동 계열 파랑의 경우와 같이 방파제 및 돌제 주변을 제외하면 현상태와 거의 같음을 알 수 있다. 방파제 주변지역을 살펴보면 현재는 방파제 방파제 외해측 및 선단에서 다소 강한 연안류가 발생하여 방파제 선단쪽으로 흐르다 방파제 선단 부근에서 유속이 적어지는 동북동 파랑의 경우와 약간 달리 상대적으로 강한 유속의 와류가 형성되는 것을 알 수 있으며, 이 경우 역시 방파제를 따라 해저퇴적물이 방파제를 따라 이동하여 방파제 선단 부근에 퇴적시킬 수 있음을 보여주며, 그 정도는 동북동 파랑의 경우보다 심할 것으로 예상된다. 그러나 계획안의 경우 방파제를 따라 연안류가 발생하는 것은 비슷하나 상대적

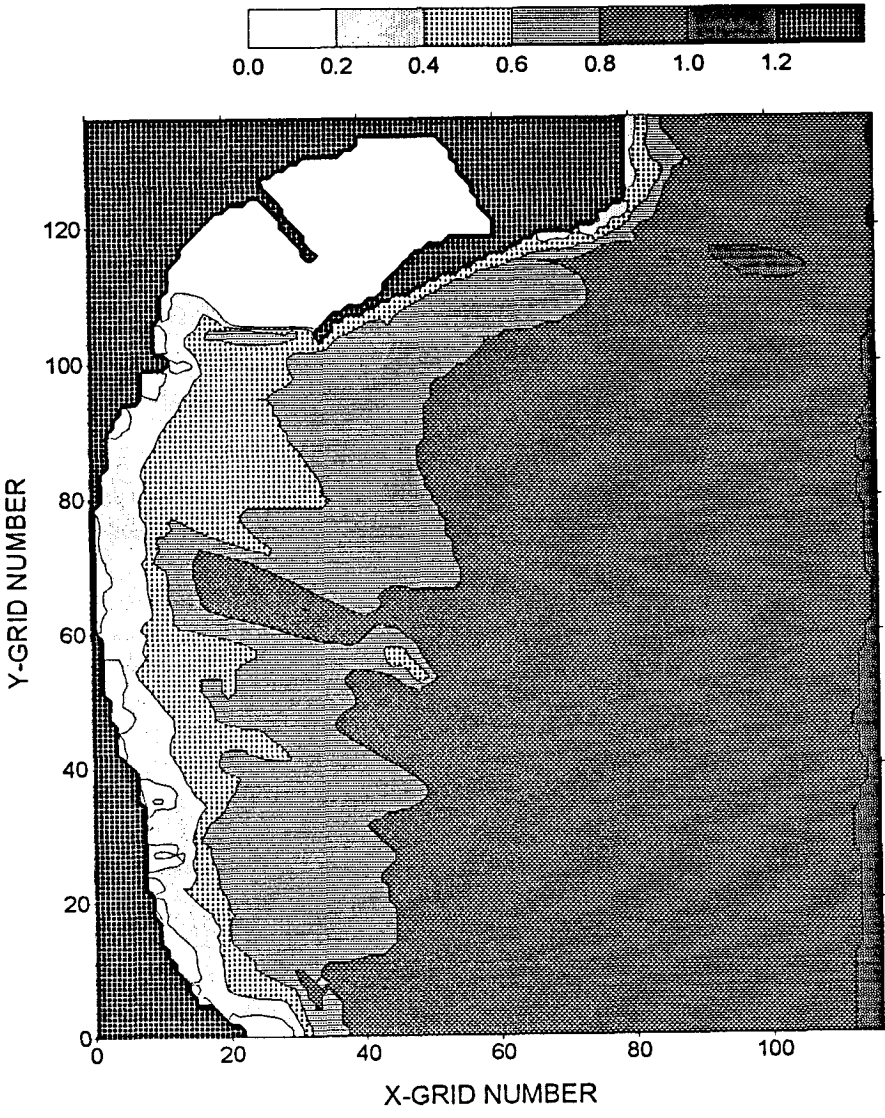


Fig. 3.3.11. Distribution of the computed wave height ratios for the present state (wave direction of ESE).

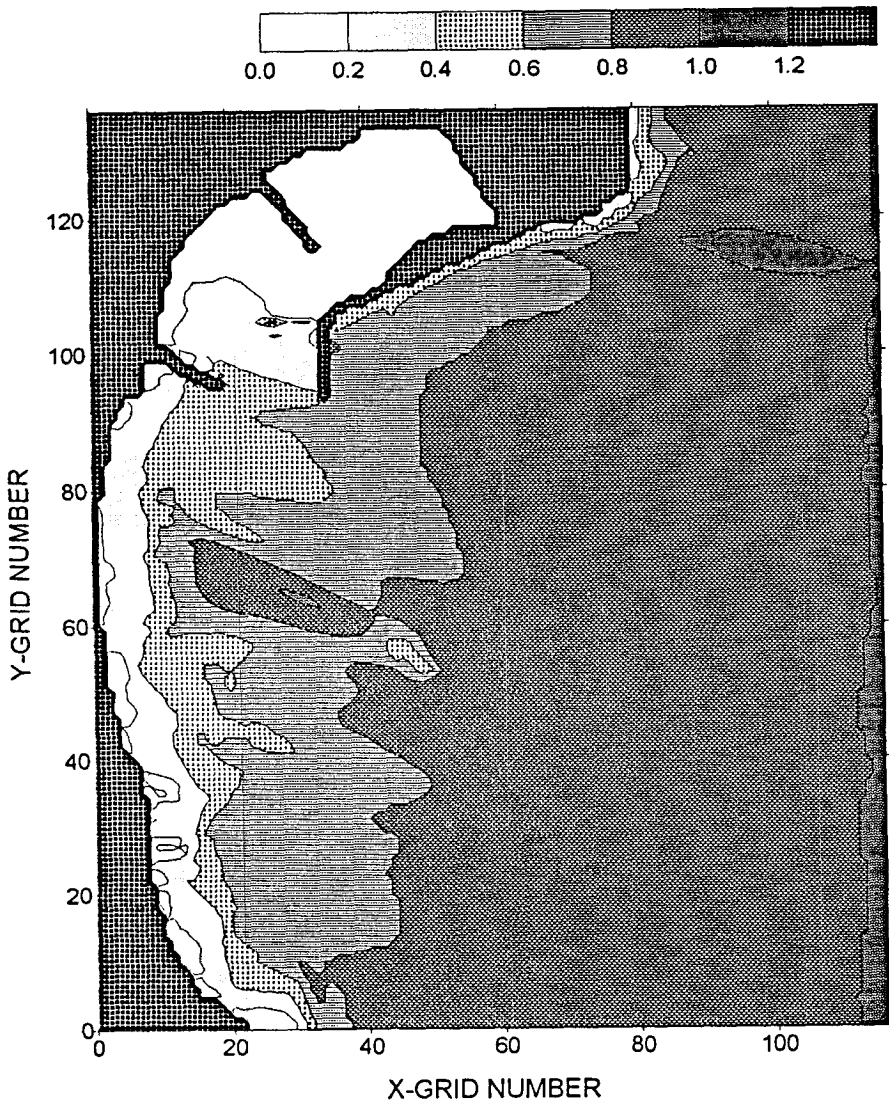


Fig. 3.3.12. Distribution of the computed wave height ratios for the KMPA plan (wave direction of ESE).

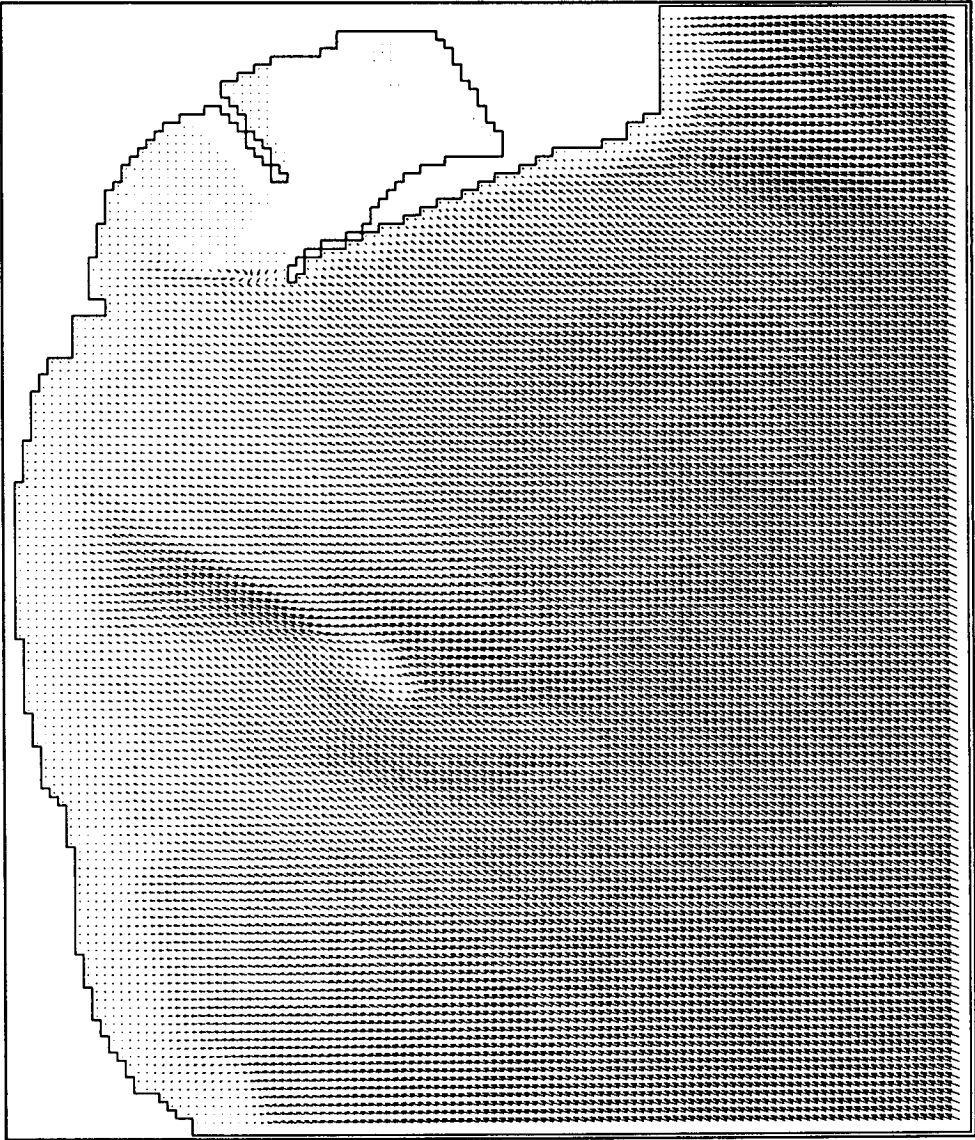


Fig. 3.3.13. Distribution of the computed wave energy fluxes for the present state (wave direction of ESE).

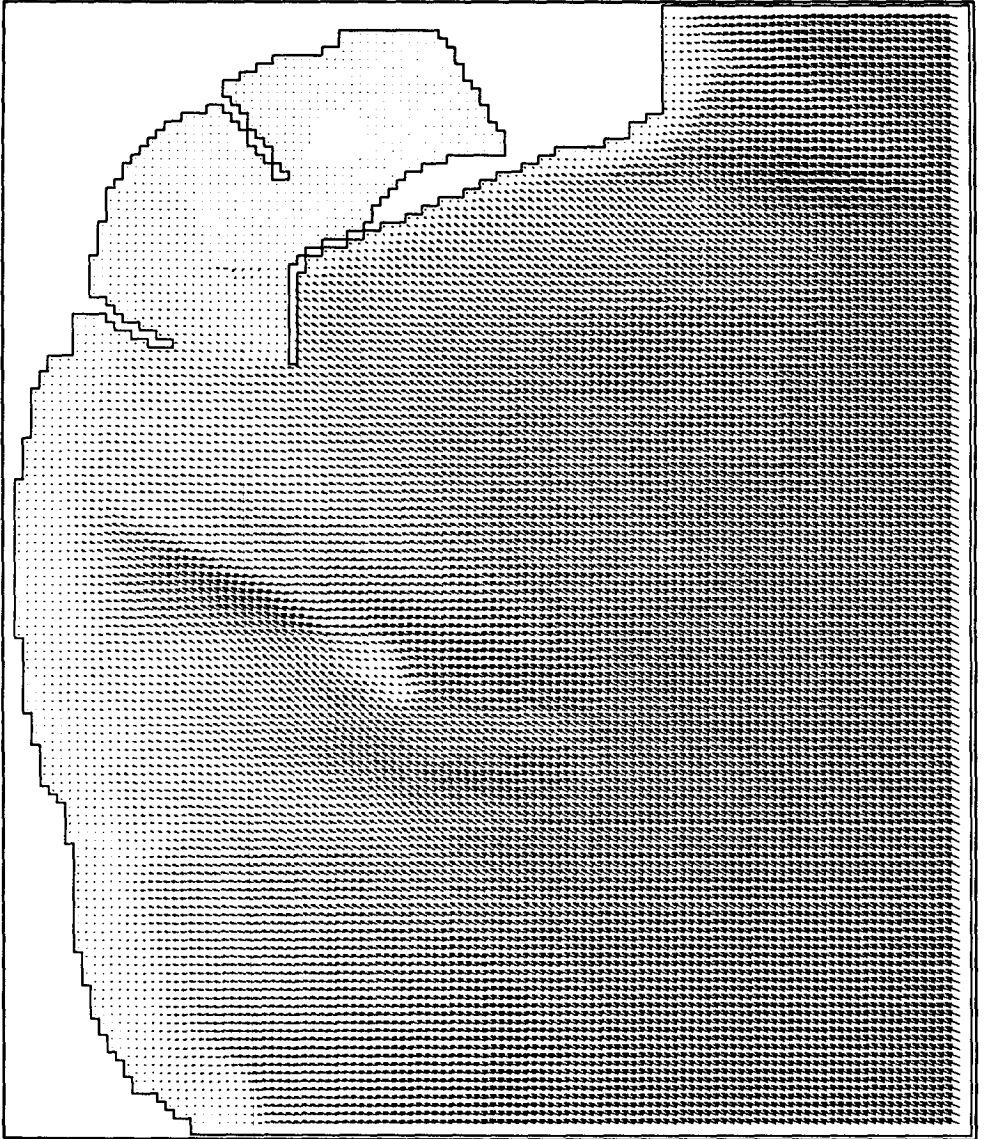


Fig. 3.3.14. Distribution of the computed wave energy fluxes for the KMPA plan (wave direction of ESE).



Fig. 3.3.15. Computed wave-induced current vectors for the present state (wave direction of ESE).



Fig. 3.3.16. Computed wave-induced current vectors for the KMPA plan (wave direction of ESE).

으로 그 유속이 약해지고, 방파제 연장 부근에서는 그 유속이 많이 약해지는 것을 보여준다. 이는 위의 경우와 같이 입력된 수심이 깊기 때문인 이유도 있겠으나 방파제 연장으로 인한 이유가 더 큰 것으로 판단된다. 또한 돌제 주변을 보면 현재는 암초 전면에서 항입구쪽으로 발달된 다소 강한 연안류를 볼 수 있으나 계획안에서는 방파제 연장으로 인해 이 지역이 차폐역이 되었고, 돌제로 인해 외해쪽에서 발달한 연안류가 항입구쪽으로 전진하지 못하고 돌제를 따라 이안류로 흐름을 알 수 있다. 그러나 돌제를 따라 외해쪽으로 부터 해안쪽으로의 흐름도 현상태보다 약하기는 하나 상당히 존재할 것으로 판단된다.

이상과 같이 죽변항 및 인근해역의 현상태 및 계획안에 대하여 ENE 및 ESE 계열의 파랑이 전파해 올 경우로 나누어 적용해 본 결과, 개선된 본 수치모형은 중장기적인 항만매몰 및 해안변형에 대한 원인분석 및 대책 마련을 위해 충분한 정도의 공학적 적용성과 예측성을 가짐을 알 수 있었으며, 부수적으로 해운항만청에서 계획한 방파제 연장 및 돌제 축조안이 항 입구 및 항내의 매몰방지의 측면에서 상당한 효과를 보일 수 있을 것으로 추정할 수 있었다.

제4절 3차원 연안역 해수순환 수치모형, WINC3D

1. 개 요

앞절에 기술된 평면 2차원 수치모형은 실용성은 갖추고 있으나 수심

평균된 또는 수심적분된 식을 이용함으로써 저층이안류(undertow) 등을 계산하지 못하므로 3차원 해저퇴적물이동 수치모형에 적용하기 위한 흐름의 연직분포 등의 파악에 문제점을 내포하고 있어 이를 보완하기 위하여, 또한 연안역 파랑류는 그 자체가 3차원적 구조를 가지므로 이를 해석하기 위해서 3차원 수치모형을 수립하였다.

본 수치모형은 각각 독립성을 갖는 파랑변형 수치모형, 해수유동 수치모형 그리고 난류마감 수치모형의 세 개의 수치모형이 유기적으로 결합된 형태를 갖고 있다. 제1차년도 연구에서는 파랑변형 및 해수유동 수치모형에, 제2차년도에는 해수유동 및 난류마감(turbulence closure) 모형 부분을, 그리고 본 연구의 최종년도인 제3차년도 연구에서는 난류마감부분 등에 대해 중점을 두고 수립하였으며, 검증을 위해 수리모형실험에 적용하여 비교적 만족할 만한 결과를 얻었으나, 현장적용에는 많은 수정 및 보완이 요구되어 이는 차후의 연구과제로 미루었다. 본 보고서에서는 금년도 연구를 통해 수립된 해수유동 및 난류마감모형에 대해 그리고 이들의 유한차분화 기법에 대해 기술하고 문헌을 통해 발표된 수리모형실험에 적용한 결과에 대해 간략히 기술한다.

2. 기본방정식

본 수치모형의 파랑변형 수치모형 부분의 기본방정식은 전철의 수치모형 WINC2D에서 사용된 파랑평균된 파수 보존 방정식과 파랑 에너지 보존식을 채용하여 파랑변형을 계산한다. 이에 대한 자세한 사항은 전철에 자세히 기술되어 있다.

해수유동 수치모형 부분의 기본방정식으로는 파랑평균 및 난류평균된 연속방정식 및 운동방정식을 사용하며, 이에 대한 유도과정 및 각 항의 물리적 의미 등은 본 연구의 제1차년도 보고서(과학기술처, 1992)에 상세히 기술되어 있으므로 본 보고서에서는 그 기본식만 수록한다. 즉, Navier-Stokes방정식에서 유속을 평균유속성분, 파랑운동에 의한 주기성 유속성분 및 난류성분으로 나누고 파랑평균 및 난류평균한 후 이를 대입하여 정리하면 다음의 운동방정식을 얻는다(Svendsen and Lorenz, 1989 ; de Vriend and Kitou, 1990).

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial U^2}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} \\
 & + \frac{\partial (\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2})}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u_w v_w}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u_w w_w}}{\partial z} \\
 & = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial (\overline{\langle u' \rangle^2} - \overline{\langle w' \rangle^2})}{\partial x} \\
 & - \frac{\partial \overline{\langle u' v' \rangle}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\langle u' w' \rangle}}{\partial z}
 \end{aligned} \tag{3.4.1}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial V^2}{\partial y} \\
 & + \frac{\partial \overline{u_w v_w}}{\partial x} + \frac{\partial (\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2})}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v_w w_w}}{\partial z} \\
 & = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \overline{\langle u' v' \rangle}}{\partial x} \\
 & - \frac{\partial (\overline{\langle v' \rangle^2} - \overline{\langle w' \rangle^2})}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\langle v' w' \rangle}}{\partial z}
 \end{aligned} \tag{3.4.2}$$

여기서,

- U, V : 파랑평균 난류평균 유속성분
- u_w, v_w, w_w : 파랑운동에 의한 순수 주기성 유속성분
- u', v', w' : 난류유속(turbulent velocity fluctuation) 성분
- η : 해수위의 상승(set-up) 또는 하강(set-down)

이며, overbar는 파랑평균, 그리고 괄호 < >는 난류평균을 나타낸다. 이상의 식(3.4.1)과 (3.4.2)는 연안역에서의 흐름운동을 지배하는 ensemble 평균 및 파랑주기 평균된 방정식이다. 위 식에서 x축을 해안선에 수직인 방향으로 y축을 해안선에 평행한 방향으로 설정하면, $\partial U^2/\partial x$ 와 $\partial V^2/\partial y$ 는 각각 해안-외해류(cross-shore current)와 연안류(longshore current)의 운동량 flux이며 수심적분된 방정식에서 이항은 보통 무시하기도 한다. UV항은 두 성분 유속간의 coupling을 표시하며, Ryrie(1983)는 이 항의 크기가 작은 것으로 가정한 바 있다. $(\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2})$ 과 $(\overline{v_w^2} - \overline{w_w^2})$ 는 파랑의 잉여응력(radiation stress)을 나타내는 항이며, $\partial(\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2})/\partial x$ 는 저층이안류(undertow)를 생성, 발달시키는 중요 요소 중 하나이다. 그러나 그 크기는 상대적으로 다른 항, 즉 $\partial\eta/\partial x$ 등에 비해 작다(Svendsen *et al.*, 1987). 해안선이 직선이며 해안선에 평행한 등수심선을 갖고 해안을 따라 흐르는 흐름이 일정한 경우 $\partial/\partial y=0$ 이 되고, 따라서 $\partial(\overline{v_w^2} - \overline{w_w^2})/\partial y=0$ 이 되며, $\partial/\partial y$ 를 갖는 모든 항이 0이 된다. $\overline{u_w v_w}$ 항은 해안선의 접선방향의 잉여응력항으로써 $\partial(\overline{u_w v_w})/\partial x$ 는 연안류를 생성 발달시키는 역할을 하며, $\partial(\overline{v_w w_w})/\partial y$ 는 해안-외해류의 해안선을 따르는 변화(lonshore variation in the cross-shore flow)를 나타낸다. $\partial(\overline{u_w w_w})/\partial z$ 와 $\partial(\overline{v_w w_w})/\partial z$ 는 파랑에 의해 생성된 전단응력의 수평성분이며, 선형파 이론과 같이 수평해저면에 대한 파랑 이론에서는 해저면 경계층을 제외한 수심에서 0이 된다. 그러나 사실상 이 항은 저면경사의 영향을 표시하는 항으로써 중요한 역할을 한다(Svendsen and Lorenz, 1989). 이 식의 우변에 있는 항들은 압력

경사(pressure gradients)와 Reynolds 응력을 나타낸다.

Reynolds 응력항을 Boussinesq의 가정, 즉

$$-\overline{\langle u'v' \rangle} = \nu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (3.4.3)$$

을 적용하여 정리하면 식(3.4.1)과 (3.4.2)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \\ &= -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial U}{\partial z} \right) + T_x \end{aligned} \quad (3.4.4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \\ &= -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial y} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial V}{\partial z} \right) + T_y \end{aligned} \quad (3.4.5)$$

윗 식에서 v_h 및 v_v 는 수평방향 및 연직방향 난류확산계수이고, T_x 와 T_y 는 x방향 및 y방향 파랑 잉여응력항을 나타내며, 아래와 같이 표시된다.

$$T_x = -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{u_w v_w}) \quad (3.4.6)$$

$$T_y = -\frac{\partial}{\partial x} (\overline{u_w v_w}) - \frac{\partial}{\partial y} (\overline{v_w^2} - \overline{w_w^2}) \quad (3.4.7)$$

여기서 특기할 것은 (u_w, w_w) 및 (v_w, w_w) 항은 각각의 요소간의 위상차로 인하여 파랑에 의한 수평전단응력이 다음과 같이 0이 된다는 점이다.

$$-\frac{\partial}{\partial z} (\overline{u_w w_w}) = 0, \quad -\frac{\partial}{\partial z} (\overline{v_w w_w}) = 0 \quad (3.4.8)$$

식(3.4.6)과 (3.4.7)을 수심에 대해 적분하면 평면 2차원 수치모형에서 적용되는 파랑잉여응력을 구할 수 있다.

$$S_{xx} = \int_{z_b}^{\eta} \rho (\overline{u_w^2} - \overline{w_w^2}) dz + \frac{1}{2} \rho g \overline{(\zeta - \eta)^2} = [N(\cos^2\theta + 1) - 1]E \quad (3.4.9)$$

$$S_{yy} = \int_{z_b}^{\eta} \rho (\overline{v_w^2} - \overline{w_w^2}) dz + \frac{1}{2} \rho g \overline{(\zeta - \eta)^2} = [n(\sin^2\theta + 1) - 1]E \quad (3.4.10)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \int_{z_b}^{\eta} \overline{u_w v_w} dz = [N \sin\theta \cos\theta]E \quad (3.4.11)$$

이 식에서 $\eta = \bar{\zeta}$, N 은 군속도와 파속의 비, E 는 파랑에너지($=1/2\rho g a^2$, a 는 파랑의 진폭)이다. 이상의 방정식과 다음식으로 표시되는 연속방정식을 이용하여 해수면의 변화 및 유속을 계산하게 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4.12)$$

3. 수치기법

이상의 기본방정식을 임의의 지형에 대해 풀기 위해서는 적절한 수치기법으로 차분화하는 것이 필요하며, 이를 컴퓨터 프로그램하여야 한다. 본 모형에서는 수치기법으로 평면적으로는 양해법 유한차분법을, 연직방향으로는 음해법 유한차분법을 사용하였으며, 계산시간을 줄이고 프로그램 과정을 단순화하기 위해 시간분리기법이 사용되었다.

연속방정식과 유속장 계산식을 크게 수심평균된 부분(external mode)과 연직방향 변화 부분(internal mode)으로 나누어 생각한다. 수심평균된 유속을 다음과 같이 정의하면

$$\bar{U} = \frac{1}{d} \int_{z_1}^n U dz, \quad \bar{V} = \frac{1}{d} \int_{z_1}^n V dz, \quad (3.4.13)$$

식(3.4.4), (3.4.5) 및 (3.4.12)로 부터 해수면 변화와 수심평균된 유속을 구할 수 있는 다음의 수심평균된 부분의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho d} \quad (3.4.14)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho d} \quad (3.4.15)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}h}{\partial y} = 0 \quad (3.4.16)$$

원래의 방정식에서 수심평균된 방정식을 빼면 연직방향 변화 부분의 식을 구할 수 있으며 이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (v_h \frac{\partial U}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_h \frac{\partial U}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_v \frac{\partial U}{\partial z}) \quad (3.4.17) \\ & + T_x + RS_x + \frac{\tau_{bx}}{\rho d} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (v_h \frac{\partial V}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v_h \frac{\partial V}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (v_v \frac{\partial V}{\partial z}) \quad (3.4.18) \\ & + T_y + RS_y + \frac{\tau_{by}}{\rho d} \end{aligned}$$

$$w = \int_{-h}^z \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right) dz \quad (3.4.19)$$

$$RS_x = -\frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (3.4.20)$$

$$RS_y = -\frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (3.4.21)$$

이상의 두 세트의 식을 시간분리기법에 의해 표시하면 다음과 같다.

즉, n시간의 수심평균유속은 식(3.4.13)에서

$$\bar{U}^n = \frac{1}{d} \int_{-h}^{\eta^n} U^n dz, \quad \bar{V}^n = \frac{1}{d} \int_{-h}^{\eta^n} V^n dz \quad (3.4.22)$$

로 표시되고, 연직방향 변화량을 u와 v라면 이는 다음과 같이 표시된다.

$$u = U^n - \bar{U}^n, \quad v = V^n - \bar{V}^n \quad (3.4.23)$$

이상의 관계를 이용하여 수심평균 관계식(3.4.14), (3.4.15) 및 (3.4.16)을 표시하면,

$$\frac{\eta^{n+1} - \eta^n}{\Delta t} + \frac{\partial \bar{U}^{n+1/2} h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^{n+1/2} h}{\partial y} = 0 \quad (3.4.24)$$

$$\frac{\bar{U}^{n+1/2} - \bar{U}^n}{\Delta t} = -g \frac{\partial \eta^{n+1}}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} - \frac{\tau_{bx}}{\rho d} \quad (3.4.25)$$

$$\frac{\bar{V}^{n+1/2} - \bar{V}^n}{\Delta t} = -g \frac{\partial \eta^{n+1}}{\partial y} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{1}{\rho d} \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho d} \quad (3.4.26)$$

$$U^{n+1/2} = \bar{U}^{n+1/2} + u, \quad V^{n+1/2} = \bar{V}^{n+1/2} + v \quad (3.4.27)$$

가 되고, 연직방향변화 부분의 계산식을 이용하여 (n+1/2)시간의 유속을 구할 수 있다. 이를 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{U^{n+1} - U^{n+1/2}}{\Delta t} + U_i^{n+1/2} \frac{\partial U^{n+1}}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial U^{n+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial U^{n+1}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial U^{n+1}}{\partial z} \right) \\ & \quad + T_x + RS_x + \frac{\tau_{bx}}{\rho d} \end{aligned} \quad (3.4.28)$$

$$\begin{aligned} & \frac{V^{n+1} - V^{n+1/2}}{\Delta t} + U_i^{n+1/2} \frac{\partial V^{n+1}}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(v_h \frac{\partial V^{n+1}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_h \frac{\partial V^{n+1}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial V^{n+1}}{\partial z} \right) \\ & \quad + T_y + RS_y + \frac{\tau_{by}}{\rho d} \end{aligned} \quad (3.4.29)$$

여기서

$$U_i \frac{\partial}{\partial x_i} = U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.4.30)$$

$$w^{n+1} = - \int_{-h}^z \left(\frac{\partial U^{n+1}}{\partial x} + \frac{\partial V^{n+1}}{\partial y} \right) dz \quad (3.4.31)$$

이상의 두 세트의 식은 각각 다른 방법에 의해 해를 구하게 된다. 즉, 수심평균식은 조석모델의 수식과 거의 흡사한 방법으로 풀게 되며, 연직방향 변화식은 연직축 변환 기법을 이용하여 축변환한 후 다시 비선형 이류항과 분산항으로 나누어 해를 구하게 된다.

수심이 변하는 일반지형에 3차원 모형을 적용하기 위한 격자망 시스템은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 x, y, z 방향의 모서리를 갖는 직육면체의 격자소를 갖는 정규 격자망이며, 다른 하나는 해저면 모양을 따라 구부러지는 모서리를 갖는 육면체의 격자소를 갖는, 즉 x, y, z 방향에서 왜곡된 격자망이다. 전자의 정규 격자망은 해저면 경사를 계단 모양으로 나타낼 수 밖에 없으므로, 계산 영역 내에 수심이 얇은 곳이 있을 경우 이의 적절할 해상(resolution)이 가능하도록 연직방향의 격자크기를 선택하면 수심이 깊은 곳에서 연직 방향의 격자수가 많아지는 약점이 있다. 후자의 해저면 형태에 맞추는 변형 격자망은 해저면을 정확하게 표현할 수는 있으나, 기본방정식과 경계조건의 축변환을 필요로 한다. 본 사업에서는 쇄파대를 포함한 천해역을 잘 표현하기 위하여 시그마 변환방법을 택하였다. 새로운 축 X, Y, T 및 연직축 (σ)은 다음 식으로 정의한다.

$$x=X, \quad y=Y, \quad \sigma=(a-b) \left(\frac{\eta-z}{\eta+h} \right) + b, \quad t=T \quad (3.4.32)$$

여기서, h 는 평균해저면의 높이이며, $\eta+h=d$ 가 되며, d 는 평균수심이다. d

이 관계식을 이용한 축변환은 시간적 및 평면적으로 변하는 해저지형 및 해수위 사이($-h \leq z \leq \eta$)의 연직축을 일정한 상수사이($a \leq \sigma \leq b$)의 연직축으로 바꾸어준다. 이 때 새로운 축 X 와 Y 는 z 축과 수직관계가 아니며, 이로 인하여 각 미분항으로부터 (x, y, z) 좌표계에서 (X, Y, σ) 좌표계로 변환하는 과정에서 다음과 같은 부수적인 항이 생긴다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial X} + \frac{\partial \sigma}{\partial X} \frac{\partial}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial X} + \left(\frac{a-b}{\eta+h} \right) \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial X} - \left(\frac{\sigma-b}{a-b} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial X} + \frac{\partial h}{\partial X} \right) \right\} \frac{\partial}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (3.4.33)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial Y} + \frac{\partial \sigma}{\partial Y} \frac{\partial}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial Y} + \left(\frac{a-b}{\eta+h} \right) \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial Y} - \left(\frac{\sigma-b}{a-b} \right) \left(\frac{\partial \eta}{\partial Y} + \frac{\partial h}{\partial Y} \right) \right\} \frac{\partial}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (3.4.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = - \left(\frac{a-b}{\eta+h} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (3.4.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial T} + \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial T} + \left(\frac{a-b}{\eta+h} \right) \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial T} \left(\frac{a-\sigma}{a-b} \right) \right\} \frac{\partial}{\partial \sigma} \end{aligned} \quad (3.4.36)$$

이상의 좌표변환 관계식에서 해저면에 해당되는 상수 a 를 -1 로, 해수면에 해당되는 상수 b 를 1 로 놓으면, $-h \leq z \leq \eta$ 의 관계가 $-1 \leq \sigma \leq 1$ 의 관계로 변환되며, 이를 식(3.4.33)~(3.4.36)에 대입하면 다음의 관계식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial X} + \frac{1}{d} \left[(1-\sigma) \frac{\partial h}{\partial X} - (1+\sigma) \frac{\partial \eta}{\partial X} \right] \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (3.4.37)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial Y} + \frac{1}{d} \left[(1-\sigma) \frac{\partial h}{\partial Y} - (1+\sigma) \frac{\partial \eta}{\partial Y} \right] \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (3.4.38)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{2}{d} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (3.4.39)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial T} - \frac{1}{d} \left[(1+\sigma) \frac{\partial \eta}{\partial t} \right] \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (3.4.40)$$

이와 같은 관계를 이용하여 기본방정식에 대해 좌표축 변환을 실시한 후, 2차 이상의 고차미분항을 생략하고 편의상 연직방향 유속을 다음의 식과 같이 정의하면

$$w^* = \frac{1}{d} \left[(1-\sigma) \left(U \frac{\partial h}{\partial X} + V \frac{\partial h}{\partial Y} \right) - (1+\sigma) \left(\frac{\partial \eta}{\partial T} + U \frac{\partial \eta}{\partial X} + V \frac{\partial \eta}{\partial Y} \right) \right] \quad (3.4.41)$$

최종적으로 새로운 좌표계 (X, Y, σ, T)에 대한 운동량 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial T} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + w^* \frac{\partial U}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial X} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(v_h \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \\ & \quad + \frac{4}{d^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + T_x^* + RS_x^* + \tau_{bx}^* \end{aligned} \quad (3.4.42)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial T} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + w^* \frac{\partial V}{\partial \sigma} \\ &= \frac{\partial}{\partial X} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(v_h \frac{\partial V}{\partial Y} \right) \\ & \quad + \frac{4}{d^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + T_y^* + RS_y^* + \tau_{by}^* \end{aligned} \quad (3.4.43)$$

위 식에서 위첨자 *는 새로운 좌표계에 대한 값을 나타낸다. 이 식을 다시 다음과 같이 연직 확산, 수평 이류 및 수평 확산의 3단계로 나누어 계산하게 된다.

제1단계 : 연직 확산

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{4}{d^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + T_x^* + RS_x^* + \tau_{bx}^* \quad (3.4.44)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T} = \frac{4}{d^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + T_y^* + RS_y^* + \tau_{by}^* \quad (3.4.45)$$

제2단계 : 수평 이류

$$\frac{\partial U}{\partial T} = -U \frac{\partial U}{\partial X} - V \frac{\partial U}{\partial Y} - w^* \frac{\partial U}{\partial \sigma} \quad (3.4.46)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T} = -U \frac{\partial V}{\partial X} - V \frac{\partial V}{\partial Y} - w^* \frac{\partial V}{\partial \sigma} \quad (3.4.47)$$

제3단계 : 수평 확산

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial X} (v_h \frac{\partial U}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (v_h \frac{\partial U}{\partial Y}) \quad (3.4.48)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial X} (v_h \frac{\partial V}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (v_h \frac{\partial V}{\partial Y}) \quad (3.4.49)$$

수치계산을 위한 평면 및 연직 격자망을 Fig.3.4.1 및 Fig.3.4.2와 같이 구성하여, 평면격자에서만 정의되는 수심과 해수위는 평면격자의 중앙에 위치하도록 하였으며, 난류확산계수는 평면격자와 연직격자 모두에서 중앙에, Radiation stresses 등의 응력항은 평면격자에서는 중앙에 그리고 연직격자에서는 모서리에 위치하며, 유속성분은 평면격자와 연직격자 모두에서 모서리에 위치하도록 하였다. 수치기법으로는 제1단계인 연직확산 계산에서는 2차 정확도를 갖는 Crank-Nicolson형의 음해법을 사용하였으며, 제2단계인 수평이류 계산에는 Angled derivative scheme을, 그리고 제3단계인 수평확산 계산에는 2차의 정밀도를 갖는 양해법을 사용하였다. 이를 유한차분식으로 표시하면, 수심평균 관계식으로 부터 구한 유속 성분을 각각 U^* , V^* 라 하고 이상의 계산식을 유한차분식으로 표시하면 다음과 같다.

제1단계 : 연직 확산

식(3.4.44) 및 (3.4.45)에서 편의상 응력항을 각각 F_x 및 F_y 로 표시하고, 시간축에 대해서 Crank-Nicolson 음해 유한차분법을 적용하면, 격자점 (i,j,k)에서의 유한차분식은 아래와 같다.

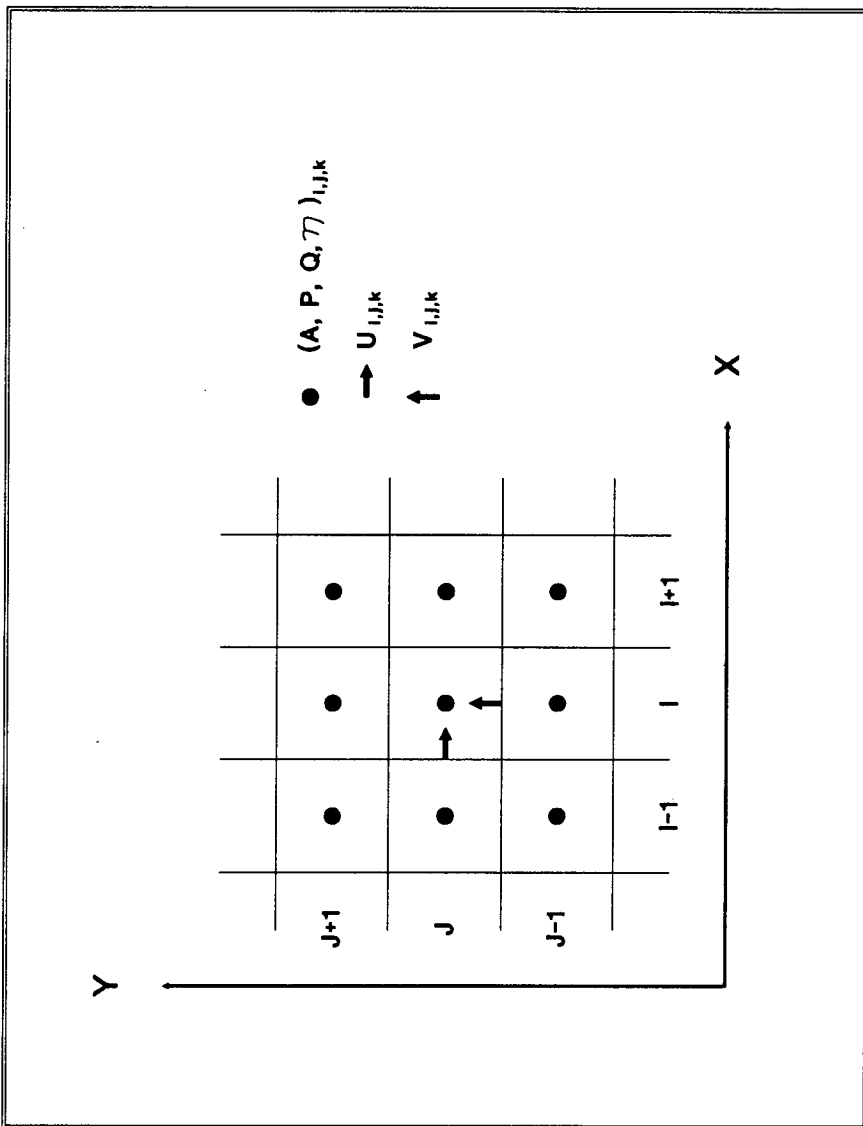


Fig. 3.4.1. 3-D wave induced current model grid system ; plan.

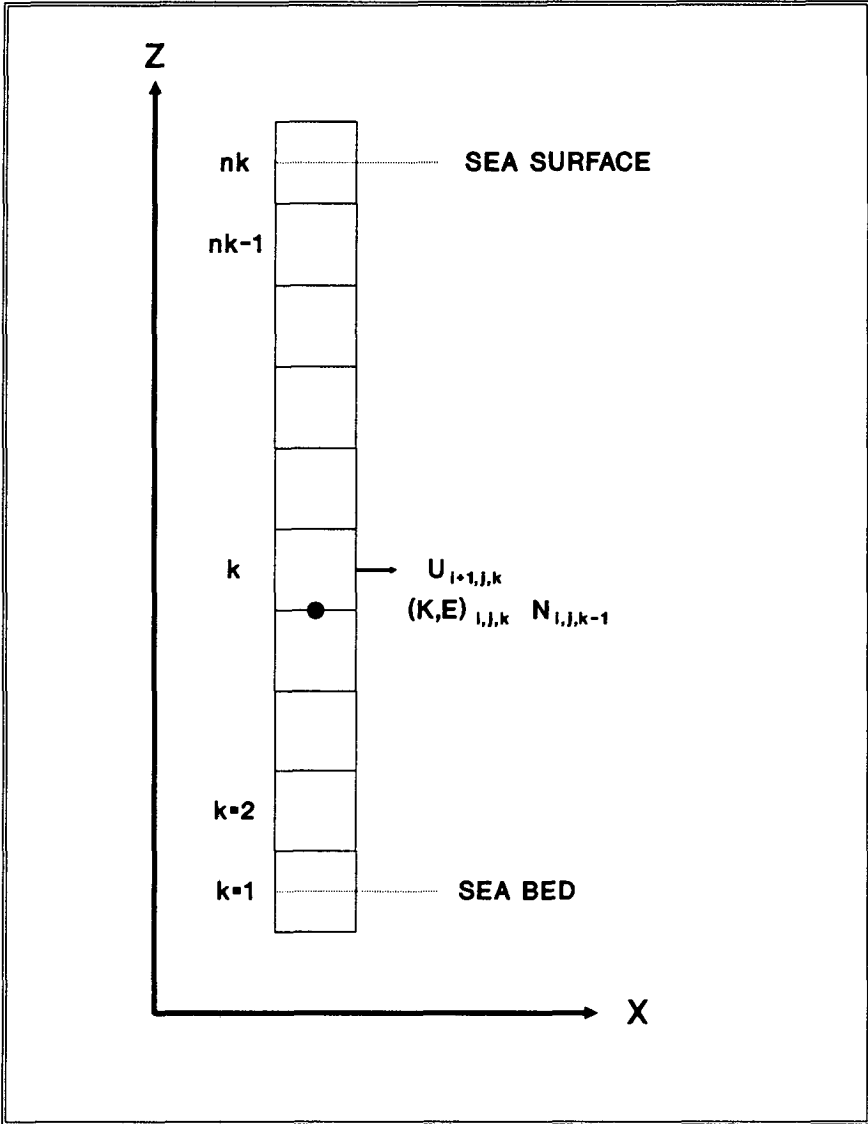


Fig. 3.4.2. 3-D wave induced current model grid system ; vertical.

$$\begin{aligned} \frac{U_{i,jk}^{++} - U_{i,jk}^+}{\Delta T} &= \frac{16}{(d_{i,j} + d_{i-1,j})^2} \frac{1}{\Delta \sigma_k} \\ &\left[W \left\{ \frac{v_{v,i-1/2,jk+1}}{0.5(\Delta \sigma_{k+1} + \Delta \sigma_k)} \delta U_k^{++} - \frac{v_{v,i-1/2,jk}}{0.5(\Delta \sigma_k + \Delta \sigma_{k-1})} \delta U_{k-1}^{++} \right\} \right. \\ &+ (1-W) \left\{ \frac{v_{v,i-1/2,jk+1}}{0.5(\Delta \sigma_{k+1} + \Delta \sigma_k)} \delta U_k^+ - \frac{v_{v,i-1/2,jk}}{0.5(\Delta \sigma_k + \Delta \sigma_{k-1})} \delta U_{k-1}^+ \right\} \\ &\left. + F_x|_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (3.4.50)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{i,jk}^{++} - V_{i,jk}^+}{\Delta T} &= \frac{16}{(d_{i,j} + d_{i-1,j})^2} \frac{1}{\Delta \sigma_k} \\ &\left[W \left\{ \frac{v_{v,i-1/2,jk+1}}{0.5(\Delta \sigma_{k+1} + \Delta \sigma_k)} \delta V_k^{++} - \frac{v_{v,i-1/2,jk}}{0.5(\Delta \sigma_k + \Delta \sigma_{k-1})} \delta V_{k-1}^{++} \right\} \right. \\ &+ (1-W) \left\{ \frac{v_{v,i-1/2,jk+1}}{0.5(\Delta \sigma_{k+1} + \Delta \sigma_k)} \delta V_k^+ - \frac{v_{v,i-1/2,jk}}{0.5(\Delta \sigma_k + \Delta \sigma_{k-1})} \delta V_{k-1}^+ \right\} \\ &\left. + F_y|_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (3.4.51)$$

$$\delta U_k = U_{i,jk+1} - U_{i,jk} \quad (3.4.52)$$

$$\delta V_k = V_{i,jk+1} - V_{i,jk} \quad (3.4.53)$$

식(3.4.50)과 (3.4.51)에서 W는 시간기중치로 이 값이 1이면 완전음해법이 되며, 0이면 양해법이 된다. 본 연구에서는 $0.5 \leq W \leq 1$ 의 값을 갖도록 하였으며, 이는 새 시간 단계의 값의 중요한 정도를 나타낸다. 식(3.4.50)과 (3.4.51)은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$A_k U_{i,jk-1}^{++} + B_k U_{i,jk}^{++} + C_k U_{i,jk+1}^{++} = D_k \quad \text{for } 2 \leq k \leq nk-1 \quad (3.4.54)$$

이 식에 해수면예선의 경계조건과 해저면에서의 경계조건을 적용하면 전수심에 걸친 tridiagonal 매트릭스가 구성되고, 이 매트릭스를 Thomas 알고리즘을 이용하여 풀면 해를 구할 수 있다.

제2단계 : 수평이류

비선형 이류항은 식(3.4.46) 및 (3.4.47)로 부터 Angled derivative explicit scheme (Flather and Heaps, 1976)을 이용하여 계산한다. $(2n+1)$ 계산시각 즉 홀수 계산시각에는 각 좌표축에 대한 격자번호 ij,k 를 증가시키면서

x방향 유속 U를 먼저 계산하고, 그리고 2n 계산시각 즉 짝수 계산시각에는 ij,k를 감소시키면서 y방향 유속 V를 먼저 계산하게 된다. 이를 차분식으로 쓰면 다음과 같다.

○ For odd time steps (i=1,ni ; j=1,nj ; k=1,nk) :

$$\begin{aligned} \frac{U_{i,j,k}^{**} - U_{i,j,k}^*}{\Delta T} + \frac{\bar{U}}{2\Delta X} (U_{i+1,j,k}^* - U_{i,j,k}^* + U_{i,j,k}^{**} - U_{i-1,j,k}^{**}) \\ + \frac{1}{4\Delta Y} \{ (V_{i,j+1,k}^* + V_{i-1,j+1,k}^*) (U_{i,j+1,k}^* - U_{i,j,k}^*) \\ + (V_{i,j,k}^* + V_{i-1,j,k}^*) (U_{i,j,k}^{**} - U_{i,j-1,k}^{**}) \} \\ + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\Delta\sigma_{k+1} + \Delta\sigma_k} (w_{i,j,k+1} + w_{i-1,j,k+1}) (U_{i,j,k+1}^* - U_{i,j,k}^*) \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta\sigma_k + \Delta\sigma_{k-1}} (w_{i,j,k} + w_{i-1,j,k}) (U_{i,j,k}^{**} - U_{i,j,k-1}^{**}) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3.4.55)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_{i,j,k}^{**} - V_{i,j,k}^*}{\Delta T} + \frac{\bar{V}}{2\Delta Y} (V_{i,j+1,k}^* - V_{i,j,k}^* + V_{i,j,k}^{**} - V_{i,j-1,k}^{**}) \\ + \frac{1}{4\Delta X} \{ (U_{i+1,j,k}^{**} + U_{i+1,j-1,k}^{**}) (V_{i+1,j,k}^* - V_{i,j,k}^*) \\ + (U_{i,j,k}^{**} + U_{i,j-1,k}^{**}) (V_{i,j,k}^{**} - V_{i-1,j,k}^{**}) \} \\ + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\Delta\sigma_{k+1} + \Delta\sigma_k} (w_{i,j,k+1} + w_{i,j-1,k+1}) (V_{i,j,k+1}^* - V_{i,j,k}^*) \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta\sigma_k + \Delta\sigma_{k-1}} (w_{i,j,k} + w_{i,j-1,k}) (V_{i,j,k}^{**} - V_{i,j,k-1}^{**}) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3.4.56)$$

$$\bar{U} = 0.25 (U_{i-1,j,k}^{**} + 2U_{i,j,k}^* + U_{i+1,j,k}^*) \quad (3.4.57)$$

$$\bar{V} = 0.25 (V_{i,j-1,k}^{**} + 2V_{i,j,k}^* + V_{i,j+1,k}^*) \quad (3.4.58)$$

○ For even time steps (i=ni,1,-1 ; j=nj,1,-1 ; k=nk,1,-1) :

$$\begin{aligned} \frac{V_{i,j,k}^{**} - V_{i,j,k}^*}{\Delta T} + \frac{\bar{V}}{2\Delta Y} (V_{i,j+1,k}^{**} - V_{i,j,k}^{**} + V_{i,j,k}^* - V_{i,j-1,k}^*) \\ + \frac{1}{4\Delta X} \{ (U_{i+1,j,k}^* + U_{i+1,j-1,k}^*) (V_{i+1,j,k}^{**} - V_{i,j,k}^{**}) \\ + (U_{i,j,k}^* + U_{i,j-1,k}^*) (V_{i,j,k}^* - V_{i-1,j,k}^*) \} \\ + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\Delta\sigma_{k+1} + \Delta\sigma_k} (w_{i,j,k+1} + w_{i,j-1,k+1}) (V_{i,j,k+1}^{**} - V_{i,j,k}^{**}) \right. \\ \left. + \frac{1}{\Delta\sigma_k + \Delta\sigma_{k-1}} (w_{i,j,k} + w_{i,j-1,k}) (V_{i,j,k}^* - V_{i,j,k-1}^*) \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3.4.59)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{U_{i,j,k}^{**} - U_{i,j,k}^*}{\Delta T} + \frac{\bar{U}}{2\Delta X} (U_{i+1,j,k}^{**} - U_{i,j,k}^{**} + U_{i,j,k}^* - U_{i-1,j,k}^*) \\
& + \frac{1}{4\Delta Y} \{ (V_{i,j+1,k}^{**} + V_{i-1,j+1,k}^{**})(U_{i,j+1,k}^{**} - U_{i,j,k}^{**}) \\
& \quad + (V_{i,j,k}^{**} + V_{i-1,j,k}^{**})(U_{i,j,k}^* - U_{i,j-1,k}^*) \} \quad (3.4.60) \\
& + \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\Delta\sigma_{k+1} + \Delta\sigma_k} (w_{i,j,k+1} + w_{i-1,j,k+1})(U_{i,j,k+1}^{**} - U_{i,j,k}^{**}) \right. \\
& \quad \left. + \frac{1}{\Delta\sigma_k + \Delta\sigma_{k-1}} (w_{i,j,k} + w_{i-1,j,k})(U_{i,j,k}^* - U_{i,j,k-1}^*) \right\} = 0
\end{aligned}$$

$$\bar{U} = 0.25(U_{i-1,j,k}^* + 2U_{i,j,k}^{**} + U_{i+1,j,k}^{**}) \quad (3.4.61)$$

$$\bar{V} = 0.25(V_{i,j-1,k}^* + 2V_{i,j,k}^{**} + V_{i,j+1,k}^{**}) \quad (3.4.62)$$

제3단계 : 수평 확산

다음 단계는 수평방향 확산 계산단계이며, 격자점 i,j,k 에서의 차분식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{U_{i,j,k}^{n+1} - U_{i,j,k}^{**}}{\Delta T} &= \frac{1}{\Delta X} \left(v_{h,i+1/2,j,k} \frac{U_{i+1,j,k}^{**} - U_{i,j,k}^{**}}{\Delta X} \right. \\
&\quad \left. - v_{h,i-1/2,j,k} \frac{U_{i,j,k}^{**} - U_{i-1,j,k}^{**}}{\Delta X} \right) \\
&+ \frac{1}{\Delta Y} \left(v_{h,i,j+1/2,k} \frac{U_{i,j+1,k}^{**} - U_{i,j,k}^{**}}{\Delta Y} \right. \\
&\quad \left. - v_{h,i,j-1/2,k} \frac{U_{i,j,k}^{**} - U_{i,j-1,k}^{**}}{\Delta Y} \right) \quad (3.4.63)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{V_{i,j,k}^{n+1} - V_{i,j,k}^{**}}{\Delta T} &= \frac{1}{\Delta X} \left(v_{h,i+1/2,j,k} \frac{V_{i+1,j,k}^{**} - V_{i,j,k}^{**}}{\Delta X} \right. \\
&\quad \left. - v_{h,i-1/2,j,k} \frac{V_{i,j,k}^{**} - V_{i-1,j,k}^{**}}{\Delta X} \right) \\
&+ \frac{1}{\Delta Y} \left(v_{h,i,j+1/2,k} \frac{V_{i,j+1,k}^{**} - V_{i,j,k}^{**}}{\Delta Y} \right. \\
&\quad \left. - v_{h,i,j-1/2,k} \frac{V_{i,j,k}^{**} - V_{i,j-1,k}^{**}}{\Delta Y} \right) \quad (3.4.64)
\end{aligned}$$

이상의 차분식과 적합한 경계조건을 이용하여 다음 단계의 시간의 해를 구하게 되며, 본 모형이 중간 계산시간의 값을 필요로 하는 조석 수치모형과 달리 일정한 값에 도달한 평형상태의 값을 구하는 것이므로 적절한 기준을 정해 이 값에 도달하면 계산을 멈추고, 그 값을 최종해로 취하였다.

4. 초기조건 및 경계조건

일정한 입사파 조건에 대해 변화하는 해수위 및 파랑류를 계산하기 위해서는 적절한 초기조건 및 경계조건을 필요로 한다. 본 수치모형이 파랑변형 계산 부분, 파랑류 계산 부분 및 난류마감 부분으로 나뉘어져 있으므로 이들 각각에 대한 초기 및 경계조건이 필요하다. 이중 난류마감 부분에 대해서는 다음 절에 기술하기로 하고 본절에서는 파랑변형 부분과 파랑류 계산 부분에 대해서만 기술하기로 한다.

가. 초기조건

복잡한 수리현상을 수치모형화하는 경우 대상이 되는 물리현상 또는 적용된 수치해석기법에 적합하도록 초기조건을 설정해야 한다. 그러나 본 수치모형은 조석 등에 의한 장주기파는 고려하지 않으므로 중간계산 과정 또는 결과에 관계없이 최종적으로 도달한 평형상태의 값을 최종해로 취하게 되므로, 실제 주어진 초기조건이 최종해의 값에 미치는 영향은 거의 없고 다만 초기조건에 따라 계산시간에서 약간의 차이를 보인다. 따라서 여러가지 경우에 대한 시험계산 과정을 통하여 안정도가 높고 짧은 시간내에 평형상태에 도달할 수 있을 것으로 기대되는 초기조건으로 파랑변형 계산 부분에 대하여는 파향은 입사경계에서의 파향을 사용하였고, 파고는 수심

에 비례하여 작아지는 것으로 간주하였으며, 파수백타는 수심에 따라 분산 관계식을 계산하여 파수를 구한 후 입사파의 파향에 따라 x 및 y방향 성분을 계산하여 초기치로 사용하였다. 또한 쇄파대에서 파랑에너지가 급격히 증가하는 것으로 계산되는 것을 피하기 위하여 쇄파한계를 설정하여 초기오차가 빨리 제거될 수 있도록 하였다. 파랑류 계산 부분에 대해서는 계산되는 전영역에 대하여 해수위가 영으로 일정하고($\eta=0$), 초기유속이 영인($U_i=0$)인 초기조건(cold start)을 사용하였다.

나. 경계조건

본 수치모형에서는 파랑변형 계산을 위한 경계조건과 해수순환 부분을 계산하기 위한 경계조건을 필요로 하며, 이들은 각각 육지경계조건과 개방 또는 외해경계조건으로 나눌 수 있다. 육지경계면은 파랑에 의한 해수면 상승 및 하강 등으로 인해 변하게 되며, 이와 같은 이동 육지경계의 처리를 위해 해수위를 계산하는 점이 아닌 유속을 계산하는 점에서 침수 조건을 고려하는 Flather 와 Heaps(1976)의 방법이 사용되었다. 또한 육지 경계조건은 slip조건과 no-slip조건으로 나누어 지며, 실제 모형 적용시 경계조건의 선택에 따라 계산결과가 크게 달라지므로 주변상황과 적용목적 등을 감안하여 적절히 선택해야 한다. 또한 해수순환 부분은 3차원으로 구성되어 있으므로 해저면과 해수면에서의 경계조건도 필요로 하게 된다. 본 보고서에서는 이들에 대해 파랑부분과 해수순환 부분으로 나누어 간략히 기술하기로 한다.

(1) 파랑장 계산을 위한 육지경계조건

No-slip 경계조건 :

파랑을 진행파로 가정하면 수심이 점차 낮은 곳으로 전파하면서 파랑이 육지경계면에 도달할 때 육지경계면에 수직한 파향을 갖는 것으로 간주할 수 있으며 또한 파랑에너지가 전부 소멸되는 것으로 가정할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$K_p=0, \quad K_n=K=k \quad (3.4.65)$$

여기서 첨자 p는 육지경계에 평행한 방향을 나타내며, 첨자 n은 육지경계에 수직한 방향을 나타낸다. 윗 식에서 나타난 바와 같이 육지경계에서는 유속이 없고 파랑진폭의 변화가 없으므로 파수벡타 K는 분리계수 k와 같아지며 이는 분산관계식으로 부터 직접 계산할 수 있다.

Slip 경계조건 :

방파제 등 비교적 수심이 깊은 곳에서의 육지경계조건은 파랑이 육지경계면을 따라 전파되는 것으로 가정할 수 있으므로 slip 경계조건을 사용하게 된다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$K_n=0, \quad \partial K_p / \partial x_n = 0 \quad (3.4.66)$$

또한 경계면에서 파랑에너지의 변화가 없는 것으로 가정하면

$$\partial a / \partial x_n = 0 \quad (3.4.67)$$

(2) 파랑장 계산을 위한 개방경계조건

파랑변형을 다루는 수치모형의 경우 개방경계조건은 계산영역에 미치는 영향이 크므로 신중하게 취급해야 한다. 수치모형실험의 경우, 모형내에서 파랑의 반사 등에 의한 영향을 줄이기 위해 개방경계를 대상지역에서 충분히 떨어진 곳에 설치하고, 모형내 인공해빈 또는 에너지 흡수필터 등

을 설치하는 것이 일반적이다. 수치모형의 경우도 개방경계에서의 반사 영향을 줄이기 위해 방사(radiation)경계 개념을 도입하는 방법 등이 제시되고 있으나(Enquist and Majda, 1977), 이러한 방사경계조건(radiational boundary condition)을 사용하더라도 수치해의 안정도를 유지하고 수치계산에 따른 인위적 반사의 영향을 감소시키기 위해 가능한 한 대상지역에서 멀리 떨어진 곳에 개방경계를 설정하는 것이 바람직하다. 본 수치모형에서는 개방경계를 대상해역에서 충분히 떨어진 곳에 설정한다는 가정하에 Neumann의 경계조건을 사용하였다. 즉,

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x_n} = 0, \quad \frac{\partial K_n}{\partial x_n} = 0, \quad \frac{\partial K_p}{\partial x_n} = \frac{\partial K_n}{\partial x_p} \quad (3.4.68)$$

(3) 유속장 계산을 위한 육지경계조건

유속장 계산을 위한 육지경계조건도 파랑장의 육지경계조건과 같이 no-slip과 slip 경계조건으로 구분할 수 있다.

No-slip 경계조건 :

$$U_n = 0, \quad U_p = 0 \quad (3.4.69)$$

Slip 경계조건 :

$$U_n = 0, \quad \partial U_p / \partial x_n = 0 \quad (3.4.70)$$

(4) 유속장 계산을 위한 개방경계조건

해수위에 대해서는 Dirichlet 경계조건을, 수심평균 유속에 대하여는 연속방정식을 사용하였다. 즉,

$$\eta = \eta(t) \quad (3.4.71)$$

$$\frac{\partial \overline{U_n}}{\partial x_n} = -\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \overline{U_p}}{\partial x_p} \quad (3.4.72)$$

여기서 경계면의 격자점내에서는 수심변화가 없는 것으로 가정하였다. 이후 식(3.4.44) 및 (3.4.45)를 이용하여 유속의 연직변화를 산출하였다.

(5) 유속장 계산을 위한 해저면 경계조건

해저면 경계조건으로 no-slip 경계조건과 slip 경계조건을 사용할 수 있으며, 그 각각은 다음과 같다.

No-slip 경계조건 :

$$U_b = V_b = 0 \quad (3.4.73)$$

Slip 경계조건 :

$$v_v \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_b = \frac{\tau_{bx}}{\rho}, \quad v_v \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_b = \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (3.4.74)$$

이 식에서 τ_{bx} 와 τ_{by} 는 해저면 마찰력의 x, y 성분을 나타낸다. 이 해저면 마찰력은 파랑과 흐름이 공존할 경우 개수로에서의 마찰력 산출과 같이 경험적 마찰계수를 이용하여 단순하게 계산할 수 없으며, 파랑의 궤도운동을 고려해야 한다. 파랑과 흐름이 공존할 때 이러한 파랑운동을 고려한 해저면 마찰력 산출을 위해 많은 연구자들이 여러가지 방법을 제안하였으나 본 연구에서는 수치모형의 수립에 중점을 두었으므로 비교적 간단히 적용할 수 있고 또한 적용범위가 비교적 넓은 Yoo(1989)의 방법을 사용하였으며, 산출된 마찰력을 식(3.4.74)에 적용하는 slip 경계조건을 채용하였다.

(6) 유속장 계산을 위한 해수면 경계조건

파랑의 효과가 없는 곳 즉, 쇄파되지 않는 곳에서는 해수면에 작용하는 응력이 없다는 다음 식으로 표현되는 조건을 사용하였으며,

$$v_v \frac{\partial U}{\partial x} \Big|_{z=\eta} = \tau_{sx} = 0, \quad v_v \frac{\partial V}{\partial y} \Big|_{z=\eta} = \tau_{sy} = 0 \quad (3.4.75)$$

쇄파되는 곳에서는 해수면에 쇄파에 의한 추가적인 운동량이 작용하므로 이를 Svendsen(1984)이 제안한 surface roller의 개념을 반영하여 Stive와 Wind가 제시한 다음 식을 해수면 경계조건으로 사용하였다.

$$\tau_{sx} = - \left(\frac{1}{16} + \frac{A}{H^2} \frac{d}{L} \right) \rho g \frac{\partial H^2}{\partial x} \quad (3.4.76)$$

$$\tau_{sy} = - \left(\frac{1}{16} + \frac{A}{H^2} \frac{d}{L} \right) \rho g \frac{\partial H^2}{\partial y} \quad (3.4.77)$$

이 식에서 H는 파고, d는 수심, L은 파장, 그리고 A는 surface roller의 단면적을 나타내며, Svendsen은 이 값을 $A \approx 0.9H^2$ 으로 제시한 바 있다.

5. 난류마감 모형

다음은 식(3.4.42) 및 (3.4.43)에 포함된 수평난류확산계수와 연직난류확산계수를 정해야 한다. 이러한 확산계수는 수치해석 결과에 상당한 영향을 미치며, 특히 연직확산계수는 3차원 수치모형에서 매우 중요하게 취급된다. Peregrine과 Svendsen(1978)에 의하면 쇄파에 의해서 생성된 난류는 surface roller에 국한되지 않고 난류확산에 의해 전수심에 걸쳐 확산된다. 따라서 연직난류확산계수는 전수심에 걸쳐 연속적으로 변한다고 가정하는 것이 타당하다. 그러나 수평난류확산계수는 일반적으로 대상해역이 되는 연안역의 경우 평면 스케일이 수심으로 대표되는 연직 스케일보다 훨씬 크므로 연직확산의 특성길이와는 다른 확산 특성길이에 의해 결정될 것이므로 본 연구에서는 이를 분리하여 고려하였다.

수평확산계수는 수치모형에 있어 계산결과를 평활화하는 역할을 하며, 일반적인 해수유동 수치모형에서는 상수로 가정된다(Sheng, 1989 등). 본 연구에서는 1차적 근사해를 구할 경우 수평확산계수는 연직축에 독립적이며 수심에 따른 변화는 2차적 해에서 나타난다고 한 Svendsen과 Lorenz (1989)의 가정에 따라 수심에 따라 일정하다고 가정하였다. Mei(1983)에 의하면 다양한 형태의 수평난류확산계수에 대한 식이 있으나 본 연구에서는 다음과 같이 표현되는 Battjes(1975)의 공식을 사용하였다.

$$v_h = K \left(\frac{5}{16} \rho g^{3/2} h^{3/2} \frac{dh}{dx} \right)^{1/3} h \quad (3.4.78)$$

여기서 K는 1 정도의 값을 갖는 상수이다.

연직난류확산계수의 경우 계산결과에 민감하게 영향을 주며, 공간적으로 변화하는 것으로 알려져 있다. 연직확산계수의 산정방법으로는 근사적으로 난류운동의 특성에 따라 표시되는 단순한 함수형태를 사용할 수 있으며(0-방정식 모형), 난류의 운동에너지를 계산하고 이를 혼합거리 또는 확산계수와 연결지워 해석하며 최근 보편적으로 사용하고 있는 1-방정식 난류모형, 난류 운동에너지와 난류 운동에너지의 감쇄율을 계산하는 2-방정식 난류모형($k-\epsilon$ 모형), 또는 난류 운동에너지와 난류확산 특성길이를 계산하는 2-방정식 난류모형($k-l$ 모형) 등이 있다. 난류모형의 특성 및 연구 동향 등에 대해서는 Launder와 Spalding(1972), Rodi(1984), Justesen (1987), 또는 ACSE Task Committee(1988) 등에 잘 기술되어 있다.

0-방정식 모형으로는 여러가지가 있으나, 한가지를 소개하면 Svendsen(1987)이 제안한 모형을 들 수 있다. Svendsen은 연직난류확산계수는 수심에 대해 선형적 또는 2차함수적 형태로 나타낼 수 있으며, 쇠

파에 의한 surface roller의 존재로 인하여 난류의 강도는 수면에서 최대가 되며 해저면쪽으로 점차 감소한다는 가정하에 다음과 같은 식을 제안한 바 있다.

$$v_v = K_1 c h \left(a - \left| \frac{z}{h} \right| \right) \quad (3.4.79)$$

$$v_v = K_2 c h \left\{ a - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\} \quad (3.4.80)$$

이 식에서 K_1 과 K_2 는 0.01 정도의 값을 갖는 상수이며, a 는 괄호안의 값이 영보다 작아지지 않도록 1보다 약간 큰 값의 상수이다.

1-방정식 난류모형은 난류의 운동에너지에 관한 1개의 방정식을 풀고, 이로부터 상출된 난류 운동에너지를 이용하여 난류의 특성길이, 난류 확산계수 및 난류에너지 감쇄율 등을 산출하는 것으로, 난류 확산특성길이 등에 대해서는 여러 형태의 식이 제안된 바 있다. 난류의 운동에너지 k 에 관한 식은 다음과 같이 표시된다(Rodi, 1984).

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + U \frac{\partial k}{\partial x} + V \frac{\partial k}{\partial y} + w \frac{\partial k}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_v}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + v_v \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] - \varepsilon \end{aligned} \quad (3.4.81)$$

이 식에서 k 는 난류의 운동에너지(turbulent kinetic energy), ε 은 난류 운동에너지의 감쇄율(turbulent kinetic energy dissipation rate)을 나타내며, σ_k 는 경험상수이다. 여기서 난류확산계수 v_v 는 난류 운동에너지 k 및 난류에너지 감쇄율 ε 과 다음의 관계를 가지며,

$$v_v = C_1 \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.4.82)$$

난류에너지 감쇄율은 난류에너지 및 난류의 특성길이와 Kolmogorov-Prandtl 이론에 의하여 다음의 관계를 갖는다.

$$\varepsilon = C_1 \frac{k^{3/2}}{l} \quad (3.4.83)$$

이상에서 난류의 특성길이를 산출하는 식은 여러 연구자들에 의하여 제안되었으나 변연구에서는 다음의 일반적인 식을 사용하였다.

$$l = \kappa^4 \sqrt{C_{1z}} \quad (3.4.84)$$

이 식에서 κ 는 Von Karman 상수이다.

식(3.4.81)을 수치모형에 적용하기 위하여 식(3.4.33)~(3.3.36)의 관계를 이용하여 좌표변환을 실시하고 유속산정식과 동일한 방법으로 유한차분화하였으며, 그 과정은 거의 동일하므로 본 보고서에서는 생략하였다. 이 식의 해를 구하기 위해서는 해저면과 해수면에서의 경계조건이 요구되며, 해저면에서는 $k=0$ 또는 $\partial k / \partial z = 0$ 의 경계조건을 사용하였으며, 해수면에서는 전단응력이 작용할 경우는 $k = v_v | \partial U / \partial z | / \sqrt{C_1}$ 의 조건을, 전단응력이 작용하지 않을 경우는 $\partial k / \partial z = 0$ 의 조건을 사용하였다.

2-방정식 난류모형은 식(3.4.81) 외에 난류 에너지 감쇄율 또는 난류의 특성길이에 관한 식 등의 두 식을 풀어 난류확산계수를 두 식에서 계산된 값으로 산출하는 것으로 본 연구에서는 난류에너지의 감쇄율에 관한 식을 대상으로 하였다. 난류에너지 감쇄율에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + V \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_v}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ & + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} v_v \left[\left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3.4.85)$$

본 연구에서는 이상의 식(3.4.81)과 (3.4.85)에서 나타난 상수로 다음의 값을 사용하였다.

$$\sigma_k=1.00, \quad \sigma_\varepsilon=1.30, \quad C_1=0.09, \quad C_{\varepsilon 1}=1.44, \quad C_{\varepsilon 2}=1.92 \quad (3.4.86)$$

이를 수치모형화 하기 위해 k-방정식과 같이 좌표변환을 실시하고 유한차분화하였으며, 경계조건으로 해저면에서는 $\varepsilon=0$ 또는 $\partial\varepsilon/\partial z=0$ 의 조건을 사용하였으며, 해수면에서는 전단력이 있을 때는 $\varepsilon=(U^*)^3/k/\Delta z$ 를 전단력이 없을 경우는 $\partial\varepsilon/\partial z=0$ 의 조건을 사용하였다. 여기서 Δz 는 경계로부터의 작은 거리이며 본 연구에서는 0.02d로 사용하였다.

6. 모델 계산

이상과 같이 수립된 본 수치모형의 적용성, 정확성 등을 검토하기 위해 기본적인 수치계산 검토과정을 거쳐 저층이안류에 대한 검증을 위해 Stive와 Wind (1986)의 수치모형실험에 적용 시험 계산을 실시하였다. 이 실험은 Fig.3.4.3에 보인 바와 같이 길이 55m, 폭 1m 및 깊이 1m의 wave flume에서 실시되었으며, 이 때 1:40의 경사를 갖는 concrete beach를 설치하였다. 이 실험에서 심해파 조건으로 환산된 입사파는 파고 0.159m, 주기 1.79초 였으며, 심해파 파랑경사 H_0/L_0 는 0.032 였다. 본 연구에서는 이 때 본 수치모형을 연직 2차원의 경우로만 국한시켜 적용하였고, 연직축은 선형좌표변환 방법을 적용하였으며, 20개의 가변격자로 나누었다. 또한 난류마감모형으로는 1방정식 모형을 사용하였다. 계산결과 해수위 변화, 파랑의 진폭 및 수심평균유속을 Fig. 3.4.4에 도시하였으며, 파랑발생장치로부터의 거리 36.5m, 39.5m 및 41.5m인 지점에서의 유속의 연직분포를

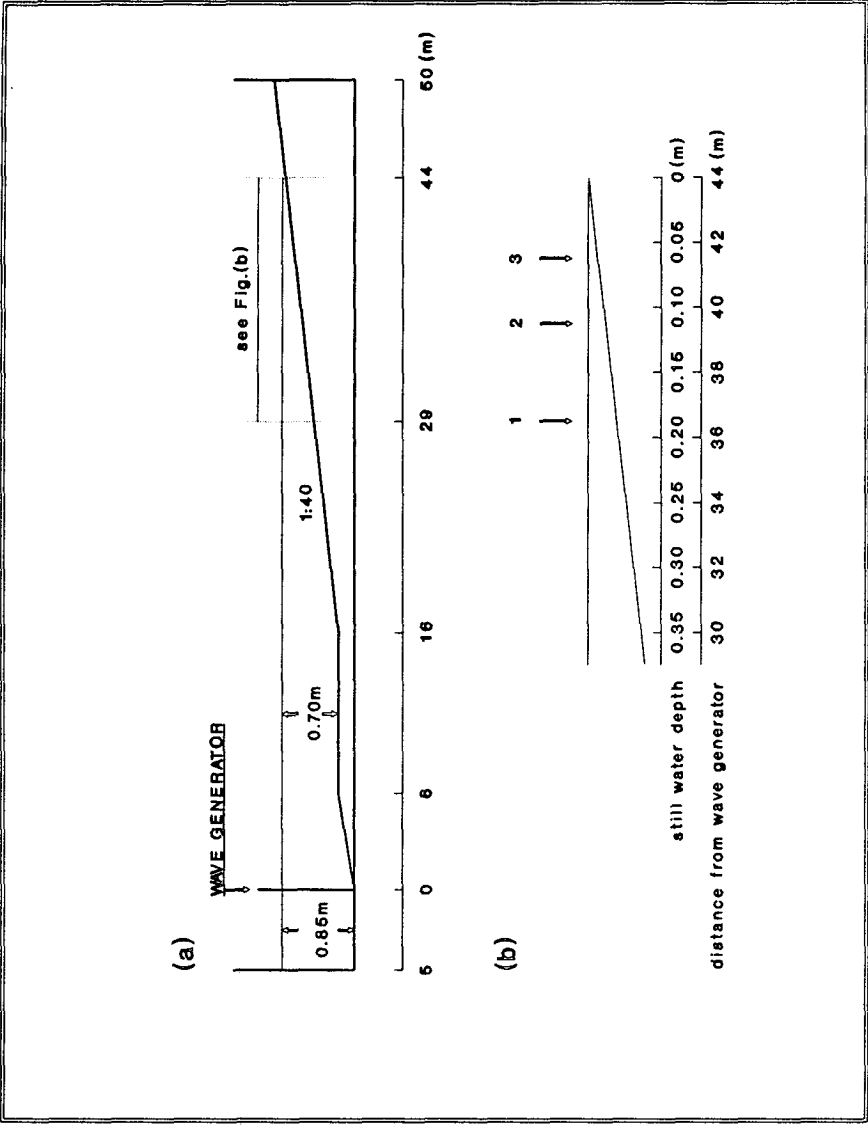


Fig. 3.4.3. Stive and Wind(1986) experimental set-up.

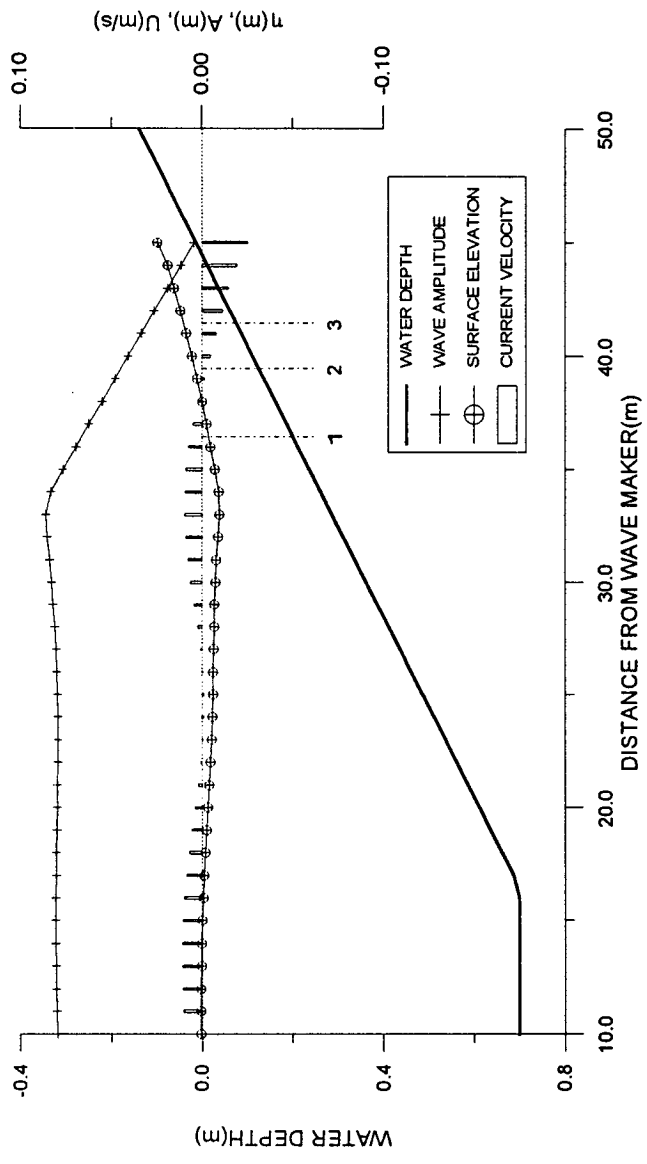


Fig. 3.4.4. Computed wave amplitude, surface elevation and depth-mean current.

Fig.3.4.5에 도시하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 해지면 근처에서 해안에서 외해 쪽으로 흐르는 저층이안류(undertow)를 상당한 정확도를 가지고 재현할 수는 있으나 실험치와는 상당한 차이를 보이기도 한다. 이는 본 수치모형이 쇄파대 내에서의 에너지 확산 및 혼합현상에 대한 재현에 약간의 문제점이 보여주는 것으로 판단된다. 또한 해지면 근처에서의 분해능이 떨어지는 것도 한 원인이 되는 것으로 판단된다. 현재 수립된 수치모형은 완성도면에서 아직 부족하여 실용화하기까지는 보완해야 할 점이 많으며, 현상 자체가 매우 복잡하고 고려해야 할 물리적 요소가 많아 차후로도 이에 대한 꾸준한 보완 연구가 필요하다. 특히 현재 비정상적인 값을 보이는 2-방정식 난류마감모형을 수정 보완하는 노력이 필요하다.

제5절 파랑류 연직분포 결정을 위한 점모형

본 연구에서 수립된 1-방정식 및 2-방정식 난류모형의 적용성을 검토하기 위해 별도의 점모형(point model)을 수립하였으며, 각각의 난류모형 기법에 대해 동일한 조건하에서 시험계산을 실시하고 상호 비교하였다.

1. 파랑류 운동방정식 및 수치계산식

파랑과 흐름이 공존할 때 경계층의 두께 δ_{wc} 가 저면 유효조도 보다는 크지만 수심에 비해 작은 ($\delta_{wc} \leq 1$, k 는 수면에서의 파수) 미소진폭파이며, Stokes조건 $kA_0 \leq 1$ (여기서 A_0 는 저면에서의 파랑에 의한 운동의 이동 진

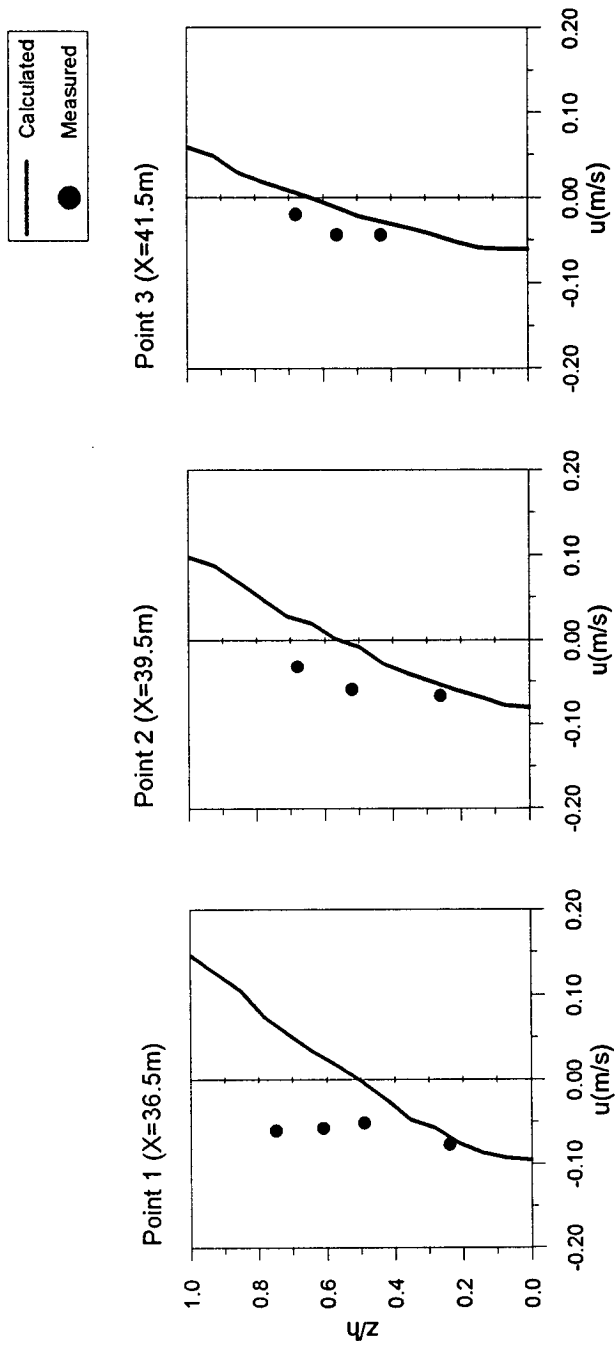


Fig. 3.4.5. Comparison of velocity profiles between the computed results and the measurements of Stive and Wind(1986).

폭)을 만족시킨다고 가정하면 운동량 보존식에서 이류가속항을 무시하고 선형 운동량 보존식을 사용할 수 있다(Davies et al, 1988). 즉,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zx}/\rho) \quad (3.5.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zy}/\rho) \quad (3.5.2)$$

여기서,

- t : 시간
- x, y : 평면상의 동향, 북향 직교좌표
- u, v : 수심 z에서의 x, y방향 유속성분
- ρ : 밀도
- p : 외부에서 가해지는 압력
- τ_{zx}, τ_{zy} : x, y 방향 전단응력

수평전단응력을 와점성계수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_{zx}/\rho = N \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3.5.3)$$

$$\tau_{zy}/\rho = N \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.5.4)$$

여기서 N은 연직방향 확산계수이다. 압력경사항은 파랑운동을 일으키는 외력으로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{dU_x}{dt}, \quad U_x = U_o \sin\phi \cos(\sigma t) \quad (3.5.5)$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{dU_y}{dt}, \quad U_y = U_o \sin\phi \cos(\sigma t) \quad (3.5.6)$$

여기서 U_o 는 회귀운동의 진폭 A_o (Excursion Amplitude)와 $U_o = A_o \gamma$ 의 관계를 가지며, σ 는 각속도, p는 기지값으로 주어지는 압력, ϕ 는 파랑 진행 방향이 y축과 이루는 각도이다.

경계조건으로 해수면에서는 작용응력이 없다는 조건, 즉

$$N \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \quad N \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (3.5.7)$$

그리고 해저면에서는 no-slip조건을 이용한다.

$$u=0, \quad v=0, \quad \text{at } z=z_0 \quad (3.5.8)$$

여기서 z_0 는 조도 계수이다.

일반적으로 대상해역의 수심이 공간적으로 일정치 않기 때문에 모든 수평격자점에서 동일한 연직방향 격자수를 갖기 위해서는 연직좌표 변환이 필요하다. 나아가 해저면 근처에서의 유속분포가 중요하므로 이 영역에 대한 향상된 분해능이 필요하다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{N}{\alpha} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (3.5.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{N}{\alpha} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \quad (3.5.10)$$

여기서,

$$\sigma = z_0 x e^{xz}, \quad x = \ln(z/z_0) \quad (3.5.11)$$

또한, 해수면에서의 경계조건을 σ -좌표계로 변환하면, 식(3.5.7)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\left(N \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)_{\sigma=0} = 0, \quad \left(N \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)_{\sigma=1} = 0 \quad (3.5.12)$$

No-slip 조건은 다음과 같다.

$$u = v = 0 \quad \text{at } \sigma = 0 \quad (3.5.13)$$

2. 유한차분식

이상의 기본방정식과 경계조건을 이용하여 음해법인 Crank-Nicolson 유한차분법을 Fig.3.5.1에서와 같은 연직방향 Staggered 격자에 대해 적용하면 각각 다음의 유한차분식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & (U_k^{t+\Delta t} - U_k^t) / \Delta t \\
 &= \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{t+\theta_1 \Delta t} + \frac{\theta_1 W_k}{\Delta \sigma^2} \{ N_k^t \bar{W}_k \delta U_{k+1}^{t+\Delta t} - N_{k-1}^t \bar{W}_{k-1} \delta U_k^{t+\Delta t} \} \\
 & \quad + \frac{\theta_2 W_k}{\Delta \sigma^2} \{ N_k^t \bar{W}_k \delta U_{k+1}^t - N_{k-1}^t \bar{W}_{k-1} \delta U_k^t \} \quad (3.5.14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (V_k^{t+\Delta t} - V_k^t) / \Delta t \\
 &= \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \right)^{t+\theta_1 \Delta t} + \frac{\theta_1 W_k}{\Delta \sigma^2} \{ N_k^t \bar{W}_k \delta V_{k+1}^{t+\Delta t} - N_{k-1}^t \bar{W}_{k-1} \delta V_k^{t+\Delta t} \} \\
 & \quad + \frac{\theta_2 W_k}{\Delta \sigma^2} \{ N_k^t \bar{W}_k \delta V_{k+1}^t - N_{k-1}^t \bar{W}_{k-1} \delta V_k^t \} \quad (3.5.15)
 \end{aligned}$$

여기서, 아래첨자 k 는 변수가 정의되는 연직층, 윗첨자 $t, t+\Delta t$ 는 계산시간이다. 그리고

$\Delta \sigma$: 연직격자간격

Δt : 계산시간간격

$$\delta U_k : \text{층간유속차} (= U_k - U_{k-1}) \quad (3.5.16)$$

$$W_k : \text{상수} (= 1/a, \text{ evaluated at } U\text{-grid point } k) \quad (3.5.17)$$

$$\bar{W}_k : \text{상수} (= 1/a, \text{ evaluated at the mid-point between } u\text{-grid points } (k+1) \text{ and } k) \quad (3.5.18)$$

이다.

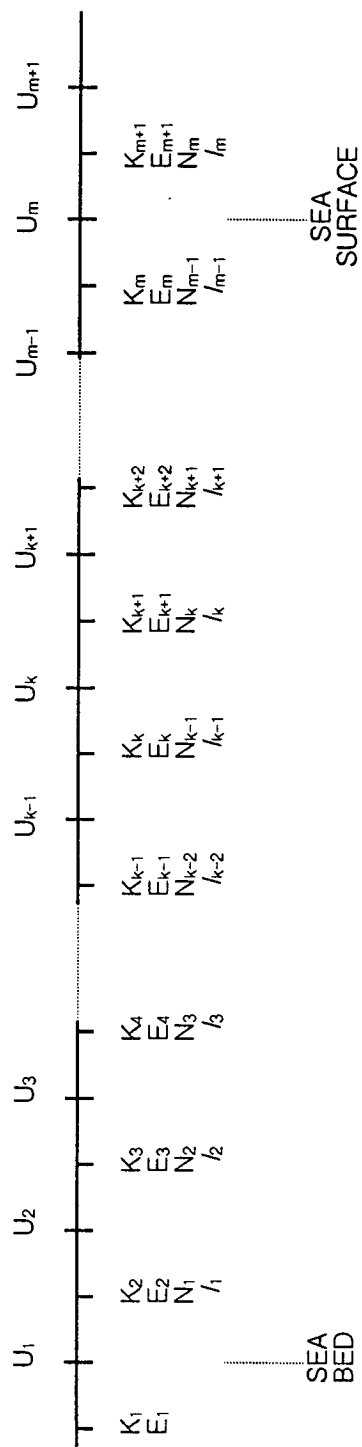


Fig. 3.5.1. Staggered grid system of the grid-box model.

시간가중치 θ_1 은 $0 \leq \theta_1 \leq 1$ 의 값을 가지며, $\theta_2 = 1 - \theta_1$ 으로 Crank-Nicolson기법에서 $\theta_1=0.5$ 이면 time-centered된 형태가 된다. $\theta_1=0$ 이면 양해 유한차분식이 되며, 전단응력이 큰 해저면에서 적당한 분해능을 얻기 위해서는 0.005m 정도의 연직 격자 간격이 필요하다. 이때 $\varepsilon=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$ 라면 수치적으로 안정된 해를 구하기 위해서는 0.0025초 정도의 계산 시간 간격이 요구된다. θ_1 이 0이 아닌 경우, 음해 차분식이 되면서($\theta_1=1$ 이면 완전 음해법, $\theta_1=0.5$ 이면 반음해법이 된다) 수치적으로 무조건적인 안정을 얻을 수 있다. 이 때 한 행에 대각선 방향으로 세개의 요소를 갖춘 행렬식을 얻게 된다. 즉, 식(3.5.14)의 경우 구성되는 연립방정식은 다음과 같다.

$$A_k^{n+1} U_k^{n+1} + B_k^{n+1} U_k^{n+1} + C_k^{n+1} U_{k-1}^{n+1} = D_k^n \quad , k = 1, \dots, m \quad (3.5.19)$$

여기서 $A_k^{n+1}, B_k^{n+1}, C_k^{n+1}, D_k^{n+1}$ 은 기지의 값으로 Thomas algorithm으로 해석된다.

$$A_k = -\alpha N_k^t \bar{W}_k \quad (3.5.20)$$

$$B_k = 1 + \alpha N_k^t \bar{W}_k + \alpha N_{k-1}^t \bar{W}_{k-1} \quad (3.5.21)$$

$$C_k = -\alpha N_{k-1}^t \bar{W}_{k-1} \quad (3.5.22)$$

$$D_k = -U_k^t + \Delta t \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \right)^{t+\theta_1 \Delta t} \quad (3.5.23)$$

$$+ \beta \cdot \{ N_k^t \bar{W}_k (U_{k+1}^t - U_k^t) - N_{k-1}^t \bar{W}_{k-1} (U_k^t - U_{k-1}^t) \}$$

여기서,

$$\alpha = \frac{\Delta t}{\Delta \sigma^2} \cdot \theta_1 W_k, \quad \beta = \frac{\Delta t}{\Delta \sigma^2} \cdot \theta_2 W_k \quad (3.5.24)$$

y방향 운동방정식도 유사한 방법으로 정의되며 편의상 생략한다.

해수면 경계조건은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$U_{m+1} = U_m \quad (3.5.25)$$

그리고 해저면에서

$$U_1 = 0 \quad (3.5.26)$$

로 고정된다.

3. 난류모델 및 수치계산식

가. 0-방정식(0-equation) 난류모델

0-방정식 난류모델은 난류확산계수 개념에 근거하며 시간평균유속 분포 결정에만 미분방정식이 사용되며 난류시스템에 대한 미분방정식은 사용하지 않는다. 주로 해저면 마찰력에 의해 난류혼합이 일어나는 것으로 가정하고 마찰유속과 평균유속간의 선형관계를 가정한다. 천해역에서 사용되는 표현은 다양하나 본연구에서는 다음 두가지가 고려된다.

◦ Bowden *et al.* (1959)

$$N_1 = 0.0025 h |U| \quad , \quad h_1 \leq z \leq h \quad (3.5.27)$$

$$N_0 = k_0 u_* z_0 \quad , \quad 0 \leq z \leq h_1 \quad (3.5.28)$$

여기서

N_1 : 해저경계층 상부의 난류 확산계수

N_0 : 해저경계면내 난류 확산계수

U : 경계층 상부의 조류속

h_1 : 해저경계층 두께 ($\sim 0.1 h$ 또는 $0.2 h$)

k_0 : von Karman 계수 (= 0.4)

u_* : 해저마찰 유속($\sim 2 - 4$ cm/s)

z_0 : 조도계수 (0.01 - 0.001 m)

◦ Davies and Furnes(1980)

$$N_1 = kU^2/\sigma \quad (3.5.29)$$

여기서 $k = 2.0 \times 10^{-5}$, $\sigma = 10^{-4} s^{-1}$ 이다.

나. 1-방정식 난류모델

1-방정식 난류모델 역시 난류확산계수 개념에 근거한다. 난류에너지 결정에 미분방정식이 도입된다.

$$\frac{\partial K}{\partial t} = N \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial z} \left(N \frac{\partial K}{\partial z} \right) - \varepsilon \quad (3.5.30)$$

여기서, K : 난류에너지

N : 난류확산계수

ε : 난류에너지 감쇄율

σ_k : 난류 Prandtl 수

파랑류에서 난류에너지에 대한 해수표면, 해저면 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{dK}{dz} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{dK}{dz} \Big|_{z=z_0} = 0 \quad (3.5.31)$$

유속, 난류에너지, 확산계수 및 혼합길이 분포외에 모델계산으로 얻어지는 정보로 임의의 연직위치에서의 전단력은 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_x = \rho N \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \tau_y = \rho N \frac{\partial v}{\partial z} \quad (3.5.32)$$

식 (3.5.30)에서 난류에너지 감쇄율은 K 와 l 로써 정의된다. 즉,

$$\varepsilon = C_1 K^{3/2} / l \quad (3.5.33)$$

난류확산계수는 다음과 같이 표시된다.

$$N = C_1 K^2 / \varepsilon \quad (3.5.34)$$

상수 σ_k , C_1 값들은 다양한 방법으로 정의되나 본연구에서는 각각 1.0과 0.09로 정의하였다.

혼합거리 l 에 대한 준경험적 표현 중 가장 간단한 표현은 해저면으로부터의 높이에 따라 선형적으로 혼합거리가 증가한다는 개념이다. 즉,

$$l = k(z_0 + z) \quad (3.5.35)$$

여기서, $k=0.4$, z_0 는 roughness height이다. 본연구에서는 Blackadar (1962)의 혼합거리식을 사용하였다.

$$l = \frac{kz}{1 + kz/l_0} \quad (3.5.36)$$

여기서,

$$l_0 = \gamma \int_{z_0}^h K^{1/2} z dz / \int_{z_0}^h K^{1/2} dz \quad (3.5.37)$$

그리고 γ 는 상수로 0.1-0.4의 값을 갖는다.

운동방정식의 경우와 마찬가지로 식(3.5.30)의 연직축을 Log변환하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \frac{N}{x^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{1}{\sigma_k} \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{N}{x} \frac{\partial K}{\partial \sigma} \right) - \varepsilon \quad (3.5.38)$$

변환된 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial K}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=1} = 0, \quad \frac{\partial K}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=0} = 0 \quad (3.5.39)$$

운동방정식의 경우와 마찬가지로 음해법인 Crank-Nicolson 유한 차분법을 연직방향 staggered 격자에 대해 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{K_k^{n+1} - K_k^n}{\Delta t} &= N_{k-1}^n \overline{W}_{k-1}^2 \{ (\gamma_1 \delta u_k^{n+1} + \gamma_2 \delta u_k^n)^2 + (\gamma_1 \delta v_k^{n+1} + \gamma_2 \delta v_k^n)^2 \} / \Delta \sigma^2 \\ &+ \frac{\theta_1}{\sigma_k} \frac{\overline{W}_{k-1}}{\Delta \sigma^2} \left\{ W_k \frac{N_k^n + N_{k-1}^n}{2} \delta K_k^{n+1} - W_{k-1} \frac{N_{k-1}^n + N_{k-2}^n}{2} \delta K_{k-1}^{n+1} \right\} \\ &+ \frac{\theta_2}{\sigma_k} \frac{\overline{W}_{k-1}}{\Delta \sigma^2} \left\{ W_k \frac{N_k^n + N_{k-1}^n}{2} \delta K_k^n - W_{k-1} \frac{N_{k-1}^n + N_{k-2}^n}{2} \delta K_{k-1}^n \right\} \end{aligned} \quad (3.5.40)$$

여기서,

$$\delta K_k = K_{k+1} - K_k \quad (3.5.41)$$

상수 γ_1, γ_2 는 다음의 관계를 가진다.

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= 1 - \gamma_1 \\ 0 &\leq \gamma_1 \leq 1 \end{aligned} \quad (3.5.42)$$

감쇄율계수는 다음 식으로 산출하였다.

$$\varepsilon = C_1 \{ 2K_k^{t+\Delta t} K_k^t - (K_k^t)^2 \} / (N_{k-1}^t) \quad (3.5.43)$$

다. 2-방정식 난류모델

2-방정식 난류모형은 식(3.5.30)의 난류에너지 방정식과 함께 난류에너

지 감쇄율에 대한 방정식을 동시에 풀고, 이들의 해를 이용하여 식(3.5.33)과 (3.5.34)의 관계를 이용하여 난류확산계수 및 난류혼합거리를 산출하는 것이다. 난류에너지 감쇄율에 대한 미분방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_{D1} \frac{\varepsilon}{K} N \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{N}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial K}{\partial z} \right) - C_{D2} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (3.5.44)$$

파랑류에서 난류에너지 감쇄율에 대한 해수면, 해저면 경계조건은 다음과 같다.

$$\left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad \varepsilon(z_0, t) = C_1^{3/4} \frac{K^{3/2}}{K z_0} \quad (3.5.45)$$

이 식에서 필요한 상수값으로 본연구에서는 다음의 상수값을 사용하였다.

$$C_1 = 0.09, \quad C_{D1} = 1.44, \quad C_{D2} = 1.92, \quad \sigma_k = 1.00, \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad (3.5.46)$$

k-방정식의 경우와 마찬가지로 식(3.5.44)의 연직축을 Log변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & C_{D1} \frac{\varepsilon}{K} \frac{N}{x^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] \\ & + \frac{1}{\sigma_\varepsilon} \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{N}{x} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) - C_{D2} \frac{\varepsilon^2}{K} \end{aligned} \quad (3.5.47)$$

k-방정식의 경우와 마찬가지로 음해법인 Crank-Nicolson 유한 차분법을 연직방향 staggered 격자에 대해 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{\varepsilon_k^{n+1} - \varepsilon_k^n}{\Delta t} = & C_{D1} \frac{(\theta_1 \varepsilon_k^{t+\Delta t} + \theta_2 \varepsilon_k^t)}{(\theta_1 K_k^{t+\Delta t} + \theta_2 K_k^t)} \frac{N_{k-1}^n \bar{W}_{k-1}^2}{\Delta \sigma^2} \cdot \\
& \{ (\gamma_1 \delta u_k^{n+1} + \gamma_2 \delta u_k^n)^2 + (\gamma_1 \delta v_k^{n+1} + \gamma_2 \delta v_k^n)^2 \} \\
& + \frac{\theta_1}{\sigma_k} \frac{\bar{W}_{k-1}}{\Delta \sigma^2} \left\{ W_k \frac{N_k^n + N_{k-1}^n}{2} \delta \varepsilon_k^{n+1} - W_{k-1} \frac{N_{k-1}^n + N_{k-2}^n}{2} \delta \varepsilon_{k-1}^{n+1} \right\} \\
& + \frac{\theta_2}{\sigma_k} \frac{\bar{W}_{k-1}}{\Delta \sigma^2} \left\{ W_k \frac{N_k^n + N_{k-1}^n}{2} \delta \varepsilon_k^n - W_{k-1} \frac{N_{k-1}^n + N_{k-2}^n}{2} \delta \varepsilon_{k-1}^n \right\} \\
& - C_{D2} \frac{\varepsilon^2}{K}
\end{aligned} \tag{3.5.48}$$

여기서,

$$\delta \varepsilon_k = \varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k \tag{3.5.49}$$

4. 모델 계산

이상과 같이 수립된 수치모형을 이용하여 주기 8초인 파랑이 10m의 수심에 전파했을 경우에 대해 수반되는 유속과 전단응력을 계산하였다. 연직방향격자수는 50개로 하였으며, 로그변환 σ -좌표계상에서 실시하였다. 조도계수 $z_0 = 0.001 m$, $z_* = 2.0 m$ 를 사용하였으며, 시간 증분 $\Delta t = 0.05$ 초로, $\theta_1 = 0.5$ 로 1,600회 반복계산을 하였다. 0-방정식 난류모형의 경우 와점성 계수는 해저면의 $0.005 m^2/s$ 에서 수심 2m의 $0.1 m^2/s$ 까지 선형적으로 증가하며, 그 이상의 수심에서는 일정한 값 $0.1 m^2/s$ 를 갖는 것으로 가정하였다. 계산 초기조건으로 유속은 0 으로 주어지나 난류확산계수, 난류에너지, 혼합길이 등은 계산초기 0 보다 작아지는 것을 방지하기 위해 10^{-6} 크기의 작은 값으로 가정되었다. 0-, 1-, 2-방정식 난류모델에 대해 대수변환좌표를 이용하여 계산한 결과를 Figs. 3.5.2 - 3.5.4에 도시하였다. 각 그림은 1파랑주기 동안 0.8초간격으로 계산된 수심에 따른 연직분포이

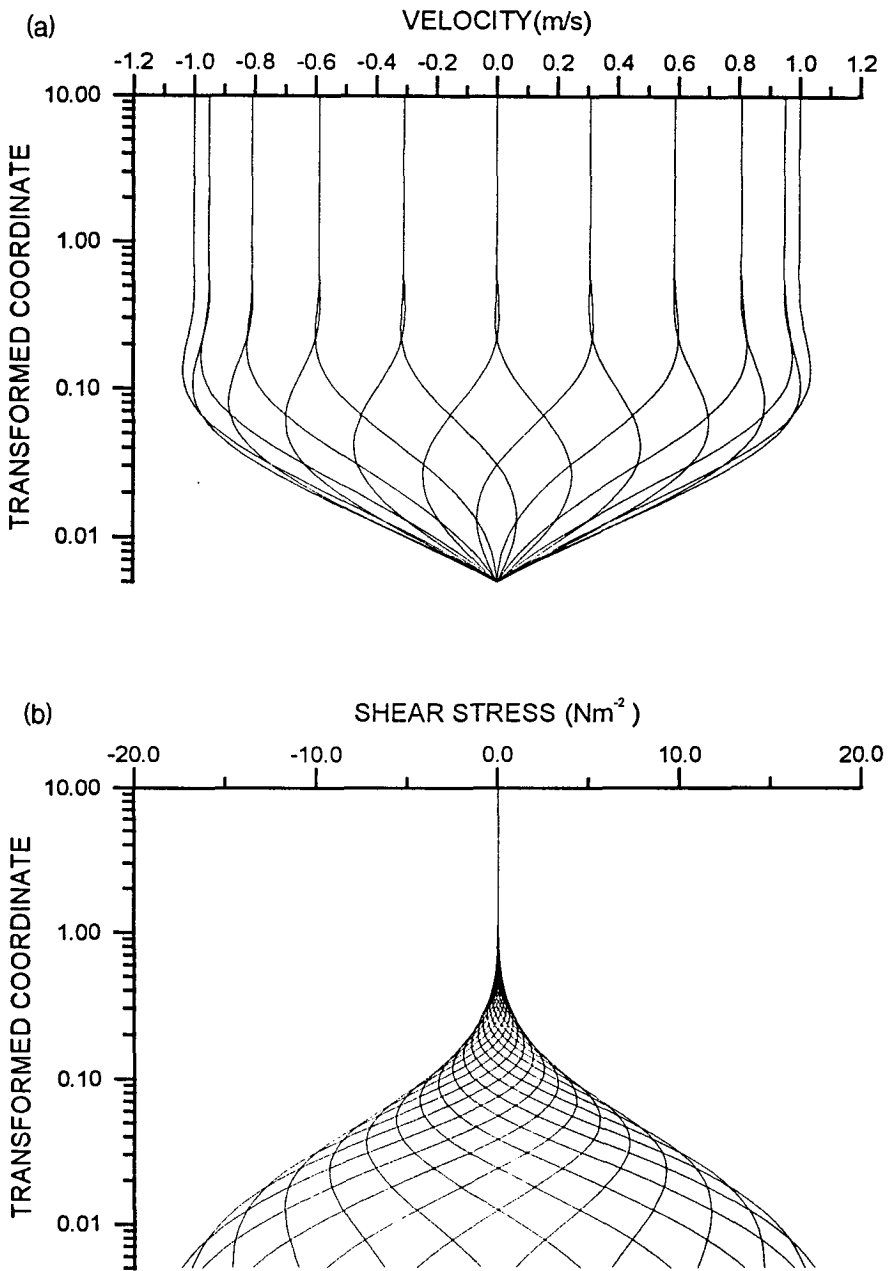


Fig. 3.5.2. Variation of the computed vertical profiles of (a) velocity and (b) shear stress during one wave period using zero-equation turbulence closure model.

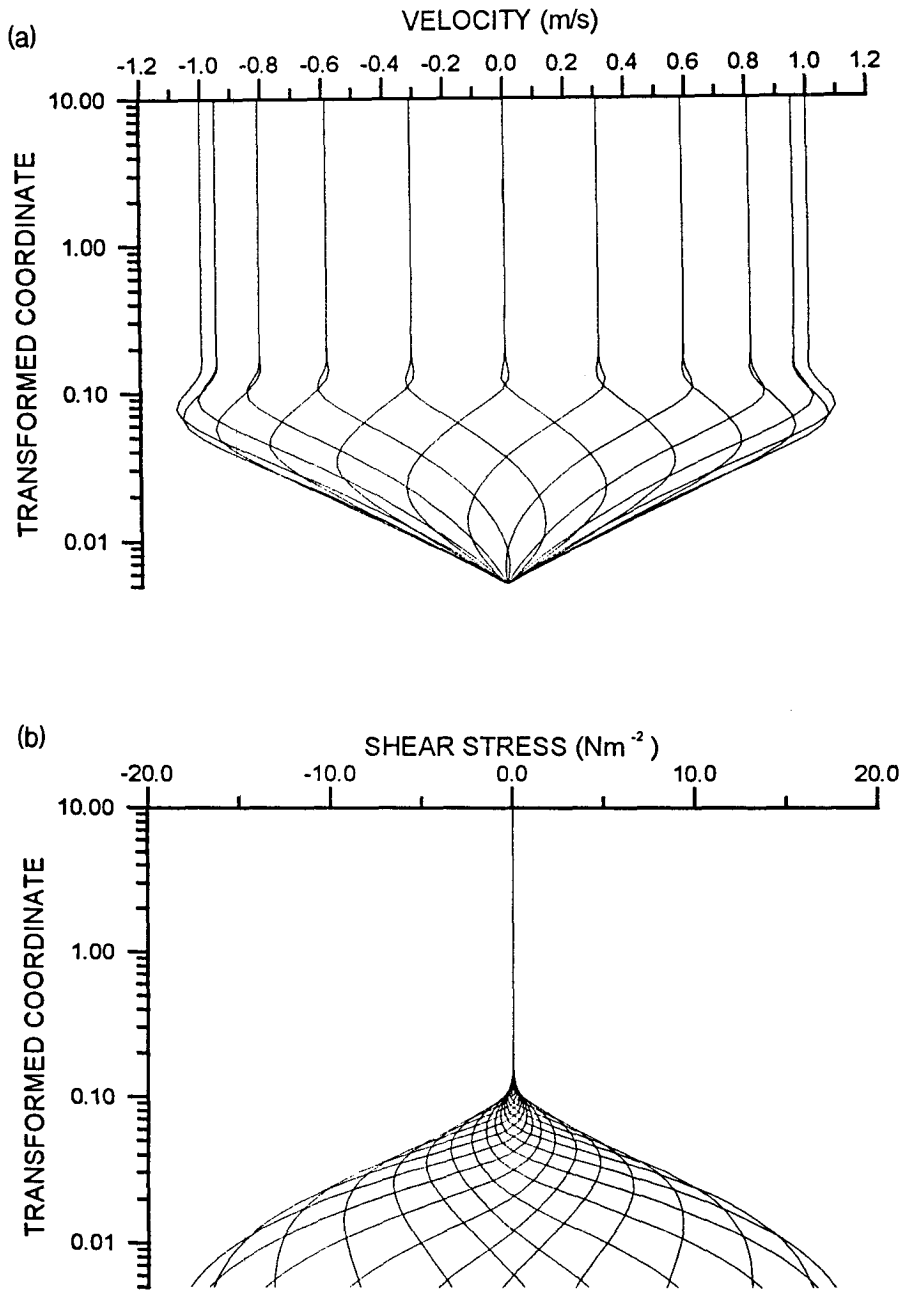


Fig. 3.5.3. Variation of the computed vertical profiles of (a) velocity, (b) shear stress, (c) turbulence kinetic energy, (d) turbulence kinetic energy dissipation rate, (e) turbulence viscosity, and (f) mixing length during one wave period using one-equation turbulence closure model.

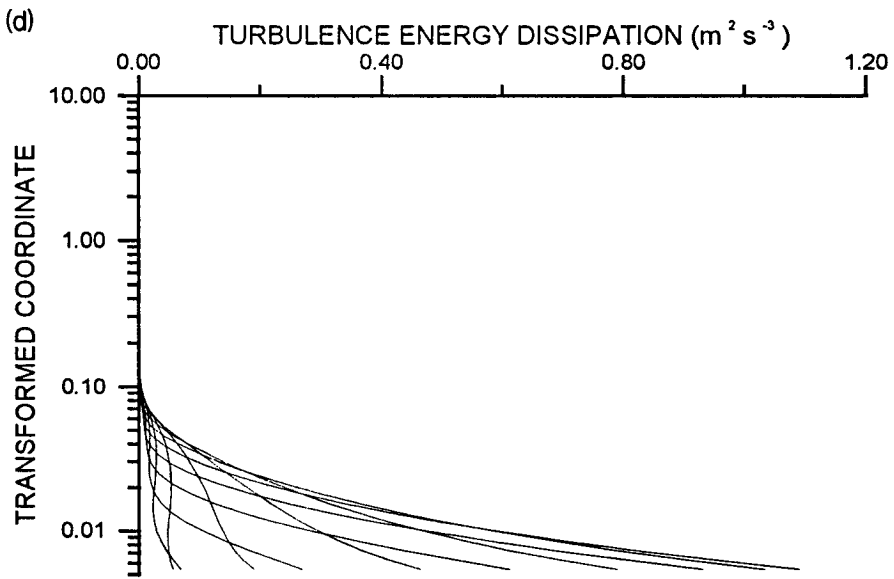
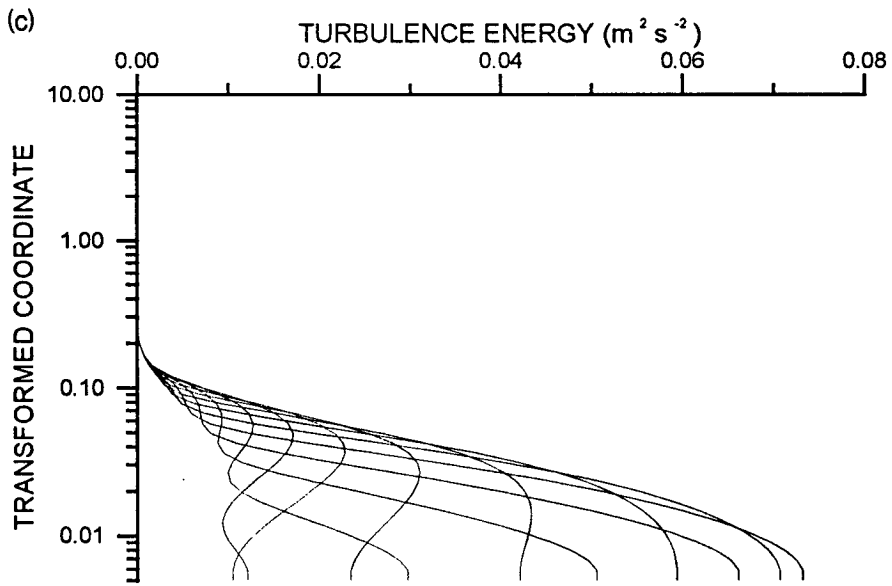


Fig. 3.5.3 (Cont'd)

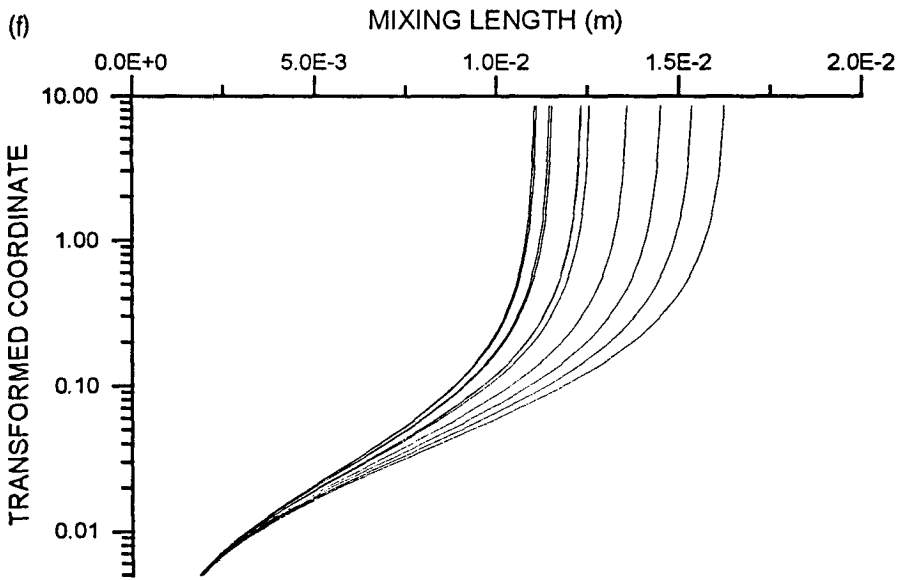
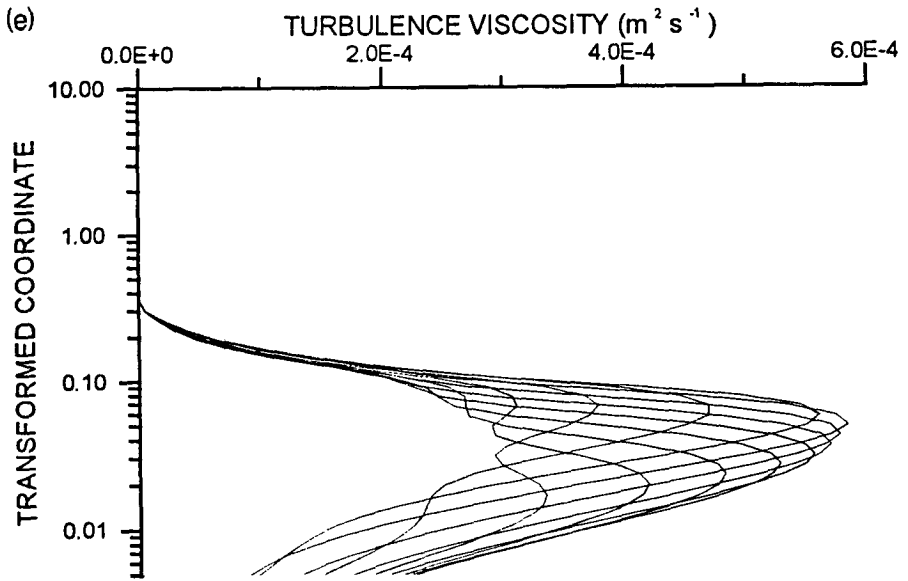


Fig. 3.5.3 (Cont'd)

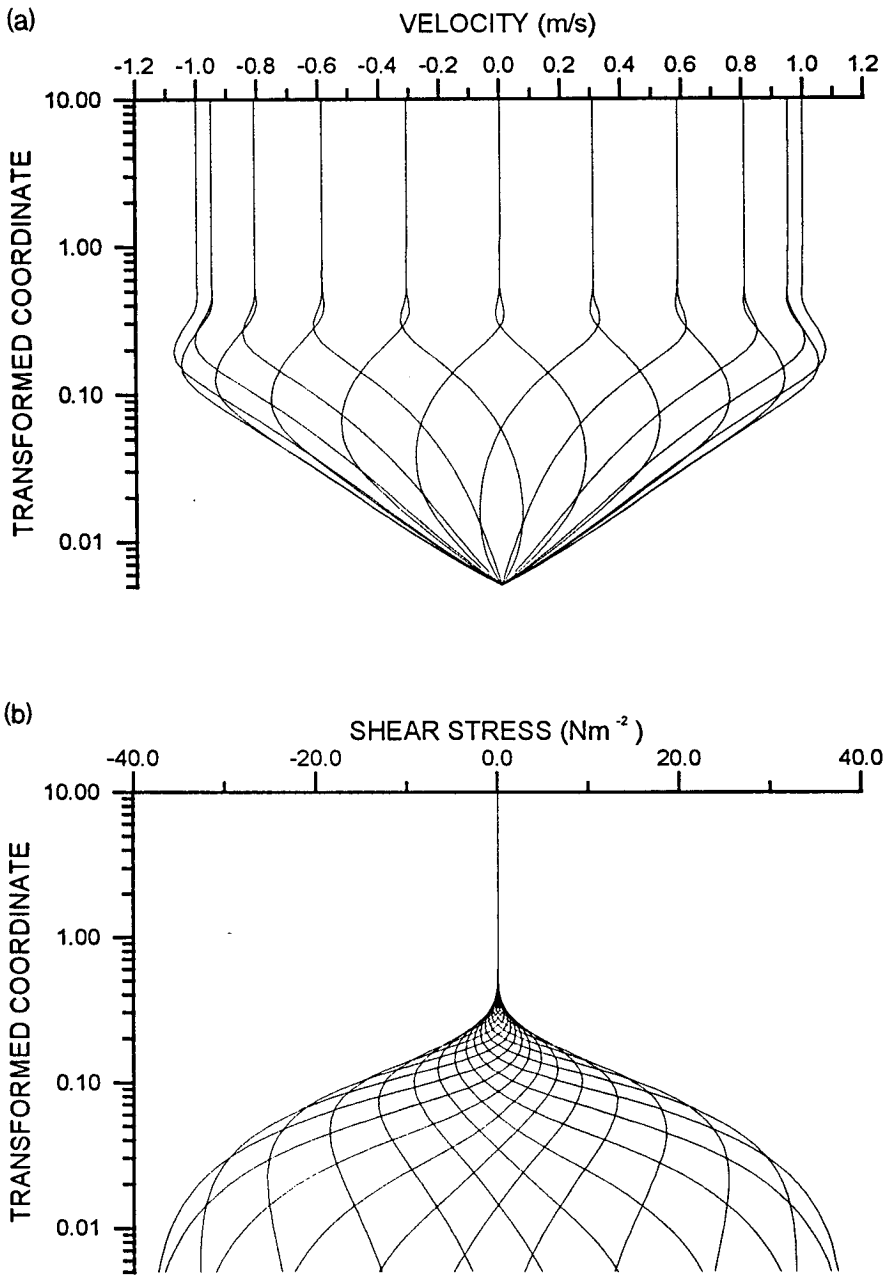


Fig. 3.5.4. Variation of the computed vertical profiles of (a) velocity, (b) shear stress, (c) turbulence kinetic energy, (d) turbulence kinetic energy dissipation rate, (e) turbulence viscosity, and (f) mixing length during one wave period using two-equation turbulence closure model.

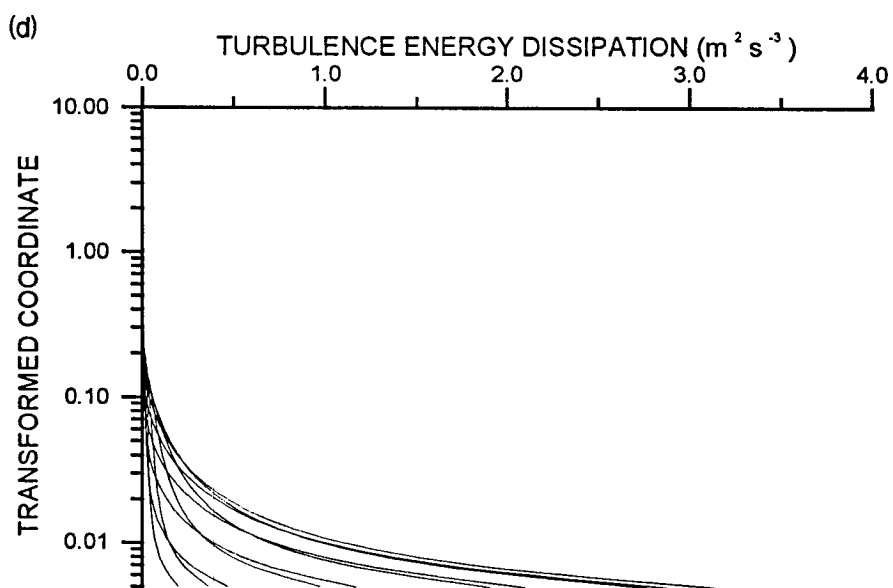
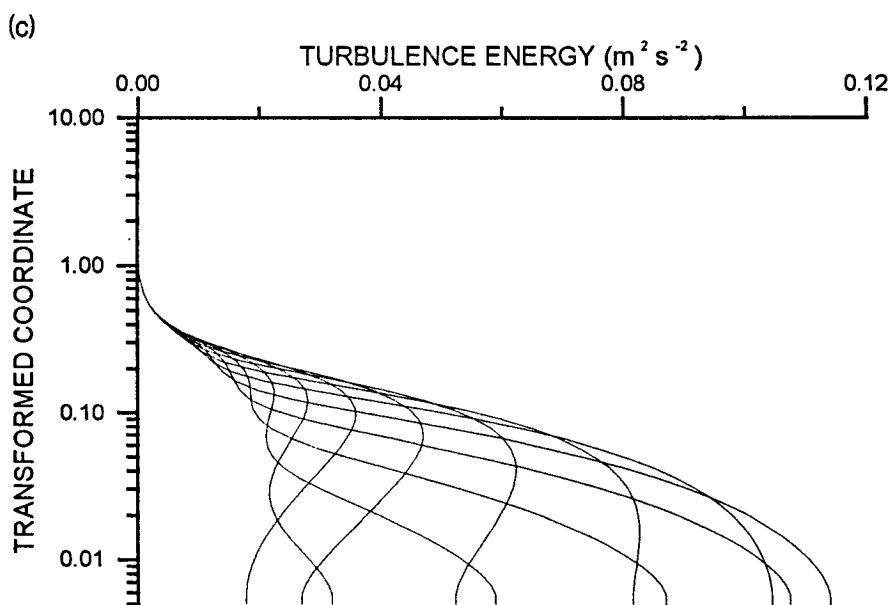


Fig. 3.5.4 (Cont'd)

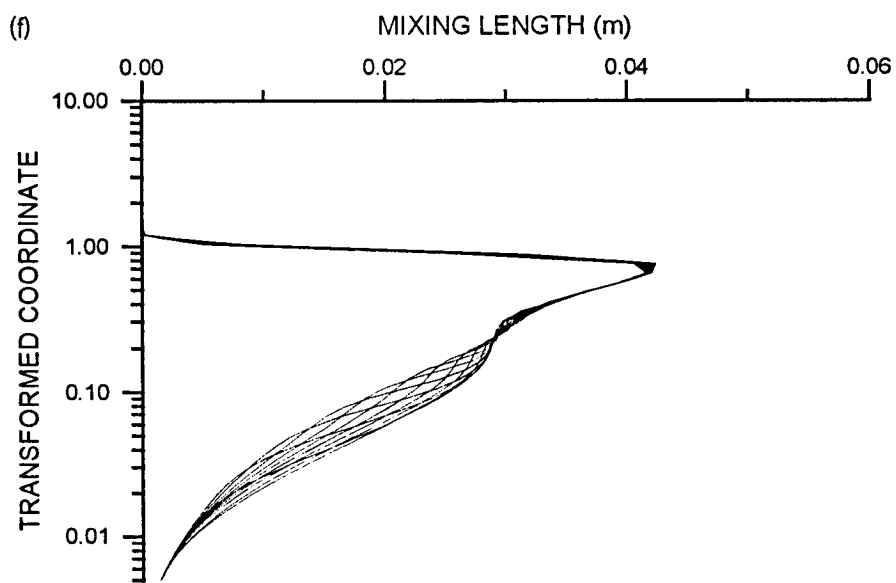
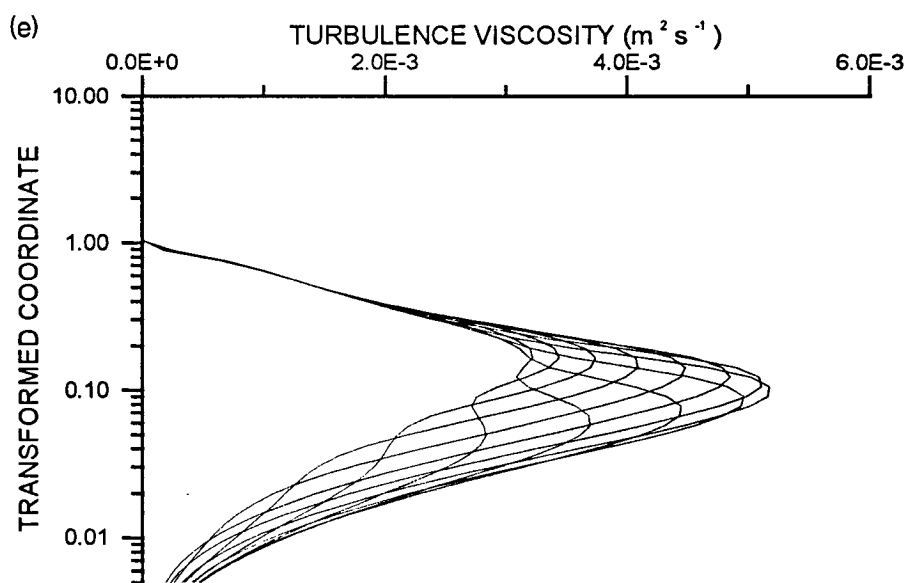


Fig. 3.5.4 (Cont'd)

다. 짧은 주기의 파랑류에 의해 형성되는 해저 경계층의 두께는 조류에 상대적으로 매우 작다. 따라서 이상의 그림 중 유속 분포의 그림을 보면 0-방정식과 1-방정식 모형의 경우 0.2m정도에서 경계층이 형성되나 2-방정식 모형의 경우 0.3m정도에서 경계층이 형성되는 것으로 나타나 약간의 차이를 보이며, 1-방정식과 2-방정식 모형의 경우에 대해 도시한 난류에너지, 난류에너지 감쇄율, 난류확산계수 및 난류혼합거리 등에 대한 그림에서도 약간씩 상이하게 나타남을 알 수 있다. 이는 주로 에너지 감쇄율 계산 과정에서 해저면 경계치의 영향으로 보이며 이에 대한 자세한 수치실험 및 분석이 요구된다 하겠다. 본 수치모형은 그 목적상 파랑의 경계층내에서의 흐름을 파악하고, 1-방정식 및 2-방정식 난류모형의 수립 및 그 적용성 확보에 있으므로 본 연구의 목적은 어느 정도 달성되었다고 할 수 있으나 차후 여러가지 경계조건 및 적용상수에 대한 수치실험 및 수치실험 결과의 자세한 분석 등이 따라야 할 것으로 판단된다.

제6절 결론 및 토의

파랑에 의한 해수순환 현상은 저층이안류 등의 3차원적 구조를 가지고 있어 평면 2차원 수치모형으로 재현 또는 예측할 수 없는 현상을 보이므로, 임의의 지형에 제약없이 사용할 수 있는 파랑에 의한 연안역 해수순환 수치모형으로 3차원 모형의 개발 및 수립이 시급히 요구된다. 특히 해저퇴적물이동 현상을 재현하기 위해서는 그 역할이 더욱 두드러진다. 본 연구에서는 연중 비교적 큰 파랑에 노출되어 있고, 해저퇴적물이 주로 사질로 구성되어 있는 동해안의 항만 및 해안의 파랑류에 의한 해저퇴적물이동현상을 파악하기 위하여 3차원 연안역해수순환 수치모형을 수립하였다.

3차원 해수순환 수치모형은 크게 파랑장 계산 부분, 흐름장 계산 부분 및 난류마감부분의 3부분으로 나누어지며, 파랑장 계산부분을 위해 수치모형 HCORD를 보완하였다. 그러나 이 모형은 적은 격자크기와 적은 계산시간 증분이 요구되어 그 정확도 및 임의의 반사율을 고려할 수 있는 적용성에도 불구하고 본 수치모형과 결합하기는 문제점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 수치모형 WINC2D에서 사용된 파랑장 계산부분을 그대로 이용하였으며, 흐름장 계산부분은 임의의 지형에 적용하기 편리하도록 연직축을 변환하였으며, 시간분리기법을 채용하여 계산시간을 줄일 수 있도록 하였다. 또한 계산의 편의를 위하여 3단계의 계산단계로 나누어 풀도록 하였으며, 수치기법으로는 연직확산단계는 음해법을 적용하여 계산시간 간격에 문제가 없도록 하였으며, 수평이류단계는 Angled Derivative Scheme을, 수평확산단계는 양해 유한차분법을 각각 적용하여 유한차분화 하였다. 또한 난류마감부분을 위하여 1-방정식 및 2-방정식 난류마감모형을 채용하여 수치모형화 하였으며, 이의 적용성 및 정확도 검토를 위해 별도로 점모형을 수립하여 시험계산을 실시하였다. 수치모형의 적용성 및 정확도를 검토하기 위해 해안-이안류를 대상으로 연직2차원 수치모형실험에 적용하여 그 결과를 비교하여 보았으며, 공학적 활용을 위해 충분한 정도의 적용성을 가짐을 확인하였으나 실제 문제에 적용하기 위해서는 많은 개선점 또한 필요하다는 것이 노출되었다. 특히 쇄파대에서의 쇄파에 의한 에너지 감쇄 및 난류의 생성 등에 관한 다양한 경계조건 및 경험상수 등을 이용한 수치모형실험이 요구되며, 그 계산결과를 정밀하게 분석하여 특정지역에 알맞는 값을 찾아내는 것 또한 차후의 중요한 연구과제라 할 수 있다.

이상의 3차원 수치모형과는 별도로 평면 2차원 수치모형 WINC2D를 개선 보완하였으며, 특히 방파제 주변에서의 회절 문제를 적절한 수치기법에 의해 개선하였다. 이와 같은 평면2차원 수치모형은 3차원 모형에 비해 계산시간이 적게 소요되고, 적용이 간편하기 때문에 대략적인 경향 파악 또는 장기간에 걸친 해저지형변화 재현에 유용하게 사용할 수 있는 등 공학적 활용을 위해서는 그 역할이 중요하다 할 수 있다. 또한 이 결과를 적절한 방법으로 간단한 점모형을 이용하여 3차원 흐름장으로 환산할 수 있으므로 그 정확도는 떨어지나 적은 계산시간으로 효과적으로 사용할 수도 있다. 본연구에서는 이와 같이 개선된 수치모형을 본연구의 기준모형항만인 죽변항 및 인근해역에 적용하여 그 정확도와 적용성을 확인하였으며, 그 실용성을 확보하였다.

본 연구의 주목적이 파랑에 의한 해저퇴적물이동 현상을 재현하기 위한 수치모형 시스템을 수립하는 점을 감안하면 본연구를 통하여 수립된 수치모형은 부분적으로 미흡하기는 하나 공학적 적용성 및 신뢰성은 대체로 만족할 만한 것으로 판단되나, 그 범용성, 경제성 및 신뢰성을 더욱 높이기 위해서는 그리고 특정지역에 맞는 경험상수 등의 도출 등을 위해서는 앞으로 꾸준한 연구를 통한 수정 및 보완과정이 요구되며, 충분한 현장관측자료 또는 수치모형실험자료와의 비교 검토하는 연구도 필요하다. 또한 본연구를 통하여 수립된 점모형의 연구결과를 이용하여 본 3차원 수치모형을 조정 검증하는 연구도 필요하며, 점모형 자체도 개선 보완을 통하여 평면2차원 수치모형의 보완적 기능을 할 수 있도록 하는 연구도 요망된다.

제 4장 사질퇴적물이동 수치모형

제1절 서 론

연안역에 구조물을 건설하면 많은 경우 퇴적 또는 침식으로 인한 문제가 발생한다. 항내나 항만의 접근수로가 퇴적되어 유지준설을 필요로 한다. 퇴적이 두드러지는 구조물 인근해역과는 달리, 해안선은 구조물이 건설되기 전 장기간에 걸쳐 도달한 자연의 평형상태가 구조물 건설로 인해 파괴되어 해안선이 전진(퇴적)하거나 후퇴(침식)하는 곳이 발생한다. 이러한 문제를 예측하여 사전에 적절한 대책을 수립하는 것이 필요하다. 연안에서의 퇴적물이동 현상은 대상해역의 해저퇴적물의 분포와 수리적 환경, 주변으로부터의 퇴적물 공급상태에 따라 매우 다양하게 나타난다. 하천에서의 퇴적물이동과 비교하면 연안역에서는 조석과 파랑이 퇴적물 이동에 큰 영향을 미친다. 따라서, 지역적 특성에 따라 퇴적물이동 현상을 재현 또는 예측하기 위한 방법도 다양하게 발전해 왔다. 역사적으로 볼 때, 수치모형 실험이 먼저 시도되었으며 근래에는 수치모형실험이 주로 활용되고 있다. 예로서, Irie와 Nadaoka (1984)는 방파제 주변에서의 수심 변화를 재현하기 위하여 수치모형실험을 수행한 바 있으며, Deigaard 등(1986)은 덴마크 해안선 부근의 해저관로의 매몰현상 연구를 위하여 수치모형을 이용하였다.

우리나라 동해안의 해황의 특징 중 하나는 동해가 일본열도와 한반도에 의하여 갇힌 형상을 하고 있어서 조석이 상당히 미약하다는 점이다. 예를 들면, 주요 조석분조인 M2의 반조차가 부산 가까이의 해안을 제외한 대부분의 동해안의 해안선에서 20cm 이내로 알려져 있다. 이러한 해역에서는 조석이 퇴적물이동에 기여하는 정도가 미약하므로, 주로 파랑과 파랑류(wave-induced current)에 의해 퇴적물이 이동하게 된다. 파랑이 우세한 해역에서 사질퇴적물이동을 예측 및 재현하기 위한 기존의 수치모델기법이 다양하므로, 이를 적절한 기준에 의해 구분·비교하는 일이 간단하지 않다. 계산하고자 하는 지형변화의 시간적 정도(몇 초에서부터 몇 개월, 또는 몇 십년)에 따라 구분할 수 있으며, 수치모델이 취하는 차원을 기준으로 구분할 수도 있다. 기존의 퇴적물이동 수치모델 기법을 정리한 자료로는 McDowell과 O'Connor(1977), O'Connor(1979), Sleath(1984), Horikawa(1986), O'Connor와 Nicholson(1988), Neilsen(1988), van Rijn(1990), O'Connor(1991) 등을 들 수 있다.

쇄파대를 포함하는 천해역을 대상으로 할 때, 퇴적물이동은 흐름방향으로 일어날 뿐 아니라 파랑의 전파방향으로도 일어난다. 전자를 연안류 방향 퇴적물이동(longshore sediment transport)이라고 한다면, 후자를 해안선 연직방향 퇴적물이동(onshore-offshore sediment transport)이라고 할 수 있다. 파랑진행방향 퇴적물이동을 별도로 실험실에서의 관측, 현장에서의 관측, 수치모델 등에 의해서 연구한 예가 많다. 이 중에서 Watanabe 등(1980), Nairn(1988), O'Connor 등(1992)은 점모형을 이용하였으며, Deigaard 등(1986)은 연직 1차원 수치모형을 이용한 바 있다. 그러나, 파랑 방향 퇴적물이동은 현상의 복잡성으로 인하여 순퇴적물이동의 방향조차도 예측하기가 어려운 단계이며, 수치계산 방식도 연직방향으로 평균한 파랑이

나 흐름의 대표값을 이용하는 방식 뿐 아니라 연직방향의 물리량의 변화를 고려하는 방식도 이용하는 등 다양한 시도가 이루어진 바 있다. 이러한 파랑방향 퇴적물이동을 연안류방향 퇴적물이동과 함께 일반적 지형에서 계산하고자 하는 시도로는 Watanabe 등(1986)과 O'Connor와 Nicholson(1989)를 들 수 있다. 본 사업에서는 이상의 파랑방향 퇴적물이동은 포함하지 않았으나, 추후 세련화 단계에서 추가할 수 있을 것이다.

일반적 지형의 퇴적물이동을 예측 및 재현하기 위하여서는 평면상태의 2차원 격자망이 요구되고 비정상(unsteady) 상태의 물리량의 연직변화를 계산하려면 연직방향의 격자망이 추가되어야 한다. 2차원 평면 수치모형이나 3차원 모형에서 등류(uniform flow)라는 가정하에서 수평방향의 확산(diffusion)·이류(advection)를 생략할 경우 점모형(point model) 또는 박스모형(box model)이라고 칭하는 연직 1차원 모형이 되며, 완전한 3차원 모형의 단순화된 모형로 보거나, 3차원 모형을 수립하기 위한 전단계로서 수리실험자료나 현장관측 자료와의 비교·검증에 많이 활용된다. 실제 지형변화를 예측하기 위해 해저질의 대부분이 사질토인 경우 점모형을 직접 이용할 수도 있으며, 해저면 경사가 완만하며 해저질의 특성의 변화가 공간적으로 완만한 경우, 점모형의 용도가 더욱 높다고 할 수 있다.

퇴적물이동 형식을 소류사와 부유사로 구분할 경우 많은 연구자들이 부유사농도의 연직분포형태를 이론적·경험적으로 가정한 바 있다. Einstein(1950), Bijker (1971), van Rijn(1984)은 흐름만 존재할 경우의 부유사량을 농도분포와 유속분포의 곱으로 나타내어 수치적분한 형태로 나타낸식을 제안하였다. 흐름만 있을 경우 흐름의 형태가 단순하여 부유사량 계산이 비교적 단순한 반면, 파랑이 추가될 경우 파랑에 의한 왕복운동으로

인하여 부유사랑 계산이 복잡해지게 된다. 또한 파랑과 흐름이 공존할 경우 부유사랑은 파랑에 의한 부유사랑과 흐름에 의한 부유사랑으로 분리할 수 있다. 파랑에 의한 부유사랑을 알기 위해서는 유속분포와 부유사 농도 분포를 알아야 한다. 1960년대에서부터 시작하여 해저면 가까이에서의 파랑경계층 내의 유속분포와 부유사농도를 정확히 파악하기 위하여 Hom-ma 와 Horikawa(1963), Sleath(1982), Fredsoe 등(1985), Justesen 등(1986), Green과 Vincent(1990), O'Connor 등(1992) 등이 실험실과 현장에서의 관측과 수치모형실험을 실시한 바 있다.

연직 1차원의 관측과 수치모형이 전수심을 대상으로 한 반면, 연직 2차원의 연구는 현재까지는 해저면 근처를 대상으로 하여 이루어졌다 (Sato,1984 ; Hansen,1991 ; Horikawa와 Mizutani,1992 ; Longuet-Higgins, 1981 ; Ronasoma와 Sleath,1992 등 참조). 수치모형을 이용한 연구의 경우, 수평축은 사흔 또는 사구의 길이 방향으로 정하고, 사흔 또는 사구의 길이만큼을 수치모형 영역으로 정하였으며, 양측 경계면에는 주기조건 (periodic condition)을 지정하였다.

이러한 연직 1차원, 연직 2차원적 고찰이 현재까지는 현장에서의 퇴적물 이동과 지형변화를 예측하는 기법에 직접 활용되지는 못하였으며, 이러한 점모형의 연구결과를 현장의 문제 해결에 활용할 수 있도록 연결하는 일이 추후의 과제라고 하겠다. 지금까지 종합한 점모형들이 변수의 변화를 무시한 등류라는 가정하에 수평방향으로의 단순화된 경우에 적용하는 모형이므로, 실제 지형에서와 같은 부등류와 비정상류에 적용할 수 있는 일반적 모형은 3차원 모형이라고 할 수 있다.

또한 퇴적물이동의 계산을 위하여 필요한 입력자료 중 해저면 조도(roughness)가 중요한 역할을 한다. 해저면의 퇴적토 입자의 직경분포를 알고 있더라도, 흐름이나 파랑의 조건에 의해 수시로 변화하는 사흔(ripple)이나 사구(dune)의 형태에 관한 자료는 관측에 의해 얻기가 어려운 경우가 많다. 이는 퇴적물 이동 현상이 활발한 악천후시에는 더욱 어려워진다. 따라서, 이 해저면 조도를 예측할 수 있는 이론 또는 수치모형이 별도로 필요하다. 기존의 이론으로는 Nielsen(1981), Vongvisessomjai(1984), Hedegaard(1985), Raudkivi(1988), Sato(1988), Amos 등(1988), Lee-Young과 Sleath(1990), O'Connor(1992)를 들 수 있다. 최근에는, Madsen 등(1990)이 불규칙 파랑에 의한 해저면 조도의 감소에 관한 연구결과를 발표한 바 있다. 해저면 조도의 정보가 퇴적물이동 계산에서 중요한 역할을 차지함에도 불구하고, 파랑과 흐름이 공존하는 경우에 대한 이론은 정립된 단계에 이르지 못한 형편이다. 기존의 해저면 조도 예측이론을 활용하지 않을 경우에는, 현장에서의 관측자료를 직접 활용하는 방안이 있다.

본연구의 제1차년도에서는 기존의 퇴적물이동을 예측하는 수치모형에 대해 검토한 바 있다. 이때 우리나라 동해안의 해저질이 대부분 사질토이므로, 퇴적물의 대상을 비점성토 만으로 국한하였다. 제2차년도에서는 비점성토를 대상으로 하여 추가적인 기존문헌 조사를 실시하였으며, 조사한 기존 이론 및 몇가지 수치모델 기법을 검토하여 수립할 퇴적물이동 모델의 방향을 3차원 모델로 선정한 바 있다. 특히 항만이나 호안 구조물, 원자력 발전소 등과 같은 인공구조물이 건설되어 있는 해역에서는 부유퇴적물의 부등적(non-uniform) 특성이 더욱 두드러지므로, 수심 평균화된 평면 2차원 모델을 적용할 경우 상당한 오차가 발생할 수 있다. 정밀한 3차원 퇴적물이동 모델을 실행시키기 위해서는 정밀한 3차원의 해수유동에 관한 자료가

필요하다. 이러한 3차원의 흐름장 자료를 구하는 방안 중 하나는 수심 평균화된 평면 2차원 해수유동 모델 결과를 적절한 기법을 이용하여 유속의 연직분포를 구하는 방법이다. 이상적으로는 3차원 해수유동 모델과 3차원 퇴적물이동 모델을 조합하는 시스템이 가장 정밀한 계산 방식이라고 할 수 있다. 제3차년도 연구에서는 이전의 연구를 통해 일차 수립된 3차원 퇴적물이동 수치모형을 개선 보완하였으며, 본연구의 대상해역인 현재상태의 죽변항 및 인근해역에 적용하였으며, 그 결과 대체로 만족할 만한 결과를 얻었다. 그러나 시간 등의 제약으로 인해 대책안에 대한 검토는 실시하지 못했으며, 이는 추후 실시 검토될 수 있을 것이다.

본 장에서는 본연구를 통하여 수립된 수치모델의 부유사이동 기본방정식, 해저지형변화 기본방정식, 경계조건, 그리고 기본방정식의 축변환과 수치기법에 관하여 간략히 기술하고, 수치계산의 정밀도를 검토하기 위한 해석해와 비교 결과, 그리고 현상태의 죽변항 인근해역에 대한 적용 및 그 결과에 대해 기술하였다.

제2절 3차원 퇴적물이동 수치모형

1. 부유사농도의 기본방정식

파랑주기에 대해 평균한 부유사농도의 기본방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_f) \frac{\partial c}{\partial z} \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{sx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{sy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

여기서, c 는 파랑주기 평균 부유사 농도; t 는 시간; u, v, w 는 각각 x, y, z 방향의 파랑주기평균 유속; x, y, z 는 각각 종방향, 횡방향, 연직방향 cartesian 축; w_f 는 부유사 침강속도; $\varepsilon_{sx}, \varepsilon_{sy}, \varepsilon_{sz}$ 는 각각 x, y, z 방향의 파랑주기평균 확산계수이다.

수심이 변하는 일반지형에 3차원 모형을 적용하기 위한 격자망 시스템은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 x, y, z 방향의 모서리를 갖는 직육면체의 격자소를 갖는 정규격자망이며, 다른 하나는 해저면 모양을 따라 곡선형의 모서리를 갖는 육면체의 격자소를 갖는, 즉 x, y, z 방향에서 왜곡된 격자망이다. 전자의 정규격자망은 해저면 경사를 계단 모양으로 나타낼 수 밖에 없으므로, 계산영역 내에 수심이 얇은 곳이 있을 경우 이의 적절할 해상(resolution)을 위하여 연직방향의 길이 증가분을 선택하면 수심이 깊은 곳에서 연직방향의 격자수가 많아지는 약점이 있다. 후자의 해저면 형태에 맞추는 변형격자망은 해저면을 정확하게 표현할 수는 있으나, 기본방정식과 경계조건의 축변환을 필요로 한다. 본연구에서는 쇄파대를 포함한 천해역을 잘 표현하기 위하여 시그마 변환 방법을 택하였으며, 연직축 (σ)은 다음 식으로 정의된다.

$$\sigma = \frac{z - z_b}{d} \quad (4.2.2)$$

여기서, z_b 는 평균해저면 높이이며, d 는 평균수심이다. 새로운 축 x' 와 y' 는 z 축과 수직이 아니며, 이로 인하여 각 미분항으로부터 (x, y, z) 좌표계에서 (x', y', σ) 좌표계로 변환하는 과정에서 부수적인 항이 생긴다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = \frac{1}{d} \quad (4.2.3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x'} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial x} \quad (4.2.4)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial y'} + \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial y} \quad (4.2.5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial z} (= \frac{1}{d} \frac{\partial f}{\partial \sigma}) \quad (4.2.6)$$

여기서, f 는 임의의 종속변수이다. 이 관계를 이용하면 식(4.2.1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x'} + v \frac{\partial c}{\partial y'} + (w' - w_f) \frac{\partial c}{\partial \sigma} \\ & - \left\{ \frac{\partial}{\partial x'} (\epsilon_{sx} \frac{\partial c}{\partial x'}) + HOT_1 \right\} - \left\{ \frac{\partial}{\partial y'} (\epsilon_{sy} \frac{\partial c}{\partial y'}) + HOT_2 \right\} \quad (4.2.7) \\ & - \frac{1}{d} \frac{\partial}{\partial \sigma} (\frac{\epsilon_{sz}}{d} \frac{\partial c}{\partial \sigma}) = 0 \end{aligned}$$

여기서, HOT_1, HOT_2 는 고차미분항이며, w' 는 (x', y', σ) 좌표계에서 다음 식으로 정의되는 연직방향의 유속이다.

$$w' = u \frac{\partial \sigma}{\partial x} + v \frac{\partial \sigma}{\partial y} + w \frac{\partial \sigma}{\partial z} \quad (4.2.8)$$

여기서, w'_f 는 w_f/d 이다. 새 기본방정식(4.2.7)은 원 기본방정식에 비해 HOT_1, HOT_2 이 추가되어 있으며, 이들은 수평확산항의 변환과정에서 발생하였다. van Rijn과 Meijer(1988)에 의하면 해저면의 구배가 1/20 이하로 완만한 경우에는 Sheng(1983)과 같이 수평방향 축의 구부러짐으로 인하여 발생하는 추가항들을 생략할 수 있으며, 본연구에서도 해저면 경사가 완만한 경우를 대상으로 한다는 가정하에 이 추가항들을 생략하였다.

기본방정식을 수치적 방법에 의해 풀고자 할 경우, 여러 면에서 장점이 있는 분리기법(splitting technique)을 활용하기로 한다(O'Connor, 1971 참조). 식(4.2.7)은 다음의 세단계로 나눌 수 있다.

$$1st\ step: \frac{\partial c}{\partial t} + (w' - w_f') \frac{\partial c}{\partial \sigma} - \frac{1}{d} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\epsilon_{sz}}{d} \frac{\partial c}{\partial \sigma} \right) = 0 \quad (4.2.9)$$

$$2nd\ step: \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x'} + v \frac{\partial c}{\partial y'} = 0 \quad (4.2.10)$$

$$3rd\ xstep: \frac{\partial c}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x'} \left(\epsilon_{sx} \frac{\partial c}{\partial y'} \right) - \frac{\partial}{\partial y'} \left(\epsilon_{sy} \frac{\partial c}{\partial y'} \right) = 0 \quad (4.2.11)$$

또한 해저면 가까이에서의 부유사농도의 구배가 큰 점을 고려하여 해저면 가까이에서의 분해능이 높게 연직 격자망을 재변환하기로 한다. 이러한 유형의 재변환은 여러 연구자들에 의해 시도된 바가 있으며, Davies 등(1988)과 Fredsoe 등(1985)이 해저 가까이에서의 격자점 간격이 좁은 축변환을 이용하였다. 본연구에서는 다음의 지수함수를 이용하였다.

$$\eta = \sigma^{-A} = \left(\frac{z - z_b}{d} \right)^{-A} \quad (4.2.12)$$

여기서 η 는 새로운 연직방향 축이며, A 는 해저면에서와 해수면에서의 격자점 간격의 상대적인 크기를 조절하는 변수이다. 식(4.2.12)는 $z = z_b$ 에서 무한값을 가지나, 부유사 계산을 위한 계산영역이 z_b 보다 위인 $z_b + a$ 이므로 아무런 문제가 없다. 위의 식(4.2.12)를 이용하여 기본방정식을 변환하기 위하여 변수 A 를 적절히 선정하는 것이 필요하다. Fredsoe 등(1985)은 연직 1차원 부유사농도식을 변환하는 변수를 선정하기 위하여 해저면 전단 응력의 값을 이용한 바가 있다. 그러나, 각 평면 위치에 따라 다른 축변환 상수를 선정하여 전 해역의 계산 격자망을 구성할 경우(평면적으로 변화하

는 A 의 값을 지정할 경우), 변환한 변수 η 와 다른 두 축 x' 와 y' 가 수직 각도를 이루지 않으므로 추가적인 항이 생겨난다. 여기서는 이러한 추가항이 생기지 않도록 전해역에 같은 값의 A 를 적용하였다. 이렇게 함으로써 유선의 분리가 일어나지 않는 흐름의 경우 거의 유선을 따라 수평 격자망이 구성이 되어 새 격자망에서의 연직방향 흐름성분이 최소화 될 수 있는 장점이 있다.

기본방정식(4.2.9)는 새로운 식으로 변환되며, 식(4.2.10)과 (4.2.11)은 그대로이다. 미분항은 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial z} \quad (4.2.13)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial z} = -\frac{A}{d} \eta^{\frac{1}{A}+1} \quad (4.2.14)$$

식(4.2.9)는 다음과 같이 변환된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = F \frac{\partial c}{\partial \eta} + G \frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} \quad (4.2.15)$$

여기서,

$$F(\eta) = (w'' - w_f) \frac{A}{d} \eta^{\frac{1}{A}+1} + \frac{A^2}{d^2} \eta^{\frac{1}{A}+1} H(\eta)$$

$$G(\eta) = \frac{A^2}{d^2} \eta^{\frac{2}{A}+2} \varepsilon_{sz} \quad (4.2.16)$$

$$H(\eta) = \frac{\partial}{\partial \eta} (\eta^{\frac{1}{A}+1} \varepsilon_{sz}) \quad (4.2.17)$$

여기서 w'' 는 $w' d$ 와 같다.

2. 초기 및 경계조건

시간에 따라 변화하는 부유사농도의 계산을 위해서는 초기조건과 경계조건이 필요하다. 본연구에서 조석 등에 의한 장주기파는 고려하지 않으므로, 중간계산결과는 상관없이 최종적으로 도달한 평형상태를 답으로 한다. 퇴적물이동 수치모형을 수행하기 위하여는 해저면 전단응력의 분포와 해저 경계면에서의 퇴적물 부상량(entrainment), 전 수심내의 확산계수 분포, 3방향의 유속자료가 필요하다. 초기조건은 최종평형의 해를 좌우하지 않으므로 임의로 가장 단순한 영(zero)이나 상수 또는 적절한 농도의 연직 분포 형태를 지정할 수 있다.

최종해는 적절한 평형상태 확인 기준에 의해 취하도록 하였다. 즉, 모든 격자점에서의 두 계산시간간의 부유사농도의 변화가 특정 범위내에 들어오면 최종해로 채택하였다. 본 모형에서는 모든 격자점에서의 부유사농도의 변화량이 해저 경계면에서의 최대 부유사 농도를 기준으로 하여 0.1% 이내가 되면 계산을 종료토록 하였다.

3차원 모형은 해수면, 해저면, 외해측 측방, 육지측 측방의 네 방향으로 경계면을 갖는다. 우선, 해수면 경계면에서는, 연직 방향의 부유사의 이동량이 없다는 조건을 이용한다. 즉,

$$w_{fc} + \varepsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (4.2.18)$$

식(4.2.18)은 축 변환 후 다음과 같이 표현된다.

$$w_{fc} - \left(\frac{A}{d} \eta^{\frac{1}{A}+1} \right) \varepsilon_{sz} \frac{\partial c}{\partial \eta} = 0 \quad (4.2.19)$$

해저 경계면에서는 두 가지의 조건이 쓰일 수 있다. 그 하나는 해저 경계면에서의 부유사 농도를 지정하는 조건이며,

$$C_a = C_a^\infty \quad (4.2.20)$$

다른 하나는 해저 경계면에서의 부상량을 지정해 주는 조건이다.

$$\frac{\partial C_a}{\partial z} = -\frac{w_f}{\epsilon_{sz}} C_a^\infty \quad (4.2.21)$$

식(4.2.21)은 다음과 같이 변형된다.

$$\frac{\partial C_a}{\partial \eta} = \left(\frac{d}{A} \eta^{-\frac{1}{A}-1} \right) \frac{w_f}{\epsilon_{sz}} C_a^\infty \quad (4.2.22)$$

van Rijn(1985)과 van Rijn과 Meijer(1991)는 이상의 두가지 해저면 경계조건이 실제 현상의 문제에 적용할 경우 거의 같은 계산결과를 보여주었다고 하였다. 이는 연직 방향의 길이의 규모가 수평방향의 길이 규모에 비해 훨씬 작은 점과, 완경사의 해저면 구배로 인하여 해저 경계면에서의 부유사농도가 거의 평형상태의 값을 갖는다는 점을 나타낸다. 본연구에서는 현장적용을 목적으로 하므로 편의상 해저면의 부유사 농도를 지정하는 조건을 채택하였다. 그러나, 수치모형 내에 선택항을 두어서 해저면에서의 부상량을 지정하고자 할 때에는 이를 적용할 수 있게 하였다.

셋째, 외해측 개방 경계면은 해수가 유입되는 경계면과 해수가 유출되는 경계면으로 나눌 수 있다. 해수가 유입되는 경계면에서는 부유사농도를 알아야 한다. 이러한 부유사농도에 관한 자료는 현장에서의 직접관측에 의하여 구하거나, 기타 예측방법에 의하여야 한다. 해수가 유출되는 경계면에서는 부유사농도의 값이 상류측의 자료로부터 구해지므로 경계면이나 경계면 바깥의 부유사 농도의 자료가 불필요하다.

넷째, 육지 경계면에서는 경계면에서 부유사 이동량이 없다는 조건을 적용한다. 즉,

$$-\varepsilon_n \frac{\partial c}{\partial n} = 0 \quad (4.2.23)$$

여기서, n 은 육지에 수직인 방향, ε_{sn} 은 육지에 수직인 방향으로의 확산계수이다. 수평방향으로 직사각형의 격자망을 사용하는 경우에는 식(4.2.23)은 다음과 같이 표현된다.

$$-\varepsilon_{sx} \frac{\partial c}{\partial x'} = 0 ; -\varepsilon_{sy} \frac{\partial c}{\partial y'} = 0 \quad (4.2.24)$$

이 경계조건은 육지 경계면을 가로지르는 확산에 의한 부유사의 이동이 없다는 것을 의미한다. 육지 경계면을 가로지르는 이류에 의한 부유사 이동도 없으나, 흐름장의 자료에서 이미 유속이 영(zero)임을 구하였으므로, 자연스럽게 충족된다.

3. 해저면 높이 변화의 기본 방정식

해저면의 높이는 해저퇴적물의 질량보존법칙에 따라 다음 식과 같이 총유사량의 수평방향의 구배에 의해 구해진다.

$$(1-n) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ty}}{\partial y} = 0 \quad (4.2.25)$$

$$q_{tx} = q_{bx} + q_{sx} ; q_{sx} = \int_{z_b}^n u c \, dz \quad (4.2.26)$$

여기서, z_b 는 해저면의 수평기준면으로 부터의 높이, n 은 해저퇴적물의 공극률이며,

$$q_{ty} = q_{by} + q_{sy} ; q_{sy} = \int_{z_b}^n v c \, dz \quad (4.2.27)$$

이다. 여기서, q_{ix}, q_{iy} 는 각각 x, y 방향의 총유사량(부유사량+소류사량); g_{ix}, g_{iy} 는 각각 x, y 방향의 소류사량; q_{sx}, q_{sy} 는 각각 x, y 방향의 부유사량; η 는 평균해수위이다.

계산된 부유사농도에 유속을 곱하여 단위면적당 부유사이동량을 구할 수 있으며, 전수심에 대해 부유사이동량을 적분한 부유사량과 소류사량을 더하여 총유사량을 구할 수 있다. 해저면의 높이 변화는 식(4.2.25)에 의하여 구한다.

4. 해저기준면에서의 부유사농도

해저기준면에서의 부유사농도를 계산하는 기존의 van Rijn(1989)의 공식은 몇 가지 점에서 단순화되어 있다. 즉, 경험적 변수인 유효파랑전단응력계수와 유효흐름전단응력계수를 해저퇴적물의 입자계수의 함수로 표현하는 과정에서 충분하지 않은 갯수의 자료에 근거하여 함수형태를 선정한 점이 있다. 또한, 파랑에 의한 평균 해저면 전단응력과 흐름에 의한 해저면 전단응력을 산술적으로 더함으로써, 흐름과 파랑의 방향성을 무시한 결과를 가져왔다. 따라서, 본연구에서는 다음 식과 같이 파랑에 의한 해저면의 전단응력의 시간적 변화를 충실히 반영하는 함수 형태를 선정하여 해저 경계면에서의 부유사농도를 계산하였다.

$$c_a = C_2 \langle |\vec{\Psi}_{wc}|^{1.5} \rangle \quad (4.2.28)$$

여기서, c_a 는 기준면(z_b+a)에서의 부유사 농도, a 는 사흔이 존재하는 해저면의 경우 사흔 높이의 반, C_2 는 조정상수, $\vec{\Psi}_{wc}$ 는 총 해저 전단응력을 표

현하는 순간 Shields계수 벡터이며, 다음 식과 같다.

$$\vec{\tau}_{wc}(t) = \frac{\vec{\tau}_{b,wc}(t)}{(s-1)\rho g d_{50}} \quad (4.2.29)$$

$$\vec{\tau}_{b,wc}(t) + \vec{\tau}_{b,cm} + \vec{\tau}_{b,w}(t) \quad (4.2.30)$$

$$\vec{\tau}_{b,cm} = \frac{f_{cm}}{f_c} \vec{\tau}_{b,c}; \tau_{b,c} = \rho f_c \vec{U} |\vec{U}| \quad (4.2.31)$$

$$\vec{\tau}_{b,w} = \rho \frac{f_w}{2} \vec{U}_\infty |\vec{U}_\infty| \cos(\sigma t) \quad (4.2.32)$$

여기서, $\vec{\tau}_{b,cm}$ 은 흐름에 관련된 총 해저 전단응력이며, 파랑의 존재로 인하여 변형된 값이다. $\vec{\tau}_{b,w}$ 는 파랑에 의한 순간 총 해저 전단응력; σ 는 파랑 각속도 ($2\pi/T$); \vec{U} 는 수심평균된 유속 벡터; \vec{U}_∞ 는 해저면 가까이에서의 파랑의 궤적속도 벡터; f_w 는 파랑마찰계수; f_c 는 흐름마찰계수 ($=k^2/(\ln(d/z_0)-1)^2$); f_{cm} 은 파랑의 존재로 인하여 수정된 흐름마찰계수이다. 괄호 < >는 파랑주기에 대한 평균을 의미하며, $1/T \cdot \int_0^T () dt$ 와 같다. 파

랑마찰계수 f_w 는 Kim(1993)에서 제시한 다음 식으로 부터 구한다.

$$f_w = 0.000684 \exp\left[7.80\left(\frac{A}{z_0}\right)^{-0.106}\right] \quad (4.2.33)$$

수정된 흐름마찰계수 f_{cm} 은 추후 연구가 필요하다. 조정상수 C_2 는 실험실 자료 및 현장관측자료를 활용하여 구하여야 하나 이에 필요한 기존자료는 매우 드문 형편이다. 본연구에서는 약간의 기존의 수리실험 자료와 죽변 해역에서 4방향 부유사이동량 관측기를 이용하여 관측된 자료를 이용하여 조정계수 C_2 를 구하여 보았다.

Nieuwjaar and van der Kaaij(1987), Nap and van Kampen(1988), Bosman(1982), van Rijn(1987), van der Valden(1986)의 수리실험자료는 파

량이 존재할 경우의 해저 기준면에서의 부유사농도를 관측한 것이며, 식 (4.2.28)을 적용한 결과 조정상수 C_2 가 0.0033(평균) \pm 0.0020(표준편차)로 나타났다. 또한 죽변항에서의 관측자료에 대해 식(4.2.28)을 적용하면 C_2 는 0.000025 \pm 0.000025 인 것으로 나타났다. 실험실과 죽변현장에서의 관측자료와 계산결과를 비교하면 Fig.4.2.1과 같다. 이 조정상수 값은 수리실험자료의 경우에 비해 훨씬 작은 값이며, 그 원인에 대해서는 추후 세밀한 검토가 필요하다.

5. 소류사량

해저 기준면에서의 부유사농도를 구하기 위한 식을 변형하여 소류사 이동량식의 형태를 다음과 같이 선정하였다.

$$|\Phi_b| = C_4 \Psi_{om}^{0.5} \langle |\Psi_{wc}|^{1.5} \rangle \quad (4.2.34)$$

여기서, $\vec{\Phi}_b = \vec{q}_b / w_f d_{50}$ (단위 폭, 단위 시간당의 순 부피), $\vec{\Psi}_{om}$ 는 파랑에 의해서 수정된 평균 해저면 전단응력에 대한 Shields 계수이며, C_4 는 조정상수이다. 파랑과 흐름이 공존할 때의 기존의 소류사량 관측자료는 거의 없다. 본연구에서는 죽변에서 Delft Hydraulics Laboratory에서 개발한 소류사 관측기 ARNHEM을 이용하여 관측한 8개의 자료를 이용하여 조정상수 C_4 를 계산하여 보았으며, 그 값은 0.055(평균) \pm 0.055(표준편차)인 것으로 나타났다. 관측자료와 계산결과를 비교하면 Fig.4.2.2와 같다. 이 때 표준편차의 값이 상당히 크게 나타난 원인은 여러가지로 추측할 수 있으며, 특히 관측 당시의 파고, 파향, 파랑류 세기와 방향, 해저면 조도에 관한 정보의 정밀성

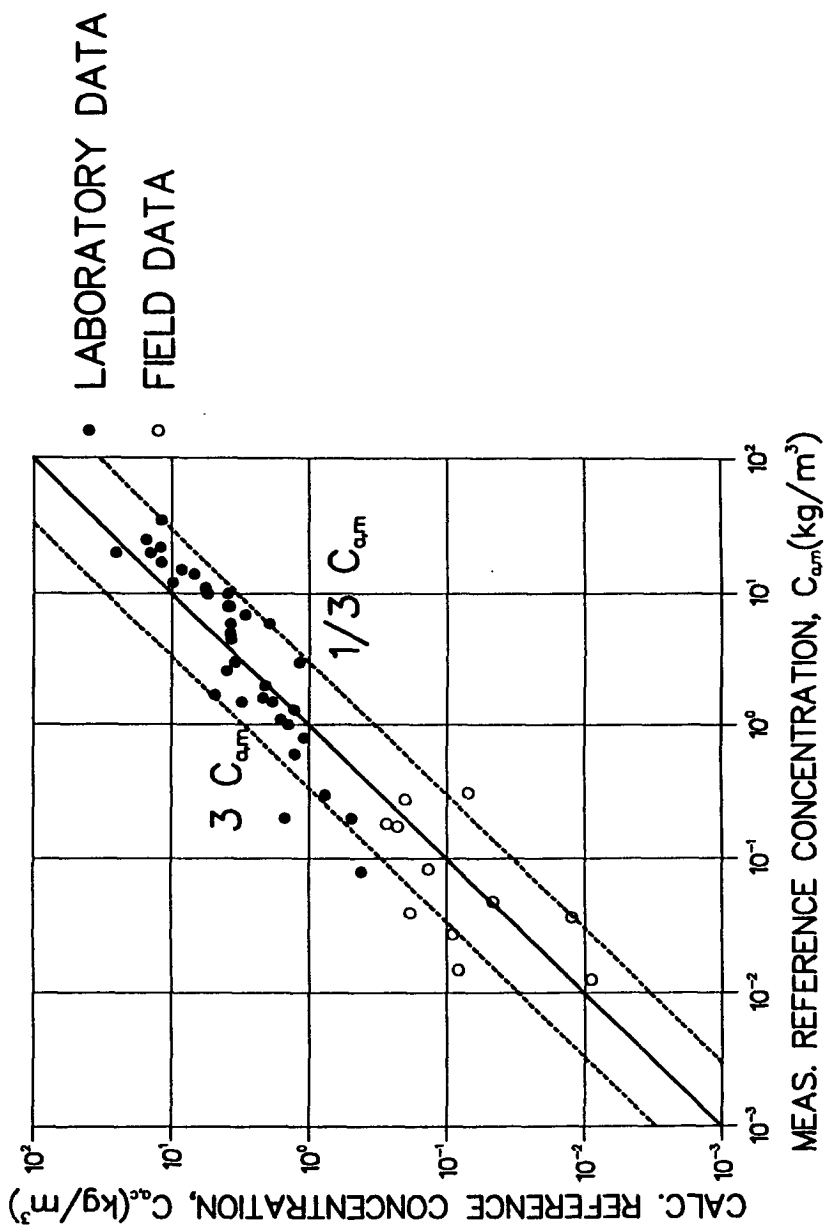


Fig. 4.2.1.1. Comparison of present formula and measurements ; suspended sediment concentration.

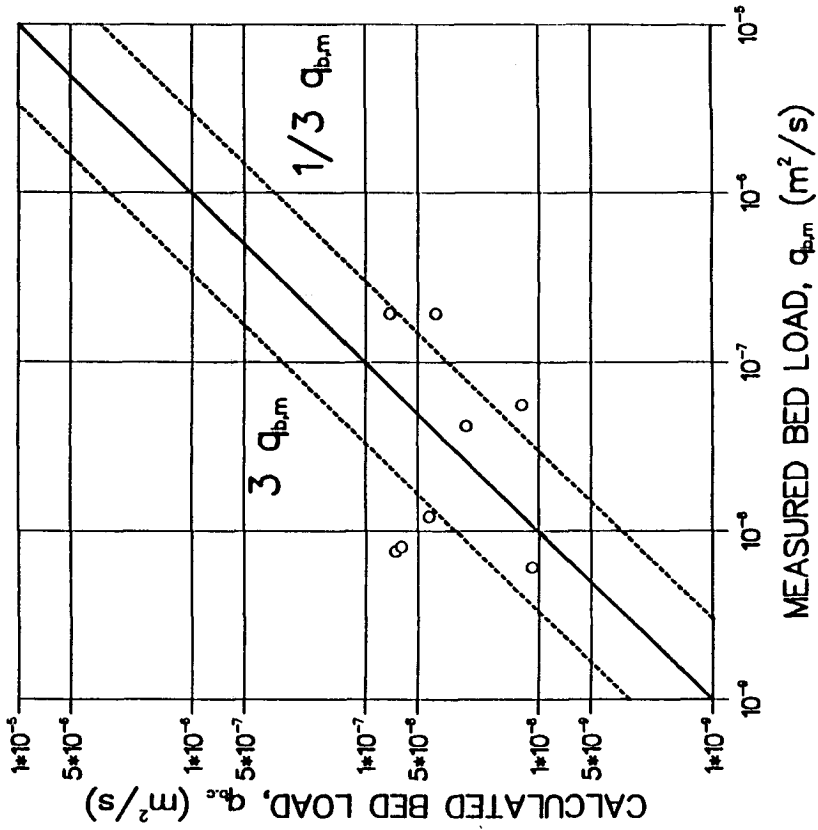


Fig. 4.2.2. Comparison of present formula and measurements ; bed load.

등을 재검토할 필요가 있다.

6. 확산계수와 유속

부유사농도의 기본방정식에는 파랑주기에 대해 평균된 세 방향의 확산계수가 들어 있다. 부유사 농도의 확산계수와 유체 자체의 난류 확산계수는 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 그 비율이 1에 가깝다. 본 연구에서는 그 비율을 1로 가정하였다. 이상적으로는 해수의 난류 확산계수를 정확히 계산하기 위하여서는 고차원의 난류 마감 모형을 포함하는 3차원의 흐름장 모델을 이용하는 것이 바람직하다. 그러나, 경우에 따라서는, 계산시간의 절약을 위해 수십평균화된 평면 2차원의 흐름장 모델을 이용한 후 연직 방향의 유속의 분포와 확산계수를 적절한 방법에 의해 구할 수도 있다. 본 연구에서는 제3장에서 기술된 바와 같이 3차원 수치모형을 이용하여 퇴적물 이동 수치모형의 입력자료를 구하는 시스템을 수립하였다.

제3절 수치 기법

임의의 지형에 대해 부유사농도 기본방정식을 풀기 위하여는 기본방정식을 차별화하는 것이 필요하다. 기본방정식을 분리하는 기법은 몇 가지 계산상의 잇점이 있는 것으로 알려져 있다. 첫째 분리하지 않는 타 기법에 비해 일반적으로 계산시간이 절약되며, 둘째 프로그램을 작성하는 과정이 간단하다. 본 수치모형에서도 위의 장점을 살리기 위해 분리기법을 이용하였다.

수치계산을 위한 수평과 연직 격자망은 Figs.4.3.1 및 4.3.2와 같이 구성된다. 부유사 농도, 해저면 높이는 평면상의 직사각형 격자소의 가운데 점에서 계산하며, 유속이나 소류사량은 격자소의 테두리에서 계산한다. 수치기법은, 연직 확산이류단계는 2차의 정밀성을 갖는 음해법을 쓰며, 수평이류단계는 투영법(projection method)을 이용한다(Verboom, 1975 ; Nicholson, 1983 참조). 세번째의 수평확산은 2차의 정밀성을 갖는 양해법에 의해 계산한다.

1 단계 : 연직 확산 이류

식(4.2.15)의 세항을 음해법을 이용해 차분화하면,

$$\frac{\partial c}{\partial t} |_{i,j,k}^{n+W} = \frac{1}{\Delta t} (c_{i,j,k}^{n+1} - c_{i,j,k}^n) \quad (4.3.1)$$

$$F \frac{\partial c}{\partial \eta} |_{i,j,k}^{n+W} = \frac{F}{2\Delta\eta} (W(c_{i,j,k+1}^{n+1} - c_{i,j,k-1}^{n+1}) + (1-W)(c_{i,j,k+1}^n - c_{i,j,k-1}^n)) \quad (4.3.2)$$

$$G \frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} |_{i,j,k}^{n+W} = \frac{G}{\Delta\eta^2} (W(c_{i,j,k+1}^{n+1} - 2c_{i,j,k}^{n+1} + c_{i,j,k-1}^{n+1}) + (1-W)(c_{i,j,k+1}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j,k-1}^n)) \quad (4.3.3)$$

여기서, 각 미분항의 기준위치는 $i\Delta x'$, $j\Delta y'$, $k\Delta\eta$ (i,j,k 는 정수)의 위치에서, $(n+W)$ (n 은 정수) 시각의 값이다. W 는 가중치이며($0.5 \leq W \leq 1$), 새 시간단계의 값의 중요한 정도를 표시한다. 첨자 i,j,k 는 각각 x',y',z 방향의 격자 번호이며, 윗첨자 n 은 계산시간단계 번호이다.

식(4.2.15)를 일반적인 계산점에 대해 표현하면,

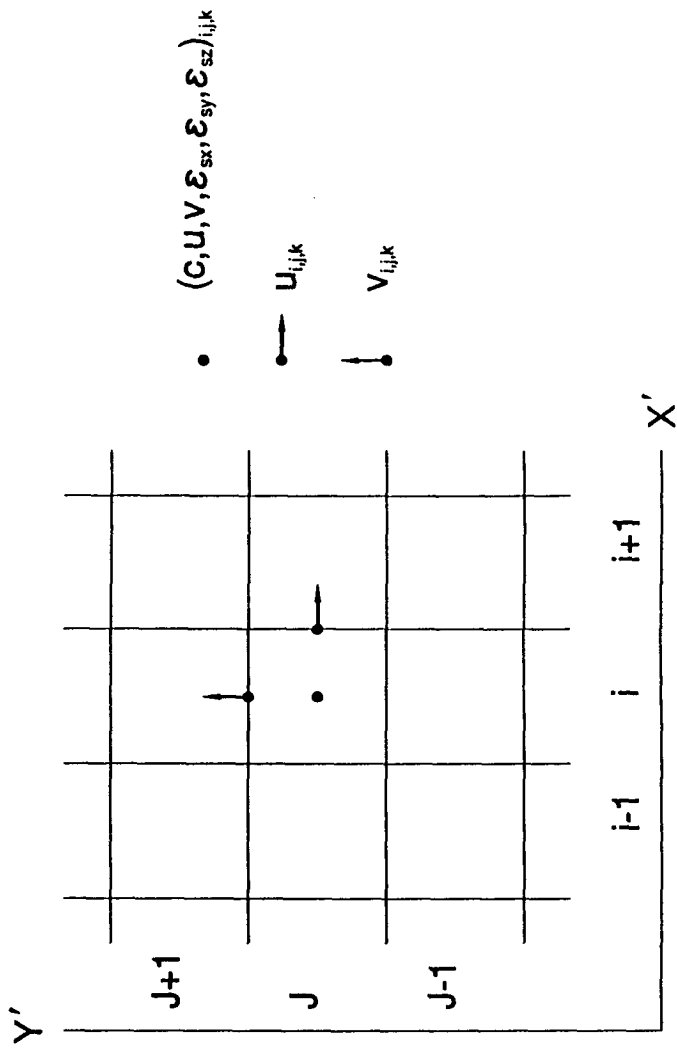


Fig. 4.3.1. Three-dimensional suspended sediment model grid ; plan.

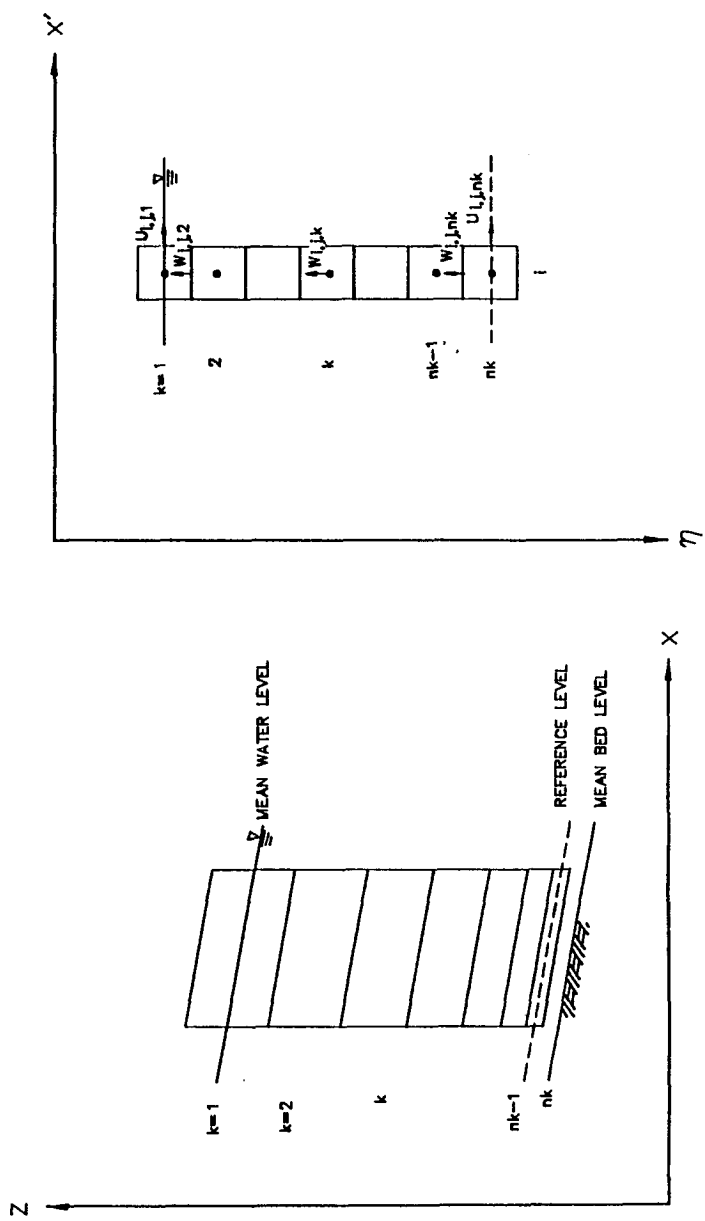


Fig. 4.3.2. Three-dimensional suspended sediment model grid ; vertical.

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{WF}{2\Delta\eta} - \frac{WG}{\Delta\eta^2} \right) c_{i,j,k-1}^{n+1} + \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{2WG}{\Delta\eta^2} \right) c_{i,j,k}^{n+1} + \left(-\frac{WF}{2\Delta\eta} - \frac{WG}{\Delta\eta^2} \right) c_{i,j,k+1}^n \\
& = \frac{1}{\Delta t} c_{i,j,k}^n + \frac{F}{2\Delta\eta} (1-W)(c_{i,j,k+1}^n - c_{i,j,k-1}^n) + \frac{G}{\Delta\eta^2} (1-W)(c_{i,j,k+1}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j,k-1}^n) \quad (4.3.4)
\end{aligned}$$

와 같으며, 표현의 편의상 L,D,U,B를 다음과 같이 정의한다.

$$L_{i,j,k} = \left(\frac{WF}{2\Delta\eta} - \frac{WG}{\Delta\eta^2} \right) \quad (4.3.5)$$

$$D_{i,j,k} = \left(\frac{1}{\Delta t} + \frac{2WG}{\Delta\eta^2} \right) \quad (4.3.6)$$

$$U_{i,j,k} = \left(-\frac{WF}{2\Delta\eta} - \frac{WG}{\Delta\eta^2} \right) \quad (4.3.7)$$

$$\begin{aligned}
B_{i,j,k} &= \frac{1}{\Delta t} c_{i,j,k}^n + \frac{F}{2\Delta\eta} (1-W)(c_{i,j,k+1}^n - c_{i,j,k-1}^n) \\
&+ \frac{G}{\Delta\eta^2} (1-W)(c_{i,j,k-1}^n - 2c_{i,j,k}^n + c_{i,j,k+1}^n) \quad (4.3.8)
\end{aligned}$$

그러면, 식(4.3.4)는 다음과 같이 간단하게 표현된다.

$$L_{i,j,k} c_{i,j,k-1}^{n+1} + D_{i,j,k} c_{i,j,k}^{n+1} + U_{i,j,k} c_{i,j,k+1}^{n+1} = B_{i,j,k-1} \quad \text{for } 2 \leq k \leq nk-1 \quad (4.3.9)$$

해수면에서의 경계조건, 식 (4.2.19)는 다음의 차분식으로 표현된다.

$$w c_{i,j,1}^{n+1} - \frac{A}{d} \eta^{\frac{1}{A}+1} \varepsilon_{sz} \frac{1}{\Delta\eta} (c_{i,j,2}^{n+1} - c_{i,j,1}^{n+1}) = 0 \quad (4.3.10)$$

이 식에 대한 식(4.3.9)의 매트릭스 요소, D, U는 다음과 같다.

$$D_{i,j,1} = w_f + \frac{A}{d} \eta^{\frac{1}{A}+1} \varepsilon_{sz} \frac{1}{\Delta\eta} \quad (4.3.11)$$

$$U_{i,j,1} = -\frac{A}{d} \eta^{\frac{1}{A}+1} \varepsilon_{sz} \frac{1}{\Delta\eta} \quad (4.3.12)$$

해저면에서는 두가지의 경계조건(부유사농도 또는 부유사 농도의 구배)을 적용할 수 있다. 부유사농도를 지정할 경우에는, 식(4.2.20)을 격자점 i,j,nk , 시간 단계 $(n+1)$ 에 적용하면,

$$C_{i,j,nk}^{n+1} = C_a^\infty \quad (4.3.13)$$

과 같다. 연직방향의 격자점 번호가 $(nk-1)$ 인 임의의 점에서의 차분식은 다음과 같다.

$$L_{i,j,nk-1} C_{i,j,nk-1}^{-i,j,nk-2n+1} + D_{i,j,nk-1} C_{i,j,nk-1}^{n+1} = B_{i,j,nk-1}^* \quad (4.3.14)$$

$$B_{i,j,nk-1}^* = -U_{i,j,nk-1} C_{i,j,nk-1}^{n+1} + B_{i,j,nk-1} \quad (4.3.15)$$

여기서,

$$B_{i,j,nk-1} = B_{i,j,nk-1}^* - U_{i,j,nk-1} C_{i,j,nk}^{n+1} \quad (4.3.16)$$

해저면, 해중, 해수면의 전수심의 격자점에 위의 차분식을 적용하면 다음의 tridiagonal 매트릭스가 구성된다.

$D_{i,j,1}$	$U_{i,j,1}$						$x C_{i,j,1} =$	$B_{i,j,1}$
$L_{i,j,2}$	$D_{i,j,2}$	$U_{i,j,2}$						$B_{i,j,2}$
	$L_{i,j,3}$	$D_{i,j,3}$	$U_{i,j,3}$					$B_{i,j,3}$
	
		
				.	.			.
					$L_{i,j,nk-1}$	$D_{i,j,nk-1}$		$B_{i,j,nk-1}$

부유사농도의 경사를 지정하는 경계조건을 사용할 경우에는, 식 (4.2.22)를 격자점 i,j,nk , 시간단계 번호 $(n+W)$ 에 대해 적용하면,

$$\frac{C_{i,j,nk}^{n+1} - C_{i,j,nk-1}^{n+1}}{\Delta\eta} = \frac{d}{A} \eta^{-\frac{1}{A}-1} \frac{w_f}{\varepsilon_{sz}} C_a^\infty \quad (4.3.17)$$

로 표현되고, 이 식에서 L,D,B는 다음과 같다.

$$L_{i,jnk} = \frac{1}{\Delta\eta} \quad (4.3.18)$$

$$D_{i,jnk} = -\frac{1}{\Delta\eta} \quad (4.3.20)$$

$$B_{i,jnk} = \frac{d}{A} \eta^{-\frac{1}{A}-1} \frac{w_f}{\varepsilon_{sz}} C_a^\infty \quad (4.3.21)$$

전수심의 격자점에 대해 차분식을 쓰면, 다음의 매트릭스가 구성된다.

$D_{i,j1}$	$U_{i,j1}$					$x C_{i,j1} =$	$B_{i,j1}$
$L_{i,j2}$	$D_{i,j2}$	$U_{i,j2}$					$B_{i,j2}$
	$L_{i,j3}$	$D_{i,j3}$	$U_{i,j3}$				$B_{i,j3}$
	
		
				.	.		.
					$L_{i,jnk}$		$D_{i,jnk}$

2 단계 : 수평 이류

격자점의 가운데에서의 부유사 농도는 다음 식에 의해 구한다.

$$C_{upper} = C_{ip,jp,k} + (C_{ip+1,jp,k} - C_{ip,jp,k}) \cdot \Gamma_x$$

$$C_{lower} = C_{ip,jp+1,k} + (C_{ip+1,jp,k} - C_{ip,jp,k}) \cdot \Gamma_x$$

$$C_{left} = C_{ip,jp,k} + (C_{ip,jp+1,k} - C_{ip,jp,k}) \cdot \Gamma_y$$

$$C_{right} = C_{ip+1, jp, k} + (C_{ip+1, jp, k} - C_{ip+1, jp, k}) \cdot r_y$$

$$C_{up, low} = C_{upper} + (C_{lower} + C_{upper}) \cdot r_y$$

$$C_{1, r} = C_{left} + (C_{right} - C_{left}) \cdot r_x$$

$$CC_{i, j, k} = \frac{(C_{up, low} + C_{1, r})}{2} \quad (4.3.22)$$

여기서, r_x, r_y 는 Fig.4.3.3과 같이 정의된다. 외해 경계면에서 해수가 유입하는 경우 Fig.4.3.4에서 보는 바와 같이 외해에서의 부유사농도 자료가 입력자료로 필요하다.

3 단계 : 수평 확산

격자점 i, j, k 에서의 차분식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{ccc_{i, j, k}^{n+1} - ccc_{i, j, k}^n}{\Delta t} &= \frac{1}{\Delta x'} \left(\varepsilon_{sx, i+1/2, j, k} \frac{ccc_{i+1, j, k}^n - ccc_{i, j, k}^n}{\Delta x'} \right. \\ &\quad \left. - \varepsilon_{sx, i-1/2, j, k} \frac{ccc_{i, j, k}^n - ccc_{i-1, j, k}^n}{\Delta x'} \right) \\ &\quad + \frac{1}{\Delta y'} \left(\varepsilon_{sy, i, j+1/2, k} \frac{ccc_{i, j+1, k}^n - ccc_{i, j, k}^n}{\Delta y'} \right. \\ &\quad \left. - \varepsilon_{sy, i, j-1/2, k} \frac{ccc_{i, j, k}^n - ccc_{i, j-1, k}^n}{\Delta y'} \right) \end{aligned} \quad (4.3.23)$$

육지경계면에서는 수평방향의 부유사의 확산이 없으므로 육지격자점에서의 부유사농도는 인접한 해상 격자점에서의 부유사농도를 갖는다고 가정한다. 예로서 $(i-1, j, k)$ 격자점이 육지라면, 다음의 차분식 형태가 된다.

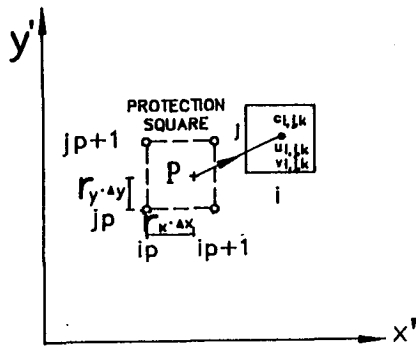


Fig. 4.3.3. Definition of r_x and r_y .

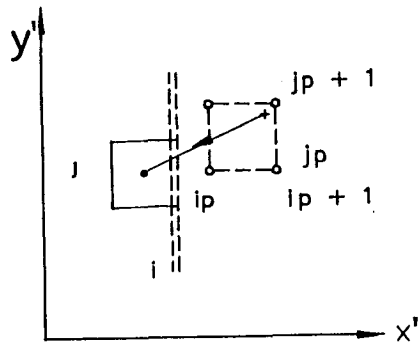


Fig. 4.3.4. Boundary condition for incoming open boundaries.

$$\frac{ccc_{i,j,k}^{n+1} - ccc_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x'} \left(\varepsilon_{sx} \frac{ccc_{i+1,j,k}^n - ccc_{i,j,k}^n}{\Delta x'} \right) \quad (4.3.24)$$

$$+ \frac{1}{\Delta y'} \left(\varepsilon_{sy} \frac{ccc_{i,j+1,k}^n - ccc_{i,j,k}^n}{\Delta y'} - \varepsilon_{sy} \frac{ccc_{i,j,k}^n - ccc_{i,j-1,k}^n}{\Delta y'} \right)$$

해저면의 높이의 변화에 대한 기본방정식 (4.2.25)는 다음과 같이 양해법으로 차분화하였다.

$$z_{b,i,j}^{n+1} = z_{b,i,j}^n + \frac{\Delta t}{1-n} \left(\frac{q_{\alpha,i,j} - q_{\alpha,i-1,j}}{\Delta x} + \frac{q_{\beta,i,j} - q_{\beta,i,j-1}}{\Delta y} \right) \quad (4.3.25)$$

제 4절 수치기법의 안정도 해석

분리기법의 Commutability는 Nicholson(1984)에 의하여 검토된 적이 있다. 그는 분리기법이 Commutability 조건을 만족시키지는 않으나, 이 조건을 만족시키지 않음으로 인한 오차는 크지 않을 것으로 예측하였다. 본 연구에서는, 세 단계로 분리된 기본방정식을 연직방향 확산이류 단계, 수평방향 이류 단계, 수평방향 확산단계의 순으로 풀기로 한다.

Consistency 또는 Compatibility는 연직확산이류 단계와 수평 확산 단계에서, 채택한 수치기법이 다음과 같이 잘 만족시키는 것으로 나타났다. 임의의 미분가능한 연속함수를 Taylor 급수로 전개하면 다음과 같다.

$$f^{n+1} = f^{n+w} + (1+W)\Delta t \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{(1-W)^2 \Delta^2}{2!} + \dots \quad (4.4.1)$$

$$f^n = f^{n+w} - W\Delta t \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{W^2 \Delta t^2}{2} + \dots$$

f 대신 c 를 대입하고 위의 두 식을 빼면,

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)^{n+W} &= \frac{c^{n+1}-c^n}{\Delta t} + (1-2W) \frac{\Delta t}{2!} \frac{\partial^2 c}{\partial t^2} \\ &= \frac{c^{n+1}-c^n}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.4.2)$$

가 된다. 이 식은 Δt 에 대해 1차의 정밀도를 갖는다. 예외적으로 W가 0.5이면(Crank-Nicolson scheme) 2차의 정밀도를 갖는다.

기본방정식(4.2.15)의 우변에서 함수 f를

$$f = F \frac{\partial c}{\partial \eta} + G \frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} \quad (4.4.3)$$

과 같이 정의하면,

$$\begin{aligned} f^{n+W} &= WF^{n+1} + (1-W)f^n - W(1-W)\Delta t \frac{\partial^2 f}{\partial t} + \dots \\ &= Wf^{n+1} + (1-W)f^n \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

와 같이 표시되고, 이 식은 시간증가분에 대하여 1차의 정밀도를 갖는다. 시간계산단계 $(n+W)$ 에서의 공간적인 면에서의 일관성을 고찰하면, c의 η 에 대한 미분항은 다음의 식들에서 구하여 진다.

$$c_{k+1} = c_k + \Delta \eta \frac{\partial c}{\partial \eta} + \frac{\Delta \eta^2}{2!} \frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} + \frac{\Delta \eta^3}{3!} \frac{\partial^3 c}{\partial \eta^3} + \dots \quad (4.4.5)$$

$$c_{k-1} = c_k - \Delta \eta \frac{\partial c}{\partial \eta} + \frac{\Delta \eta^2}{2!} \frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} - \frac{\Delta \eta^3}{3!} \frac{\partial^3 c}{\partial \eta^3} + \dots \quad (4.4.6)$$

$$\frac{\partial c}{\partial \eta} = \frac{c_{k+1} - c_{k-1}}{2\Delta \eta} - \frac{\Delta \eta^2}{3!} \frac{\partial^3 c}{\partial \eta^3} + \dots \quad (4.4.7)$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial \eta^2} = \frac{c_{k-1} - c_k + c_{k+1}}{\Delta \eta^2} - \frac{2\Delta \eta^2}{4!} \frac{\partial^4 c}{\partial \eta^4} + \dots \quad (4.4.8)$$

윗 식에서 식(4.4.7)와 (4.4.8)은 2차의 정밀도를 갖는다. 식(4.4.2), (4.4.7) 및 (4.4.8)은 모두 Δt 와 $\Delta \eta$ 가 줄어들면서 truncation error도 줄어들므로 원 편미분 방정식과 일관성(consistency)이 있다고 말 할 수 있다.

세단계로 분리된 각각의 수치계산과정은 계산의 안정성(Stability)을 유지하여야 한다. Smith(1965)는 연직방향의 확산이류계산에 쓰이는 음해기법은 무조건으로 안정함을 보인 바 있다. Nicholson(1983)에 의하면, 두 번째의 투영법도 기하학적인 내삽법의 특성상, 내삽방식에 따라 크고 작은 계산오차를 유발하기는 하나, 무조건 안정을 유지한다. 세단계의 수평 확산 단계는 O'Connor and Nicholson(1988)이 제시한 다음과 같은 안정조건이 필요하다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{2\varepsilon_{sx}} \quad ; \quad \Delta t \leq \frac{\Delta y^2}{2\varepsilon_{sy}}$$

여기서 Δt 는 시간증가분, Δx , Δy 는 각각 x , y 방향으로의 길이증가분이다.

제5절 부유사농도 계산 수치기법의 정확도

수치 모형은 항상 수치오차를 수반한다. 실제 지형에 수치모형을 적용했을 때 구한 답의 정밀도를 평가하기 위하여 이 수치모형을 단순한 경우의 해석해와 비교해 보았다. 본연구에서는 수치모형의 입력자료로 Dobbins(1944)이 비정상(unsteady) 부유사농도에 대한 해석해를 구한 조건을 똑같이 적용하여 그 결과를 해석해와 비교하였으며, Hjelmfelt and Lenau(1970)의 정상(steady) 부등(nonuniform) 부유사농도에 대한 해석해와 비교하였다. Dobbins(1944)이 해석해를 구한 제 변수의 값은 다음과 같다.

Variable	Value	Remarks
d (m)	17.07	56 ft
w_f (mm/s)	4.115	0.0135 ft/s
ϵ_{sz} (m^2/s)	0.04561	0.491 ft^2/s
$\rho_s c_a$ (kg/m^3)	1.0	
Δt (s)	414.8148	

수치모형의 계산결과와 해석해를 Fig.4.5.1에 제시하였으며, 수치모형이 해수면에서는 해저면에 비해 상대적으로 덜 정확한 답을 보였다. 해저면의 부유사농도를 기준으로 할 때 최대상대오차는 3%인 것으로 나타났으며, 이는 공학적 활용을 위해서는 만족할 만 한 정도인 것으로 판단된다.

다음은 본 수치모형을 Hjelmfelt and Lenau(1970)의 해와 비교하였다. 이들의 해가 최종평형상태에 관한 해이므로 본 수치모형을 충분한 시간동안 실행시킨 후의 답을 취하여 해석해와 비교하였다(한 계산간격 동안 전 계산 격자점에서 부유사농도의 변화가 0.1 % 이내일 때 계산 종료). 그들의 해석해와 본 수치모형을 적용한 조건은 다음과 같다.

Variable	Value	Remarks
d (m)	1.0	
U (m/s)	1.0	Uniform along depth
w_f (cm/s)	2	
u_* (m/s)	0.1	
$\rho_s c_a$ (kg/m^3)	1.0	

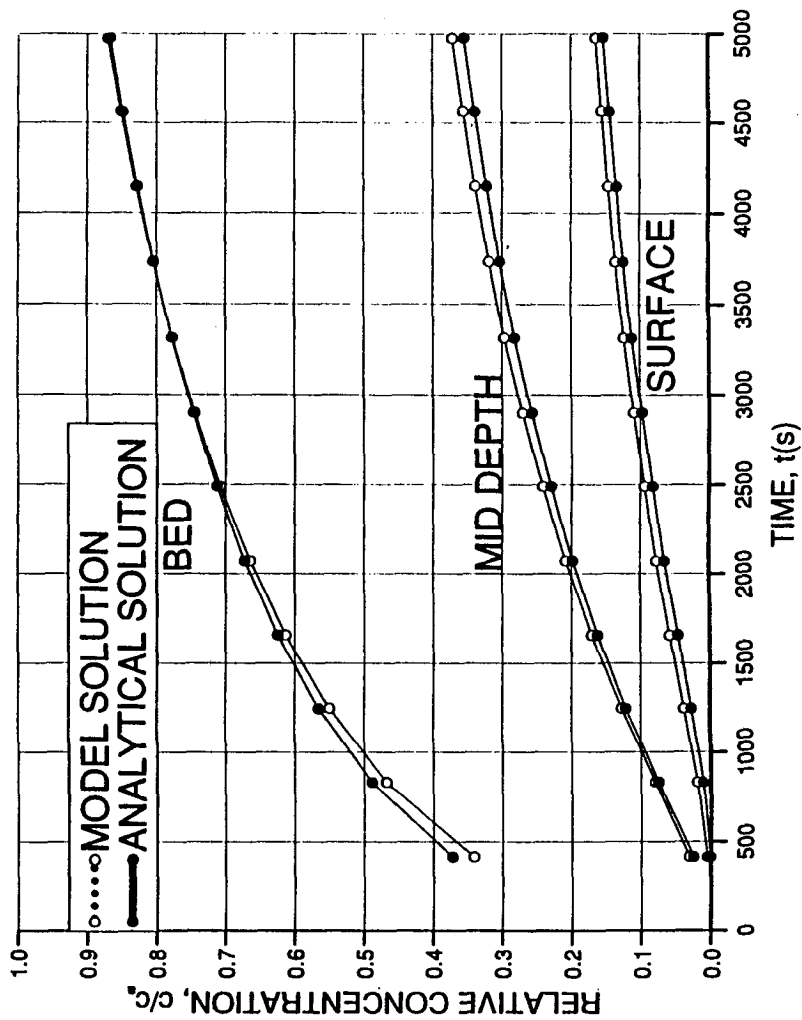


Fig. 4.5.1. Comparison of present model results with Dobbins(1944) analytical solution.

해석해와 본 수치모형의 계산결과를 Fig.4.5.2에 제시하였으며, 대체적으로 수치모형은 해석해와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 해저면 가까이의 계산결과가 높은 층에 비해 더욱 정확한 값을 보인다. 계산영역 내에서의 해저면의 부유사농도에 비한 최대상대오차는 4% 정도로 우수한 편인 것으로 나타났다.

제6절 수치모형의 현장적용

1. 개 요

이상과 같이 수립된 3차원 퇴적물이동 수치모형을 본 연구의 기준모형항만 및 해안으로 선정된 죽변항 및 인근 해역에 적용하였다. 죽변항은 1905년 방파제가 축조된 이후 항내에 지속적인 퇴적현상이 일어나고 있으며, 현재는 퇴적 및 준설이 거의 매해 반복되고 있다. 죽변항 매몰의 저감 대책 마련을 위해 한국해양연구소(1987, 1988, 1989)가 파랑, 흐름 및 퇴적물이동량을 관측한 바 있으며, 이들 관측자료를 본 모형의 입력 및 검증자료로 이용하였으며, 본연구 수행중 관측 분석된 자료는 1993년 10월 부터 12월 까지 약 2개월간 실시된 파랑관측을 제외하면 각각의 관측기간이 일주일 정도로 짧고 관측항목간의 유기적 해석이 어려워 좀 더 시간을 갖고 정밀한 분석을 거쳐야 할 것으로 판단되어 이들 자료의 관측항목간의 유기적 해석 및 정리는 추후의 연구과제로 미루고 본연구에서는 이 자료를 직접적으로 이용하지는 않았다. 또한 이전의 관측자료와의 비교 분석 및 검토도 추후의 연구과제라 할 수 있다.

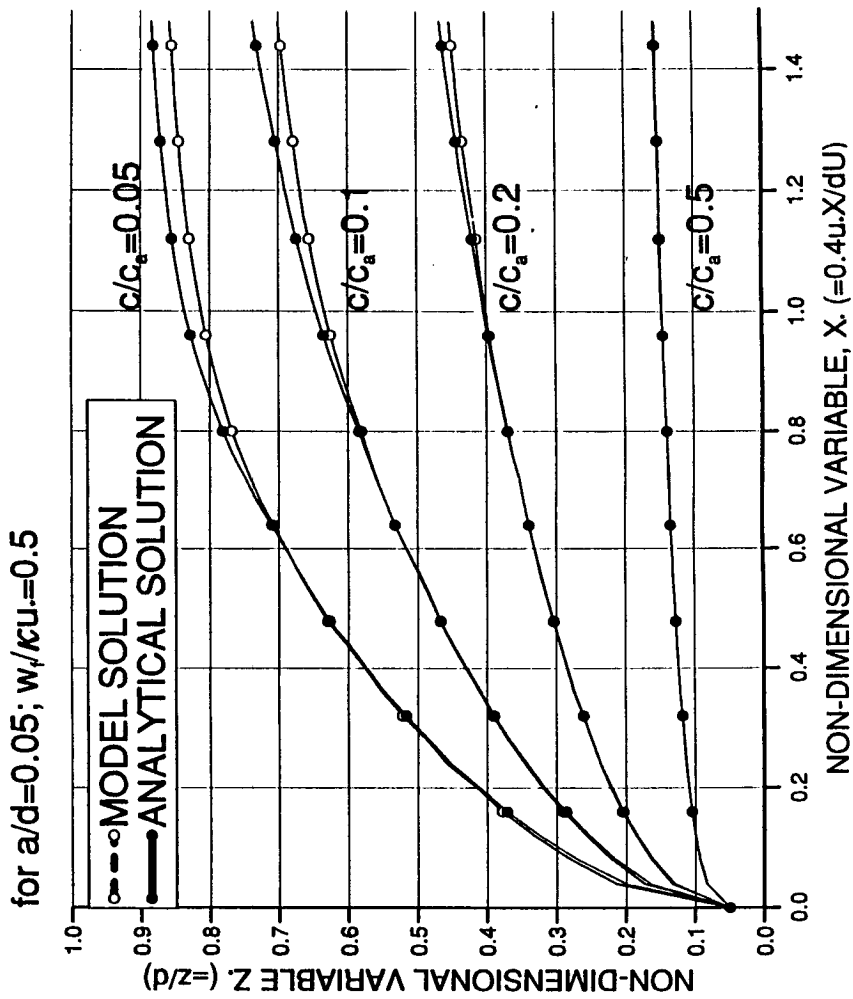


Fig. 4.5.2. Comparison of present model results with Hjeimfelt and Lenau(1970) solution.

본 퇴적물이동 수치모형은 앞에서 기술한 바와 같이 파랑 자체에 의한 퇴적물이동은 고려하지 않으며, 파랑에 의해 생성 발달된 연안류에 의한 퇴적물이동만을 고려하고, 계산된 3차원 부유사농도로 부터 해저지형변화를 계산하므로 기본적인 입력자료로 3차원 파랑류 자료가 요구된다. 본연구에서는 제3장에서 기술된 3차원 파랑류순환 수치모형을 이용할 예정이었으나 시간적인 제약으로 인해 이 결과를 이용할 수는 없었으며, 본연구에서 수립된 점모형 결과를 적절한 방법으로 보간하여 산출된 결과를 이용하였다. 이때 파랑의 전파변형 산출에는 수치모형 ECORD를, 파랑류 산출에는 수치모형 WIFLOW가 각각 이용되었다. 계산으로는 현상태와 현재 계획중인 대책안에 대해 계산할 예정이었으나 수치모형의 수립 및 검증이 예상보다 늦어져 현상태에 대해서만 계산하고 본 수치모형의 적용성 및 정확도 등에 대해서만 검토하였으며, 현재 계획중인 대책안에 대한 적용은 차후의 연구 과제로 미루었다.

2. 현장특성 및 검증자료

죽변항은 내항의 크기가 약 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 이며, 평균수심은 약 5m이다. 1905년 이후 동측으로 방파제와 남측으로 방사제가 축조·연장되었다. 방파제 건설이 시작된 이후 죽변항 주변의 해저지형이 상당히 변한 것으로 나타났다. 수심 20m까지의 해저면 경사는 약 1/50이며, 해저면은 모래와 암반으로 구성되어 있다. 죽변항 인근의 해안은 양단에 암반이 노출된 pocket형이며, 양단 사이에 사빈이 발달되어 있다. 이 사빈의 중간지점에 홍수시 육상으로부터 모래를 공급하는 작은 하천이 있으나, 해양연구소(1987)의 관측에 따르면 그 양은 무시할만 하다. 죽변만 바깥쪽에도 몇 개의 작은 하천이 있지만 죽변만 양단에 형성된 암반단면으로 인해, 죽변만

밖에서의 퇴적물이동은 항 주변에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

1975년 1월 1일부터 1985년 12월 31일까지(1977년 1월 1일부터 12월 31일까지는 제외)의 연중파랑상태는 각 파랑조건에 대한 시간빈도율로 제시된 Fig.4.6.1과 같다(해양연구소, 1989). 이 그림에 따르면 동계에는 NE-계열의 파랑이 우세한 반면, 하계에는 NE-, E-, 혹은 SE-계열의 파랑이 거의 균등하게 분포한다. 이 해역에서의 퇴적물이동의 주된 기작 및 이동양상을 파악하고, 관련 수치모형의 입력 및 검증자료 획득을 위해 여러 항목에 대한 현장관측이 수행된 바 있다(해양연구소 1987, 1988, 1989 참조). 이때 풍향, 풍속, 온도 및 습도는 Norway의 Aanderaa 사에서 제작한 Weather Station으로 관측하였으며, 조위와 조류는 각각 같은 회사의 WLR5과 RCM5를 이용하여 관측하였다. 바람에 의한 흐름을 파악하기 위하여 부표추적도 실시된 바 있으며, 해저퇴적물은 100점 이상을 grab형 채취기로 채취·분석하였다.

3. 파랑의 전파변형 계산

파랑의 전파변형 산출에는 제2차년도 연구를 통하여 수정 보완된 수치모형 ECORD가 사용되었다. 비교 검증을 위한 자료로는 해양연구소(1987)의 관측자료가 이용되었으며, 관측 분석된 파랑에 대한 자세한 내용을 Table 4.6.1과 Fig.4.6.2에 수록하였다.

파랑전파모형을 우선 외해경계를 따라 파고 5.5m, 주기 7초의 파랑이 ENE- 및 ESE-방향에서 일정하게 입사되는 것으로 가정한 악천후시에 대해 적용하였으며, 입사파향에 따른 계산 결과 파고분포도는 Fig.4.6.3a,b와

Values shown are % of time.

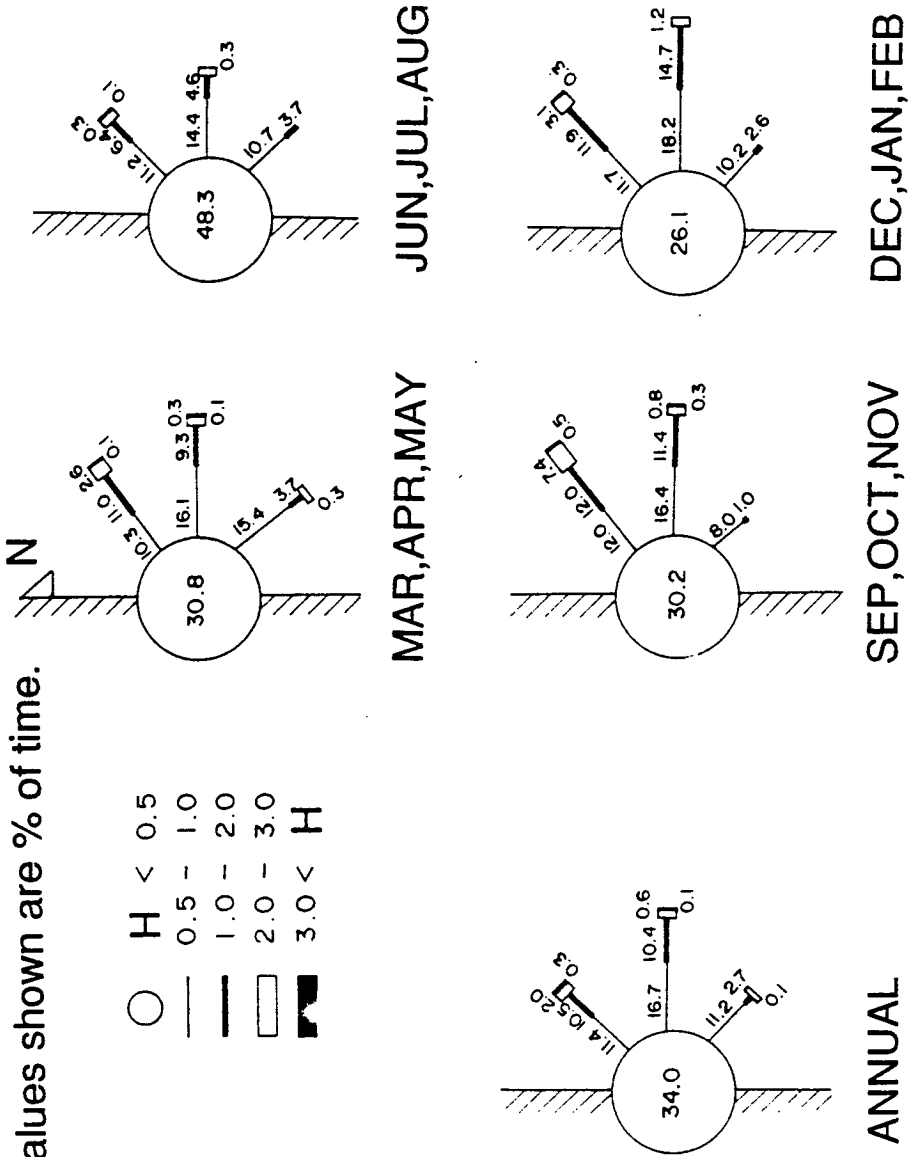
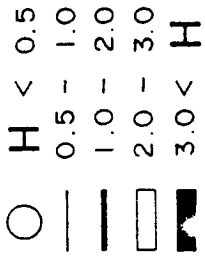


Fig. 4.6.1. Annual wave climate at Chukpyon.

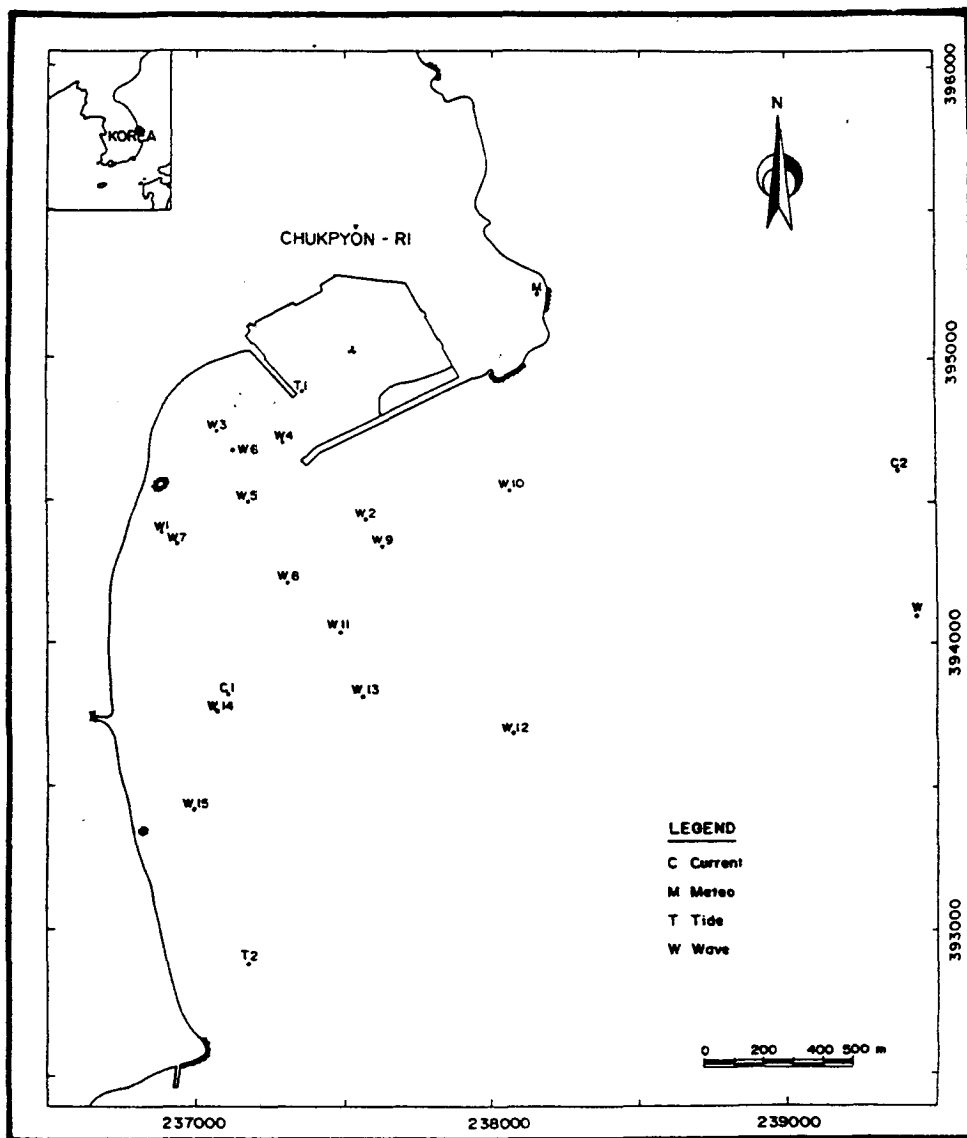


Fig. 4.6.2. Measurement stations for wave height.

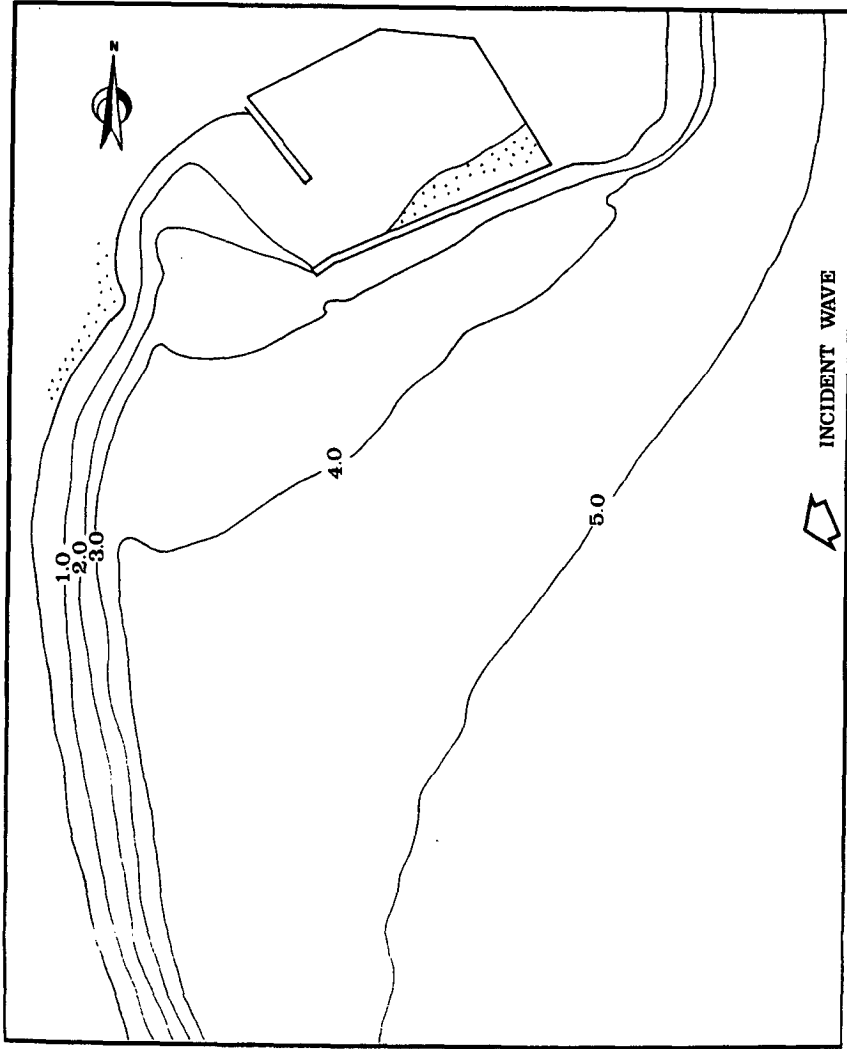


Fig. 4.6.3a. Wave height distribution computed by the model, ECORD (wave direction of ENE).

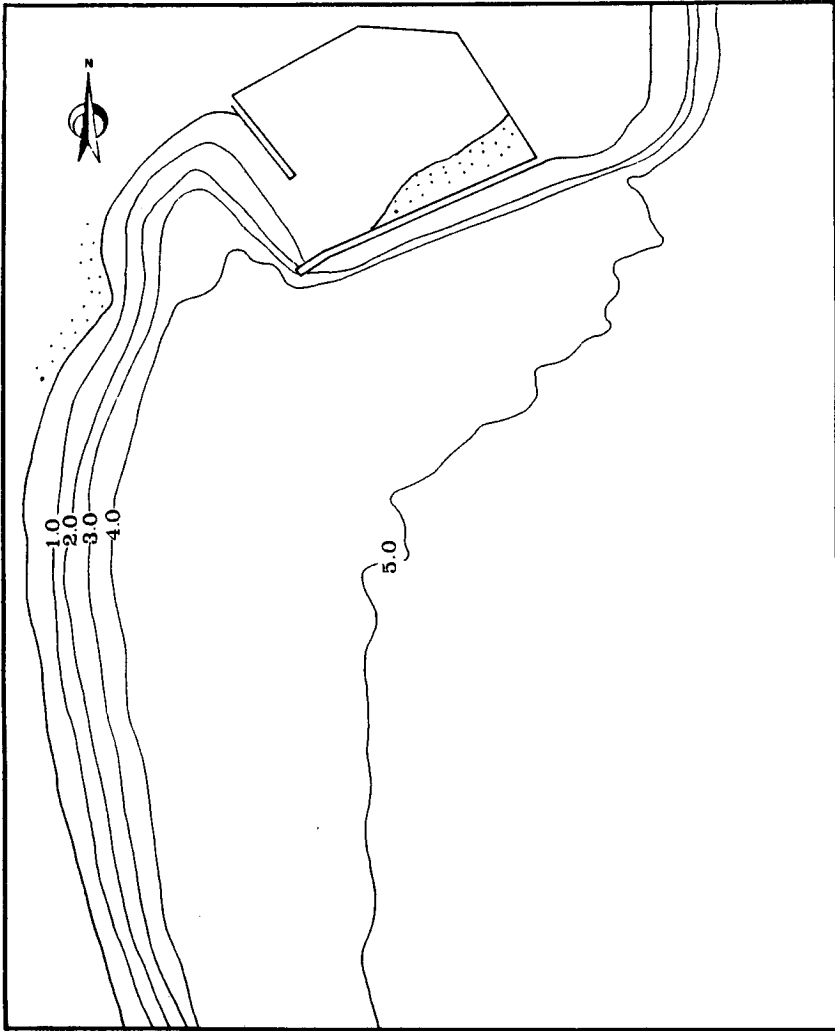


Fig. 4.6.3b. Wave height distribution computed by the model, ECORD (wave direction of ESE).

같다. 이 결과를 보면 동방파제가 입사파의 항내진입을 현저히 감소시키는 것으로 나타났다. ENE-방향의 파랑의 경우에는 동방파제를 향하는 강한 굴절로 인하여 죽변항 주변에는 매우 낮은 파고분포가 나타난다. 또한 본 파랑모형을 Table 4.6.1에 제시한 각 파랑조건에 대해서도 실행하였으며, 정점 W에서의 유의파고를 입사파 조건으로 하였다. 천해정점(W1-W13)에서 입사파에 대한 계산된 파고비와 관측된 파고비와의 비교를 Table 4.6.2에 제시하였다. 강한 회절영역 부근으로서 약간의 위치편차가 해에 매우 민감한 영역인 정점 W4와 W6에서는 상당히 다른 값을 보였것을 제외하고는 대부분의 경우에 파고비의 계산치와 관측치가 잘 일치하여 본 수치모형은 전체계산영역에 걸쳐 비교적 정확한 파고분포를 보이는 것으로 나타났다.

Table 4.6.1 Details of wave measurements at Chukpyon (after KORDI, 1987).

St.	X(EW)	Y(NS)	d(m)	Period	θ_w	H _w (m)
W	239,509	394,011	39.0	14 Aug. 87 -14 Sep. 87	ESE	-
W3	237,050	394,802	5.5	16 Aug. 87 11:05-13:11	ESE	0.748
W4	237,259	394,723	6.3	16 Aug. 87 16:55-18:08	ENE	0.654
W5	237,185	394,514	8.2	9 Sep. 87 12:35-14:35	ENE	0.421
W6	238,358	394,833	6.6	9 Sep. 87 10:20-12:20	ENE	0.419
W8	237,274	394,244	12.0	10 Sep. 87 11:30-13:30	ENE	0.457
W9	237,628	394,432	14.0	10 Sep. 87 15:55-17:55	ENE	0.599
W11	237,477	394,052	13.0	10 Sep. 87 13:40-15:45	ENE	0.566
W12	237,072	393,637	22.0	11 Sep. 87 9:10-11:10	ENE	0.768
W13	237,524	393,804	9.0	11 Sep. 87 11:20-13:20	ENE	0.740

Note : d = water depth relative to MSL ; θ_w = wave direction
H_w = wave height

Table 4.6.2 Comparison of calculated and measured wave heights.

Station	Measured Wave Height Ratio (H / H at W)	Calculated Wave Height Ratio (H / H at W)	Relative Error to Incident Wave (%)
W3	0.63	0.60	-0.5
W4	0.74	0.35	-7.1
W5	0.62	0.54	-1.5
W6	0.18	0.42	+4.3
W8	0.77	0.71	-1.1
W9	0.80	0.76	-0.7
W11	0.86	0.80	-1.1
W12	0.94	0.96	+0.3
W13	0.86	0.85	-0.2

4. 파랑류의 계산

파랑류산출을 위하여 제2차년도 연구에서 수립된 수치모형 WIFLOW를 이용하였다. 이 수치모형은 수심평균된 연속방정식 및 운동방정식을 사용하며, 계산시간이 짧아 실제지형의 장기간에 걸친 해저지형변화의 재현에 효과적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 본모형의 적용성을 검토하기 위하여, 본모형을 파랑변형 수치모형 ECORD를 이용하여 계산된 경우, 즉 파고 5.5 m, 파향 ENE 및 ESE에 대해 계산된 파랑장을 입력자료로 이용하여 적용하여 보았으며 이 때 저면조도는 수심의 6 %로 하였다. 이 계산 결과를 Fig.4.6.4a,b에 제시하였으며, 이 그림은 두파향 모두 퇴적물을 항내로 이동시킬 수 있는 강한 연안류를 발생시킨다는 것을 보여준다. 또한 파랑이 북쪽에서 진입할 때보다 남쪽에서 진입할 때 보다 강하게 발달하며,

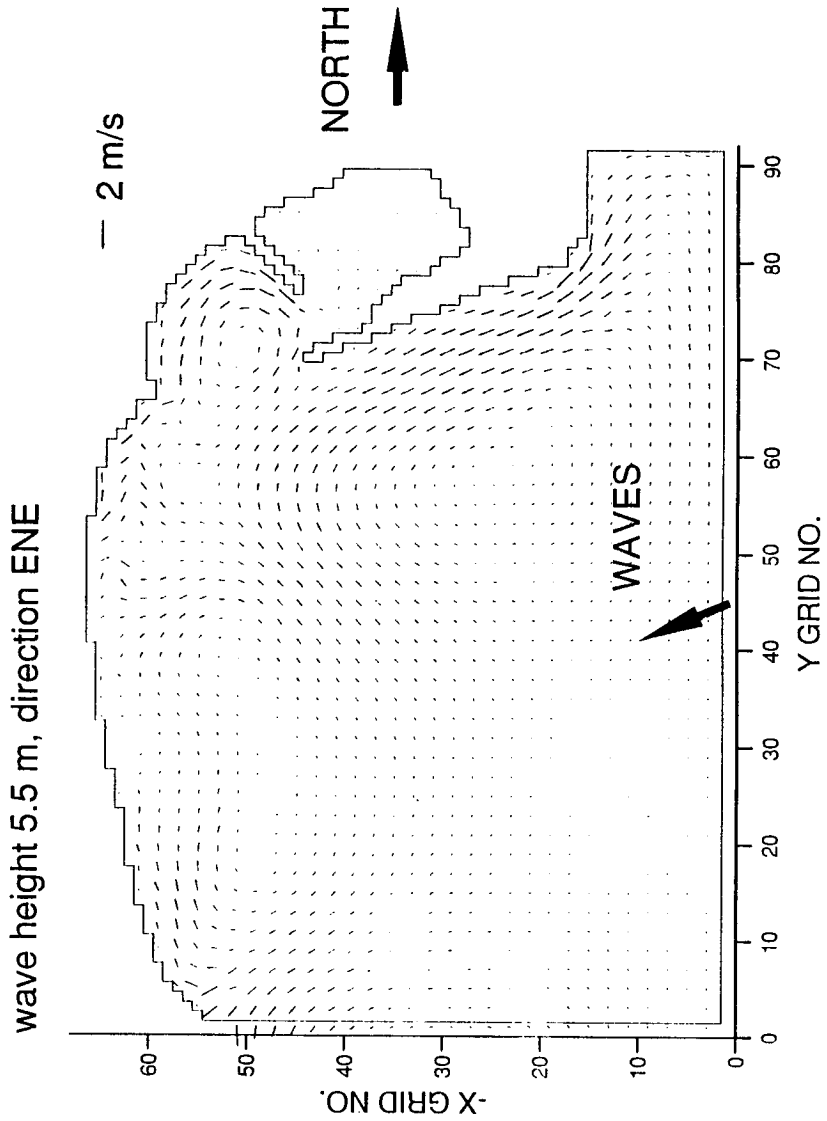


Fig. 4.6.4a. Wave-induced current vectors computed by the model, WIFLOW (wave direction of ENE).

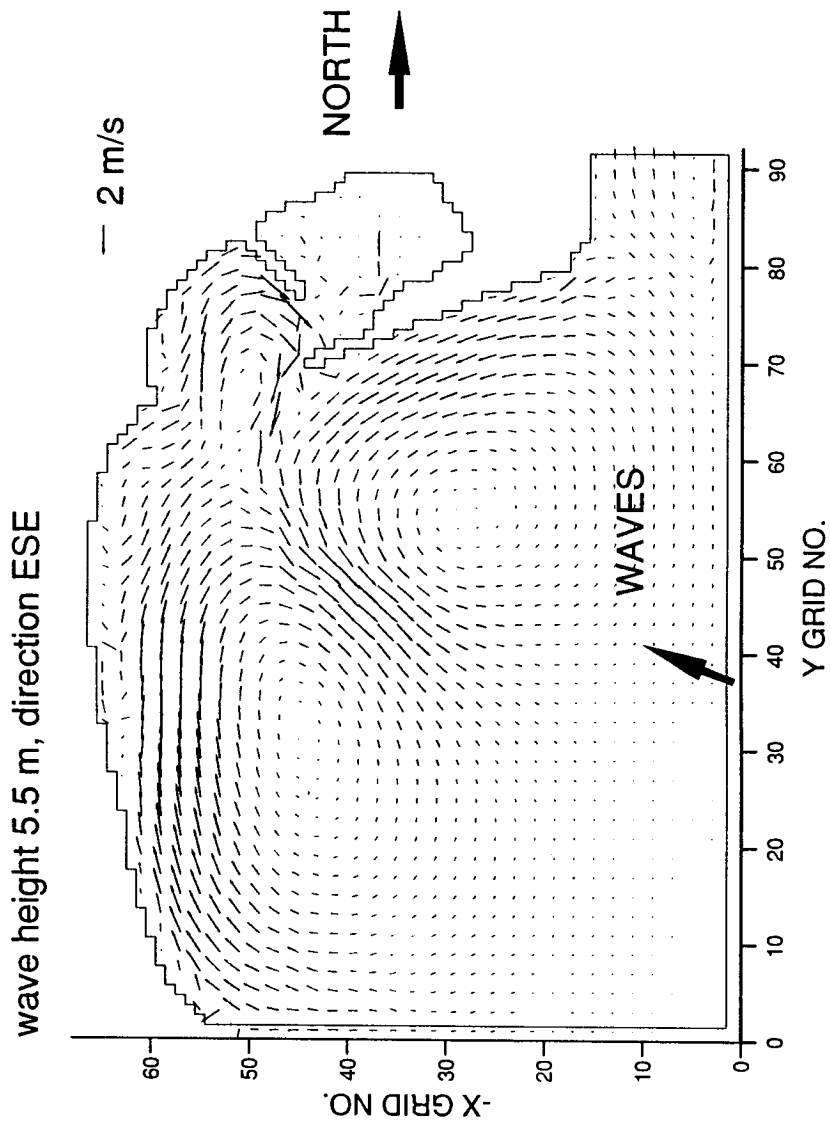


Fig. 4.6.4b. Wave-induced current vectors computed by the model, WIFLOW (wave direction of ESE).

이는 파랑류가 공간적으로 균일하게 발달하기 위해 필요한 거리의 효과 때문이다. 또한 방사제 남쪽 사빈 전면에서는 연안류가 항상 북쪽으로 발달하여 퇴적물의 항내 유입에 기여하고 있음을 보이며, 동방파제 전면에서의 연안류는 두 파향 모두 남서류를 발생시킨다. 파향이 매우 드물거나 불가능한 S 혹은 SSE가 아닌 경우에는 동방파제 전면에서의 연안류는 항상 항입구를 향할 것으로 판단되며, 이 역시 항입구의 매몰에 기여할 것으로 예상된다.

파고가 높을수록 퇴적물의 이동량이 증가하고, 저면고에 미치는 영향이 커지지만, 태풍시에는 강한 바람과 높은 파고로 인해 파랑류를 직접 측정하기는 매우 어렵다. 이상적으로는 파랑이 비교적 높을 때, 해안에 직각 방향인 여러 정점의 사빈상에서 파랑류 분포를 관측하여야 한다. 그러나, 대부분의 경우 시간, 장비, 및 예산 등의 제약으로 인해 충분한 관측을 실시하기는 대단히 어려우며, 특히 해저지형변화에 큰 영향을 미치는 폭풍시 등 파랑이 클 때는 해상에 튼튼한 고정구조물을 설치해야 하는 등 관측 자체가 어렵기 때문에 세계적으로도 이러한 현장관측자료를 입수하기는 어려운 실정이다. 포항지방 해운항만청은 죽변 해안에서 파랑류의 세기와 경향을 파악하기 위한 관측을 수행한 바 있으며(포항지방 해운항만청, 1988), 본 연구에서는 이 결과를 검증자료로 이용하였다. 이 때 파랑류는 프로펠러형의 유속계인 RCM-5P를 이용하여 10분 간격으로 관측하였으며, 관측에 대한 자세한 사항을 Table 4.6.3와 Fig.4.6.5에 수록하였다. 이 그림의 정점 L2에서 관측 분석된 잔여류 유속을 풍향 및 풍속, 유의파고 및 최대주기와 함께 Fig.4.6.6에 수록하였다. 관측기간 동안에 유의파고는 두 개의 peak를 보였으며, 기록된 파랑류에서도 두 개의 peak를 보였다. 관측기간 동안의 유의파고는 0.3~1.6 m이었으며, 이는 많은 양의 퇴적물을 이동시키기에는

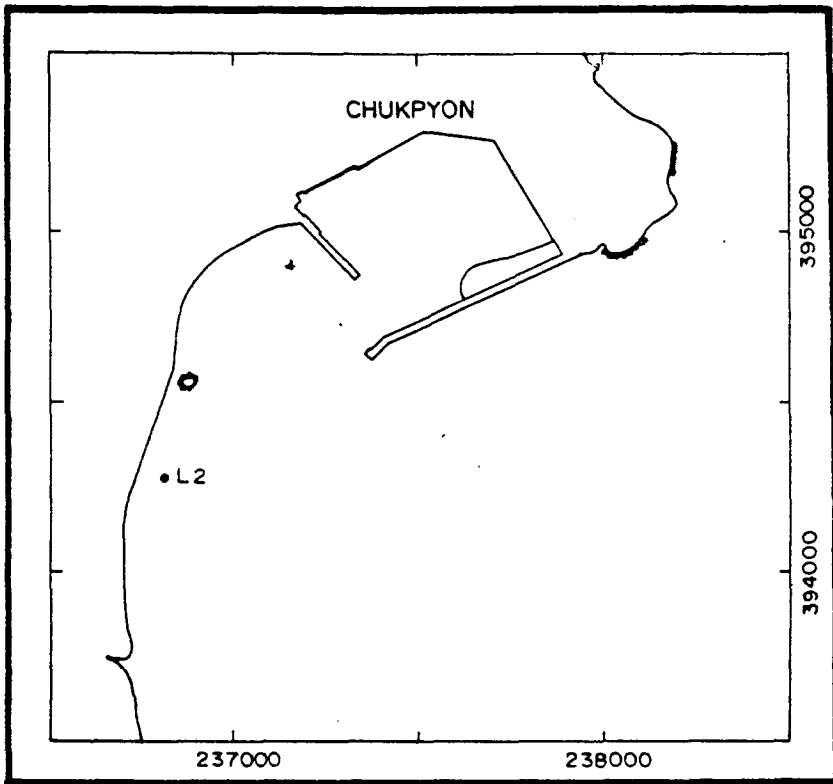


Fig. 4.6.5. Measurement station for wave-induced current.

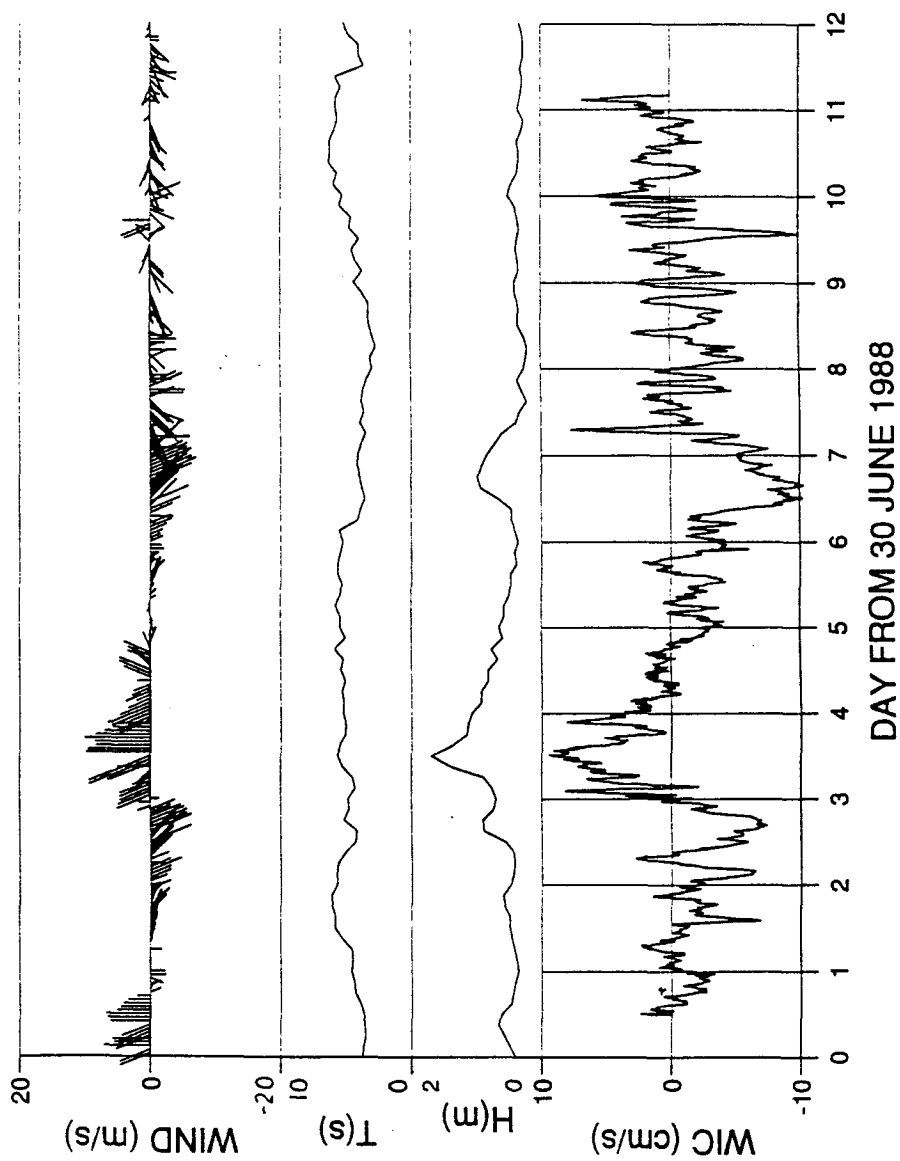


Fig. 4.6.6. A time-series of measured wave-induced current.

Table 4.6.3 Details of wave-induced current measurement at Chukbyon.

St.	X(EW)	Y(NS)	Period	d(m)
L2	236,790	394,305	30 Jun. 88 - 11 Jul. 88	2.0

비교적 작은 값이나, 본모형을 검증하는데는 사용될 수 있을 정도인 것으로 판단되었다.

작은 파랑조건하에서 관측된 관측치와 수치모형의 계산치를 비교하기 위하여 해저면이 단순한 plane beach라는 가정하에 파랑류를 산정하기 위해 본래의 평면 2차원 모형 대신에 단순한 평면 1차원 모형을 사용하였다. 관측기간 중에 나타난 최대유속은 1988년 7월 3일 발생한 입사파랑의 파고가 1.6m 일때의 8 cm/s와 7월 6일 입사파랑의 파고가 1m 일때의 0.9cm/s였으며, 이때의 바람은 각각 북풍과 남풍계열 이었다. 이와 같은 조건하에서 plane beach로 가정하고 실시된 본 수치모형에 의한 수심 2m에서의 유속은 각각의 경우에 대해 11.4 cm/s와 10.6 cm/s로 계산되었으며, 이는 바람, 파향 및 파랑류를 측정하는데 어느 정도의 불확실성이 포함될 수 있으며, 파랑류의 세기가 쇄파각에 큰 영향을 받는 점을 고려할 때 관측치와 잘 일치한다고 할 수 있다.

5. 부유사농도 및 해저지형 변화

대상해역의 부유사농도 및 해저지형변화는 전절에서 기술한 3차원 수치모형을 이용하여 계산하였다. 이 때 수치모형의 평면격자망은 파랑 및 파랑류 모형과 같이 30m×30m 크기의 92×68=6,256개의 격자로, 그리고 연

직격자수는 10개로 구성하였으며, 연직좌표 변환계수는 0.1로 하였다. 계산 시간증분 Δt 는 0.1초로 하였으며, 기준면 농도와 소류이동량에 관한 scaling parameter C_2, C_4 는 각각 2.5×10^{-5} , 0.055로 주었다. 계산된 부유퇴적물의 농도를 해양연구소(1988)의 관측치와 비교하였다. 이 때 부유퇴적물농도는 HR Ltd(U.K.)의 채취기를 이용하여 관측하였으며, 관측위치는 Fig.4.6.7에 그리고 관측일시 및 관측점의 수심 등에 대한 자세한 사항은 Table 4.6.4에 수록하였다. 3개 정점에서 수심에 걸쳐 계산된 부유퇴적물농도의 연직분포를 관측치와 함께 Fig.4.6.8a-c에 제시하였다. 이 그림을 보면 관측치가 보다 큰 분산을 보임을 감안할 때 계산치가 비교적 타당한 결과를 보임을 알 수 있다.

Table 4.6.4 Details of suspended sediment concentration measurements.

St.	X(EW)	Y(NS)	Period	d(m)	θ_w	H(m)
R2	237,288	394,834	16 Aug. 87 12:30-13:30	5.3	ESE	0.817
R4	237,053	393,899	17 Aug. 87 10:00-13:30	2.0	ENE	0.745
R6	236,769	393,802	16 Aug. 87 15:00-18:00	3.9	ENE	0.758

해저지형변화를 재현 또는 예측하기 위해서 파랑조건에 따라 해저지형이 연속적으로 변하므로 이상적으로는 파랑조건을 실제의 시계열과 같이 연속적으로 입력시켜 계산해야 한다. 그러나, 중기간 혹은 장기간에 걸친 모의에서 실제 시계열을 입력할 경우 막대한 계산시간을 필요로 하며, 이는 공학적인 관점에서 바람직하지 못하다. 이에 대한 몇가지 대안은 일반적으로 다음과 같다. 그 첫째는, 일종의 모의기법(Vemulakonda et al., 1988)을 사용하는 것으로 파랑의 종합적인 시계열을 만드는 것이다. 이 기법을 통

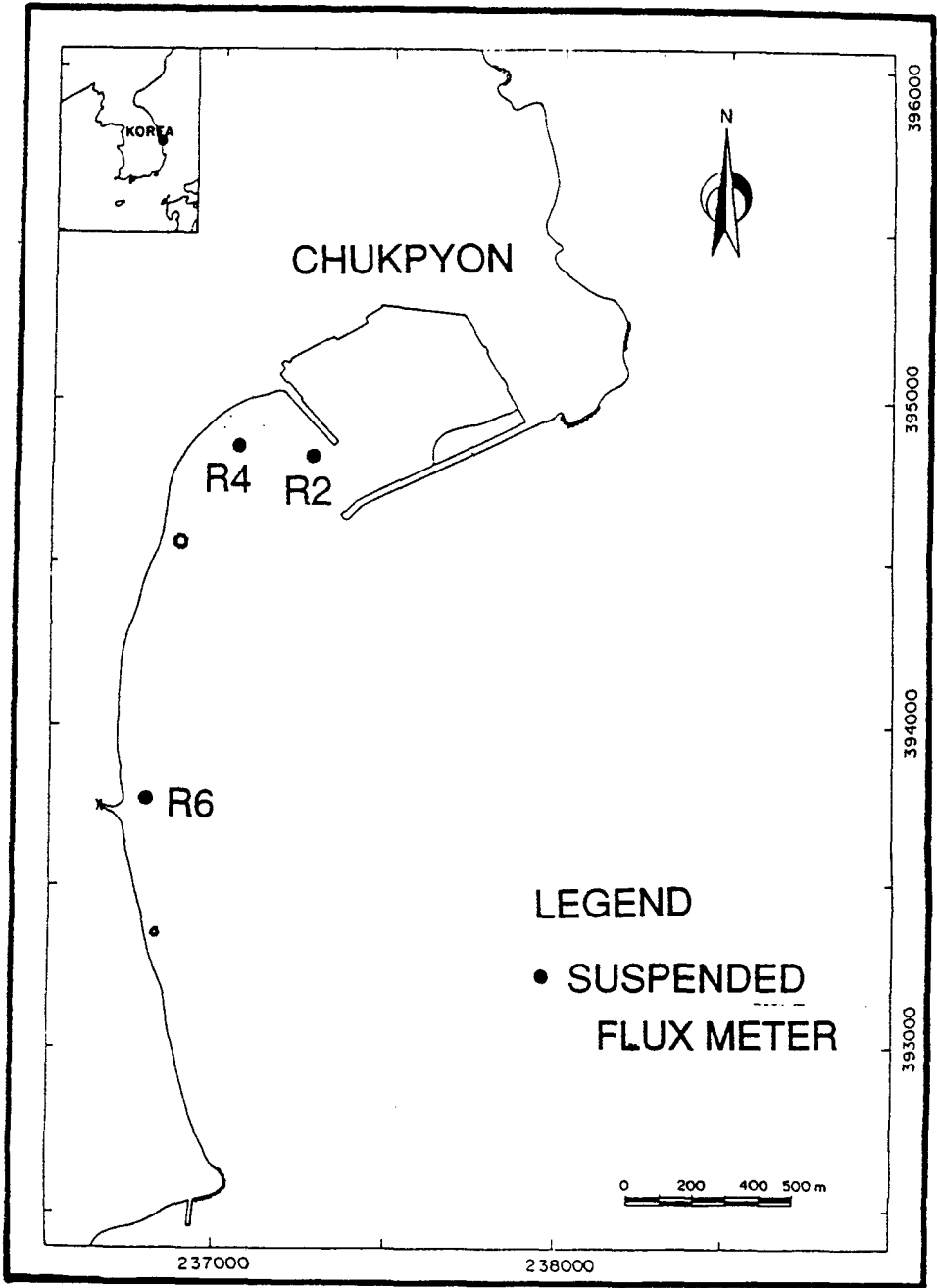


Fig. 4.6.7. Measurement stations for suspended sediment concentration.

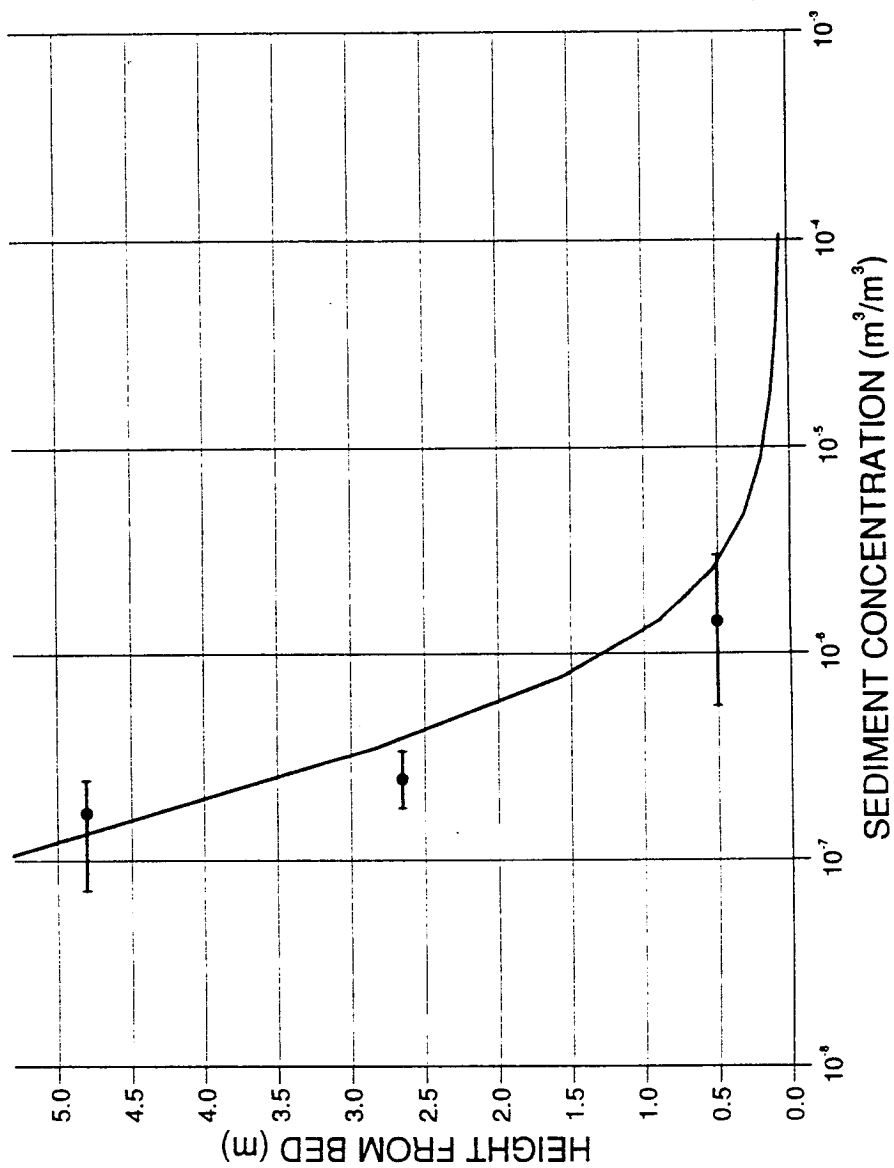


Fig. 4.6.8a. Comparison of calculated and measured suspended sediment concentrations : station R2.

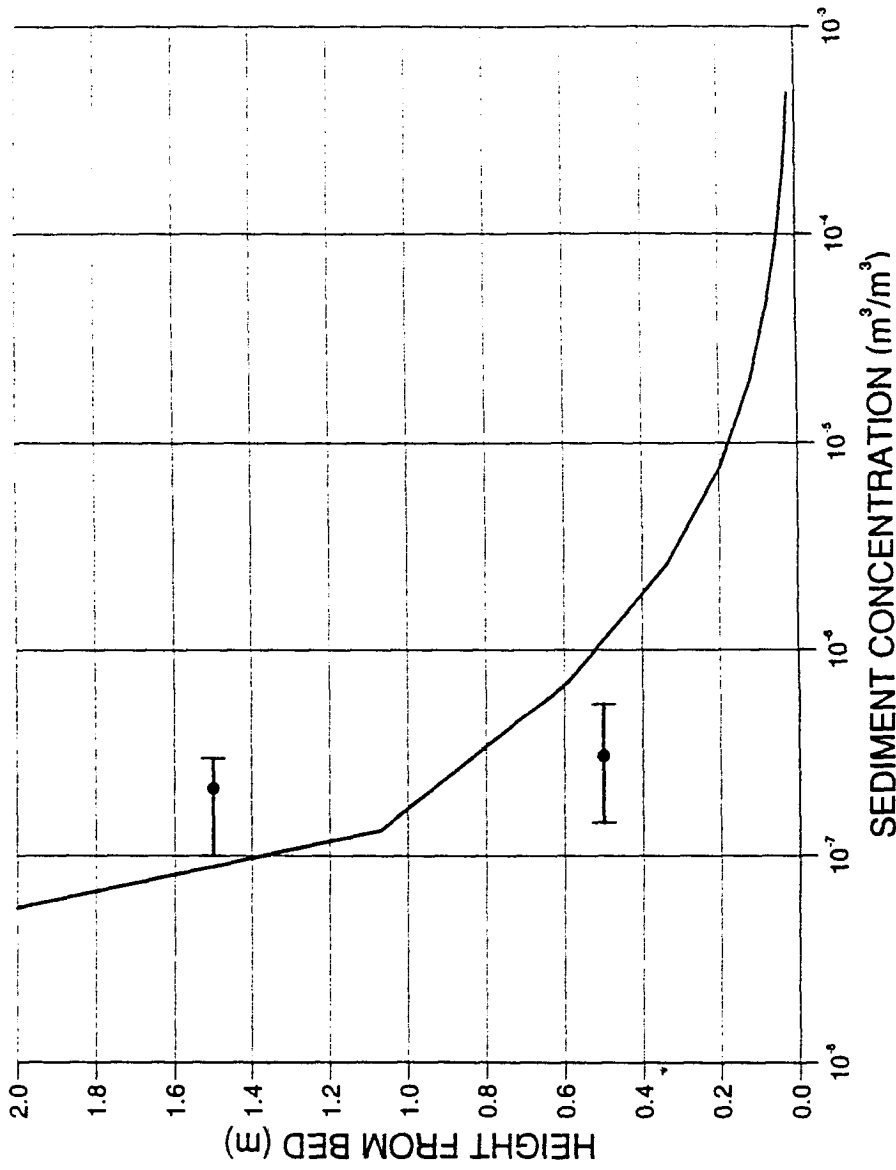


Fig. 4.6.8b. Comparison of calculated and measured suspended sediment concentrations : station R4.

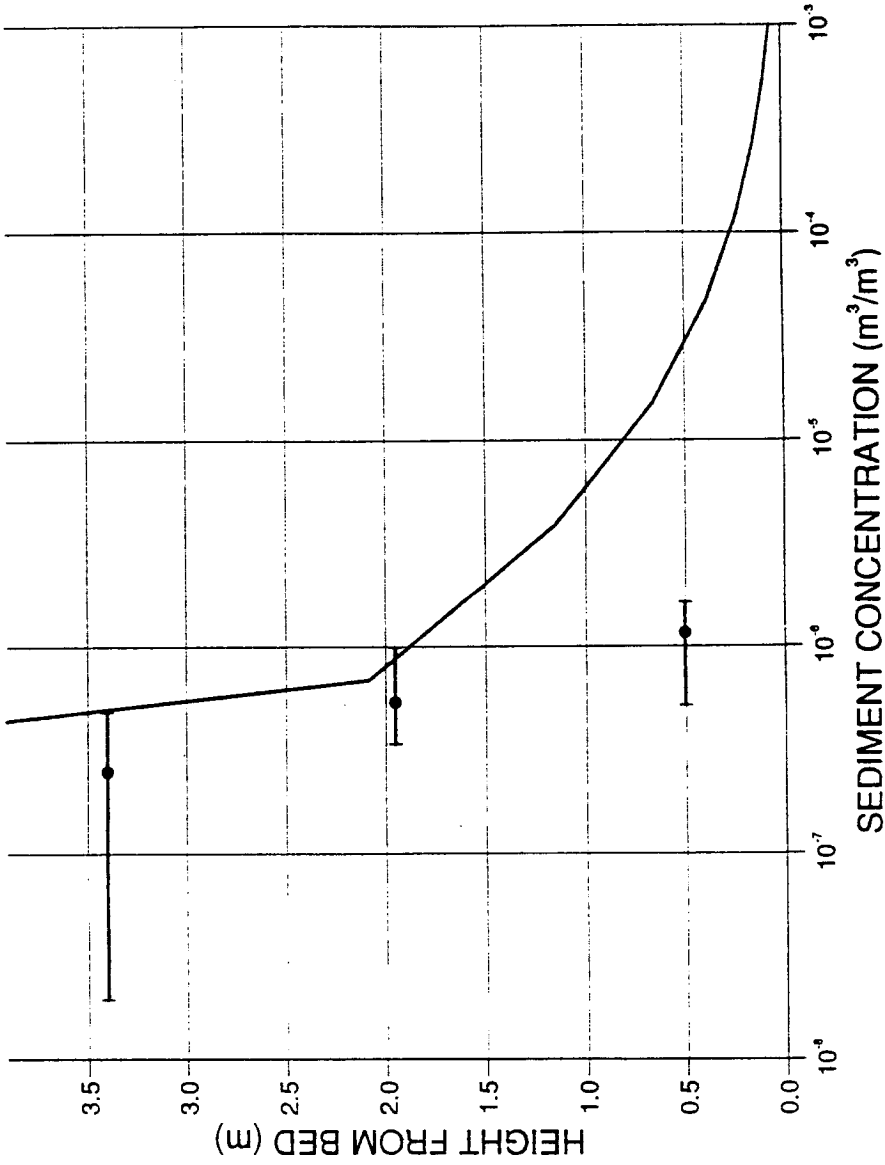


Fig. 4.6.8c. Comparison of calculated and measured suspended sediment concentrations : station R6.

한 인위적인 파랑기록은 현장에서의 실제적인 파랑통계치를 대표하며, 파랑 조건의 수가 실제의 총시계열 수보다 훨씬 감소하여 계산시간을 줄일 수 있다. 둘째는 하나의 대표파랑을 사용하는 것으로서, 가장 작은 수의 파랑 조건을 사용한다. Chesher and Miles(1992)는 가중방법을 사용하여 대표파고, 주기 및 파향을 선택하는 방법을 제시한 바 있다. 그러나, 너무 작은 수의 파랑조건을 사용하면 특정점에서, 특히 파향의 영향이 중요한 경우에 퇴적물 이동 양상이 적절하게 재현되지 않는 단점이 있다. 셋째는 현장에서의 파랑조건을 작은 수의 여러 군으로 분류하여 사용하는 것으로, 그 군의 수는 사용목적, 요구되는 정확도 및 계산효율을 고려하여 주의하여 선택하게 되며, 각 군의 파랑조건은 그 군을 대표하는 파고, 주기 및 파향을 나타내도록 한다. 이 때 각 파랑조건은 같은 초기저면조건에 적용되며, 해저지형의 총변화는 각 파랑조건에 의한 결과에 적절한 시간가중치를 주어 합하여 구하는 방법으로 본 연구에서는 이 방법을 택하였다.

수치모형 계산치와의 비교 목적으로 본연구에서는 제2장에서 기술한 바와 같이 1993년 10월 부터 12월 까지 2개월간 파랑관측을 실시하고 그 전후에 수심측량을 실시하였으나 수심측량 자료에 문제가 발견되어 본연구에서는 연속적인 파랑자료와 수심자료를 동시에 얻을 수 있는 1987년 6월과 11월에 관측된 해양연구소의 자료(해양연구소, 1988)를 검증자료로 이용하였다. 특히 이 기간은 최대유역파고가 각각 5.4m와 5.6m이었던 B급 태풍 Thelma(1987년 7월 10일)와 Dinah(1987년 8월 30일)가 통과한 기간으로 지형변화가 컸을 것으로 예상되었다. 이 기간 동안 기록된 파랑자료를 분석한 결과, 두개의 대표파향(ENE, ESE)과 최대주기 7초를 갖는 세개의 파고로 구성되는 6개의 대표군으로 나눌 수 있었으며, 이 6개의 파랑조건 및 각 조건에 대한 시간가중치가 Table 4.6.5에 제시되었다.

Table 4.6.5 Weighting times for the six wave conditions

H(m)	Wave Direction	
	ENE	ESE
3.5	147.2	67.5
4.5	18	2
5.5	8	1

이상과 같은 파랑조건을 이용하여 해저지형변화를 계산하였으며, 수심 변화의 측정치와 계산치를 각각 Fig.4.6.9와 Fig.4.6.10에 제시하였다. 이 그림을 비교해 보면 파랑류의 영향을 확인할 수 있으며, 퇴적 및 침식의 일반적인 양상이 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 해안선 부근에서의 퇴적현상 재현에는 불충분한 점이 있으나 방사제 부근 및 동방파제 선단 전면에서의 퇴적을 명확하게 보여준다. 또한 해안선을 따라 퇴적현상이 발생하는 것을 보여주며 주로 ENE계역의 파랑에 의해 죽변항에서 북평해수욕장 방향으로 퇴적현상이 지냉됨을 보여준다. 전체적으로 침식과 퇴적에 대한 계산오차가 약 $\pm 100\%$ 정도로 이는 비교적 만족스러운 결과라 할 수 있다. 이 기간내에 죽변항내에서 측정된 평균퇴적고는 약 0.4m인 반면 계산치는 0.2m이었다.

제7절 결론 및 토의

임의의 지형에 제약이 없이 적용할 수 있는 퇴적물이동 수치모형으로서 3차원 모형이 적합하며, 특히, 해안 구조물 주위에서는 부등류의 특성이

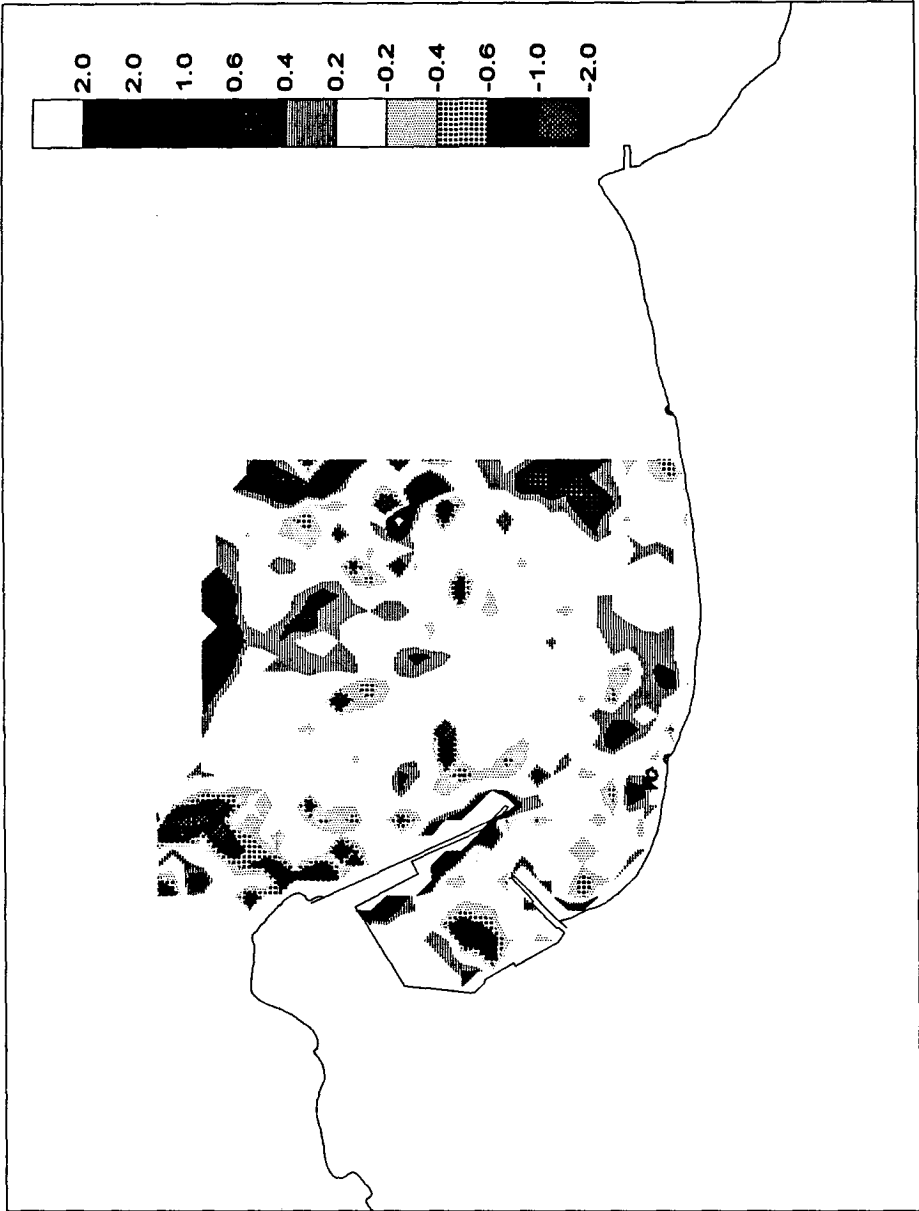


Fig. 4.6.9. Measured depth change between Aug. 1987 and Nov. 1987.

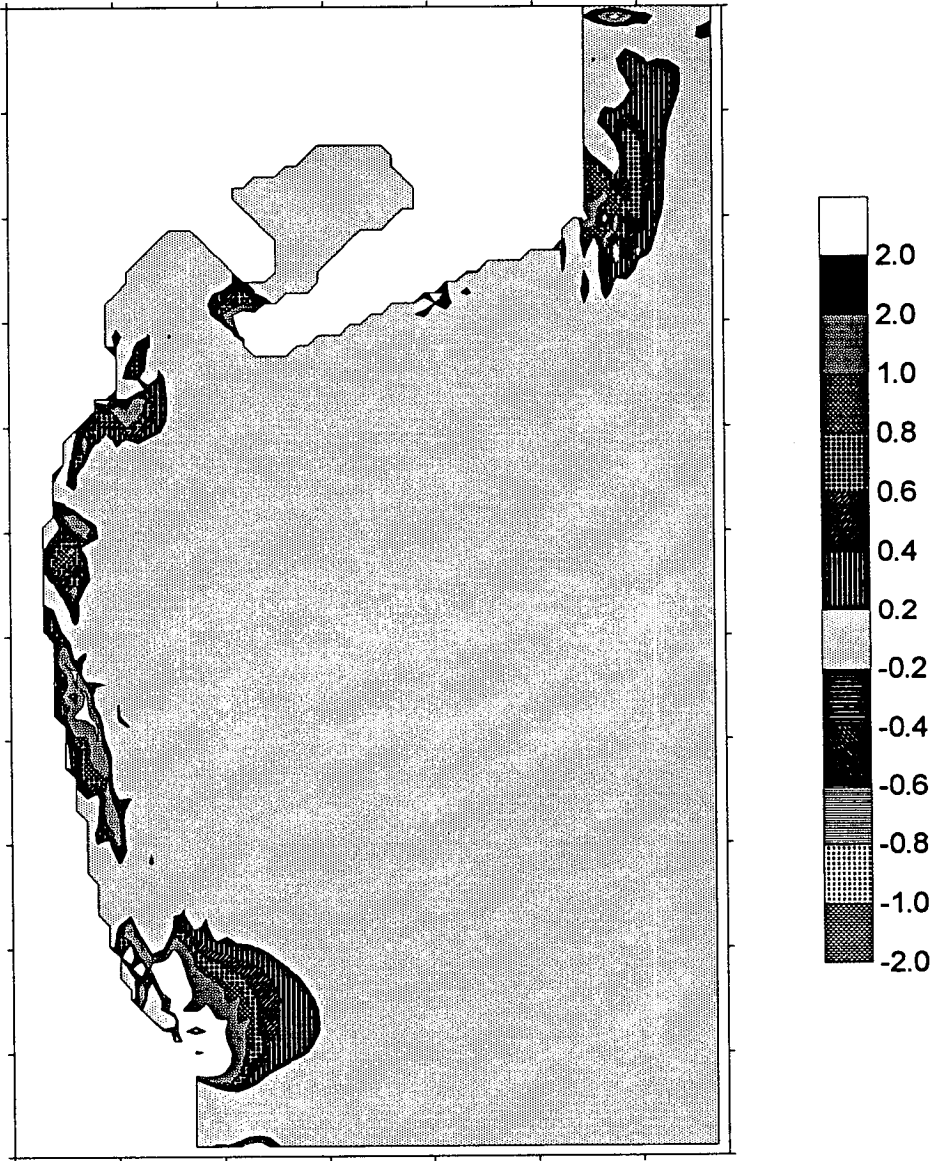


Fig. 4.6.10. Calculated depth change between Aug. 1987 and Nov. 1987.

강하므로 3차원 모형의 역할이 더욱 두드러진다. 본연구에서는 연중 비교적 큰 파랑에 노출되어 있고 해저퇴적물이 주로 모래질로 구성되어 있는 동해안의 항만 및 해안에 적용을 목적으로 3차원 시질퇴적물이동 수치모형을 수립하였다.

3차원 부유사농도의 기본방정식은 임의의 지형에 적용하기 편리하도록 연직축을 변환하였으며, 계산의 편의를 위하여 기본방정식은 계산단계를 3단계로 나누어서 풀었다. 수치기법으로는 연직 확산이류 단계는 음해법, 수평 이류 단계에는 투영법, 그리고 수평 확산 단계는 양해법 유한차분법을 각각 사용하였다. 3차원 부유사이동 수치모형의 입력자료로서 해저 기준면에서의 부유사농도, 소류수량, 3방향 확산계수, 3방향 유속이 필요하다. 이 중, 해저 기준면에서의 부유사농도를 구하는 경험식의 조정상수를 수리실험자료와 측면에서의 관측자료로 구하였으며, 소류수량을 계산하기 위한 경험식의 조정상수도 측면에서의 관측자료로 구하였다.

수치모형의 정확도를 검토하기 위하여 연직 1차원의 비정상 확산이류 문제(Dobbins, 1944)와 연직 2차원의 부등 확산이류 문제(Hjelmfelt and Lenau, 1970)에 대한 해석해와 비교하여 본 결과, 공학적 활용을 위해 충분한 정밀도를 가짐을 확인하였다.

연안역에 적용할 목적으로 파랑주기평균 3차원 퇴적물이동 수치모형을 파랑모형 및 파랑류모형과 결합시켜 수립한 비교적 단순한 수치모형 시스템을 측면항에 적용하여 측면항 부근에서의 퇴적물이동과 지형변화를 비교적 만족스럽게 재현할 수 있었다. 또한 비록 제한된 관측치와 비교하였지만 파랑모형과 파랑류모형도 그 정확도를 확인할 수 있었다. 퇴적물이동

수치모형의 전체적인 정확도는 약 $\pm 100\%$ 정도로서, 모형을 검증할 현장자료만 확보된다면 공학적 목적을 위한 사용에는 충분한 정도인 것으로 판단된다. 포항지방 해운항만청이 제안한 계획된 대책안(포항지방 해운항만청, 1989)에 대한 적용은 시간 및 자료의 제약으로 차후의 연구과제로 미루었다.

본연구의 주목적이 3차원 해저퇴적물이동 수치모형이라는 점을 감안하면 본연구를 통하여 수립된 수치모형은 그 적용성 및 신뢰성에 있어 대체로 만족할 만한 것으로 판단되나, 그 범용성, 경제성 및 신뢰성을 더욱 높이기 위해서는 앞으로도 꾸준한 연구를 통한 수정 및 보완과정이 필요하며, 충분한 현장관측 자료를 이용한 여러가지 경험상수의 조정 또는 결정이 필요하다. 또한 연직 1차원 또는 연직 2차원 점모형의 연구결과(실험실과 현장에서의 관측자료 분석, 수치모형 결과 분석)를 활용하여 본 3차원 모형을 조정 및 검증하는 것도 필요하며, 부유사농도 계산 격자망 체계를 흐름 계산 모형과 같은 것으로 조정하는 것이 계산의 편의상 유리한지에 대한 검토도 차후의 연구과제라 할 수 있다.

제5장 해안선 변형 수치모형

제1절 개요

동해안에 위치한 항만의 특징은 대부분이 주변에 사빈해안을 포함하고 있다는 것인데 항만의 건설 또는 확장에 따라 항만 구조물의 영향으로 주변 해안이 침식 또는 퇴적을 경험하게 된다. 이와 같은 항만 구조물 주변의 해안 변형을 예측하기 위하여 수치모형이 많이 사용되고 있다. 이러한 수치모형 중에는 등수심선 변형 수치모형(Perlin and Dean, 1985) 또는 3차원 수치모형(Wang et al., 1975; Watanabe, 1982) 등과 같이 해안선 뿐만 아니라 부근의 해저지형의 변화까지도 예측할 수 있는 복잡하고 정교한 모형들이 사용되기도 하지만 해저지형에는 관계 없이 해안선의 변화만을 예측하려 하는 경우에는 이론적 배경이 간단하고 계산시간이 덜 걸리면서도 비교적 정확한 예측이 가능한 해안선변형 수치모형이 많이 사용된다.

해안선변형 수치모형은 Pelnard-Considere(1956)에 의하여 이론적인 기초가 확립된 이래 많은 연구가 계속되어 왔다. 최근에 Hanson and Kraus(1989)에 의해 발표된 GENESIS 모델은 지금까지 개발된 해안선변형 모델중 가장 정교하고 그 실용성이 입증된 모형이라 할 수 있다. 본 연구

에 사용된 수치모형은 직교좌표계를 사용하는 기존의 모형들과는 달리 해안선을 따라가는 곡선좌표계를 사용함으로써 해안선의 형상이 비교적 복잡한 지역에도 적용이 용이한 모형이다. 또한 본 모형은 이안제 배후에서의 해안선의 융기 및 톱블로의 형성을 계산할 수 있는 모형으로서 Suh and Hardaway(1994)에 의해 미국 버지니아주 칩폭스 주립공원에 건설된 이안제군 배후에서의 해안선 변화과정을 계산함으로써 그 효용성이 입증된 바 있으며, 현재 월성 원자력발전소 부근의 해안선 변형과 영일만 신항개발로 인한 주변 해안선 변화 예측에 적용되고 있다.

본 장에서는 이 해안선변형 수치모형에 대하여 간략히 정리, 소개하고 1993년 10월 13일부터 12월 7일까지의 죽변항 남측 약 1.7 km의 해안선에 대하여 동기간 동안에 대상해역 수심 약 20 m 지역에서 3시간 간격으로 연속관측된 파랑자료를 이용하여 해안선 변화를 계산하여 관측치와 비교한다. 또한 포항지방해운항만청(1989)에 의해 제시된 죽변항 매몰방지 대책안에 대하여 본 수치모형을 적용함으로써 그 대책안이 죽변항 주변의 해안선 변형에 미치는 영향을 분석한다.

제2절 기본방정식 및 경계조건

1. 기본방정식

본 수치모형에서 사용되는 곡선좌표계와 기타 기호들이 Fig. 5.2.1에 표시되어 있다. s 는 해안선을 따라가는 좌표로서 바다쪽을 향해서 셋을

때 오른쪽이 양의 방향을 나타낸다. (x_s, y_s) 는 해안선상 임의점의 위치를 직교좌표계로 나타낸 값이다.

$$\vec{m} = \left(\frac{\partial x_s}{\partial s}, \frac{\partial y_s}{\partial s} \right) = (\cos\theta, \sin\theta) \quad (5.2.1)$$

은 s 가 증가하는 방향으로의 해안선에 접선방향의 단위벡터를 나타내고,

$$\vec{n} = \left(-\frac{\partial y_s}{\partial s}, \frac{\partial x_s}{\partial s} \right) = (-\sin\theta, \cos\theta) \quad (5.2.2)$$

은 해안선에 수직으로 바다쪽으로 향하는 단위벡터를 나타내며, θ 는 \vec{m} 과 x 축이 이루는 각도로서 x 축의 양의 방향으로부터 반시계방향으로 잰 값이다. 이 그림에서 Q 는 부피로 나타낸 연안표사이동율이며, α_b 는 쇄파의

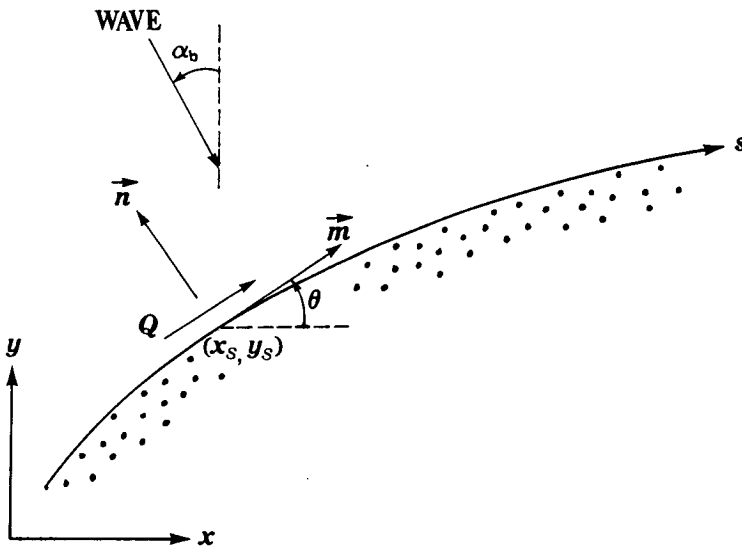


Fig. 5.2.1 Curvilinear coordinate system and definition of model variables.

파봉선과 x 축이 이루는 각으로서 x 축의 양의방향으로부터 반시계방향으로 잰 값이다.

해안선상의 점 (x_s, y_s) 가 해안선에 수직한 방향으로 움직인다고 가정하게 되면,

$$\left(\frac{\partial x_s}{\partial t}, \frac{\partial y_s}{\partial t} \right) = e \vec{n} \quad (5.2.3)$$

로 표시할 수 있으며, 여기서 e 는 해안선에 수직한 방향으로의 해안선의 이동율을 나타낸다. 해안선상의 점 (x_s, y_s) 를 복소수

$$z_s = x_s + iy_s \quad (5.2.4)$$

로 나타내고, e 를

$$e = \frac{1}{D} \frac{\partial Q}{\partial s} \quad (5.2.5)$$

로 나타내게 되면 식 (5.2.3)은

$$\frac{\partial z_s}{\partial t} = -\frac{1}{D} \frac{\partial Q}{\partial s} \exp \left[i \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (5.2.6)$$

가 된다. 여기서 D 는 표사이동의 한계수심을 나타낸다. θ 가 아주 작은 경우 이 식은 직교좌표계를 사용하는 해안선 변형 모델에서 일반적으로 사용되는 토사 보존방정식이 됨을 쉽게 증명할 수 있다.

Ozasa and Brampton(1980)은 해안선에 나란한 방향으로 파고의 변화가 심한 경우 그 영향을 고려할 수 있는 다음과 같은 연안표사이동을 산정 공식을 제안하였다:

$$Q = \Gamma H_b^{5/2} \left\{ K_1 \sin(2\delta_b) - K_2 \frac{\partial H_b}{\partial s} \cos\beta \cos\delta_b \right\} \quad (5.2.7)$$

여기서,

$$\Gamma = \frac{\sqrt{g}}{16(s_s - 1)(1 - p)\sqrt{\kappa}} \quad (5.2.8)$$

이며

$$\delta_b = \alpha_b - \theta \quad (5.2.9)$$

는 쇄파선이 해안선과 나란하다는 가정하에 계산되는 해안선에 대한 쇄파의 각을 나타낸다. g 는 중력가속도, s_s 는 해수에 대한 모래의 비중, p 는 모래의 공극율, κ 는 쇄파고의 쇄파수심에 대한 비, H_b 는 쇄파고, $\tan\beta$ 는 해저면 기울기, K_1, K_2 는 연안표사이동에 대한 경험계수들이다. 식(5.2.7)의 첫번째 항은 파랑이 해안선에 비스듬히 입사하는 경우 이에 의한 연안표사이동을 나타내며, 둘째항은 회절현상이 심한 경우 해안선에 나란한 방향으로의 쇄파고의 차이에 의해 발생하는 표사이동을 나타낸다. 해안선 근처에서의 해저면 기울기, $\tan\beta$ 는 주어진 쇄파고, 주기, 모래입경의 함수로 Sunamura(1984)에 의해 제안된 경험식을 이용하여 계산한다.

계수 K_1 에 대하여는 많은 연구가 수행된 바 있다. Komar and Inman(1970)은 현장자료 분석을 통하여 $K_1=0.77$ 을 구한바 있으며, Kraus et al.(1982)은 0.77보다는 0.58을 사용할 것을 제안하였다. 한편 최근에 del Valle et al.(1993)은 퇴적물의 입경을 고려한 다음과 같은 식을 제안하였다:

$$K_1 = 1.4 \exp(-2.5D_{50}) \quad (5.2.10)$$

계수 K_2 에 대해서는 별로 많은 연구가 되어있지 않다. Ozasa and Brampton(1980) 은 $K_2=3.24 K_1$ 을 사용하였다. 그러나 Hanson and Kraus(1989)는 K_2 가 K_1 의 0.5 내지 1배의 값을 갖는 것이 적당하다고 제안하였다.

해안선변형 모형들이 가지고 있는 기본적인 가정들 중의 하나는 해안의 침식 또는 퇴적이 발생하는 외해측으로의 한계수심이 모형의 영역 전체에 걸쳐 일정하다는 것이다. Berkemeier(1985)는 발생시간이 연중 12시간 이상을 초과하지 않는 근해파랑의 파고를 H_e 라고 할 때 표사이동 한계수심, D 는

$$D = 1.57H_e \quad (5.2.11)$$

로 나타낼 수 있음을 제안하였다.

토사 보존방정식 (5.2.6)을 풀기 위해서는 쇄파선을 따라서 파고와 각도가 주어져야 한다. 본 모형은 모형의 영역내에 이안제가 존재하는 경우 그 배후에서 쇄파의 파고와 파향을 계산하는 알고리즘을 포함하고 있다. 이 알고리즘은 Kraus(1982)의 방법을 약간 수정한 것으로서 자세한 내용은 한국해양연구소(1991)를 참조하면 될 것이다.

2. 유한차분방정식 및 경계조건

식 (5.2.6), (5.2.7) 및 (5.2.9)를 양해 유한차분법에 의해 푼다. Fig. 5.2.2에 표시한 바와같이 해안선의 위치 및 각도와 쇄파의 각도는 절점에서

정의되고, 연안표사이동율은 두 절점 사이에서의 값으로 정의된다. i 번째 절점에서의 토사 보존방정식 (5.2.6)은 다음과 같은 유한차분형태로 표시된다.

$$z_{s_i}' = z_{s_i} + \frac{\Delta t}{D} \left[\frac{Q_{i-1} - Q_i}{(\Delta s_i - \Delta s_{i-1})/2} \right] \exp \left[i \left(\frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} + \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (5.2.12)$$

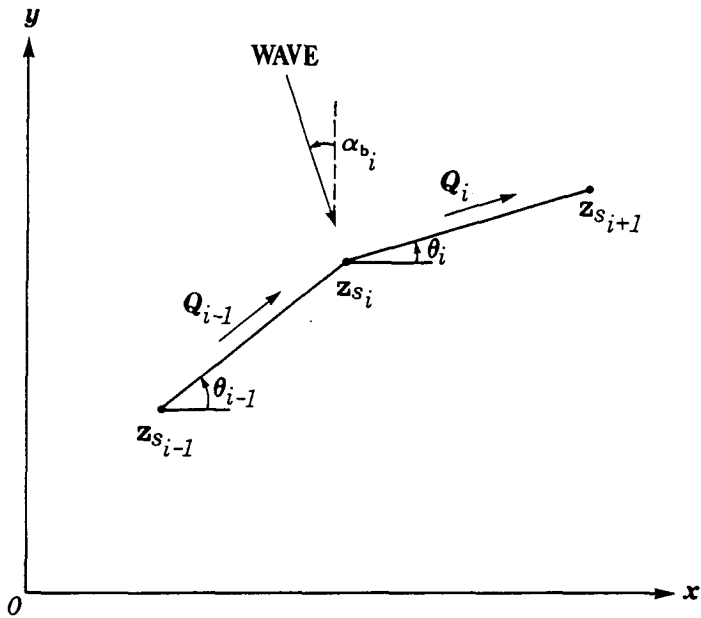


Fig. 5.2.2 Finite difference representation of shoreline and associated transport around i th point.

여기서 Δt 는 시간의 증분을 나타낸다. 프라임(')은 현재 시간으로부터 한 단계후의 풀어야 하는 값을 나타내며, 프라임이 안붙은 값들은 현재 시간에서 아는 값들이다. $\Delta s_i, \theta_i$ 및 Q_i 는 다음 식들과 같이 계산된다.

$$\Delta s_i = [(x_{s_{i+1}} - x_{s_i})^2 + (y_{s_{i+1}} - y_{s_i})^2]^{1/2} \quad (5.2.13)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[\frac{y_{s_{i+1}} - y_{s_i}}{x_{s_{i+1}} - x_{s_i}} \right] \quad (5.2.14)$$

$$Q_i = \Gamma \left[\frac{H_{b_i} + H_{b_{i+1}}}{2} \right]^{5/2} \left[K_1 \sin(2\delta_{b_i}) - K_2 \frac{H_{b_{i+1}} + H_{b_i}}{\Delta s_i} \cdot \left(\frac{\cot \beta_i + \cot \beta_{i+1}}{2} \right) \cos \delta_{b_i} \right] \quad (5.2.15)$$

여기서

$$\delta_{b_i} = \frac{\alpha_{b_i} + \alpha_{b_{i+1}}}{2} - \theta_i \quad (5.2.16)$$

양해 유한차분법을 사용할 때 시간의 증분 Δt 가 커지면 해가 불안정해진다. Kraus and Harikai(1983)의 방법에 따라 δ_b 가 작은 경우, 즉 해안선에 대한 파랑의 입사각이 크지 않은 경우, 개략적인 안정조건은

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \frac{(\Delta x_s)^2}{\varepsilon} \quad (5.2.17)$$

를 만족시키게 된다. 여기서 $\varepsilon = 2K_1 \Gamma H_b^{5/2} / D$. 이 조건으로부터 안정한 해를 얻을 수 있는 시간의 증분에 대한 1차적인 근사치를 추정할 수 있다. 만약 계산된 해안선이 톱니모양의 불안정성을 보이게 되면 Δt 를 좀 더 작게 조정해야 할 것이다. 이러한 불안정성은 Uda(1983)가 제안한 것과 같

이 해안선의 방향, 연안표사이동을, 해안선의 위치 등을 평활화 시킴으로서 약화시킬 수 있지만, 이 경우 절점 사이의 거리 Δs 가 증가함에 따라 토사의 보존 측면에서 오차를 가져오는 단점이 있다.

모형 영역 양단에서의 상황에 따라 몇가지 경계조건들을 생각할 수 있다. 첫째로 경계점에서 해안선의 위치가 고정되어 변하지 않는다고 가정하는 것인데, 이는 경계 근처에서 연안표사이동율이 일정하여 해안이 평형상태를 이루는 경우이다. 이와 같은 고정경계조건은 해안선의 길이가 충분히 길어서 경계에서의 표사이동이 연안구조물에 의한 영향을 받지 않는 경우에 적용이 가능하다. 둘째는 경계 근처에서 연안표사이동율이 선형적으로 변한다고 가정하여(즉 $Q_{B+1} = 2Q_B - Q_{B-1}$, 여기서 B 는 경계점을 의미함) 경계점에서 해안선의 위치가 변하도록 하는 유동 경계조건이다. 셋째는 경계점에 불투과성 표사차단용 돌제가 설치되어 있는 경우에 적용할 수 있는 불투과 경계조건이다. 마지막으로 경계점에서의 해안선의 변화를 미리 알고 있는 경우에 적용할 수 있는 강제 경계조건을 생각할 수 있다. 본 모형에서는 강제 경계조건을 사용하는 경우 경계점에서의 최종 위치가 입력 자료로 주어져야 하며 최초 위치로부터 최종 위치까지 시간에 선형적으로 비례하여 변화한다고 가정한다.

3. 톱블로 형성의 계산

해안선이 전진하여 불투과성 이안제에 도달하면, 외해쪽으로는 전진이 멈추어야 한다. 그러나 이안제의 존재를 인식하지 못하는 수치모형은 이안제의 외해쪽으로 해안선이 전진하는 비현실적인 계산결과를 초래하게

될 것이다. 따라서 매 시간간격마다 절점의 어느 하나라도 이안제의 외해 쪽으로 전진하도록 계산된 것이 있는지 조사하여, 있다면 그 점을 이안제의 위치까지 끌어들어야 한다. Hanson and Kraus(1985)는 해안선 변형 수치모형에서 호안이 존재하는 경우 해안선이 호안 배후로까지 후퇴하는 것을 방지하는 방법을 제안한 바 있다. 이 방법은 우선 절점이 호안의 배후로 이동하는 것을 허용하면서 계산을 실시한 후 다시 그 절점 부근에서의 연안표사이동율을 조정하여 호안의 배후로 이동한 절점을 호안의 위치로 끌어낸다. 본 연구에서도 이와 유사한 방법을 사용한다.

Fig. 5.2.3에서와 같이 절점으로 나타낸 해안선의 위치를 생각한다. 파선은 현재 시간으로부터 Δt 이전의 해안선 위치를 나타내며, 실선과 파점선은 각각 현재 시간에서의 수정 전·후의 해안선 위치를 나타낸다. 아래 분석에서 프라임이 붙은 값들은 수정전의 해안선 위치를 나타낸다.

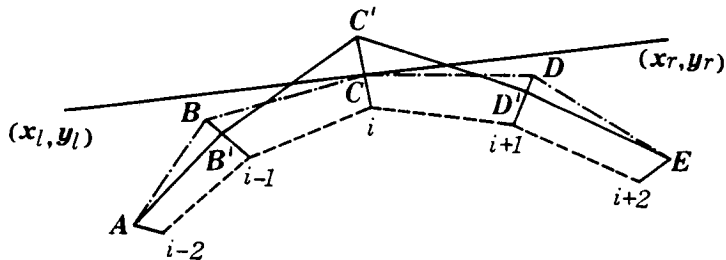


Fig. 5.2.3 Illustration of tombolo calculation.

Fig. 5.2.3에서 i 번째 절점이 이안제의 외해측으로 전진하여 C' (x_{s_i}' , y_{s_i}')에 도달하였다. 우선 이 점을 점 C 와 C' 을 지나는 선이 이안제와 만나는 점 C 로 끌어당긴다. 양단의 좌표가 (x_ℓ, y_ℓ) 및 (x_r, y_r) 인 이안제는 다음 식으로 표시되며

$$y = (x - x_\ell) \tan \theta_B + y_\ell \quad (5.2.18)$$

여기서, θ_B 는 x 축의 양의 방향으로부터 반시계방향으로 잰 때 x 축과 이안제가 이루는 각을 나타낸다. 점 C 와 C' 을 지나는 직선의 식은 다음과 같고,

$$y = (x_{s_i}' - x) \cot \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} + y_{s_i}' \quad (5.2.19)$$

여기서, θ_i 와 θ_{i-1} 은 Fig. 5.2.2에 정의된 바와 같고, $-\cot[(\theta_{i-1} + \theta_i)/2]$ 는 점 C 와 C' 을 지나는 직선의 기울기를 나타낸다. 점 C 의 위치는 식 (5.2.18) 및 (5.2.19)로 표시되는 직선들의 교차점으로 구해진다.

점 C 부터 C' 까지의 해안선의 전진은 실제 상태에서는 발생하지 않으며 수치모형에서만 발생하는 가상적인(fictitious) 움직임이다. 이만큼의 가상적인 움직임은 모래의 가상적인 이동을, ΔQ_{fc} 에 의해 발생된다고 가정한다. 이러한 가상적인 이동을, ΔQ_{fc} 는 식 (5.2.12)에서 z_{s_i} 대신에 점 C 의 좌표를, z_{s_i}' 대신에 점 C' 의 좌표를 대입하여 다음과 같이 구한다.

$$\Delta Q_{fc} = \frac{D(\Delta s_i + \Delta s_{i-1})}{2\Delta t} \exp \left[-i \left(\frac{\theta_i + \theta_{i-1}}{2} - \frac{\pi}{2} \right) \right] (z_{s_i}' - z_{s_i}) \quad (5.2.20)$$

ΔQ_{fc} 만큼의 이동율을 i 번째 절점 부근에서 계산된 이동율(Q_{i-1} 및/또는 Q_i)에 그들의 방향에 따라 다음과 같이 가감한다.

$$Q_{i-1}^f = Q_{i-1} - \Delta Q_{fc} \frac{Q_{i-1}}{Q_{i-1} - Q_i} \quad \text{if } Q_{i-1} \geq 0 \text{ and } Q_i \leq 0 \quad (5.2.21)$$

$$Q_i^f = Q_i - \Delta Q_{fc} \frac{Q_i}{Q_{i-1} - Q_i}$$

$$Q_{i-1}^f = Q_{i-1} - \Delta Q_{fc} \quad \text{if } Q_{i-1} \geq 0 \text{ and } Q_i > 0 \quad (5.2.22)$$

$$Q_i^f = Q_i + \Delta Q_{fc} \quad \text{if } Q_{i-1} < 0 \text{ and } Q_i \leq 0 \quad (5.2.23)$$

위의 식들에서 윗첨자 c 는 수정된 이동율을 나타낸다. 이와같이 수정된 이동율을 이용하여 점 B 및/또는 D 의 새로운 위치를 계산한다. 만약 새로 계산된 점 B 또는 D 가 이안제의 외해쪽으로 전진하는 것으로 계산되면 위와 똑같은 방법으로 이안제의 위치까지 끌어들인다. 마지막으로 부언할 것은 본 모형에서 만일 어느 인접한 두 절점이 모두 이안제에 도달한 경우에는 이 점들 사이에서의 표사이동율은 영으로 둔다는 것이다.

제3절 수치모형의 입력자료

해안선의 변화를 예측하기 위해서는 우선 과거의 일정기간 동안 관측 또는 예보된 파랑자료 및 해저퇴적물 자료와 같은 기간 동안의 해안선 변화 자료를 이용하여 해안선 변형 수치모형을 검증한 후 검증된 수치모형을 이용하여 현상태의 해안선을 초기조건으로 하여 향후 일정기간 동안 해안선 변화를 계산하여야 한다. 본 수치모형의 적용 구간은 죽변항 남측 방사제로부터 남쪽 약 1.7 km에 위치한 암반지역까지로 하고, 1993년 10월 13일

과 12월 7일에 실시한 해안선 측량자료를 이용하여 모형을 검증하였다. 한편 측면향 방사제 남측 약 500 m 지역에는 해안선부터 수심 약 4 m 정도 되는 지역까지 암초가 불규칙하게 분포되어 있는데 본 수치모형에서는 이를 이안제로 가정하여 해안선 변화를 계산하였다.

본 연구에서는 본 보고서 2장에 언급된 바와 같이 Fig. 2.2.1의 정점 FW에서 1993년 10월 12일부터 12월 7일까지 약 2개월간 매 3시간 간격으로 관측된 파랑자료를 이용하였다. 이 지점에서의 파랑관측은 파랑파고계를 이용하여 실시함으로써 불규칙 파랑의 제반 특성을 알 수 있도록 하였는데 본 연구에서는 유의파고, 유의파 주기 및 평균파향에 관한 자료를 사용하였다. 우선 본 수치모형의 적용지역에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 파랑을 선별하기 위하여 정점 FW에서 관측된 파랑자료중 동쪽을 기준으로 해서 시계반대방향으로 겹 평균파향이 25° 이상 되는 경우는 파랑이 측면향 주방파제 및 육지에 막혀서 본 모형의 적용지역에 영향을 미치지 못할 것으로 판단되어 자료에서 제외시켰다. 이와 같이 N 및 NE 계열의 파랑을 제외시켰을 때 나머지 파랑은 257 시간이 된다. 이와 같이 선별된 파랑자료로부터 다시 해저 등심선이 남북 방향으로 평행하다는 가정하에 굴절 및 천수효과만을 고려하여 수심 5 m에서의 유의파고 및 파향을 계산하여 이를 모형의 입력 파랑조건으로 사용하였다. 수심 5 m부터 쇄파지점까지의 파랑변형은 등심선이 해안선과 나란하다고 가정하고 지역적인 암초 또는 구조물의 영향을 고려하여 본 수치모형 내에서 별도로 계산된다.

과학기술처(1992)에 의하면 본 지역 해안선 퇴적물의 평균입경, D_{50} 은 0.26 mm로서 Fine sand이며, 이러한 평균입경에 대하여 식 (5.2.10)에

의해 계산된 계수 K_1 은 0.73이다. 이 값은 사빈에서 일반적으로 사용되는 값과 비슷하다(Komar and Inman, 1970). 계수 K_2 는 Hanson and Kraus(1989)가 제안한 바와 같이 $K_2=0.5K_1$ 을 사용하였다.

표사이동 한계수심을 계산하기 위해서는 장기간의 파랑 관측자료가 필요하다. 본 연구지역에서는 이와 같은 장기 자료가 없기 때문에 일본기상청(1984, 1985, 1986, 1987)에서 예보한 죽변 부근 심해파 자료를 정리한 결과 1983년부터 1986년 사이의 가장 큰 파랑은 파고 6.7 m, 주기 13초의 파랑이었다. 이로부터 천수효과만을 고려하여 계산하면 수심 10 m에서 파고가 7.2 m가 된다. 이 값을 식 (5.2.11)의 H_e 로 사용하면 표사이동 한계수심은 11.3 m로 계산되며 이를 수치모형의 입력자료로 사용하였다.

제4절 수치모형의 검증 및 적용

1. 모형의 검증

본 수치모형을 검증하기 위하여 1993년 10월 13일부터 12월 7일까지의 죽변항 남측 약 1.7 km의 해안선 변화를 계산하여 관측치와 비교하였다. 계산결과와 관측치를 Fig. 5.4.1에 제시하였다. 이 그림에서 x 축은 남북방향, y 축은 동서방향을 나타낸다. 방사제($x=0$)에서는 불투과 경계조건을 사용하였으며, $x=1,700$ m 지점에서는 Fig. 5.4.1에서 알 수 있듯이 해안

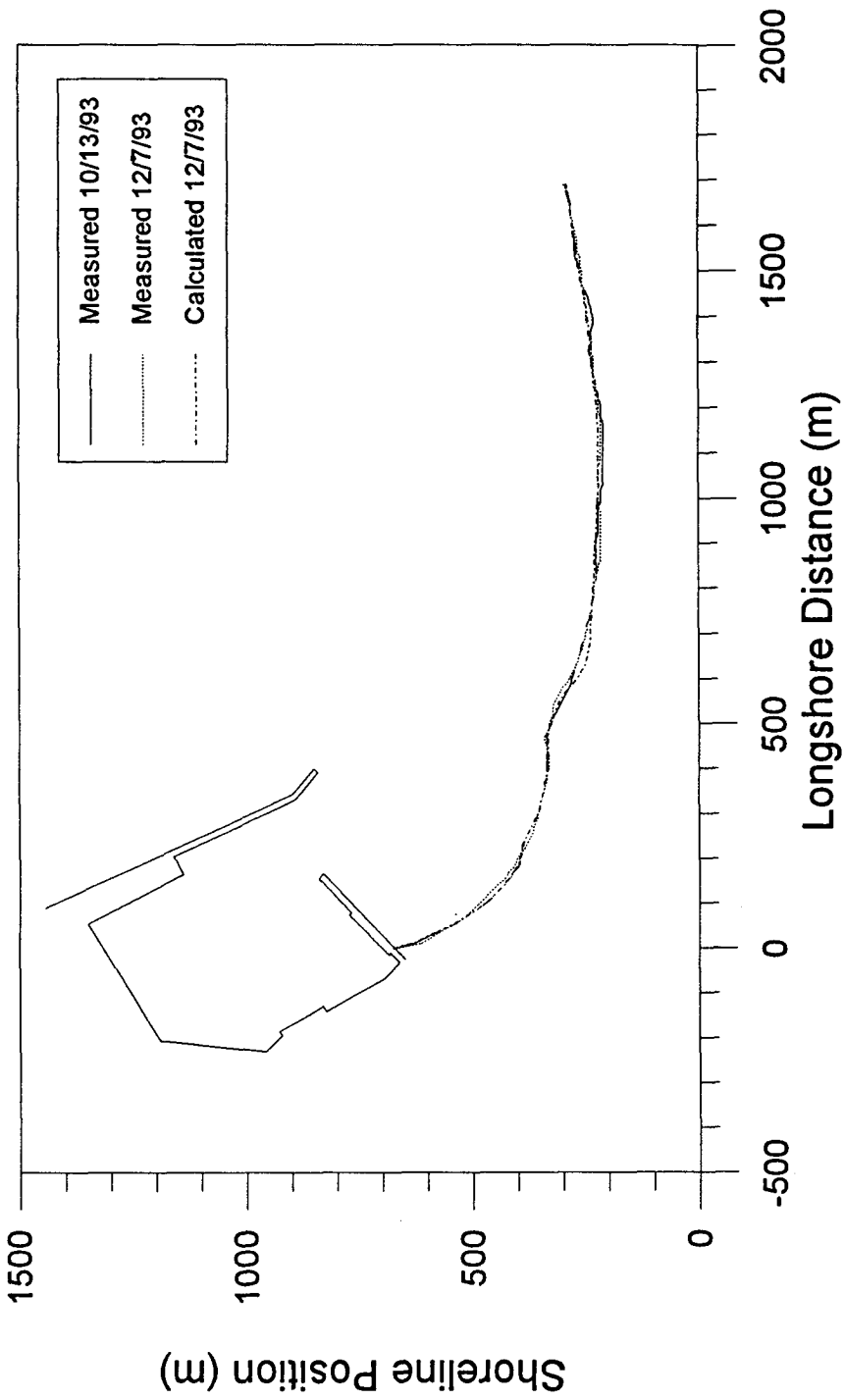


Fig. 5.4.1. Comparison between measurement and computation of shoreline change near Chukpyon Harbour.

선의 변화가 거의 없기 때문에 고정 경계조건을 사용하였다. 죽변항 주방파제 뒷부분($x=0-500$ m)에서의 관측치를 보면 이 기간중에 다소의 변화를 보여서 10월에는 약간의 굴곡을 보이던 해안선이 12월에는 매끈한 상태로 변화하였다. 그러나 계산결과는 이와 같은 미세한 변화를 재현하지 못하였다. $x=500-700$ m 사이에서는 12월 해안선의 관측치와 계산치가 서로 비슷한 경향을 보이기는 하지만 계산치가 관측치에 비해 10-15 m 후퇴한 것으로 나타난다. 그러나 $x=800-1,000$ m 사이에서는 이와 반대로 계산치가 관측치보다 약 15 m 정도 전진한 것으로 나타난다. 한편 $x=1,000-1,700$ m 구간에서는 10월에는 약간의 굴곡을 보이던 해안선이 12월에는 매끈한 모양으로 바뀐 것을 알 수 있으며 12월의 관측치와 계산치가 상당히 잘 일치함을 알 수 있다. 전체적으로 볼 때 관측치와 계산치가 부분적으로 약간의 차이를 보이기도 하지만 전반적인 해안선 변화 양상을 잘 나타내고 있다.

2. 모형의 적용

포항지방해운항만청(1989)의 보고서에 의하면 죽변항 매몰방지 대책안으로서 주방파제를 현재의 방파제 끝에서 남쪽으로 약 200 m 정도 연장하고 현재의 방사제 남쪽 약 450 m 정도 되는 지점에 길이 약 200 m의 돌제를 설치하는 안을 제시하였다. 이 대책안에 대하여 돌제만을 설치하는 경우, 주방파제만 연장하는 경우, 그리고 돌제와 방파제 연장을 함께 실시하는 경우 등에 대하여 상술한 바와 같이 모형의 검증시에 사용하였던 파랑조건을 그대로 사용하여 해안선 변화를 계산하였다.

돌제만을 설치하는 경우에는 Fig. 5.4.2에서 볼 수 있듯이 돌제 남측에 심한 침식이 발생할 것으로 예상된다. 그러나 돌제와 죽변항 방사제 사이의 해안은 거의 변화가 없는 것으로 계산된다. 돌제는 설치하지 않고 죽변항 주방파제만을 200 m 연장하는 경우에는 Fig. 5.4.3에서 볼 수 있듯이 해안선 변화가 거의 발생하지 않을 것으로 예상된다. 이는 이 지역의 동계 파랑이 북서 계열이 우세하여 연장된 방파제가 파랑을 차폐시키는 효과 때문인 것으로 추측된다. 한편 돌제의 설치와 주방파제 연장을 함께 실시하는 경우의 해안선 변화를 Fig. 5.4.4에 제시하였는데 이 경우는 주방파제만을 연장하는 경우와 거의 차이를 보이지 않아 돌제의 효과가 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나 본 계산은 동계 파랑을 대상으로 한 것이기 때문에 남동계열의 파랑이 우세한 춘·하계에 대해서는 이 돌제가 어떤 효과를 보일지 확실치 않으므로 본 계산결과만으로 이 돌제의 효과 또는 설치 여부를 판단하기는 곤란하다.

제5절 결론 및 토의

Suh and Hardaway(1994)에 의해 개발된 해안선 변형 수치모형을 적용하여 죽변항 남측 약 1.7 km 지역에서 1993년 10월 13일부터 12월 7일까지 약 2개월간의 해안선 변화를 계산하였다. 모형의 적용 결과 관측치와 계산치가 부분적으로 약간의 차이를 보이기도 하지만 전반적인 해안선 변화 양상을 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다. 본 수치모형을 포함지방해운항만청(1989)이 제시한 죽변항 매몰방지 대책안(주방파제를 현재의 방파제 끝에서 남쪽으로 약 200 m 정도 연장하고 현재의 방사제 남쪽 약 450 m 정도 되는 지점에 길이 약 200 m의 돌제를 설치하는 안)에 대하여

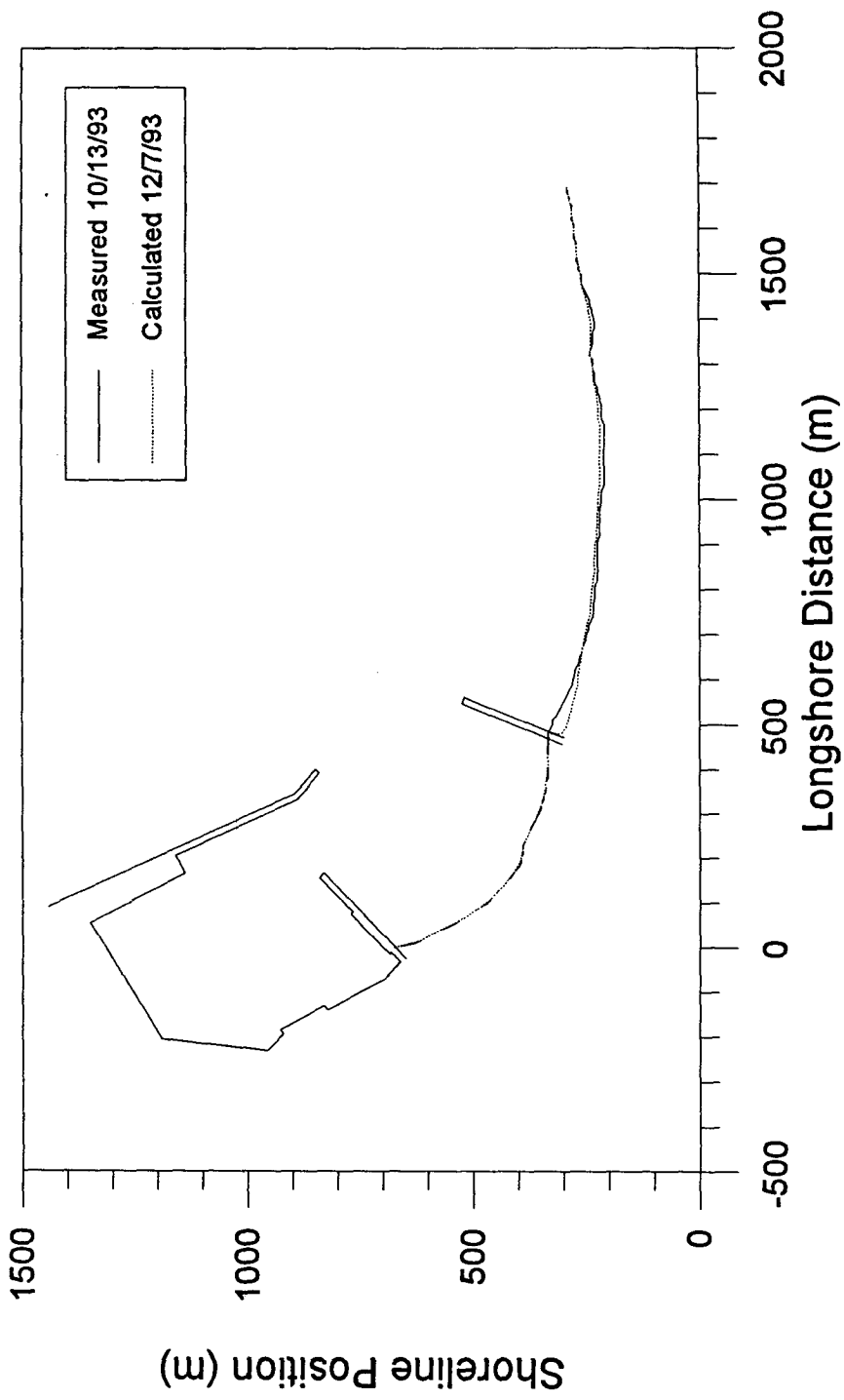


Fig. 5.4.2. Prediction of shoreline change near Chukpyon Harbour for the case of installation of a groin.

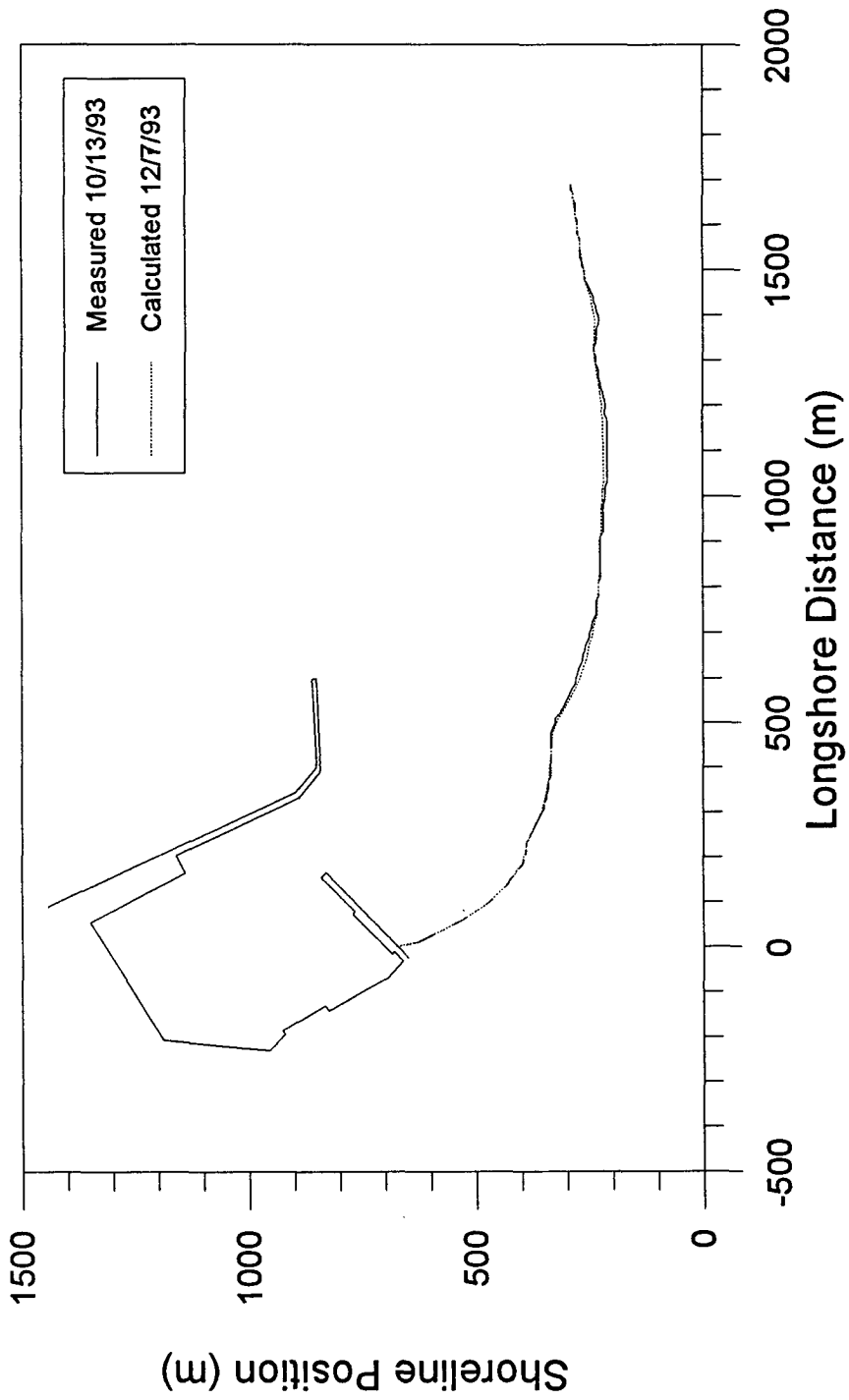


Fig. 5.4.3. Prediction of shoreline change near Chukpyon Harbour for the case of extension of the breakwater.

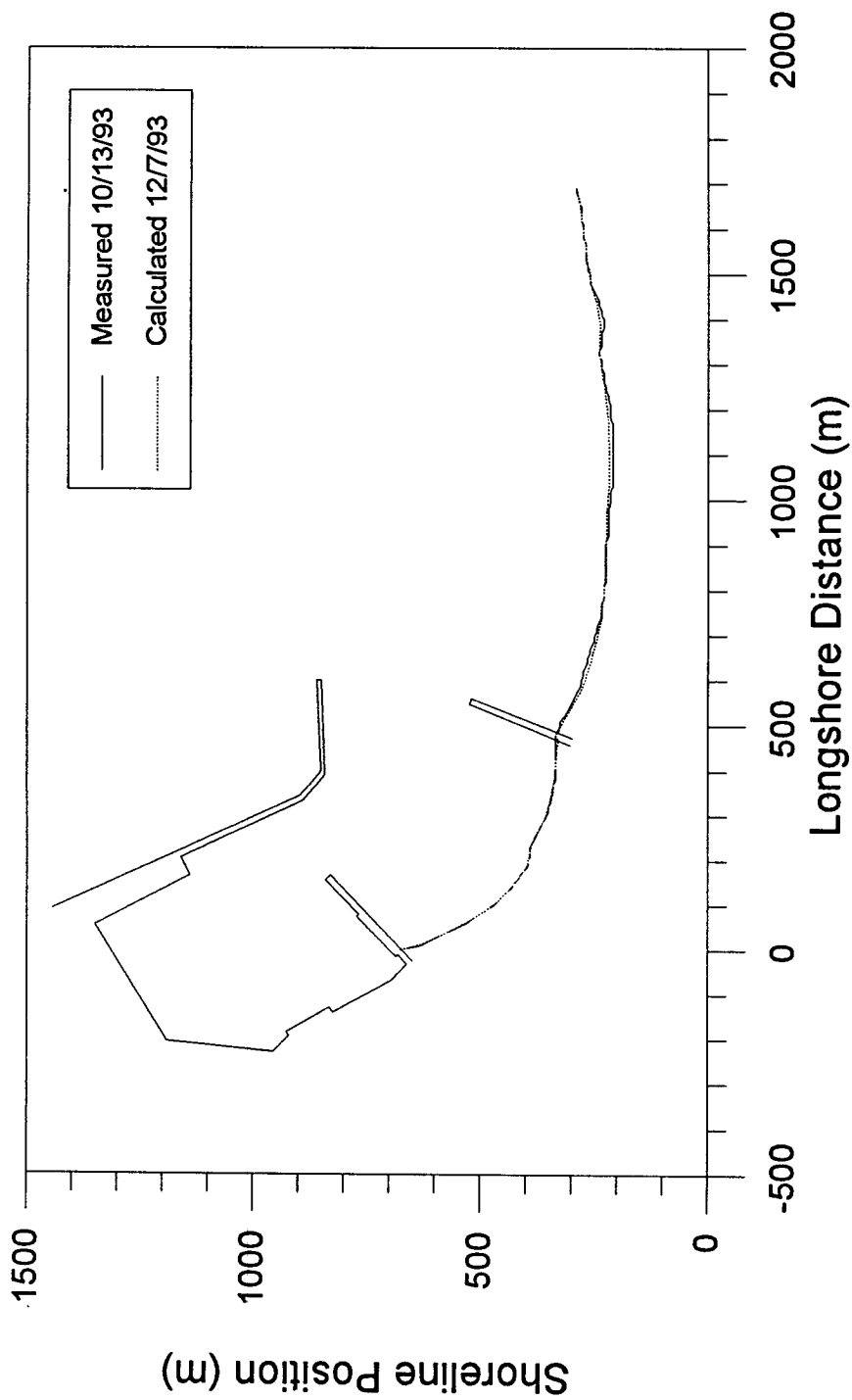


Fig. 5.4.4. Prediction of shoreline change near Chukpyon Harbour for the case of both installation of a groin and extension of the breakwater.

적용한 결과 동계에는 죽변항 주방파제만을 연장함으로써 충분히 이 지역의 해안변형을 최소화시킬 수 있으며 돌제의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 본 계산은 동계 파랑을 대상으로 한 것이기 때문에 남동계열의 파랑이 우세한 춘·하계에 대해서는 이 돌제가 어떤 효과를 보일지 확실치 않으므로 본 계산결과만으로 이 돌제의 효과 또는 설치 여부를 판단하기는 곤란하다. 따라서 이 대책안에 대한 정확한 평가를 위해서는 적어도 1년 이상의 연속 파랑관측과 계절별 해안선 변화 관측이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

제6장 결론 및 토의

연중 비교적 큰 외해 파랑에 노출되어 있고 사질퇴적환경인 동해안 항만의 매몰현상에 대한 원인을 분석하고, 그 대책수립에 필요한 첨단요소 기술을 개발하여, 동해안의 주요 항만에 대한 매몰 방지대책 수립을 위한 기초자료를 제공하기 위한 목적으로 실시된 본 연구에서는 연구방법상 수리모형실험을 통한 방법에 비해 상대적으로 저렴하고 비교적 쉽게 이용할 수 있는 실용성, 신뢰성 및 범용성을 갖춘 관련 수치모형을 개발하는 데 중점을 두었다. 본장에서는 본연구를 통하여 얻어진 각 부문별 연구성과에 대한 결론 및 향후의 연구내용에 대해 간략히 기술하였다.

본 연구에서는 항만매몰 및 해안변형의 원인 분석과 대책 마련을 위한 실험연구를 위해 현장실험과 수치모형실험의 대상이 될 기준모형항만을 경상북도 울진군의 죽변항으로 선정하였으며, 울진원자력발전소 주변해안을 포함하는 죽변항 부근 해안을 기준모형해안으로 선정하였으며, 이에 따른 현장관측을 2년간에 걸쳐 동계와 하계 각 2회씩 4회 실시하였다. 관측항목은 단주기 파랑, 장주기파, 연안류, 해안선 측량 및 수심측량, 부유사 채취 및 해저퇴적물 채취 등이었다. 관측 수집된 원시자료는 적절한 자료 처리 과정을 거쳐 수치모형 입력 및 검증 자료의 형태로 또한 상호비교 분석 형태로 정리 보관되었으며, 관측항목간의 상호 관련성 비교, 계절적 비교, 그리고 기존의 자료와 비교 검토하였다. 그러나 각 관측기간이 짧고, 관측기간 중의 해황이 나빠 자료의 신뢰성이 의문시되어 관측항목간의 유기적 해

석 및 분명한 상호 관련성을 규명하기는 어려웠다. 이러한 비교연구는 수치모형 등과의 연결 또는 부분적 예측을 통해 차후 자세한 분석이 필요하며, 원시자료의 재처리 과정 또한 요구된다.

연안역 해저퇴적물이동 현상을 정확히 재현, 예측하기 위해서는 연안역 해수유동 현상의 정확한 예측 또는 산정이 필수적이다. 또한 연안역 해수유동은 3차원적 구조를 가지고 있으므로, 이에 따라 3차원 수치모형, WINC3D(3-Dimensional Wave Induced Nearshore Circulation Model), 수립에 중점을 두었으며, 보완적으로 사용될 기존의 2차원 수치모형, WINC2D를 수정, 보완하였다. 이상의 해수유동 모형은 크게 3부분, 즉 파랑변형 부분(Wave Transformation Module), 해수유동 부분(Current Module), 그리고 난류마감 부분(Turbulence Closure Module)으로 구성된다. 본 연구에서는 3차원 수치모형의 해수유동 부분과 난류마감 모형 수립에 중점을 두었다. 파랑변형 부분의 계산을 위해 수치모형, HCORD를 연구대상해역에 대해 수립 시험적용 계산을 실시하여 만족할 만한 결과를 얻었으나, 이 수치모형은 임의의 반사율을 고려할 수 있는 등 다양한 적용성 및 높은 신뢰성에도 불구하고, 작은 격자체계 및 작은 계산시간 간격이 요구되는 등 해수순환 부분과의 직접적인 연결에는 문제가 있었으며, 이에 따라 본 연구에서는 3차원 수치모형을 위해 2차원 해수순환 수치모형에서의 파랑변형 계산부분을 그대로 채용하였다. 평면 2차원 연안역 해수순환 수치모형의 경우 수치모형 WINC2D를 보완하고 본연구의 기준모형항만인 죽변항에 모형을 수립 적용하여, 만족할 만한 결과를 얻었으며, 그 적용성 및 신뢰성을 확인하였다. 3차원 모형의 경우, 해저퇴적물이동과 관련하여 해저면 경계층 부근에서의 유속 분포가 매우 중요하므로 본 연구에서는 가변 격자를 갖는 연직좌표 변환기법을 채용하여 해저면 근처에서의 분해능을

향상시켰다. 또한 계산시간을 줄이기 위해 그리고 계산과정의 편의를 위해 시간분리기법을 사용하였으며, 계산과정을 연직확산, 수평이류 및 수평확산의 3단계로 나누었으며, 각각의 계산과정에 대해 각각의 특성에 알맞는 수치기법을 사용하였다. 연직확산 단계에는 음해법 유한차분법을, 수평이류 단계에는 Angled Derivative Scheme을, 그리고 수평확산 단계에는 양해 유한차분법을 사용하였다. 또한 물리적 특성에 적합한 연직확산계수를 산정하기 위해 1-방정식 및 2-방정식 난류마감모형을 수립하였으며, 난류마감모형의 형태별 특성 및 관련계수의 검토 등을 위하여 3차원 모형과 별도로 용도가 다양하고 간편히 사용할 수 있는 연직 3차원 점모형(point model)을 수립하였다. 수립된 수치모형을 수리모형실험과 비교하여 대체로 만족할 만한 결과를 얻었다. 그러나 실제지형에 적용하기에는 그 범용성, 신뢰성 및 경제성을 확보하기 위해서는 앞으로도 많은 수정 및 보완이 필요하며, 특히 쇄파대에서의 쇄파에 의한 에너지 감쇄, 난류의 생성 등에 관한 다양한 경계조건 및 경험상수 등에 대한 수치실험 및 이 수치실험 결과의 정밀한 분석 그리고 이를 통한 특정지역에 적합한 상수의 도출 등에 관한 차후의 연구가 요구된다.

본 연구의 목적상 가장 중요한 부분인 해저퇴적물이동 연구의 경우, 동해안의 해저퇴적물이 입자가 큰 사질퇴적물이기 때문에 대부분 소류의 형태로 이동하며, 흐름 또한 전술한 바와 같이 3차원적 구조를 가지고 있으므로 해저퇴적물 이동량의 정량적 산출과 구조적 이해를 위해서는 3차원적 연구가 필수적이다. 따라서 본격 3차원 해저퇴적물이동 수치모형을 수립하였으며 이 때 필요한 소류량 계산을 위한 경험식의 조정상수를 관측자료를 이용하여 구하고 이를 적용하였다. 본 수치모형은 임의 지형에 적용하기 편리하도록 연직축 변환 기법을 사용하였으며, 계산시간의 절약 및 편의를

위해 3단계로 나누어 계산하는 방법을 적용하였다. 즉, 연직 확산 및 이류 단계는 음해법으로, 수평 이류 단계는 투영법으로, 그리고 수평 확산 단계는 양해법을 사용하였다. 수치모형의 정확도를 검토하기 위하여 연직 1차원의 비정상 확산 이류 문제에 대한 해석해와 비교 검토하였으며, 그 결과 공학적 활용을 위해서는 충분한 정확도를 가짐을 확인하였다. 또한 본 연구의 기준모형항만인 죽변항의 현상태에 대하여 시험적용하여 해저퇴적물과 해저지형변화를 비교적 만족스럽게 재현할 수 있었다. 이 결과 모형을 검증할 충분한 현장자료가 확보된다면 공학적 목적을 위한 사용에는 충분한 정도인 것으로 판단된다. 그러나 연안류 수치모형과 같이 그 범용성, 신뢰성 및 경제성을 높이기 위해서는 앞으로도 꾸준한 연구를 통한 수정 및 보완작업이 필요하며, 충분한 현장관측자료를 이용한 여러가지 경험상수의 조정 및 결정이 필요하다.

비교적 지형이 단순한 지역에 장기간에 걸친 해안변형을 파악하기에 편리한 해안선변형 수치모형, ILINE은 곡선좌표계를 사용하여 그 적용성을 향상시켰으며, 이를 대상해역에 적용하여 현장관측자료를 이용하여 현상태에 대해 검증하고, 포항지방해운항만청이 계획한 계획안에 대해서도 계산하였다. 동계의 파랑자료에 대해서 계산을 실시한 결과 동방파제를 연장하는 것 만으로도 충분히 이 지역의 해안변형을 최소화시킬 수 있으며, 돌계의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 계산 결과는 대체로 예상된 결과와 일치하여 그 적용성을 입증할 수 있었으며, 그 실용성을 확인할 수 있었다.

본연구를 통하여 개선 또는 수립된 수치모형의 적용을 통하여 본연구의 기준모형항만인 죽변항에 부분적으로 적용한 결과 현재 계획중인 죽변

항의 동측 방파제 연장 및 돌계의 축조는 죽변항 및 인근해역의 항만 매몰 현상 및 해안변형현상을 개선할 수 있을 것으로 정성적 평가를 할 수 있었다. 본연구의 주요 목적이 항만 매몰 및 해안변형의 원인을 분석하고, 그 대책을 마련하기 위한 tool의 개발 즉, 관련 수치모형의 개발 수립이라는 측면에서 보면 적절한 형태를 갖춘 그리고 공학적 적용성을 갖는 수치모형을 수립하였다고 할 수 있다. 그러나 개별적으로 보면 신뢰성, 범용성 및 경제성을 높이기 위한 꾸준한 연구를 필요로 하며 또한 이들을 유기적으로 연결하여 체계화하는 연구도 요구된다.

참 고 문 헌 (Reference)

- 과학기술처. 1987. 해안구조물 적정설계조건 결정기법의 체계화 연구. 한국과학기술원 해양연구소. BSPG 00043-157-2, 479 pp.
- 과학기술처. 1988. 해안구조물 적정설계조건 결정기법의 체계화 연구(II). 한국과학기술원 해양연구소. BSPG 00064-195-2, 455 pp.
- 과학기술처. 1989. 해안구조물 적정설계조건 결정기법의 체계화 연구(III). 한국해양연구소. BSPG 00088-243-2, 363 pp.
- 과학기술처. 1992. 동해안 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(I). 한국해양연구소. BSPG 00166-482-2.
- 과학기술처. 1992. 항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(II). 한국해양연구소. BSPG 00153-481-2.
- 오병철, 박경수, 심재설. 1992. Array를 이용한 파향 스펙트럼 산정에 관한 연구. Ocean Research, Vol. 14, No. 2, pp. 111~129.
- 일본기상청. 1984. 기상청 연안파랑 수치계산자료 제2호.
- 일본기상청. 1985. 기상청 연안파랑 수치계산자료 제3호.
- 일본기상청. 1986. 기상청 연안파랑 수치계산자료 제4호.
- 일본기상청. 1987. 기상청 연안파랑 수치계산자료 제5호.
- 포항지방해운항만청. 1988. 죽변항 매몰방지대책 조사용역 보고서. pp 474.
- 한국해양연구소. 1991. 틸볼로 형성에 관한 수치모델. BSPE 00223-371-2.
- 해양연구소. 1984. 해양관측편람. 233 pp.

- Amos, C.L., A.J. Powen, D.A. Huntley and C.F.M. Lewis. 1988. Ripple generation under the combined influences of waves and currents of the Canadian Shelf. *Continental Shelf Res.*, 8(10) ; 1129-1153.
- ASCE Task Committee on Turbulence Models in Hydraulic Computations. 1988. Turbulence Modeling of surface water flow and transport : Part I -IV. *Jou. Hyd. Eng.*, ASCE. Vol. 114, No. 9 : 970-1073.
- Basco, D.R. 1983. Surfzone currents, *Coastal Eng.* , 7 ; 331-355.
- Battjes, J.A. 1968. Refraction of water waves. *J. of Waterways and Harbours Div.*, ASCE, 94(WW4) : 437-451.
- Battjes, J.A. 1975. Modelling of turbulence in the surf zone. *Proc. Symp. Modeling Techniques*. ASCE : 1050-1061.
- Battjes, J.A. 1988. Surfzone dynamics, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 20, 257-293.
- Berkemeier, W.A. 1985. Field data on seaward limit of profile change. *J. Wtrway., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, 111(3), 598-602.
- Berkhoff, J.C.W. 1972. Computaion of combined refraction-diffraction. *Proc. 13th Conf. Coastal Eng.*, ASCE : 471-490.
- Berkhoff, J.C.W., N. Booij and A.C. Radder. 1982. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves. *Coastal Eng.*, 6, pp. 255~279.
- Bettess, P. and O.C. Zienkiewicz. 1977. Diffraction and refraction of surface waves using finite and infinite elements. *Int. J. Numer. Methods in Eng.*, 11 : 1271-1290.
- Bijker, E.W. 1971. Longshore transport computations. *J.WWHCE Div.*, ASCE, 97(WW4).
- Blackadar, A.K. 1962. The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere. *J. Geophys. Res.* , 67, 3095-3120.
- Booij, N. 1981. Gravity waves on water with non-uniform depth and current. *Delft Univ. Tech., Dept. Civil Eng.*, Report No. 81-1.

- Bosman, J.J. 1982. Concentration measurements under oscillatory water motion. Delft Hydraulics Laboratory/TOW Report on Model Investigation M1695 part II. Delft.
- Bowden, K.F., L.A. Fairbairn and P. Hughes. 1959. The distribution of shearing stresses in a tidal current. *Geophys. J. Roy. Astro. Soc.*, 2, 288-305.
- Chesher, T.J. and Miles, G.V. 1992. The concept of a single representative wave for used in numerical models of long term sediment transport predictions. *Proc. Int. Conf. Hydraulics and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine, and River Waters*. Vol. 1. Ashgate.
- Copeland, G.J.M. 1985a. A practical alternative to the mild-slope wave equation. *Coastal Eng.*, 9 : 125-149.
- Copeland, G.J.M. 1985b. Practical radiation stress calculations connected with equations of wave propagation. *Coastal Eng.*, 9 : 195-219.
- Davies, A.G., R.L. Soulsby and H.L. King. 1988. A numerical model of the combined wave and current bottom boundary layer. *J. Geophys. Res.*, 93, 491-508.
- Davies, A.M. and Furnes, G.K. 1980. Observed and computed M2 tidal currents in the North Sea. *Jou. Phys. Oceanogr.* Vol. 10 : 237-257.
- del Valle, R., R. Medina and M.A. Losada. 1993. Dependence of coefficient K on grain size. *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean. Engrg.*, ASCE, Vol. 119, No. 5, pp. 568-574.
- De Vriend, H.J. 2DH computational of transient seabed evolutions ' *Proc. 20th Coastal Eng. Conf. , ASCE , 1689-1712 , 1986.*
- De Vriend, H.J. and N. Kitou. 1990. Incorporation of wave effects in a 3D hydrostatic mean current model. *Proc. 22nd Coastal Eng. Conf., ASCE, 1005-1018.*
- Deigaard, R., Fredsoe, J. and Hedegaard, I.B. 1986. Mathematical model for littoral drift. *J. of the Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 112, No.3, pp. 351-369.
- Dobbins, W.E. 1944. Effect of turbulence on sedimentation. *Transactions, ASCE, 112(109) ; 629-656.*

- Dobson, R.S. 1967. Some applications of digital computer to hydraulic engineering problems. Stanford Univ., Technical Report No. 80.
- Du Toit, C.G. and J.F.A. Sleath. 1981. Velocity measurements close to rippled beds in oscillatory flow. *J. Fluid Mechanics*, Vol. 112, pp.71-96.
- Ebersole, B. A. 1985. Refraction-diffraction model for linear water waves. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, 111(6), pp. 939~953.
- Einstein, H.A. 1950. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. U.S. Dept. of Agriculture, Tech. Bulletin No. 1026.
- Enquist, B. and A. Majda. 1977. Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves. *Math. Comp.* Vol. 31 : 629-651.
- Flather, R.A. and N.S. Heaps. 1976. Tidal computations for Morecombe bay. *Geophys. J. R. Astro. Soc.* 42.
- Fredsoe, J., Andersen, O. H. and Silberg, S. 1985. Distribution of suspended sediment in large waves. *J. waterway, Port, coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 111 No. 6.
- Green, M.O. and Vincent, C.E. 1990. Wave entrainment of sand from a rippled bed. *ICCE*, ASCE : 2200-2212.
- Hansen, E.A., Fredsoe, J. and Deigaard, R. 1991. Distribution of suspended sediment over wave generated ripples. *Int. Symp. on the Transport of Suspended Sediment and its Mathematical Modelling*, Florence, Italy.
- Hanson, H. and N.C. Kraus. 1985. Seawall constraint in shoreline numerical model. *J. Wtrway., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, Vol. 111, No. 6, pp. 1079-1083.
- Hanson, H. and N.C. Kraus. 1989. GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change; Report 1, Technical Reference. Tech. Rep. CERC-89-10. *Coast. Engrg. Res. Center, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., USA.*
- Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, E. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Muller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H.

- Walden. 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsche Hydr. Zeit. Reihe A(8), No.12. pp.95.
- Hedegaard, I.B. 1985. Wave generated ripples and resulting sediment transport in waves. Inst. Hydrodynamics and hydraulic Eng., Tech. Univ. Denmark, Series Paper No. 36.
- Hjelmfelt, A.T. and C.W. Lenau. 1970. Non-equilibrium transport of suspended sediment. J. Hyd. Div., ASCE, 96(HY7) ; 1567-1586.
- Hom-ma, M. and Horikawa, K. 1963. A Laboratory study on suspended sediment due to wave action. IAHR Congress, London. pp. 213-220.
- Homma, M., Horikawa, K. and Kajima, R. 1965. A study on suspended sediment due to wave action. Coastal Engineering in Japan, Vol. 8, pp. 85-103.
- Horikawa, K. 1978. Coastal engineering : An introduction to ocean engineering. University of Tokyo Press, 402 pp.
- Horikawa, K. 1986. State of the art-prediction of beach evolution. Proc. 5th Congress, APD-IAHR, Seoul, pp. 15-77.
- Horikawa, K. and Mizutani, S. 1992. Oscillatory flow behaviour in the vicinity of ripple models. ICCE, ASCE, pp. 2122-2135.
- Houston, J.R. 1981. Combined refraction and diffraction of short waves using finite element methods. Appl. Ocean Res., 3(4) : 163-170.
- Huynh-Thanh, S. and Temperville, A. 1990. A numerical model of the rough turbulent boundary layer in combined wave and current interaction, ICCE, ASCE, pp. 853-866.
- Irie, I. and Nadaoka, K. 1984. Laboratory reproduction of seabed scour in front of breakwater. ICCE, ASCE, pp. 1715-1747.
- Ito, Y. and K. Tanimoto. 1972. A method of numerical analysis of wave propagation - Application of wave refraction and diffraction. Proc. 13th Conf. Coastal Eng., ASCE, Chap. 26.
- Justesen, P., Fredsoe, J. and Deigaard, R. 1986. The bottleneck problem for turbulence in relation to suspended sediment in the surf zone. ICCE, ASCE, pp. 1225-1239.

- Justesen, P. 1987. Turbulent wave boundary layers. Series Paper No. 43. Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Eng., Tech. Univ. Denmark.
- Keller, J.B. 1958. Surface waves on water of non-uniform depth. *J. Fluid Mech.*, 4 : 607-614.
- Keller, J.B. 1962. Geometrical theory of diffraction. *J. Opt. Soc. Am.*, 52(2) : 116-129.
- Kennedy, J.F. and Locher, F.A. 1972. Sediment suspension by water waves. In "Waves on beaches and resulting sediment transport", Academic Press, New York.
- Kim, H. 1993. Three-dimensional sediment transport model. Ph.D. Thesis, University of Liverpool, U.K.
- Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple. 1986. Modeling waves in surfzones and around islands. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, ASCE, 112(1), pp. 78~93.
- Kirby, J.T. 1983. Propagation of weakly-nonlinear surface water waves in regions with varying depth and current. Res. Rep. No. CE-83-37, Dept. of Civil Eng., Univ. of Delaware.
- Kirby, J.T. 1984. A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography. *J. Geophys. Res.*, 89(C1) ; 745-747.
- Kirby, J.T. and R.A. Dalrymple. 1983. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. *J. Fluid Mech.*, 136 : 453-466.
- Kobune, K. and N. Hashimoto. 1986. Estimation of directional spectra from maximum entropy principle. Proc. 5th Int. Offshore Mech. and Arctic Eng., ASME 1, pp. 80~85.
- Komar, P.D. and D.L. Inman. 1970. Longshore sand transport on beaches. *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 30, pp. 5914-5927.
- Kraus, N.C. 1982. Pragmatic calculation of the breaking wave height and wave angle behind structures. Proc. of 29th Japanese Coast. Engrg. Conf., pp. 95-99 (in Japanese).
- Kraus, N.C. and S. Harikai. 1983. Numerical model of the shoreline change at Oarai beach. *Coast. Engrg.*, Vol. 7, pp. 1-28.

- Kraus, N.C., M. Isobe, H. Igarashi, T. Sasaki and K. Horikawa. 1982. Field experiments on longshore sediment transport in the surf zone. Proc. of 18th Conf. on Coast. Engrg., ASCE, pp. 969-988.
- Lauder, B.E. and Spalding, D.B. 1972. Lectures in mathematical models of turbulence. Academic Press.
- Lee-Young, J.S. and J.F.A. Sleath. 1990. Ripple formation in combined trans- directional steady and oscillatory flow. Sedimentology, 37 ; 509-516.
- Liu, P.L.F. 1983. Wave-current interactions on a slowly varying topography. J. Geophys. Res., 88(C7) ; 4421-4426.
- Liu, P.L.F. and T.K. Tsay. 1983a. On weak reflection of water waves. J. Fluid Mech., 131 : 59-71.
- Liu, P.L.F. and T.K. Tsay. 1983b. Water wave motion around a breakwater on a slowly varying topography. Proc. Conf. Coastal Structures. pp. 979-987.
- Longest-Higgins, M.S., 1981. Oscillatory flow over steep sand ripples. J. Fluid Mechanics, Vol. 107, pp. 1-35.
- Longuet-Higgins, M.S., D.E. Cartwright and N.D. Smith. 1963. Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating bouy. In Ocean Wave Spectra. Prentice-Hall, Inc. pp. 111-136.
- Madsen, P.A. and J. Larsen. 1987. An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation. Coastal Eng., 11, pp. 329~351.
- Madsen, O.S., P.P. Mathisen and M.M. Rosengaus. 1990. Movable bed friction factors for spectral waves. ICCE, ASCE.
- McDowell, D.M. and O'Connor, B.A. 1977. Hydraulic behaviour of estuaries. The MacMillan Press Ltd.
- Mei, C.C. 1983. The applied dynamics of ocean surface waves. John Wiley & Sons. New York. 740pp.
- Mofjeld, H.O. and J.W. Lavelle. 1984. Setting the length scale in a second- order closure model of the unstratified bottom boundary layer. J. Phys. Oceanogr., 14, 833-839.

- Munk, W.H. and R.S. Arthur. 1952. Wave intensity along a refracted bay. Symp. on Gravity Waves. National Bureau of Standards, Circular 521, Washington D.C.
- Murray, P.B. Davies, A.G. and Soulsby, R.L. 1991. Sediment pickup in wave and current flows. In "Sand Transport in Rivers, Estuaries and the Sea", Proc. Euromech 262, Soulsby, R. L. and Bettess, R.(eds). Balkema, Rotterdam.
- Nairn, R.B. 1988. Prediction of wave height and mean return flow in cross-shore sediment transport modelling. Proc. IAHR Symp. on Math. Modelling of Sediment Transport in Coastal Zone, Copenhagen ; 193-202.
- Nap, E. and van Kampen, A. 1988. Sediment transport in irregular non-breaking waves. Coastal Eng. Dep., Delft University of Technology.
- Nicholson, J.M.C. 1983. Three-dimensional models of particulate and cohesive suspended sediment transport. Ph.D. Thesis at Univ. of Manchester.
- Nielsen, P. 1981. Dynamics and geometry of wave-generated ripples. J. Geophys. Res., 86(C7) ; 6467-6472.
- Nielsen, P. 1988. Towards modelling coastal sediment transport. ICCE, ASCE, 1952-1958.
- Nieuwjaar, M. and van der Kaaij, Th. 1987. Sediment concentrations and transport in irregular non-breaking waves. Coastal Eng. Dep., Delft University of Technology.
- O'Connor, B.A. 1971. Mathematical model of sediment distribution. Proc. 14th IAHR Congress, Paris.
- O'Connor, B.A., Harris, J.M., Kim, H., Wong, Y.K., Oebius, H.U. and Williams, J.J. 1992. Bed boundary layers. ICCE, ASCE.
- O'Connor, B.A., Kim, H., and Williams, J.J. 1994. Hydrodynamics of random wave boundary layers. Coastal Dynamics'94, An International Conference on the Role of Large Scale Experiments in Coastal Research, Barcelona, Spain(in preparation).
- O'Connor, B.A. 1979. Models of fine sediment behaviour. Proc. First Int. Symp. on Cohesive Sediments, Cambridge.

- O'Connor, B.A. 1991. Suspended sediment transport in the coastal zone. Int. Symp. on the Transport of Suspended Sediment and its Mathematical Modelling, Florence, Italy.
- O'Connor, B.A. 1992. Prediction of seabed sand waves. Proc. International Conf. on the Computer Modelling for Seas and Coastal Regions, Southampton, England.
- O'Connor, B.A. and J. Nicholson. 1988. A Three-dimensional model of suspended particulate sediment transport. Coastal Engineering, Vol. 12, pp. 157-174.
- O'Connor, B.A. and J. Nicholson. 1989. Modelling of changes in coastal morphology. Proc. Int. Symp. Sediment Transport Modelling, ASCE. New Orleans, U.S.A.
- Ozasa, H. and A.H. Brampton. 1980. Mathematical modelling of beaches backed by seawalls. Coast. Engrg., Vol. 4, No. 1, pp. 47-63.
- Pelnard-Considere, R. 1956. Essai de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets. 4th Journees de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question III, Rapport No. 1.
- Penny, W.G. and A.T. Price. 1952. The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwaters. Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A244 : 253-263.
- Peregrine, D.H. and I.A. Svendsen. 1978. Spilling breakers, bores and hydraulic jumps. Proc. 16th ICCE. ASCE.
- Perlin, M. and R.G. Dean. 1985. 3-D model of bathymetric response to structures. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 111(2) : 153-170.
- Pierson, W.J. and L. Moskowitz. 1964. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitagorodskii. J. Geophys. Res. Vol.69, No.24 : 5181-5189.
- Radder, A.C. 1979. On the parabolic equation method for water wave propagation. J. Fluid Mech., 95(1) : 159-176.
- Ranasoma, K. I. M. and Sleath, J. F. A. 1992. Velocity measurements close to rippled beds. ICCE. ASCE : 2383-2396.

- Raudkivi, A.J. 1988. The roughness height under waves. *J. Hyd. Res.*, 26(5) ; 569-584.
- Roache, P.J. 1972. *Computational fluid dynamics*. Hermosa Publishers. 434pp.
- Rodi, W. 1984. Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review. Institut fur Hydromechanik, Univ. of Karlsruhe.
- Ryrie, S.C. 1983. Longshore motion generated on beaches by obliquely incident bores. *Jou. Fluid Mech.* Vol.129 : 193-212.
- Sato, S. 1988. Sand ripple geometry and sand transport mechanism due to irregular oscillatory flows. ICCE, ASCE ; 1748-1762.
- Sato, S., Mimura, N. and Watanabe, A. 1984. Oscillatory boundary layer flow over rippled beds. ICCE, ASCE, pp. 2293-2309.
- Sato, S., Shimosako, K. and Watanabe, A. 1987. *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 30 : 89-98.
- Sato, Y. and Hamanaka, K-I. 1992. Quasi-turbulent boundary layer of oscillating flow over ripples. ICCE, ASCE, pp. 2424-2437.
- Sheng, Y.P. 1983. Mathematical modelling of 3-dimensional coastal currents and sediment dispersion : Model development and application. CERC, Technical Report, CERC-83-2.
- Sheng, Y.P. 1989. Evolution of a three-dimensional curvilinear-grid hydrodynamics model for estuaries, lakes and coastal waters : CH3D. in *Estuarine and Coastal Modelling*. M.L. Spaulding, Ed. ASCE : 40-49.
- Shepard, F.P. and D.L. Inman. 1950. Nearshore circulation related to bottom topography and wave refraction. *Trans. Am. Geophys. Union*. Vol.3, No.2 : 196-212.
- Sleath, J.F.A. 1982. The suspension of sand by waves. *J. of Hydraulic Research*, Vol. 20, No. 5.
- Sleath, J.F.A. 1984. *Sea bed mechanics*. John Wiley and Sons.
- Smith, G.D. 1965. *Numerical solution of partial differential equations*. Oxford Univ. Pree.

- Stive, M.J.F. and H.G. Wind. 1986. Cross-shore mean flow in the surfzone. *Coastal Eng.* Vol. 10 : 325-340.
- 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.*
- Svendsen, I.A. 1984. Mass flux and undertow in a surf zone. *Coastal Eng.* Vol. 8 : 303-329.
- Svendsen, I.A. 1987. Analysis of surf-zone turbulence. *Jou. Geophys. Res.* Vol. 92, No. C5 : 5115-5124.
- Svendsen, I.A., H.A.Schaffer and J.B. Hansen. 1987. The interaction between the undertow and the boundary layer flow on a beach. *Jou. Geophys. Res.* Vol. 92, No. C11 : 11845-11856
- Svendsen, I.A. and R.S. Lorenz. 1989. Velocities in combined undertow and longshore currents. *Coastal Eng.* 13. 55-79.
- Suh, K.D. and C.S. Hardaway. 1994. Numerical modeling of tombolo formation. *Proc. of 24th Conf. on Coast. Engrg., ASCE* (will be appeared).
- Sunamura, T. 1984. Quantitative predictions of beach-face slopes. *Geological Soc. of America Bull.*, Vol. 95, pp. 242-245.
- Tsay, T.K. and P.L.F. Liu, 1983. A finite element model for water wave refraction and diffraction. *Applied Ocean Res.*, 5(1), pp. 30-37.
- Tsay, T.K. and P.L.F. Liu. 1982. Numerical solution of water-wave refraction and diffraction problems in the parabolic approximation. *J. Geophys. Res.*, 87(C10) : 7932-7940.
- Uda, T. 1983. Predictive model of planform change of a spit at a river mouth. *Coast. Engrg. in Japan*, Vol. 26, pp. 137-150.
- Van Rijn, L.C. and Meijer, K. 1988. Three-dimensional mathematical modelling of suspended sediment transport in currents and waves. *Proc. IAHR Symp. on Math. Mod. of Sed. Transp. in the Coastal Zone, Copenhagen*, pp. 89-99.
- Van Rijn, L.C. 1984. Sediment transport, Part I : Bed load transport. *J. Hyd. Eng.*, ASCE, 110(HY10).

- Van Rijn, L.C. 1985. Two-dimensional vertical mathematical model for suspended sediment transport by currents and waves. DHL Report S488, Part IV.
- Van Rijn, L.C. 1987. Data Base: Sand concentration profiles for currents and/or waves. DH Report M1695-04-1.
- Van Rijn, L.C. 1989. Handbook sediment transport in currents and waves. DH Report H461.
- Van Rijn, L.C. 1990. The state of the art in sediment transport modelling. Int. Conf. on Sediment Transport Modelling, pp. 13-32.
- Van der Valden, E. 1986. Sand suspension in an oscillatory flow near the bed. Delft University of Technology, Coastal Engineering Department, Delft, The Netherlands.
- Vemulakonda, S.R., Scheffner, N.W. Earickson, J.A. and Chou, L.W. 1988. Kings Bay coastal processes numerical model. U.S. Army, CERC. Technical Report, CERC-88-3.
- Verboom, G.K. 1975. The advection-dispersion equation for an isotropic medium solved by fractional-step method. Proc. Int. Conf. on Math. Models for Environmental Problems. Southampton, U.K. (ed. Brebbia, C.A.)
- Vincent, C.E. and Green, M.O. 1990. Field measurements of the suspended sand concentration profiles and fluxes and of the resuspension coefficient γ_0 over a rippled bed. J. Geophysical Research, Vol. 95, No. C7, pp. 11591-11601.
- Vongvisessomjai, S. 1984. Oscillatory ripple geometry. J. Hyd. Eng., ASCE, 110(3) ; 247-266.
- Wang, H., R.A. Dalrymple and J.C. Shiau. 1975. Computer simulation of beach erosion and profile modification due to waves. Proc. Symp. Modeling Technique, ASCE : 1369-1384.
- Warren, R., J. Larsen and P.A. Madsen. 1985. Application of short wave numerical models to harbour design and future development of the model. Int. Conf. Numerical and Hydraulic Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, England. Paper L1 ; 303-308.
- Watanabe, A. 1982. Numerical models of nearshore currents and beach deformation. Coastal Eng. in Japan, 25 : 147-161. Watanabe, A., Y.

- Riho and K. Horikawa. 1980. Beach profiles and on-offshore sediment transport. ICCE, ASCE ; 1106-1121.
- Watanabe, A. and K. Maruyama. 1986. Numerical modelling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking. Coastal Eng. in Japan, 29 ; 19-39.
- Watanabe, A., K. Maruyama, T. Shimizu and T. Sakakiyama. 1986. Numerical prediction model of three-dimensional beach deformation around a structure. Coastal Eng. in Japan, 29 ; 179-194.
- Williams, R.G., J. Darbyshire and P. Holms. 1980. Wave refraction and diffraction in a caustic region : A numerical solution and experimental validation. Proc. Inst. Civ. Eng., 69(2) : 653-649.
- Yoo, D. 1986. Mathematical modelling of wave-current interacted flow in shallow water. Ph.D. Thesis. Univ. of Manchester.
- Yoo, D. 1989. Explicit modelling of bottom friction in combined wave-current flow. Coastal Eng. Vol. 13 : 325-340.

부 록
(APPENDIX)

Table A2.2.1 Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during continuous measurement(FW, 1993).

SITE : CHUKPYON(FW)

OCT. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
12D 18H	0.46	6.02	4.24	0.77	0.33	0.46	9.09	6.10	5.03	60.1	48.8
12D 21H	0.41	6.28	4.63	0.61	0.29	0.41	9.23	6.71	5.82	61.5	36.7
13D 0H	0.35	6.25	5.02	0.56	0.25	0.35	10.02	7.12	6.26	43.9	41.9
13D 3H	0.36	7.04	4.89	0.57	0.25	0.35	10.36	6.83	5.67	67.3	37.6
13D 6H	0.34	7.10	4.80	0.58	0.24	0.33	8.79	6.70	5.80	54.2	37.3
13D 9H	0.46	2.99	3.54	0.68	0.34	0.47	8.27	4.84	3.87	9.0	24.2
13D 12H	1.03	4.78	4.23	1.77	0.73	1.02	7.21	5.17	4.60	2.3	18.1
13D 15H	0.71	3.44	3.66	1.18	0.53	0.74	6.85	4.64	3.99	20.1	25.0
13D 18H	1.66	6.27	5.12	2.97	1.16	1.63	8.86	6.74	6.00	22.5	22.5
13D 21H	1.84	8.17	5.81	3.84	1.27	1.79	10.90	8.11	7.24	19.5	19.0
14D 0H	1.86	9.72	6.29	3.17	1.27	1.80	10.82	8.53	7.62	18.1	11.6
14D 3H	1.62	9.63	5.92	2.78	1.12	1.58	12.08	8.36	7.42	21.1	15.3
14D 6H	1.35	6.02	5.13	2.12	0.93	1.30	11.02	6.81	6.03	49.8	28.7
14D 9H	1.44	6.48	5.10	2.38	0.99	1.39	9.30	6.78	6.07	31.3	26.8
14D 12H	1.54	5.63	4.71	2.73	1.08	1.51	8.53	6.03	5.33	61.2	29.0
14D 15H	1.22	6.54	4.59	2.07	0.88	1.19	8.46	6.16	5.44	33.0	34.3
14D 18H	0.91	6.06	4.48	1.49	0.65	0.91	8.18	5.90	5.22	49.3	35.0
14D 21H	0.92	6.01	4.44	1.34	0.65	0.90	7.78	5.82	5.12	55.4	40.8
15D 0H	1.41	6.25	5.19	2.37	1.00	1.37	9.34	6.62	5.90	46.7	23.3
15D 3H	1.02	6.02	4.75	1.85	0.71	0.99	8.15	5.93	5.32	63.8	35.7
15D 6H	0.77	4.92	4.47	1.28	0.55	0.77	7.94	5.69	5.08	77.7	37.1
15D 9H	0.61	5.24	4.47	0.97	0.43	0.59	7.97	5.65	4.94	77.0	41.8
15D 12H	0.63	5.63	4.89	1.10	0.46	0.63	9.28	6.09	5.34	84.3	30.7
15D 15H	0.74	4.93	3.62	1.42	0.55	0.75	8.04	4.78	3.97	66.6	37.5
15D 18H	0.83	3.94	3.63	1.41	0.62	0.84	7.15	4.61	3.93	118.3	25.1
15D 21H	0.53	3.29	3.86	0.85	0.40	0.54	8.26	4.93	4.22	95.3	35.4
16D 0H	0.45	3.86	4.08	0.83	0.33	0.45	8.93	5.56	4.69	88.0	32.9
16D 3H	0.43	9.62	4.32	0.72	0.31	0.43	9.19	5.87	4.82	100.8	33.8
16D 6H	0.36	4.64	4.28	0.69	0.26	0.36	9.88	5.71	4.81	95.0	48.8
16D 9H	0.33	8.58	4.13	0.54	0.24	0.33	10.14	6.09	4.86	52.3	23.3
16D 12H	0.36	4.49	3.90	0.76	0.27	0.37	8.03	5.18	4.46	29.2	34.7

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

OCT, 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/2}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
16D 15H	0.35	4.76	3.77	0.62	0.25	0.35	8.44	5.22	4.20	37.0	40.4
16D 18H	0.29	4.63	4.27	0.48	0.21	0.29	8.11	5.83	5.10	35.3	37.5
16D 21H	0.24	8.11	4.41	0.42	0.17	0.24	8.70	6.00	5.18	68.2	44.7
17D 0H	0.23	5.81	4.98	0.40	0.16	0.23	9.96	6.61	5.67	50.4	34.5
17D 3H	0.18	5.06	4.66	0.33	0.14	0.19	8.65	6.45	5.24	69.6	48.3
17D 6H	0.16	7.78	4.43	0.31	0.12	0.17	9.39	6.21	5.06	74.6	43.4
17D 9H	0.16	4.13	3.78	0.30	0.13	0.17	8.85	4.97	4.11	72.0	63.0
17D 12H	0.15	6.03	3.91	0.30	0.13	0.18	8.48	5.00	3.81	6.9	30.7
17D 15H	0.19	4.15	3.76	0.44	0.16	0.21	7.46	4.65	3.74	13.4	31.3
17D 18H	0.14	4.04	3.86	0.26	0.12	0.16	8.91	4.84	3.97	67.5	48.8
17D 21H	0.18	5.06	3.93	0.32	0.14	0.20	7.48	4.78	4.09	6.4	35.6
18D 0H	0.20	3.77	3.45	0.53	0.17	0.24	7.32	4.36	3.51	7.7	40.2
18D 3H	0.29	4.51	4.15	0.52	0.21	0.29	9.90	5.42	4.58	2.2	49.9
18D 6H	1.00	8.19	5.69	1.53	0.69	0.97	10.91	8.08	7.04	15.0	11.2
18D 9H	0.95	6.52	5.01	1.73	0.67	0.91	9.50	6.99	6.08	11.4	22.2
18D 12H	0.87	7.83	4.84	1.40	0.62	0.87	9.26	6.80	5.94	15.9	16.6
18D 15H	0.54	7.49	5.19	0.98	0.39	0.55	9.49	6.49	5.64	11.8	21.6
18D 18H	0.62	7.44	4.50	1.02	0.45	0.62	8.63	6.73	5.67	24.1	20.3
18D 21H	0.56	6.52	5.53	0.95	0.40	0.57	10.80	7.08	6.30	23.6	21.7
19D 0H	0.61	5.61	5.51	1.11	0.44	0.60	8.89	6.82	6.08	17.3	27.0
19D 3H	0.60	5.79	5.21	1.16	0.43	0.59	9.10	6.64	5.62	13.4	26.1
19D 6H	0.40	5.39	5.27	0.81	0.29	0.40	9.57	6.86	5.92	32.5	40.6
19D 9H	0.55	6.50	5.12	1.00	0.38	0.54	8.79	6.53	5.76	5.8	24.4
19D 12H	0.35	6.05	4.76	0.60	0.25	0.34	9.49	6.37	5.42	0.9	34.4
19D 15H	0.28	6.03	4.32	0.44	0.21	0.29	8.94	6.10	5.34	28.0	49.6
19D 18H	0.28	5.81	4.40	0.47	0.20	0.27	8.59	6.17	5.34	94.9	39.3
19D 21H	0.29	5.81	4.69	0.46	0.21	0.29	9.41	6.29	5.58	21.5	37.8
20D 0H	0.30	6.28	4.65	0.47	0.21	0.29	10.33	6.11	5.24	22.0	37.8
20D 3H	0.33	5.40	4.42	0.56	0.24	0.34	7.15	5.67	5.01	18.7	41.2
20D 6H	0.25	6.03	4.26	0.46	0.20	0.28	7.82	5.18	4.36	47.7	40.4
20D 9H	0.20	6.00	4.60	0.36	0.15	0.21	10.89	5.99	5.05	36.3	43.3
20D 12H	0.22	5.24	4.27	0.44	0.16	0.22	9.78	6.07	5.07	48.2	33.9

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

OCT. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^\circ$)	s ($^\circ$)
20D 15H	0.22	3.83	3.91	0.35	0.16	0.23	8.18	5.30	4.29	144.3	34.9
20D 18H	0.19	6.53	5.38	0.33	0.14	0.20	10.71	7.30	6.27	23.5	48.5
20D 21H	0.22	4.15	4.16	0.37	0.16	0.22	9.37	5.74	4.81	29.2	29.2
21D 0H	0.23	3.60	3.82	0.44	0.17	0.23	8.38	5.16	4.22	109.0	51.7
21D 3H	0.20	3.44	3.76	0.39	0.15	0.20	8.91	5.17	4.13	129.6	43.4
21D 6H	0.16	3.59	3.84	0.27	0.12	0.16	9.00	5.37	4.46	147.6	33.2
21D 9H	0.17	2.69	3.44	0.37	0.16	0.22	8.59	3.88	2.89	134.0	36.1
21D 12H	0.25	3.23	3.10	0.68	0.24	0.33	6.42	3.40	2.62	145.3	43.9
21D 15H	0.18	2.40	3.16	0.54	0.20	0.27	7.81	3.31	2.46	182.8	21.7
21D 18H	0.24	3.94	3.37	0.59	0.24	0.32	6.82	3.82	2.87	163.7	26.2
21D 21H	0.45	5.07	4.27	0.78	0.34	0.46	7.49	5.46	4.77	148.9	19.8
22D 0H	0.27	5.79	4.72	0.51	0.19	0.27	7.53	5.54	4.99	155.5	36.2
22D 3H	0.25	5.41	4.49	0.45	0.19	0.27	8.04	5.30	4.54	140.4	45.0
22D 6H	0.38	5.42	4.21	0.68	0.27	0.38	8.51	5.58	4.74	5.9	30.8
22D 9H	0.38	7.43	4.69	0.63	0.28	0.39	9.02	6.18	5.42	359.9	20.1
22D 12H	0.49	7.11	4.65	0.85	0.35	0.48	8.45	6.19	5.52	4.8	23.0
22D 15H	0.55	10.38	4.26	0.92	0.40	0.55	10.90	6.05	5.06	22.5	19.2
22D 18H	0.94	9.14	6.00	1.46	0.66	0.92	11.27	8.86	8.08	17.4	15.0
22D 21H	0.91	8.67	5.62	1.37	0.63	0.88	10.08	8.08	7.38	22.4	13.3
23D 0H	0.77	7.72	5.27	1.17	0.53	0.73	9.24	7.13	6.22	25.2	25.2
23D 3H	0.64	7.44	5.93	1.39	0.43	0.61	9.72	7.29	6.60	16.8	26.9
23D 6H	0.68	7.77	5.42	1.21	0.49	0.69	9.03	7.14	6.58	19.7	25.1
23D 9H	0.66	7.44	6.00	1.14	0.46	0.65	9.72	7.76	7.07	18.9	26.7
23D 12H	0.83	7.10	5.04	1.39	0.58	0.83	9.40	6.97	6.32	18.7	23.9
23D 15H	1.08	7.38	5.35	1.68	0.76	1.06	9.48	7.25	6.41	15.1	22.2
23D 18H	1.04	6.52	5.51	1.64	0.73	1.01	8.79	7.24	6.41	13.3	20.2
23D 21H	0.86	6.51	5.62	1.39	0.61	0.84	9.38	7.21	6.28	27.9	27.3
24D 0H	0.86	6.50	5.62	1.30	0.61	0.86	9.41	6.89	6.15	32.9	24.1
24D 3H	0.80	6.78	5.52	1.28	0.57	0.78	9.63	6.93	6.16	24.2	29.7
24D 6H	0.81	6.01	5.37	1.36	0.59	0.82	10.79	6.62	5.87	29.1	31.3
24D 9H	1.26	6.79	6.04	1.85	0.88	1.25	9.93	7.35	6.64	30.9	19.2
24D 16H	0.92	8.63	5.99	1.49	0.65	0.92	12.23	7.96	7.12	18.2	17.7

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

OCT. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
24D 19H	1.16	8.13	6.66	1.69	0.81	1.13	10.30	8.21	7.32	24.6	17.2
24D 22H	1.13	8.13	6.60	2.03	0.80	1.14	10.68	8.22	7.21	36.4	16.2
25D 1H	1.03	7.11	6.15	1.69	0.73	1.01	9.95	7.83	6.91	25.6	20.6
25D 4H	1.11	6.85	6.02	1.91	0.79	1.08	10.14	7.67	6.75	21.2	22.8
25D 7H	0.98	7.37	6.11	1.55	0.69	0.97	9.88	7.63	6.88	17.2	18.9
25D 10H	0.70	7.10	5.77	1.03	0.50	0.69	10.19	7.58	6.64	11.7	26.1
25D 13H	0.78	6.52	4.40	1.26	0.55	0.77	10.15	6.48	5.51	5.6	21.2
25D 16H	0.83	6.26	4.36	1.34	0.59	0.81	8.96	6.46	5.56	22.2	25.7
25D 19H	0.88	7.42	5.39	1.45	0.60	0.87	10.83	7.28	6.39	18.2	21.8
25D 22H	1.24	7.11	6.30	1.98	0.87	1.21	13.59	8.62	7.37	33.9	23.4
26D 1H	2.07	9.21	7.69	3.13	1.45	2.03	13.78	10.10	8.80	28.0	15.0
26D 4H	1.87	9.11	7.42	2.69	1.29	1.84	12.40	9.72	8.69	36.9	16.7
26D 7H	1.41	8.12	6.82	2.29	0.96	1.38	12.01	8.84	8.06	27.4	18.9
26D 10H	1.25	8.60	6.75	1.75	0.87	1.18	12.32	9.18	8.01	27.6	25.6
26D 13H	1.29	8.11	6.75	1.85	0.89	1.23	12.31	9.03	7.74	26.2	23.1
26D 16H	1.36	8.18	6.95	2.34	0.94	1.32	13.14	9.17	8.10	17.7	21.7
26D 19H	1.39	7.79	6.69	2.11	0.98	1.35	12.94	9.06	8.09	29.3	19.7
26D 22H	1.38	6.52	6.35	2.65	0.97	1.33	12.79	8.53	7.42	19.5	17.0
27D 1H	1.10	8.59	6.48	1.89	0.75	1.05	14.45	8.56	7.53	44.6	22.2
27D 4H	0.83	9.69	5.93	1.23	0.58	0.79	13.24	8.50	7.40	31.9	26.1
27D 7H	0.81	7.09	6.28	1.14	0.56	0.78	12.36	8.61	7.56	32.5	27.7
27D 10H	0.84	6.54	6.65	1.26	0.57	0.80	12.63	8.92	7.84	21.9	22.6
27D 13H	0.87	10.26	6.68	1.54	0.61	0.84	12.50	8.98	8.08	52.2	24.2
27D 16H	0.85	9.66	6.32	1.35	0.60	0.85	12.25	8.21	7.54	53.3	29.9
27D 19H	0.80	8.62	5.35	1.32	0.56	0.79	10.59	7.44	6.71	51.6	31.3
27D 22H	0.70	7.80	5.07	1.08	0.49	0.67	10.74	7.21	6.25	57.1	36.3
28D 1H	0.66	8.65	4.93	1.05	0.46	0.63	10.82	7.42	6.36	59.9	28.9
28D 4H	0.65	10.86	5.11	1.02	0.46	0.63	10.45	7.55	6.45	56.4	24.9
28D 7H	0.60	9.11	5.68	1.00	0.42	0.59	11.34	7.73	6.79	58.7	29.6
28D 10H	0.62	9.57	5.83	0.95	0.43	0.60	12.74	8.32	7.39	46.3	29.0
28D 13H	0.64	7.80	5.47	1.05	0.44	0.61	10.66	7.60	6.43	50.0	29.7
28D 16H	0.71	4.64	4.64	1.22	0.51	0.70	9.98	6.17	5.56	99.5	28.9

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

OCT. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
28D 19H	0.65	7.78	4.59	1.08	0.47	0.64	9.76	6.44	5.60	101.4	28.9
28D 22H	0.56	5.42	5.03	0.95	0.39	0.54	10.89	6.79	5.72	60.9	28.9
29D 1H	0.45	5.43	5.11	0.82	0.32	0.45	11.12	7.12	5.92	108.5	28.8
29D 4H	0.47	5.23	4.96	0.76	0.34	0.47	8.51	6.47	5.85	102.0	26.2
29D 7H	0.47	5.21	5.13	0.79	0.34	0.46	9.11	6.70	5.75	104.6	28.7
29D 10H	0.40	7.40	4.77	0.61	0.28	0.39	9.92	6.51	5.57	93.2	30.6
29D 13H	0.45	4.92	3.96	0.89	0.32	0.44	8.28	5.24	4.38	92.8	30.1
29D 16H	0.81	4.50	4.13	1.43	0.58	0.80	7.10	5.27	4.52	33.6	49.2
29D 19H	1.60	6.27	5.27	2.44	1.14	1.60	8.30	6.73	5.98	14.3	29.0
29D 22H	1.52	6.56	5.67	2.48	1.08	1.49	9.04	7.32	6.55	39.4	47.9
30D 1H	1.42	7.13	6.32	2.35	0.99	1.40	10.61	7.63	6.92	56.7	52.1
30D 4H	0.97	7.42	6.09	1.88	0.69	1.01	9.95	7.53	6.66	103.7	55.0
30D 7H	0.99	8.57	6.38	1.43	0.71	0.99	11.38	8.49	7.18	90.8	24.4
30D 10H	0.73	8.62	6.31	1.28	0.51	0.71	13.10	8.56	7.75	87.0	32.8
30D 13H	0.70	8.63	5.73	1.42	0.52	0.71	9.38	6.88	6.15	53.4	32.2
30D 16H	0.47	7.79	5.96	0.89	0.35	0.49	10.54	6.99	6.04	51.8	36.3
30D 20H	0.42	7.84	5.48	0.75	0.30	0.42	10.43	7.24	6.57	37.6	37.7
30D 23H	0.44	9.12	5.93	0.82	0.32	0.45	11.70	6.79	5.89	29.6	23.2
31D 2H	0.43	9.09	6.44	0.74	0.32	0.45	10.49	8.01	7.19	24.8	25.0
31D 5H	0.35	7.79	5.91	0.63	0.25	0.35	10.61	7.30	6.83	22.2	34.4
31D 8H	0.39	8.21	5.60	0.60	0.27	0.37	10.35	7.76	6.94	26.4	37.8
31D 11H	0.54	8.14	5.38	0.94	0.39	0.54	10.41	6.90	6.13	26.7	30.4
31D 14H	0.50	8.14	5.64	0.87	0.37	0.51	10.10	7.40	6.46	21.2	26.6
31D 17H	0.45	7.80	5.16	0.90	0.35	0.48	9.97	6.59	5.31	21.5	27.2
31D 20H	0.42	7.82	5.77	0.66	0.29	0.41	11.43	7.57	6.92	25.7	26.4
31D 23H	0.52	7.85	5.56	0.81	0.36	0.51	10.35	7.57	6.65	27.1	29.8

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

NOV. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^\circ$)	s ($^\circ$)
5D 2H	0.23	4.64	3.96	0.36	0.16	0.23	7.96	5.00	4.21	17.6	43.3
5D 5H	0.31	3.84	3.70	0.54	0.23	0.32	7.76	4.75	4.01	142.8	41.5
5D 8H	0.24	5.05	3.75	0.42	0.18	0.25	7.36	4.93	4.14	80.2	57.8
5D 11H	0.24	4.64	3.88	0.41	0.17	0.23	9.94	5.33	4.39	33.0	48.1
5D 14H	0.28	4.91	3.86	0.53	0.20	0.28	8.78	5.41	4.55	31.8	32.5
5D 17H	0.27	5.25	3.89	0.66	0.26	0.36	7.30	4.15	3.08	20.7	29.8
5D 20H	0.40	9.77	3.37	0.67	0.31	0.42	10.69	4.68	3.52	22.1	28.8
5D 23H	0.58	8.60	5.59	0.92	0.41	0.57	10.10	8.33	7.71	18.6	17.2
6D 2H	0.98	8.20	6.85	1.88	0.70	0.98	10.76	8.48	7.77	22.9	16.3
6D 5H	1.04	8.12	6.57	1.70	0.73	1.03	10.63	8.14	7.29	15.8	12.8
6D 8H	0.81	7.43	5.20	1.46	0.57	0.81	8.97	6.93	6.40	17.1	18.8
6D 11H	0.95	7.09	4.78	1.60	0.67	0.93	9.06	6.53	5.44	13.2	17.3
6D 14H	0.80	6.78	4.89	1.45	0.57	0.79	8.12	6.48	5.55	8.1	22.5
6D 17H	0.62	6.51	5.14	1.19	0.44	0.61	8.89	6.59	5.77	19.1	21.3
6D 20H	0.83	5.08	4.31	1.18	0.60	0.84	7.87	5.62	4.90	21.3	20.7
6D 23H	2.12	6.53	5.46	3.18	1.49	2.08	8.42	6.60	6.10	24.1	20.1
7D 2H	3.07	8.63	6.70	4.80	2.15	3.04	11.04	8.61	7.89	23.7	16.5
7D 5H	3.00	8.71	6.89	4.57	2.12	2.89	10.86	9.19	8.19	24.0	17.0
7D 8H	3.12	9.10	7.24	4.87	2.22	3.06	11.49	9.56	8.72	28.9	21.7
7D 11H	2.80	10.20	7.26	3.83	1.93	2.67	11.70	9.90	9.00	23.1	18.3
7D 14H	3.04	9.70	7.39	4.70	2.10	2.98	12.55	9.92	9.07	28.1	14.8
7D 17H	3.06	9.14	7.26	5.52	2.18	3.08	12.53	9.31	8.43	27.8	13.8
7D 20H	2.48	8.63	6.83	3.84	1.76	2.42	10.42	9.00	8.21	25.0	20.0
7D 23H	1.96	8.16	6.16	3.20	1.37	1.90	10.07	8.01	7.15	26.7	20.1
8D 2H	1.72	8.71	6.06	2.58	1.22	1.66	10.58	8.02	7.15	26.7	23.1
8D 5H	1.60	8.15	6.20	2.17	1.13	1.57	9.78	7.99	7.10	26.0	23.9
8D 8H	1.46	7.12	5.94	2.30	1.02	1.42	9.31	7.78	6.85	23.2	26.4
8D 11H	1.40	7.76	5.90	2.04	0.99	1.38	9.50	7.71	6.77	34.1	32.7
8D 14H	1.31	7.43	5.73	2.53	0.91	1.23	9.87	7.39	6.53	31.6	29.8
8D 17H	1.16	6.80	5.18	1.74	0.82	1.16	9.40	6.85	6.04	40.1	34.6
8D 20H	1.27	6.26	4.78	1.92	0.91	1.25	9.21	6.48	5.58	40.7	34.5
8D 23H	1.23	5.61	4.62	1.98	0.88	1.20	8.79	6.31	5.20	42.0	36.1

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

NOV. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
9D 2H	1.20	6.27	4.62	1.97	0.85	1.20	7.74	6.01	5.22	35.3	33.7
9D 5H	1.43	5.99	4.89	2.27	1.00	1.44	8.65	6.18	5.56	57.6	28.7
9D 8H	1.70	6.27	5.25	3.04	1.20	1.69	8.91	6.83	6.15	70.3	26.9
9D 11H	1.59	6.80	5.40	2.52	1.13	1.56	8.98	7.05	6.25	67.9	20.2
9D 14H	1.62	7.09	5.48	2.80	1.14	1.58	8.56	7.20	6.39	59.4	18.7
9D 17H	1.70	8.15	5.92	2.56	1.18	1.65	9.90	7.69	6.96	52.7	26.3
9D 20H	1.57	7.77	5.50	2.71	1.11	1.56	9.33	7.54	6.58	43.1	30.5
9D 23H	1.40	6.79	5.46	2.08	0.98	1.36	10.21	7.24	6.22	45.5	28.5
10D 2H	1.36	6.80	5.67	2.16	0.96	1.34	9.05	7.27	6.60	33.5	27.9
10D 5H	1.31	7.41	5.45	2.04	0.93	1.27	9.79	7.26	6.53	26.1	31.0
10D 8H	1.21	7.13	5.04	2.00	0.83	1.17	9.04	6.53	5.78	16.1	35.0
10D 11H	1.22	6.80	5.06	2.37	0.86	1.20	9.17	6.52	5.71	32.7	35.3
10D 14H	1.09	6.49	4.93	1.94	0.76	1.06	9.31	6.51	5.70	74.5	52.3
10D 17H	1.19	6.27	5.24	1.85	0.86	1.18	10.09	6.90	6.10	82.7	43.9
10D 20H	1.14	5.79	5.19	1.75	0.81	1.10	9.79	6.85	5.91	76.2	40.7
10D 23H	0.99	6.02	4.90	1.49	0.71	0.98	8.23	6.51	5.64	66.3	38.5
11D 2H	1.01	7.07	4.87	1.79	0.71	0.99	9.35	6.36	5.62	85.1	32.8
11D 5H	1.03	5.25	4.85	1.99	0.73	1.00	9.42	6.36	5.46	74.5	37.1
11D 8H	0.94	6.05	4.62	1.71	0.65	0.92	7.97	5.97	5.17	71.9	36.5
11D 11H	0.77	6.52	4.41	1.35	0.56	0.78	8.45	6.02	5.27	80.5	30.4
11D 14H	1.01	6.25	4.64	1.62	0.73	0.99	7.83	6.06	5.28	79.9	22.6
11D 17H	1.17	5.45	4.67	2.24	0.83	1.14	8.16	6.02	5.30	65.3	28.3
11D 20H	1.10	5.09	4.81	1.99	0.79	1.10	8.43	6.14	5.36	58.8	28.4
11D 23H	1.20	6.28	4.99	1.94	0.84	1.16	8.11	6.52	5.75	73.0	24.9
12D 2H	1.16	6.54	4.78	1.86	0.81	1.12	8.59	6.23	5.37	72.5	28.8
12D 5H	1.17	6.52	4.87	1.89	0.83	1.16	8.45	6.28	5.52	69.1	25.5
12D 8H	1.25	6.78	5.17	2.55	0.88	1.24	8.70	6.69	5.84	64.2	19.9
12D 11H	1.08	7.06	4.84	1.79	0.76	1.07	7.90	6.29	5.64	67.4	23.2
12D 14H	1.05	5.07	4.61	2.03	0.75	1.03	8.37	5.93	5.01	25.0	32.5
12D 17H	0.98	4.93	4.53	1.78	0.70	0.97	8.77	5.98	5.10	20.0	35.2
12D 20H	0.87	5.21	4.49	1.53	0.62	0.86	8.76	5.74	4.99	18.8	27.5
12D 23H	0.83	6.30	4.79	1.23	0.60	0.83	8.01	6.26	5.28	63.0	30.8

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

NOV. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/2}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
13D 2H	0.87	6.04	4.54	1.41	0.62	0.87	8.00	5.86	5.14	75.3	30.9
13D 5H	0.80	6.25	4.50	1.26	0.58	0.80	7.39	5.80	5.13	73.6	30.4
13D 8H	0.81	6.04	4.98	1.32	0.58	0.81	8.86	6.41	5.60	63.9	22.3
13D 14H	1.03	6.51	5.30	1.60	0.73	1.02	8.45	6.65	5.88	64.0	28.1
13D 20H	1.27	8.21	5.73	1.95	0.89	1.23	10.60	7.77	6.72	91.1	24.3
13D 23H	1.05	7.09	5.52	1.64	0.75	1.04	9.57	7.23	6.53	65.9	36.9
14D 2H	1.19	6.76	5.87	1.96	0.84	1.15	8.89	7.28	6.49	91.7	46.1
14D 5H	1.17	7.72	5.88	1.80	0.84	1.17	9.73	7.55	6.51	105.3	46.6
14D 8H	1.01	7.44	6.15	1.73	0.72	1.00	13.16	8.53	7.46	73.0	33.8
14D 11H	1.16	8.64	7.22	1.81	0.80	1.13	12.16	9.52	8.69	26.6	20.4
14D 14H	1.24	9.73	7.31	2.12	0.87	1.20	12.76	10.02	8.58	27.3	14.5
14D 17H	1.39	9.56	7.40	2.22	0.97	1.36	11.91	9.34	8.28	26.7	17.3
14D 20H	1.57	8.66	7.29	2.53	1.10	1.51	10.84	9.30	8.05	26.5	16.0
14D 23H	1.23	8.19	6.87	1.85	0.86	1.19	11.86	8.65	7.68	23.2	18.7
15D 2H	0.98	8.23	6.52	2.02	0.68	0.96	10.49	8.43	7.49	29.3	15.7
15D 5H	0.90	8.61	6.95	1.34	0.62	0.87	11.03	8.75	8.09	30.4	20.0
15D 8H	0.80	8.63	6.74	1.16	0.55	0.79	10.13	8.38	7.70	33.2	26.4
15D 11H	0.78	7.80	6.34	1.31	0.54	0.78	10.19	8.10	7.67	32.2	25.1
15D 14H	0.99	7.76	6.44	1.60	0.69	0.97	10.24	8.21	7.62	38.4	21.8
15D 18H	1.06	7.43	5.40	1.63	0.75	1.06	9.70	7.53	6.91	28.6	25.2
15D 21H	0.75	7.10	5.58	1.21	0.53	0.74	10.16	7.47	6.78	29.6	23.4
16D 0H	0.65	7.76	5.10	1.10	0.46	0.65	9.54	7.41	6.43	29.3	29.1
16D 3H	0.60	7.09	4.91	1.16	0.43	0.60	10.43	7.11	6.20	35.6	25.1
16D 9H	0.58	6.03	4.80	1.06	0.41	0.58	9.08	6.52	5.74	27.1	32.0
16D 12H	0.73	5.81	4.37	1.13	0.52	0.72	8.70	5.89	5.10	36.1	48.7
16D 15H	0.71	5.62	4.23	1.41	0.50	0.70	8.08	5.72	4.83	54.9	52.2
16D 18H	0.72	6.77	4.63	1.11	0.51	0.69	9.25	6.25	5.44	39.5	32.2
16D 21H	0.70	6.51	4.87	1.09	0.50	0.69	8.44	6.41	5.76	80.9	40.8
17D 2H	0.68	5.85	4.92	1.23	0.48	0.67	8.60	6.19	5.46	108.9	37.0
17D 3H	0.54	5.99	4.76	0.83	0.38	0.53	9.71	6.40	5.58	60.7	67.5
17D 6H	0.72	5.82	5.15	1.08	0.51	0.71	10.32	6.74	5.88	22.3	24.8

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

NOV. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/2}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
17D 9H	0.87	6.27	5.25	1.48	0.61	0.85	10.74	6.81	5.95	21.2	25.4
17D 12H	0.85	6.53	5.32	1.41	0.60	0.83	9.94	6.83	6.11	20.9	26.5
17D 15H	0.83	6.76	5.53	1.61	0.57	0.80	9.98	7.33	6.50	12.8	23.6
17D 18H	0.72	6.80	5.63	1.06	0.51	0.70	10.64	7.57	6.61	25.1	25.0
17D 21H	0.79	6.50	5.65	1.25	0.55	0.76	9.96	7.17	6.29	24.3	22.9
18D 0H	0.79	6.47	5.58	1.29	0.56	0.78	8.80	7.09	6.20	25.2	22.9
18D 3H	0.73	6.23	5.29	1.26	0.52	0.73	9.56	6.82	5.84	19.4	26.4
18D 6H	0.63	6.03	5.24	1.09	0.44	0.62	8.75	6.58	5.76	19.7	23.9
18D 9H	0.52	5.85	5.01	0.96	0.38	0.52	9.13	6.82	5.62	34.2	31.5
18D 12H	0.83	9.72	7.08	1.26	0.57	0.81	11.65	9.45	8.64	24.0	19.9
18D 15H	2.21	9.59	7.18	3.24	1.55	2.18	12.45	9.92	9.09	33.0	28.5
18D 18H	3.29	10.33	7.70	5.49	2.31	3.19	13.72	10.80	9.80	32.9	22.5
18D 21H	3.36	11.00	7.61	5.17	2.28	3.27	13.97	10.18	9.49	39.6	24.2
19D 0H	2.78	11.80	7.35	5.05	1.88	2.65	14.31	10.69	9.49	42.1	32.0
19D 3H	2.92	11.80	7.48	4.84	2.02	2.85	13.93	10.86	9.94	42.4	22.2
19D 6H	3.01	10.94	7.44	4.90	2.03	2.90	13.01	10.31	9.61	33.6	16.5
19D 9H	2.93	10.89	7.22	5.78	1.98	2.78	11.97	9.88	9.05	38.4	15.3
19D 12H	2.78	10.28	6.92	4.96	1.91	2.65	11.61	9.96	8.99	35.7	12.9
19D 15H	2.67	9.70	6.72	4.20	1.83	2.55	11.84	9.54	8.45	37.5	18.7
19D 18H	2.32	10.42	6.64	3.95	1.63	2.28	12.64	9.55	8.39	43.7	13.1
19D 21H	1.93	9.71	6.55	2.93	1.36	1.85	12.72	9.56	8.51	38.1	19.0
20D 0H	1.82	9.75	6.83	2.69	1.26	1.77	12.03	9.66	8.74	42.9	19.4
20D 3H	1.73	10.27	7.32	2.39	1.20	1.67	12.66	9.88	8.87	47.8	19.6
20D 6H	1.89	8.66	7.13	3.18	1.30	1.83	13.37	9.70	8.63	39.6	18.6
20D 9H	1.77	8.63	7.01	2.39	1.23	1.73	12.32	9.62	8.66	41.7	19.5
20D 12H	1.48	10.27	6.56	2.23	1.04	1.44	12.79	9.13	8.03	46.7	22.6
20D 15H	1.27	10.29	6.07	2.04	0.88	1.24	12.39	8.78	7.72	51.3	24.6
20D 18H	1.12	9.69	5.92	1.82	0.78	1.08	11.73	8.71	7.69	50.8	26.9
20D 21H	1.00	9.21	5.41	1.82	0.69	0.98	10.93	7.64	6.76	51.2	28.0
21D 0H	0.94	9.12	5.66	1.46	0.65	0.91	10.07	7.89	7.22	49.2	28.5
21D 3H	0.78	9.18	5.35	1.27	0.53	0.74	10.22	7.57	6.74	70.7	46.0
21D 6H	0.74	9.05	5.80	1.31	0.51	0.72	10.74	7.87	7.07	49.8	32.4

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

NOV. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
21D 9H	0.67	9.08	5.66	1.28	0.47	0.66	9.82	7.52	6.77	65.0	30.3
21D 12H	0.89	5.61	5.11	1.25	0.63	0.88	9.52	6.66	5.86	39.9	21.6
21D 15H	0.91	6.52	4.90	1.45	0.65	0.91	9.24	6.63	5.91	36.3	28.1
21D 18H	1.96	11.65	8.36	2.92	1.39	1.95	13.94	11.24	10.04	37.7	13.2
21D 21H	2.59	10.31	8.50	3.88	1.77	2.54	15.56	11.19	9.91	38.5	10.8
22D 0H	2.78	11.67	8.41	4.18	1.94	2.75	14.65	10.95	9.94	40.0	13.6
22D 3H	2.43	9.58	7.88	4.30	1.72	2.37	13.56	10.41	9.32	40.6	14.5
22D 6H	2.15	10.29	8.01	3.55	1.49	2.10	15.20	10.53	9.33	45.6	17.6
22D 10H	2.06	10.89	8.13	2.83	1.45	2.02	12.54	10.47	9.40	40.0	19.8
22D 14H	1.80	10.26	7.46	2.78	1.25	1.73	11.94	9.93	8.98	40.8	16.6
22D 17H	1.60	9.06	7.30	3.67	1.11	1.57	11.37	9.28	8.47	36.8	15.9
22D 20H	1.23	9.64	6.39	2.24	0.87	1.20	12.10	8.71	7.88	40.6	21.4
22D 23H	1.09	8.60	6.39	1.82	0.74	1.06	10.44	8.30	7.69	36.0	20.5
23D 2H	0.85	8.62	6.67	1.31	0.61	0.85	10.82	8.46	7.64	41.1	24.1
23D 5H	0.84	8.18	4.96	1.37	0.58	0.82	10.19	7.38	6.41	42.2	27.6
23D 8H	0.80	7.39	4.92	1.52	0.58	0.81	10.06	7.10	5.95	37.7	28.2
23D 11H	0.62	6.85	4.80	1.00	0.45	0.61	9.45	6.49	5.61	37.4	36.3
23D 14H	0.66	5.26	4.90	1.13	0.49	0.67	9.54	6.44	5.63	20.3	28.2
23D 17H	0.83	6.01	4.80	1.39	0.59	0.83	9.14	6.47	5.67	18.5	31.4
23D 20H	0.77	6.05	5.25	1.28	0.55	0.76	10.90	7.02	6.11	22.8	27.1
23D 23H	0.60	7.82	6.11	1.01	0.41	0.59	12.12	7.45	6.71	43.5	44.8
24D 2H	0.90	7.76	6.34	1.72	0.63	0.88	11.27	8.29	7.36	34.4	30.5
24D 5H	1.07	8.60	6.66	1.75	0.74	1.05	10.94	8.33	7.59	34.2	28.3
24D 8H	0.89	8.61	6.44	1.58	0.62	0.87	10.63	8.37	7.55	41.1	27.7
24D 11H	0.88	7.86	6.26	1.44	0.61	0.86	10.42	8.00	7.35	35.2	22.9
24D 14H	0.72	7.13	5.72	1.10	0.51	0.72	10.07	7.79	7.24	39.9	28.4
24D 17H	0.88	9.13	6.92	1.33	0.62	0.86	11.54	8.94	8.16	44.8	34.3
24D 20H	1.04	8.13	6.91	2.00	0.74	1.01	11.91	8.53	7.59	32.8	29.0
24D 23H	0.76	8.17	6.44	1.47	0.55	0.77	10.88	7.94	7.34	45.5	32.0
25D 2H	0.57	7.79	5.54	1.04	0.40	0.55	9.85	7.54	6.58	35.8	31.7
25D 5H	0.60	6.78	4.68	0.88	0.42	0.58	9.61	6.80	5.50	21.5	36.3
25D 8H	0.67	4.38	4.22	1.02	0.48	0.65	9.27	5.74	4.80	153.4	24.5

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

NOV. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
25D 11H	0.58	6.05	4.06	0.91	0.41	0.57	8.25	5.51	4.55	13.0	23.4
25D 14H	0.35	6.25	4.64	0.78	0.28	0.38	9.57	5.71	4.80	21.9	22.7
25D 17H	0.31	6.25	5.09	0.58	0.23	0.33	11.72	6.33	5.58	22.9	32.7
25D 20H	0.30	5.77	4.78	0.52	0.23	0.31	8.80	5.42	4.62	21.2	32.7
25D 23H	0.29	5.41	4.51	0.67	0.27	0.37	8.72	4.84	3.86	76.6	36.9
26D 2H	0.30	4.25	4.27	0.57	0.24	0.33	8.48	4.97	4.01	112.3	43.8
26D 5H	0.31	4.14	3.88	0.54	0.25	0.34	8.28	4.69	3.86	148.5	38.6
26D 8H	0.30	2.44	3.35	0.66	0.26	0.35	8.39	4.05	3.16	161.1	36.3
26D 11H	0.32	2.56	3.83	0.57	0.25	0.34	7.94	4.73	3.82	48.7	53.9
26D 14H	0.27	5.57	4.04	0.59	0.22	0.30	7.98	4.68	3.76	94.8	55.5
26D 17H	0.27	3.30	3.83	0.43	0.21	0.29	8.41	4.71	3.86	155.6	23.6
26D 20H	0.32	4.37	4.11	0.58	0.26	0.35	8.68	4.74	3.86	143.2	33.0
26D 23H	0.22	3.94	3.83	0.52	0.20	0.27	8.64	4.30	3.30	149.4	29.7
27D 2H	0.17	8.62	4.36	0.27	0.12	0.17	10.63	6.31	5.25	50.1	43.6
27D 5H	0.22	4.91	4.12	0.34	0.16	0.23	8.24	5.48	4.76	55.7	38.2
27D 8H	0.23	4.93	4.28	0.43	0.18	0.24	10.25	5.98	5.02	32.1	41.9
27D 11H	0.26	6.26	4.43	0.51	0.21	0.29	7.63	5.56	4.59	27.3	28.0
27D 14H	0.27	6.04	4.27	0.48	0.23	0.31	7.32	4.92	3.84	27.5	33.2
27D 17H	0.23	7.12	5.12	0.40	0.17	0.24	8.53	6.33	5.52	20.4	27.8
27D 20H	0.20	4.62	4.43	0.37	0.15	0.21	10.94	6.23	5.17	2.4	36.8
27D 23H	0.19	4.77	4.36	0.40	0.16	0.21	9.18	4.97	3.84	354.5	41.6
28D 2H	0.37	6.79	4.47	0.67	0.31	0.42	9.13	5.18	3.89	359.6	25.7
28D 5H	0.49	6.55	5.28	0.87	0.35	0.49	9.83	7.19	6.52	3.3	21.0
28D 8H	0.53	6.80	5.26	0.91	0.37	0.52	9.28	7.03	6.17	6.4	19.7
28D 12H	0.54	6.05	4.99	0.92	0.39	0.54	10.29	6.52	5.91	14.5	28.3
28D 17H	1.57	9.21	7.66	2.41	1.10	1.55	12.06	9.81	8.78	23.1	23.0
28D 20H	1.49	7.81	7.32	2.81	1.04	1.47	11.28	9.12	8.02	18.4	19.2
28D 23H	1.12	7.44	6.74	1.75	0.79	1.08	10.55	8.32	7.38	16.7	20.5
29D 2H	0.87	7.77	6.17	1.50	0.62	0.86	9.36	7.82	6.79	35.0	24.5
29D 5H	0.56	6.80	5.68	1.20	0.40	0.57	9.81	7.00	6.35	36.7	29.4
29D 8H	0.55	7.12	5.11	0.86	0.38	0.54	10.69	7.18	6.24	32.3	33.3
29D 11H	0.43	6.79	5.23	0.68	0.30	0.43	9.99	7.04	6.39	83.4	42.1

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

NOV. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
29D 14H	0.39	7.09	5.28	0.62	0.27	0.37	10.55	7.35	6.43	34.0	35.7
29D 17H	0.39	6.83	5.16	0.73	0.27	0.38	10.10	7.22	6.23	29.7	34.7
29D 20H	0.39	7.08	5.08	0.59	0.28	0.38	10.40	7.02	5.84	46.1	32.3
29D 23H	0.38	6.23	5.05	0.70	0.28	0.38	10.42	6.92	6.03	35.1	30.9
30D 2H	0.38	5.60	4.82	0.73	0.27	0.37	9.96	6.46	5.45	31.2	33.3
30D 5H	0.37	5.27	4.82	0.57	0.26	0.37	9.84	6.72	5.85	37.8	30.0
30D 8H	0.39	7.76	4.81	0.58	0.27	0.38	9.58	6.93	5.76	39.5	37.3
30D 11H	0.48	7.12	5.44	0.74	0.34	0.47	9.85	7.46	6.38	31.9	34.7
30D 14H	0.54	6.29	5.44	0.80	0.38	0.52	9.67	7.04	6.10	30.5	28.1
30D 17H	0.54	6.05	5.26	0.93	0.38	0.53	10.81	6.69	5.91	32.3	21.9
30D 20H	0.51	5.62	4.05	0.81	0.37	0.51	8.51	5.68	4.80	30.3	35.7
30D 23H	0.83	4.38	4.08	1.37	0.60	0.82	7.42	5.17	4.49	24.9	29.2

SITE : CHUKPYON(FW)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
1D 2H	0.87	5.80	4.71	1.39	0.61	0.85	7.49	5.91	5.28	10.8	25.1
1D 5H	0.65	5.42	4.58	0.98	0.46	0.65	9.00	5.99	5.13	21.6	34.7
1D 8H	0.62	6.02	4.81	1.20	0.44	0.60	9.11	6.27	5.38	53.0	48.1
1D 11H	0.71	6.51	4.66	1.24	0.51	0.72	8.65	6.15	5.45	52.0	50.3
2D 14H	0.76	7.48	6.90	1.28	0.54	0.75	10.03	7.96	7.29	25.1	20.1
2D 17H	0.70	7.41	4.89	1.17	0.49	0.68	9.21	7.35	6.29	31.5	27.8
2D 20H	0.68	7.41	5.36	1.07	0.49	0.67	8.85	6.95	6.12	25.7	26.3
2D 23H	0.60	5.08	4.44	0.95	0.45	0.62	9.46	6.10	5.29	3.2	19.7
3D 2H	0.42	8.17	6.01	0.84	0.31	0.42	10.47	7.29	6.29	34.1	36.7
3D 5H	0.49	6.78	6.06	0.81	0.34	0.48	9.31	7.57	6.73	4.8	16.5
3D 8H	1.07	7.07	6.33	1.92	0.76	1.06	10.67	7.79	6.67	9.0	17.7
3D 11H	1.24	7.42	6.25	1.79	0.87	1.24	9.81	7.57	6.77	12.6	18.9
3D 17H	1.45	10.27	7.09	2.13	1.02	1.42	11.88	9.82	8.62	29.1	23.7

Table A2.2.1 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(FW)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
3D 20H	1.63	8.65	7.17	2.84	1.15	1.59	11.96	9.14	7.96	27.2	22.3
3D 23H	1.50	7.85	7.05	2.38	1.04	1.48	10.70	8.71	7.68	18.8	20.5
4D 2H	1.55	8.17	6.92	2.95	1.10	1.53	10.90	8.81	7.77	23.0	18.5
4D 5H	1.69	7.48	6.84	2.46	1.18	1.67	9.51	8.25	7.38	11.9	19.8
4D 8H	1.70	8.18	6.96	2.63	1.21	1.67	10.32	8.54	7.79	12.7	16.2
4D 11H	1.39	8.17	6.40	2.97	1.01	1.41	11.46	7.93	6.98	17.0	14.6
4D 14H	1.27	7.11	6.36	2.06	0.89	1.24	10.14	7.92	6.82	3.9	17.1
4D 17H	1.14	7.76	6.46	1.88	0.80	1.13	10.41	7.98	7.12	4.5	16.8
4D 20H	1.22	7.11	6.51	1.83	0.86	1.22	10.06	7.93	7.05	14.1	16.6
4D 23H	0.94	7.75	6.03	1.45	0.67	0.93	9.93	7.53	6.65	11.6	21.2
5D 2H	1.02	6.50	5.85	1.67	0.71	0.98	9.41	7.17	6.42	17.4	20.7
5D 5H	1.02	7.79	6.15	1.79	0.73	1.02	10.52	8.01	6.98	13.5	20.8
5D 8H	0.89	8.19	6.29	1.45	0.64	0.89	10.57	8.13	7.02	29.3	20.6
5D 11H	1.12	7.13	5.94	2.33	0.78	1.10	9.86	7.60	6.72	17.6	20.1
5D 14H	0.93	7.37	5.13	1.35	0.66	0.89	8.65	6.91	6.13	24.6	23.1
5D 17H	1.02	6.53	5.23	1.57	0.72	1.00	8.76	6.98	6.07	23.4	26.1
5D 20H	1.09	6.84	5.76	1.68	0.77	1.08	9.09	7.37	6.43	23.7	23.0
5D 23H	1.05	6.79	5.86	1.81	0.74	1.02	8.85	7.39	6.51	22.9	21.2
6D 2H	1.11	6.82	6.18	2.06	0.77	1.06	10.96	7.98	6.91	21.1	23.1
6D 5H	1.21	8.60	6.05	1.76	0.85	1.19	10.94	8.02	6.88	32.6	25.3
6D 8H	1.17	7.44	5.73	1.82	0.81	1.13	9.18	7.39	6.52	18.5	18.8
6D 11H	1.08	7.10	5.66	1.89	0.76	1.07	9.11	7.13	6.31	17.1	21.4
6D 14H	1.06	6.49	5.26	2.08	0.73	1.03	8.21	6.61	5.82	15.0	25.7
6D 17H	1.01	6.28	5.35	1.92	0.70	1.00	8.80	6.56	5.87	26.7	23.7
6D 20H	0.77	6.25	5.41	1.27	0.55	0.77	9.00	6.62	5.85	42.6	33.3
6D 23H	0.63	6.23	5.34	1.11	0.45	0.62	8.46	6.59	5.80	38.4	30.2
7D 2H	0.53	6.02	5.14	0.91	0.37	0.53	8.73	6.30	5.64	37.0	42.2
7D 5H	0.54	6.04	5.22	1.04	0.39	0.55	9.54	6.26	5.60	40.3	28.4
7D 8H	0.58	5.82	4.93	0.97	0.41	0.59	9.28	6.32	5.47	45.1	39.0
7D 11H	0.64	5.62	4.75	1.15	0.45	0.63	8.30	6.03	5.33	25.9	31.1

Table A2.2.2 Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurement(WW1, 1993).

SITE : CHUKPYON(WW1)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/2}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
2D 12H	0.66	8.20	6.77	1.21	0.48	0.68	9.83	7.95	7.46	31.5	25.9
2D 13H	0.72	7.72	6.85	1.18	0.50	0.73	9.82	7.90	7.33	23.6	23.9
2D 15H	0.64	7.13	6.62	0.96	0.46	0.64	9.45	7.79	7.07	24.2	26.6
2D 16H	0.68	7.40	6.34	1.34	0.48	0.68	9.45	7.68	6.95	22.0	21.4
2D 17H	0.70	7.41	4.89	1.17	0.49	0.68	9.21	7.35	6.29	31.5	27.8
2D 18H	0.77	7.43	4.83	1.22	0.55	0.75	9.27	6.96	5.84	20.3	25.5
2D 19H	0.69	7.12	5.12	1.12	0.49	0.68	8.96	6.81	5.98	20.1	30.3
2D 20H	0.68	7.41	5.36	1.07	0.49	0.67	8.85	6.95	6.12	25.7	26.3
2D 21H	0.55	7.13	5.56	0.97	0.40	0.56	9.70	7.03	6.30	25.9	25.3
2D 22H	0.54	7.09	5.07	0.86	0.42	0.58	8.54	6.12	5.25	26.6	34.9
2D 23H	0.60	5.08	4.44	0.95	0.45	0.62	9.46	6.10	5.29	3.2	19.7
3D 0H	0.53	5.24	5.51	1.00	0.39	0.55	8.78	6.53	5.94	6.6	18.7
3D 1H	0.46	7.80	5.91	0.90	0.34	0.48	9.52	6.58	5.66	33.4	31.8
3D 2H	0.42	8.17	6.01	0.84	0.31	0.42	10.47	7.29	6.29	34.1	36.7
3D 3H	0.43	6.31	5.89	0.75	0.30	0.43	11.82	7.52	6.69	3.5	26.1
3D 4H	0.47	6.30	5.98	0.85	0.32	0.46	10.69	7.39	6.52	10.9	19.8
3D 5H	0.49	6.78	6.06	0.81	0.34	0.48	9.31	7.57	6.73	4.8	16.5
3D 6H	0.46	7.80	5.74	0.75	0.32	0.45	9.99	7.52	6.34	34.5	30.3
3D 7H	0.93	7.43	6.17	1.65	0.66	0.93	10.90	7.77	6.62	15.9	22.1
3D 8H	1.07	7.07	6.33	1.92	0.76	1.06	10.67	7.79	6.67	9.0	17.7
3D 9H	1.34	7.10	6.40	2.14	0.95	1.32	9.55	7.71	6.72	6.7	15.1
3D 10H	1.28	7.41	6.27	2.55	0.90	1.24	10.08	7.70	6.72	9.5	17.9
3D 11H	1.24	7.42	6.25	1.79	0.87	1.24	9.81	7.57	6.77	12.6	18.9
3D 12H	1.08	6.26	6.11	1.63	0.78	1.08	9.66	7.60	6.71	11.3	17.0
3D 13H	1.13	7.08	6.18	1.80	0.80	1.12	10.07	7.53	6.67	9.6	16.9
3D 16H	1.15	10.34	6.08	1.84	0.82	1.13	11.66	8.53	7.19	24.0	25.8
3D 17H	1.45	10.27	7.09	2.13	1.02	1.42	11.88	9.82	8.62	29.1	23.7
3D 18H	1.57	9.67	6.93	2.75	1.10	1.55	12.10	9.14	7.95	21.0	24.5
3D 19H	1.72	9.65	7.24	2.57	1.20	1.69	11.25	9.17	8.03	31.5	20.1
3D 20H	1.63	8.65	7.17	2.84	1.15	1.59	11.96	9.14	7.96	27.2	22.3
3D 21H	1.48	8.58	6.84	2.72	1.01	1.47	11.15	8.24	7.74	27.9	21.0
3D 22H	1.45	9.11	7.05	2.13	1.01	1.41	11.58	8.78	7.70	23.8	21.5
3D 23H	1.50	7.85	7.05	2.38	1.04	1.48	10.70	8.71	7.68	18.8	20.5

Table A2.2.2 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(WW1)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/2}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
4D 0H	1.57	7.79	7.07	2.62	1.09	1.51	12.86	8.53	7.69	26.9	18.7
4D 1H	1.51	8.26	6.94	2.28	1.07	1.48	10.94	8.65	7.62	27.0	24.8
4D 2H	1.55	8.17	6.92	2.95	1.10	1.53	10.90	8.81	7.77	23.0	18.5
4D 3H	1.67	8.55	6.98	2.38	1.17	1.67	11.46	8.56	7.55	20.6	19.0
4D 4H	1.56	7.79	6.86	2.65	1.10	1.52	10.55	8.45	7.39	15.1	18.7
4D 5H	1.69	7.48	6.84	2.46	1.18	1.67	9.51	8.25	7.38	11.9	19.8
4D 6H	1.63	7.82	6.84	2.82	1.15	1.61	10.48	8.55	7.33	17.6	18.0
4D 7H	1.73	8.18	6.96	2.57	1.22	1.70	10.79	8.54	7.53	15.2	16.6
4D 8H	1.70	8.18	6.96	2.63	1.21	1.67	10.32	8.54	7.79	12.7	16.2
4D 9H	1.61	7.79	6.94	2.55	1.13	1.61	9.98	8.53	7.73	10.8	14.4
4D 10H	1.50	7.80	6.56	2.40	1.05	1.48	10.67	7.98	7.36	10.4	18.0
4D 11H	1.39	8.17	6.40	2.97	1.01	1.41	11.46	7.93	6.98	17.0	14.6
4D 12H	1.21	8.15	6.38	2.09	0.86	1.18	9.69	8.13	7.21	9.5	16.4
4D 13H	1.37	7.81	6.61	2.43	0.97	1.35	10.27	8.06	7.26	8.0	15.2
4D 14H	1.27	7.11	6.36	2.06	0.89	1.24	10.14	7.92	6.82	3.9	17.1
4D 15H	1.06	7.45	6.00	1.71	0.77	1.05	9.72	7.92	6.85	5.5	20.5
4D 16H	1.18	8.11	6.40	1.85	0.82	1.15	11.04	8.00	7.14	9.0	18.2
4D 17H	1.14	7.76	6.46	1.88	0.80	1.13	10.41	7.98	7.12	4.5	16.8
4D 18H	1.20	7.75	6.51	2.18	0.84	1.16	10.13	7.95	7.11	8.9	19.2
4D 19H	1.21	7.43	6.65	2.22	0.85	1.21	9.88	7.94	7.18	18.3	17.3
4D 20H	1.22	7.11	6.51	1.83	0.86	1.22	10.06	7.93	7.05	14.1	16.6
4D 21H	1.21	7.10	6.50	2.04	0.87	1.20	11.53	8.07	7.05	19.1	13.8
4D 22H	1.19	7.09	6.36	2.22	0.84	1.15	9.52	7.63	6.84	15.1	15.4
4D 23H	0.94	7.75	6.03	1.45	0.67	0.93	9.93	7.53	6.65	11.6	21.2
5D 0H	0.82	7.15	5.91	1.40	0.58	0.81	8.72	7.24	6.50	24.3	22.1
5D 1H	0.93	7.07	6.08	1.67	0.66	0.92	9.43	7.56	6.72	23.8	14.7
5D 2H	1.02	6.50	5.85	1.67	0.71	0.98	9.41	7.17	6.42	17.4	20.7
5D 3H	1.05	6.51	5.91	2.00	0.74	1.02	11.35	7.57	6.50	21.3	19.4
5D 4H	1.15	7.14	6.14	2.13	0.83	1.15	10.39	7.81	6.76	20.0	18.3
5D 5H	1.02	7.79	6.15	1.79	0.73	1.02	10.52	8.01	6.98	13.5	20.8
5D 6H	0.98	8.59	6.24	1.57	0.69	0.96	10.62	8.28	7.20	21.5	17.5
5D 7H	0.91	7.46	6.10	1.62	0.64	0.89	9.42	7.71	6.71	21.4	22.9
5D 8H	0.89	8.19	6.29	1.45	0.64	0.89	10.57	8.13	7.02	29.3	20.6
5D 9H	1.02	8.17	6.17	1.70	0.73	1.00	11.28	7.98	6.87	22.2	22.0
5D 10H	0.92	7.46	5.97	1.48	0.65	0.92	9.41	7.56	6.64	11.5	19.2

Table A2.2.2 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(WW1)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^\circ$)	s ($^\circ$)
5D 11H	1.12	7.13	5.94	2.33	0.78	1.10	9.86	7.60	6.72	17.6	20.1
5D 13H	1.08	7.10	5.21	1.71	0.77	1.07	9.44	7.09	6.10	19.7	25.8
5D 14H	0.93	7.37	5.13	1.35	0.66	0.89	8.65	6.91	6.13	24.6	23.1
5D 15H	0.89	6.85	5.26	1.46	0.62	0.87	9.30	6.84	6.14	23.4	23.9
5D 16H	1.02	6.82	5.13	1.49	0.71	1.00	8.81	6.95	5.94	15.8	27.4
5D 17H	1.02	6.53	5.23	1.57	0.72	1.00	8.76	6.98	6.07	23.4	26.1
5D 18H	1.06	6.54	5.45	1.55	0.73	1.04	9.14	6.93	6.11	17.3	27.3
5D 19H	1.00	6.56	5.51	1.59	0.72	0.98	8.99	7.20	6.33	14.8	23.0
5D 20H	1.09	6.84	5.76	1.68	0.77	1.08	9.09	7.37	6.43	23.7	23.0
5D 21H	1.18	7.43	5.98	2.17	0.83	1.13	9.05	7.58	6.64	25.5	23.6
5D 22H	1.09	7.36	5.81	1.84	0.77	1.08	9.92	7.45	6.50	27.3	25.7
5D 23H	1.05	6.79	5.86	1.81	0.74	1.02	8.85	7.39	6.51	22.9	21.2
6D 0H	1.22	7.41	6.25	1.85	0.86	1.20	10.99	7.89	6.91	29.1	18.3
6D 1H	1.00	7.80	5.82	1.76	0.70	0.98	10.94	7.47	6.59	24.4	24.6
6D 2H	1.11	6.82	6.18	2.06	0.77	1.06	10.96	7.98	6.91	21.1	23.1
6D 3H	1.25	8.65	6.33	2.14	0.86	1.22	10.19	7.97	7.04	28.8	17.7
6D 4H	1.30	8.55	6.34	2.10	0.91	1.25	10.55	8.22	7.12	28.3	20.2
6D 5H	1.21	8.60	6.05	1.76	0.85	1.19	10.94	8.02	6.88	32.6	25.3
6D 6H	1.21	7.83	6.00	2.02	0.86	1.20	10.20	7.82	6.77	22.5	21.5
6D 7H	1.23	7.79	6.07	2.00	0.86	1.19	11.51	7.75	6.90	22.8	20.6
6D 8H	1.17	7.44	5.73	1.82	0.81	1.13	9.18	7.39	6.52	18.5	18.8
6D 9H	1.11	7.72	5.87	1.92	0.79	1.09	9.73	7.56	6.74	22.6	20.6
6D 10H	1.06	7.41	5.67	1.65	0.74	1.03	8.74	7.20	6.54	23.8	22.7
6D 11H	1.08	7.10	5.66	1.89	0.76	1.07	9.11	7.13	6.31	17.1	21.4
6D 12H	1.08	6.84	5.22	1.77	0.76	1.06	8.53	6.68	6.00	16.0	22.8
6D 13H	1.02	6.84	5.07	1.91	0.72	1.01	9.64	6.69	5.92	18.0	28.1
6D 14H	1.06	6.49	5.26	2.08	0.73	1.03	8.21	6.61	5.82	15.0	25.7
6D 15H	1.10	6.48	5.32	1.81	0.78	1.08	9.08	6.62	5.95	11.1	21.3
6D 16H	0.95	6.27	5.22	1.48	0.67	0.93	8.58	6.49	5.83	21.0	21.2
6D 17H	1.01	6.28	5.35	1.92	0.70	1.00	8.80	6.56	5.87	26.7	23.7
6D 18H	0.82	6.05	5.25	1.42	0.58	0.82	8.49	6.56	5.81	27.6	29.8
6D 19H	0.80	5.61	5.26	1.31	0.57	0.80	9.15	6.62	5.87	30.6	29.5
6D 20H	0.77	6.25	5.41	1.27	0.55	0.77	9.00	6.62	5.85	42.6	33.3
6D 21H	0.70	6.03	5.42	1.01	0.50	0.69	8.20	6.66	5.84	39.8	32.4
6D 22H	0.66	6.03	5.27	1.09	0.47	0.65	8.91	6.32	5.65	34.2	28.3

Table A2.2.2 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(WW1)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
6D 23H	0.63	6.23	5.34	1.11	0.45	0.62	8.46	6.59	5.80	38.4	30.2
7D 0H	0.58	5.63	5.22	1.24	0.41	0.56	7.89	6.35	5.68	31.4	32.3
7D 1H	0.56	5.80	5.27	0.96	0.40	0.57	8.65	6.48	5.66	38.0	33.5
7D 2H	0.53	6.02	5.14	0.91	0.37	0.53	8.73	6.30	5.64	37.0	42.2
7D 3H	0.49	5.79	5.10	0.96	0.36	0.50	8.49	6.21	5.65	33.5	34.2
7D 4H	0.53	6.06	5.10	0.99	0.39	0.54	7.69	6.23	5.56	35.7	27.3
7D 5H	0.54	6.04	5.22	1.04	0.39	0.55	9.54	6.26	5.60	40.3	28.4
7D 6H	0.58	5.99	5.31	1.05	0.41	0.58	8.73	6.26	5.69	42.4	32.1
7D 7H	0.56	5.80	5.20	1.11	0.40	0.56	8.42	6.51	5.76	50.2	35.7
7D 8H	0.58	5.82	4.93	0.97	0.41	0.59	9.28	6.32	5.47	45.1	39.0
7D 9H	0.56	5.43	4.70	0.82	0.39	0.54	9.24	6.23	5.31	38.5	32.7
7D 10H	0.61	5.60	4.80	0.99	0.44	0.60	8.33	6.26	5.31	21.2	35.2
7D 11H	0.64	5.62	4.75	1.15	0.45	0.63	8.30	6.03	5.33	25.9	31.1
7D 12H	0.62	5.44	4.78	0.99	0.44	0.62	8.88	6.04	5.34	10.0	25.9
7D 13H	0.56	5.60	4.68	1.02	0.40	0.55	8.70	6.08	5.30	20.7	27.8

Table A2.2.3 Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurement(WW2, 1993).

SITE : CHUKPYON(WW2)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
2D 12H	0.75	8.16	6.79	1.38	0.53	0.75	9.60	7.99	7.55	21.3	33.2
2D 13H	0.79	7.76	6.95	1.40	0.57	0.79	10.84	8.23	7.42	16.7	33.0
2D 15H	0.86	7.10	6.92	1.94	0.60	0.85	11.32	8.07	7.20	13.5	23.7
2D 16H	0.71	7.45	6.05	1.22	0.51	0.70	9.95	7.67	7.09	20.8	26.3
2D 17H	0.78	7.43	4.74	1.30	0.54	0.76	8.71	6.95	6.05	16.8	27.8
2D 18H	0.85	7.40	4.86	1.47	0.60	0.83	8.95	6.92	5.82	12.1	27.1
2D 19H	0.81	7.11	5.10	1.24	0.58	0.81	8.72	7.00	5.99	11.2	24.0
2D 20H	0.78	7.11	5.38	1.44	0.55	0.77	9.89	7.20	6.22	9.0	29.5
2D 21H	0.62	6.79	5.37	1.26	0.44	0.62	8.63	6.99	6.28	7.3	24.4
2D 22H	0.71	7.07	5.46	1.34	0.51	0.73	9.22	7.06	6.44	21.3	24.5
2D 23H	0.64	8.20	4.42	1.18	0.45	0.64	8.98	5.93	5.21	0.3	20.7
3D 0H	0.63	5.43	5.35	0.95	0.46	0.64	9.43	6.61	5.88	359.0	14.2
3D 1H	0.50	8.21	5.59	0.85	0.37	0.52	9.03	6.66	5.95	27.1	31.6
3D 2H	0.46	7.06	5.78	0.82	0.34	0.47	9.13	6.74	6.16	6.2	25.3
3D 3H	0.47	6.27	5.72	0.75	0.34	0.47	9.50	7.34	6.22	358.3	24.2
3D 4H	0.47	8.22	5.85	0.79	0.33	0.47	10.42	7.50	6.48	30.0	34.9
3D 5H	0.50	7.09	5.92	0.88	0.35	0.50	10.15	7.67	6.50	7.0	19.8
3D 6H	0.51	7.07	5.89	0.77	0.36	0.51	11.02	7.72	6.67	4.0	19.6
3D 7H	0.59	6.05	5.67	0.94	0.41	0.57	10.10	7.28	6.27	0.9	19.6
3D 8H	0.84	6.28	5.77	1.35	0.59	0.82	9.97	7.26	6.30	8.5	15.9
3D 9H	1.26	6.79	6.02	1.85	0.88	1.23	9.74	7.36	6.52	8.1	17.3
3D 10H	1.11	6.81	5.81	2.41	0.78	1.09	9.33	7.44	6.59	7.6	20.1
3D 11H	1.12	7.05	6.05	1.84	0.81	1.12	9.03	7.33	6.61	5.0	15.9
3D 12H	1.07	7.11	6.10	1.75	0.74	1.05	9.89	7.52	6.59	7.7	21.2
3D 15H	1.36	6.51	5.69	2.08	0.94	1.32	10.10	7.39	6.29	1.9	22.0
3D 16H	1.33	10.32	6.13	2.17	0.94	1.30	13.74	8.60	6.98	22.2	42.2
3D 17H	1.77	9.73	7.55	2.82	1.24	1.70	11.48	10.25	9.31	22.5	35.7
3D 18H	1.75	9.70	7.13	2.72	1.23	1.70	11.93	9.41	8.17	20.5	29.1
3D 19H	1.80	9.15	7.22	3.07	1.26	1.75	11.62	9.37	8.21	20.4	24.5
3D 20H	1.71	8.63	7.00	2.63	1.20	1.67	12.04	9.17	8.10	22.8	29.5
3D 21H	1.72	8.64	7.04	3.32	1.22	1.72	10.43	8.78	7.75	31.9	29.2
3D 22H	1.54	7.47	7.08	2.68	1.09	1.50	11.69	8.90	7.88	20.5	20.4
3D 23H	1.57	7.81	7.13	2.89	1.10	1.55	11.27	8.91	7.87	14.4	24.7

Table A2.2.3 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(WW2)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/2}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
4D 0H	1.84	7.46	7.05	2.60	1.30	1.80	12.25	8.75	7.62	13.3	21.1
4D 1H	1.69	8.13	6.75	2.93	1.19	1.65	10.09	8.42	7.52	13.1	24.3
4D 2H	1.83	7.79	6.86	2.96	1.27	1.79	11.02	8.44	7.43	10.7	25.3
4D 3H	1.95	7.83	7.07	3.73	1.37	1.91	10.65	8.39	7.51	7.9	27.5
4D 4H	1.90	7.77	6.91	3.05	1.33	1.85	10.04	8.32	7.47	9.3	25.6
4D 5H	1.77	7.76	6.77	2.99	1.24	1.76	11.92	8.36	7.25	10.5	25.3
4D 6H	1.90	7.46	6.76	2.97	1.32	1.89	10.72	8.15	7.36	7.3	24.2
4D 7H	2.10	8.19	7.06	3.65	1.50	2.07	10.65	8.68	7.74	10.5	22.1
4D 8H	2.07	8.59	7.01	4.90	1.43	2.01	10.83	8.44	7.74	10.6	23.6
4D 9H	1.86	8.19	7.00	3.10	1.32	1.84	10.51	8.63	7.65	10.4	21.5
4D 10H	1.81	7.79	6.72	3.48	1.25	1.75	10.67	8.19	7.42	8.3	22.1
4D 11H	1.59	7.43	6.51	3.88	1.10	1.56	10.84	8.01	7.20	12.0	16.3
4D 12H	1.39	7.79	6.43	2.53	1.00	1.37	9.85	8.10	7.42	11.7	16.7
4D 13H	1.24	6.79	6.17	2.21	0.84	1.20	9.95	7.58	6.77	3.9	16.0
4D 14H	1.23	7.77	6.22	2.02	0.88	1.20	9.83	8.07	7.05	12.6	17.2
4D 15H	1.31	7.80	6.31	2.24	0.92	1.26	10.80	7.96	7.05	7.7	19.0
4D 16H	1.40	8.17	6.38	2.17	0.99	1.37	10.12	8.05	7.24	4.6	21.3
4D 17H	1.61	7.77	6.76	2.24	1.14	1.57	10.35	8.16	7.27	6.7	25.4
4D 18H	1.37	6.82	6.41	1.87	0.96	1.33	10.67	7.94	7.00	4.4	26.2
4D 19H	1.46	7.47	6.56	2.33	1.02	1.44	10.30	8.04	7.19	5.4	28.9
4D 20H	1.35	7.37	6.58	2.09	0.97	1.33	11.02	8.18	7.02	5.7	26.1
4D 21H	1.34	7.40	6.41	2.22	0.95	1.32	11.37	7.93	6.96	11.2	21.6
4D 22H	1.31	7.73	6.27	1.93	0.93	1.29	9.76	7.79	6.98	7.9	23.6
4D 23H	1.34	7.73	6.20	2.43	0.94	1.32	9.85	7.68	6.76	7.9	19.9
5D 0H	0.98	6.80	5.85	1.55	0.69	0.97	9.25	7.14	6.35	8.9	29.2
5D 1H	0.82	7.05	5.81	1.55	0.58	0.81	9.41	7.33	6.46	11.1	22.2
5D 2H	0.98	6.26	5.72	1.52	0.68	0.97	10.77	7.31	6.48	7.4	24.3
5D 3H	1.22	6.04	5.86	1.90	0.85	1.20	10.35	7.30	6.45	13.1	19.9
5D 4H	1.17	7.41	5.98	2.15	0.83	1.17	9.64	7.71	6.80	8.9	25.7
5D 5H	1.11	8.13	5.92	1.66	0.78	1.08	10.65	7.70	6.64	19.8	26.4
5D 6H	1.15	8.17	6.29	1.95	0.81	1.12	9.51	7.93	6.93	20.3	24.8
5D 7H	1.07	7.40	6.22	1.72	0.76	1.06	10.70	8.08	7.07	10.7	21.6
5D 8H	1.02	7.83	6.14	1.58	0.71	0.98	9.89	7.84	6.97	18.2	25.1
5D 9H	0.99	7.09	6.06	1.80	0.70	0.97	10.64	7.81	6.77	17.8	18.4
5D 10H	1.11	7.43	6.02	1.90	0.75	1.08	10.56	7.36	6.50	21.7	21.9
5D 11H	1.21	7.37	5.90	2.25	0.85	1.20	10.95	7.57	6.59	22.1	21.7

Table A2.2.4 Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurement(WW3, 1993).

SITE : CHUKPYON(WW3)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
5D 13H	0.43	7.77	5.37	0.66	0.30	0.42	9.29	7.60	6.81	80.9	33.2
5D 14H	0.36	7.77	4.99	0.72	0.25	0.35	9.37	7.06	6.22	80.3	31.0
5D 15H	0.36	6.54	5.14	0.56	0.26	0.36	10.15	7.23	6.58	70.1	30.0
5D 16H	0.40	7.43	5.02	0.73	0.28	0.40	9.57	7.00	6.12	73.1	31.0
5D 17H	0.42	7.42	4.86	0.66	0.30	0.42	9.26	7.09	6.09	75.7	36.8
5D 18H	0.46	8.17	5.18	0.74	0.32	0.45	9.78	7.23	6.46	69.0	35.6
5D 19H	0.47	7.11	5.27	0.75	0.33	0.46	9.37	7.26	6.54	73.9	37.0
5D 20H	0.43	7.40	5.00	0.71	0.31	0.42	9.77	7.23	6.21	76.4	36.9
5D 21H	0.46	7.39	5.47	0.75	0.33	0.46	9.09	7.49	6.56	76.1	33.2
5D 22H	0.46	7.10	5.60	0.92	0.32	0.45	10.25	7.54	6.73	72.8	37.2
5D 23H	0.51	7.78	5.85	0.85	0.36	0.50	9.92	7.87	6.88	77.6	37.8
6D 0H	0.51	6.81	5.70	0.82	0.35	0.49	10.37	7.79	6.89	74.2	27.4
6D 1H	0.51	6.85	5.81	0.88	0.36	0.50	10.93	7.74	7.00	75.4	33.1
6D 2H	0.49	8.22	6.13	0.75	0.35	0.48	11.92	8.16	7.13	78.9	27.8
6D 3H	0.56	7.83	6.30	0.85	0.39	0.55	10.53	8.19	7.27	73.0	30.3
6D 4H	0.61	8.63	6.10	1.04	0.43	0.60	10.67	8.44	7.47	80.1	27.9
6D 5H	0.64	8.22	6.33	0.95	0.45	0.64	10.76	8.27	7.30	74.9	30.0
6D 6H	0.55	8.19	5.96	0.94	0.39	0.54	10.28	8.20	7.32	70.8	36.5
6D 7H	0.54	8.17	5.84	0.93	0.38	0.53	10.40	7.79	6.89	70.9	36.4
6D 8H	0.51	7.13	5.52	0.80	0.37	0.50	9.34	7.49	6.57	74.2	34.0
6D 9H	0.49	7.13	5.35	1.04	0.35	0.49	9.83	7.36	6.48	72.0	34.4
6D 10H	0.45	6.53	5.26	0.73	0.32	0.45	9.43	7.13	6.45	76.7	24.2
6D 11H	0.46	7.39	5.67	0.88	0.33	0.46	9.31	7.13	6.59	73.0	29.1
6D 12H	0.46	6.79	5.12	0.86	0.32	0.46	8.80	6.79	5.92	73.1	29.4
6D 13H	0.44	6.85	4.90	0.75	0.32	0.45	8.83	6.64	5.84	76.6	35.7
6D 14H	0.45	7.06	5.04	0.78	0.32	0.45	8.87	6.70	5.93	73.9	28.0
6D 15H	0.47	6.77	4.85	0.86	0.34	0.47	9.63	6.52	5.72	75.7	28.8
6D 16H	0.44	6.55	4.93	0.64	0.32	0.44	8.81	6.61	5.93	76.3	25.7
6D 17H	0.49	6.74	5.09	0.74	0.34	0.48	7.96	6.55	5.98	75.8	22.6
6D 18H	0.43	5.81	5.21	0.65	0.30	0.42	9.76	6.63	5.94	73.3	19.4
6D 19H	0.42	6.29	5.24	0.64	0.29	0.41	9.64	6.86	6.06	78.4	31.9
6D 20H	0.44	6.30	5.63	0.74	0.32	0.44	9.32	7.27	6.24	80.4	26.9
6D 21H	0.38	6.24	5.42	0.63	0.27	0.37	8.86	6.80	6.02	73.5	29.8
6D 22H	0.35	5.81	5.24	0.57	0.25	0.35	9.64	6.76	5.87	73.4	25.9

Table A2.2.4 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(WW3)

DEC. 1993

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
6D 23H	0.35	6.51	5.29	0.58	0.25	0.35	10.16	6.96	5.88	85.3	33.6
7D 0H	0.32	6.28	5.45	0.60	0.23	0.33	10.65	6.94	6.09	85.9	31.1
7D 1H	0.34	6.24	5.50	0.60	0.24	0.33	10.03	6.97	6.19	83.6	31.3
7D 2H	0.33	5.84	5.31	0.56	0.23	0.32	10.16	6.92	6.03	85.6	30.3
7D 3H	0.31	6.05	5.32	0.53	0.22	0.31	9.10	6.84	6.03	82.5	35.7
7D 4H	0.31	6.79	4.98	0.60	0.23	0.32	9.21	6.93	5.89	76.1	18.9
7D 5H	0.34	6.06	5.52	0.50	0.24	0.33	9.82	7.09	6.13	86.9	27.4
7D 6H	0.34	6.25	5.41	0.50	0.24	0.33	9.37	6.87	5.97	92.7	31.2
7D 7H	0.34	5.81	5.41	0.54	0.24	0.34	10.65	7.17	6.23	77.8	34.5
7D 8H	0.34	6.00	5.36	0.50	0.25	0.34	9.38	6.98	5.90	85.5	31.8
7D 9H	0.34	6.03	4.77	0.69	0.25	0.35	10.96	6.33	5.53	89.9	27.3
7D 10H	0.31	6.51	4.85	0.52	0.22	0.31	9.37	6.51	5.67	77.9	32.9
7D 11H	0.34	5.61	4.77	0.53	0.25	0.34	9.11	6.47	5.54	81.3	26.8
7D 12H	0.33	6.27	4.82	0.60	0.23	0.32	8.95	6.33	5.67	93.6	32.9
7D 13H	0.31	6.50	4.68	0.58	0.23	0.32	10.08	6.45	5.48	93.4	28.8

Table A2.2.5 Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurement(SW1, 1994).

SITE : CHUKPYON(SW1)

APR. 1994

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
21D 19H	0.77	5.59	4.04	1.41	0.56	0.79	6.96	5.18	4.49	87.4	28.8
21D 20H	0.76	5.42	4.12	1.24	0.55	0.76	6.93	5.26	4.66	95.5	24.5
21D 21H	0.78	5.22	4.16	1.33	0.56	0.77	7.55	5.40	4.79	78.5	36.2
21D 22H	0.78	5.59	4.30	1.28	0.55	0.77	6.81	5.40	4.82	91.2	29.6
21D 23H	0.71	5.07	4.20	1.09	0.51	0.71	6.99	5.44	4.77	91.3	33.2
22D 0H	0.77	5.58	4.40	1.42	0.55	0.76	6.91	5.65	5.01	84.3	34.0
22D 1H	0.80	5.24	4.48	1.35	0.57	0.80	7.48	5.75	5.13	81.7	28.2
22D 2H	0.79	5.25	4.62	1.40	0.56	0.78	8.01	6.00	5.31	106.7	26.8
22D 3H	0.73	5.82	4.71	1.26	0.52	0.73	8.48	6.01	5.45	96.1	28.0
22D 4H	0.74	6.24	4.73	1.14	0.53	0.73	7.51	6.10	5.33	99.8	24.0
22D 5H	0.73	6.51	4.84	1.27	0.52	0.73	8.22	6.20	5.47	92.3	25.2
22D 6H	0.74	6.49	4.83	1.38	0.52	0.72	7.54	6.18	5.50	97.7	25.7
22D 7H	0.74	6.26	4.69	1.14	0.51	0.72	7.87	6.07	5.36	97.0	24.5
22D 8H	0.69	6.05	4.76	1.14	0.49	0.68	8.18	6.25	5.52	97.0	26.6
22D 9H	0.72	6.06	4.68	1.11	0.51	0.70	8.11	6.14	5.46	94.8	27.8
22D 10H	0.65	6.27	4.69	1.06	0.46	0.65	7.95	6.07	5.28	97.9	27.2
22D 11H	0.68	6.03	4.78	1.15	0.48	0.67	7.69	6.04	5.54	91.5	26.7
22D 12H	0.61	6.01	4.54	1.04	0.44	0.61	7.79	5.90	5.23	95.5	28.0
22D 13H	0.66	6.05	4.56	1.14	0.46	0.64	8.46	5.92	5.18	98.9	26.3
22D 14H	0.59	5.99	4.48	1.12	0.43	0.60	7.94	5.75	5.05	96.6	25.9
22D 15H	0.63	5.81	4.13	1.32	0.47	0.64	7.14	5.46	4.83	95.6	24.1
22D 16H	0.67	6.23	3.70	1.03	0.49	0.67	6.82	5.19	4.30	104.1	28.8
22D 17H	0.70	5.41	3.79	1.22	0.51	0.71	6.92	4.95	4.26	97.0	31.2
22D 18H	0.68	5.81	3.67	1.16	0.50	0.70	6.76	4.67	3.95	86.8	37.3
22D 19H	0.67	5.81	3.80	1.09	0.50	0.67	6.78	4.85	4.16	96.5	33.3
22D 20H	0.62	5.99	3.93	1.03	0.45	0.62	7.01	4.90	4.37	96.3	35.8
22D 21H	0.66	3.94	3.77	1.10	0.48	0.67	7.44	4.72	4.13	6.8	25.3
22D 22H	0.71	3.75	3.61	1.16	0.52	0.72	7.43	4.53	3.90	1.7	20.1
22D 23H	0.75	4.05	3.68	1.22	0.56	0.76	6.87	4.63	3.94	358.7	25.2
23D 0H	0.75	4.15	3.76	1.36	0.55	0.76	7.54	4.60	4.02	2.4	25.2
23D 1H	0.70	4.13	3.71	1.21	0.51	0.70	6.45	4.67	4.09	6.2	28.7
23D 2H	0.65	4.15	3.71	1.23	0.47	0.65	6.52	4.66	4.01	359.6	35.7
23D 3H	0.65	4.17	3.62	1.33	0.50	0.68	6.63	4.54	3.88	15.1	26.9

Table A2.2.5 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(SW1)

APR, 1994

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/2}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
23D 4H	0.81	4.37	3.80	1.43	0.60	0.82	6.77	4.66	4.11	7.6	27.0
23D 5H	0.82	4.91	3.77	1.45	0.61	0.84	6.20	4.80	4.13	8.1	31.6
23D 6H	0.84	4.62	3.92	1.49	0.63	0.85	6.00	4.84	4.34	19.5	30.3
23D 7H	0.65	4.64	3.78	1.28	0.49	0.68	6.41	4.80	4.14	32.3	38.2
23D 8H	0.55	4.77	3.77	0.97	0.41	0.56	6.83	4.80	4.14	19.8	40.0
23D 9H	0.53	4.77	3.71	0.98	0.40	0.55	6.25	4.78	4.11	30.6	35.7
23D 10H	0.50	4.91	3.74	0.81	0.37	0.52	6.52	4.70	4.09	26.8	33.6
23D 11H	0.43	4.51	3.75	0.73	0.32	0.44	8.39	4.73	3.95	32.4	33.5
23D 12H	0.38	4.49	3.75	0.76	0.28	0.38	8.19	4.93	4.12	24.2	42.2
23D 13H	0.42	4.61	4.06	0.68	0.30	0.41	8.33	5.38	4.53	21.3	39.7
23D 14H	0.38	4.63	4.17	0.70	0.28	0.38	8.67	5.43	4.70	10.5	41.5
23D 15H	0.43	7.81	4.49	0.76	0.33	0.45	9.91	5.63	4.78	15.7	21.8
23D 16H	0.48	7.15	4.37	0.94	0.36	0.49	8.95	6.11	5.28	19.2	17.2
23D 17H	0.54	7.10	4.07	0.94	0.40	0.55	9.29	6.10	5.12	23.2	15.6
23D 18H	0.51	8.21	4.19	0.77	0.36	0.50	9.93	6.10	5.13	28.0	20.9
23D 19H	0.54	8.10	4.59	0.80	0.39	0.53	9.64	6.96	6.01	26.8	18.4
23D 20H	0.58	7.09	4.59	0.97	0.41	0.55	9.62	6.54	5.49	37.5	20.9
23D 21H	0.61	5.25	4.56	0.92	0.43	0.59	9.40	6.31	5.52	21.9	28.0
23D 22H	0.61	7.82	4.64	1.07	0.44	0.61	9.37	6.54	5.40	21.7	30.8
23D 23H	0.63	4.94	4.61	0.99	0.44	0.61	9.74	6.25	5.32	27.4	36.4
24D 0H	0.64	8.54	4.64	0.91	0.45	0.63	8.82	6.27	5.29	34.2	19.7
24D 1H	0.75	8.19	4.29	1.18	0.56	0.77	9.45	6.13	5.06	36.3	23.4
24D 2H	1.20	4.37	4.08	1.82	0.85	1.17	8.82	5.18	4.47	7.5	28.2
24D 3H	1.18	4.26	4.20	2.05	0.84	1.17	8.95	5.41	4.56	1.6	21.5
24D 4H	1.01	4.76	4.35	1.63	0.72	1.00	8.25	5.56	4.77	11.4	30.0
24D 5H	0.86	8.16	4.68	1.51	0.62	0.87	9.35	6.39	5.42	44.7	26.5

Table A2.2.6 Characteristics of wave data observed in Chukpyon harbor during simultaneous measurement(SW2, 1994).

SITE : CHUKPYON(SW2)

APR. 1994

Time	H_s (m)	T_p (s)	T_z (s)	H_{max} (m)	H_{rms} (m)	$H_{1/3}$ (m)	T_{max} (s)	$T_{1/3}$ (s)	$T_{H_{1/3}}$ (s)	θ ($^{\circ}$)	s ($^{\circ}$)
21D 19H	0.65	5.61	4.26	1.12	0.46	0.64	6.67	5.35	4.73	91.4	23.5
21D 20H	0.64	5.40	4.25	0.94	0.46	0.63	6.96	5.47	4.75	97.9	26.1
21D 21H	0.64	5.08	4.31	1.18	0.46	0.63	7.20	5.47	4.78	85.3	29.7
21D 22H	0.69	5.24	4.48	1.19	0.49	0.69	6.79	5.61	4.99	81.0	22.3
21D 23H	0.63	5.24	4.43	1.13	0.45	0.63	7.95	5.61	4.95	92.0	29.4
22D 0H	0.70	5.61	4.60	0.99	0.50	0.67	7.66	5.89	5.21	103.5	19.3
22D 1H	0.67	5.62	4.60	1.19	0.47	0.66	7.63	5.78	5.15	100.9	25.7
22D 2H	0.65	6.03	4.60	1.03	0.46	0.63	7.53	5.81	5.17	104.3	25.4
22D 3H	0.66	5.42	4.73	1.05	0.47	0.65	7.81	5.97	5.20	82.4	26.5
22D 4H	0.65	6.24	4.76	1.05	0.46	0.65	7.72	6.11	5.35	88.8	24.3
22D 5H	0.60	6.03	4.55	0.89	0.42	0.58	8.34	5.86	5.12	88.6	27.8
22D 6H	0.63	6.04	4.84	1.08	0.44	0.62	7.85	6.08	5.44	99.9	22.5
22D 7H	0.64	6.51	4.77	1.07	0.45	0.63	7.81	6.16	5.26	104.6	26.6
22D 8H	0.62	6.27	4.77	0.87	0.43	0.59	8.07	6.20	5.41	103.9	25.0
22D 9H	0.63	6.25	4.73	0.97	0.44	0.62	7.81	6.12	5.43	102.4	21.0
22D 10H	0.62	5.98	4.65	1.30	0.44	0.62	8.80	6.09	5.30	101.3	25.2
22D 11H	0.65	6.00	4.86	1.16	0.46	0.64	7.50	6.12	5.36	99.7	18.5
22D 12H	0.58	5.82	4.66	0.89	0.41	0.57	8.74	6.04	5.31	101.1	26.0
22D 13H	0.62	5.82	4.66	1.01	0.44	0.62	7.31	5.85	5.20	97.8	23.1
22D 14H	0.50	5.80	4.49	0.82	0.36	0.50	7.67	5.82	5.13	98.7	29.5
22D 15H	0.51	5.81	4.57	0.89	0.36	0.50	7.82	5.73	5.09	99.0	29.5
22D 16H	0.52	5.39	4.26	0.90	0.38	0.53	8.19	5.51	4.80	89.4	27.6
22D 17H	0.46	5.64	4.32	0.89	0.34	0.47	7.30	5.61	4.90	95.9	33.1
22D 18H	0.46	6.03	4.37	0.82	0.33	0.46	7.14	5.60	4.94	99.4	33.3
22D 19H	0.41	5.39	4.49	0.82	0.30	0.42	7.04	5.59	4.96	93.5	34.6
22D 20H	0.39	5.80	4.49	0.75	0.28	0.39	7.29	5.59	4.97	97.6	35.6
22D 21H	0.39	5.39	4.43	0.67	0.29	0.39	7.21	5.61	4.97	88.2	37.1
22D 22H	0.43	5.42	4.65	0.76	0.31	0.45	6.82	5.48	4.98	87.2	30.0
22D 23H	0.41	5.61	4.43	0.80	0.31	0.42	7.10	5.37	4.77	92.5	36.8
23D 0H	0.37	4.92	4.22	0.76	0.28	0.39	6.82	5.16	4.52	83.0	35.0
23D 1H	0.36	5.23	4.10	0.59	0.27	0.37	7.23	5.10	4.55	85.5	37.0
23D 2H	0.32	4.78	4.06	0.58	0.24	0.34	7.11	5.01	4.43	75.0	35.5
23D 3H	0.34	4.37	4.00	0.61	0.26	0.36	6.40	4.88	4.08	88.2	40.9

Table A2.2.6 (Cont'd).

SITE : CHUKPYON(SW2)

APR. 1994

Time	H_s	T_p	T_z	H_{max}	H_{rms}	$H_{1/3}$	T_{max}	$T_{1/3}$	$T_{H_{1/3}}$	θ	s
	(m)	(s)	(s)	(m)	(m)	(m)	(s)	(s)	(s)	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)
23D 4H	0.38	5.23	4.03	0.65	0.30	0.42	6.80	4.86	4.23	74.2	31.8
23D 5H	0.37	4.63	3.88	0.69	0.30	0.40	6.82	4.79	3.96	54.7	31.6
23D 6H	0.35	4.92	3.94	0.72	0.27	0.37	6.58	4.85	4.21	55.6	37.1
23D 7H	0.34	4.63	3.83	0.61	0.26	0.35	6.49	4.84	4.14	59.1	35.8
23D 8H	0.31	4.89	3.80	0.62	0.23	0.32	7.14	4.86	4.14	66.6	33.6
23D 9H	0.30	4.75	3.91	0.62	0.22	0.31	7.20	4.86	4.28	56.5	28.5
23D 10H	0.28	4.92	3.78	0.53	0.21	0.29	6.55	4.80	4.10	67.7	36.4
23D 11H	0.28	4.37	3.87	0.49	0.21	0.29	8.40	4.97	4.24	63.8	26.5
23D 12H	0.28	4.38	3.98	0.49	0.20	0.28	10.55	5.37	4.46	67.6	30.2
23D 13H	0.26	4.15	4.10	0.40	0.19	0.26	9.42	5.38	4.56	69.1	29.2
23D 14H	0.25	4.38	4.16	0.46	0.20	0.27	10.01	5.10	4.25	63.2	32.8
23D 15H	0.24	9.07	4.14	0.47	0.21	0.29	8.71	4.58	3.52	82.3	48.7
23D 16H	0.31	8.20	3.73	0.65	0.25	0.33	9.26	4.83	3.78	42.2	48.8
23D 17H	0.35	8.64	3.46	0.58	0.27	0.37	11.04	4.90	3.82	51.6	46.4
23D 18H	0.38	8.61	3.56	0.64	0.28	0.37	8.45	4.89	3.94	54.5	42.5
23D 19H	0.38	8.63	4.08	0.57	0.27	0.37	9.75	6.14	4.88	50.0	37.2
23D 20H	0.41	8.58	4.17	0.65	0.29	0.40	10.43	5.84	4.87	52.9	31.6
23D 21H	0.45	3.76	4.00	0.73	0.31	0.44	9.56	5.52	4.54	146.4	28.3
23D 22H	0.45	3.76	4.05	0.75	0.32	0.44	8.60	5.50	4.54	140.1	25.5
23D 23H	0.45	7.44	4.20	0.79	0.31	0.43	9.63	5.80	4.82	141.3	27.6
24D 0H	0.44	8.63	4.29	0.64	0.31	0.42	9.37	5.98	4.86	57.2	40.7
24D 1H	0.45	8.19	4.97	0.74	0.35	0.48	8.96	6.35	5.26	63.7	25.2
24D 2H	0.48	8.20	4.73	0.92	0.38	0.52	8.66	5.19	4.24	64.1	26.9
24D 3H	0.55	8.19	4.50	0.99	0.41	0.57	8.78	6.12	5.41	61.7	28.0
24D 4H	0.55	7.76	4.53	0.85	0.40	0.55	8.71	6.09	5.26	61.8	25.2
24D 5H	0.61	4.75	4.49	0.95	0.44	0.60	9.36	5.88	5.19	48.9	21.4

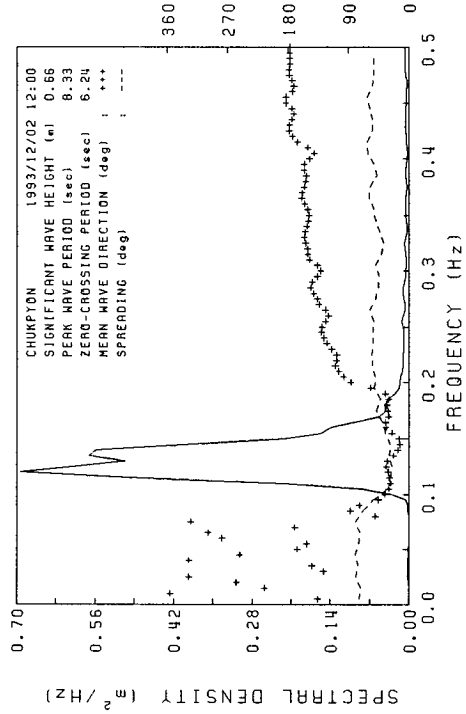
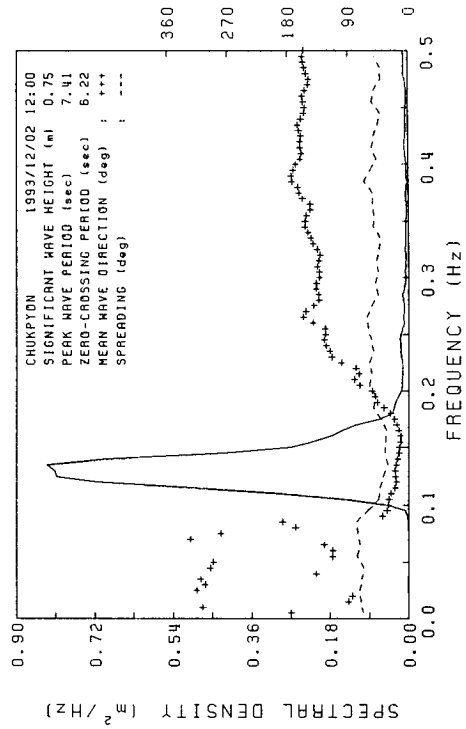
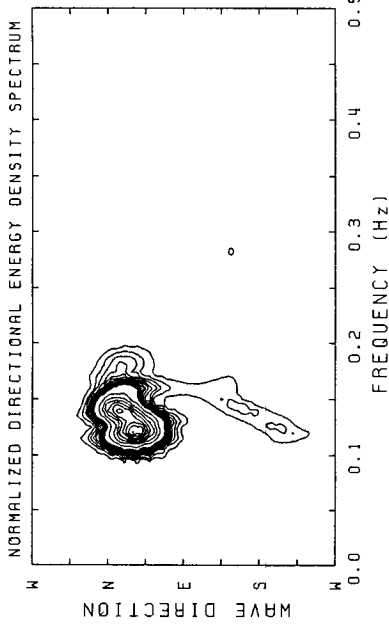
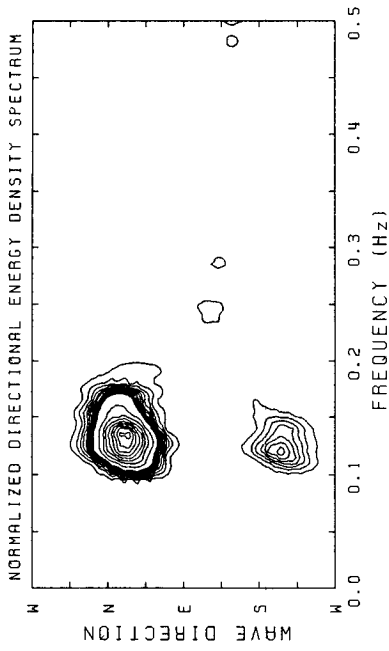


Fig. A.2.2.1. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/02 12:00)

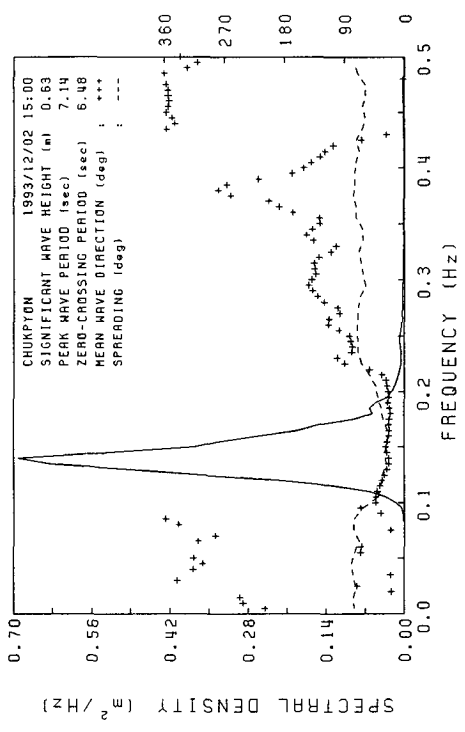
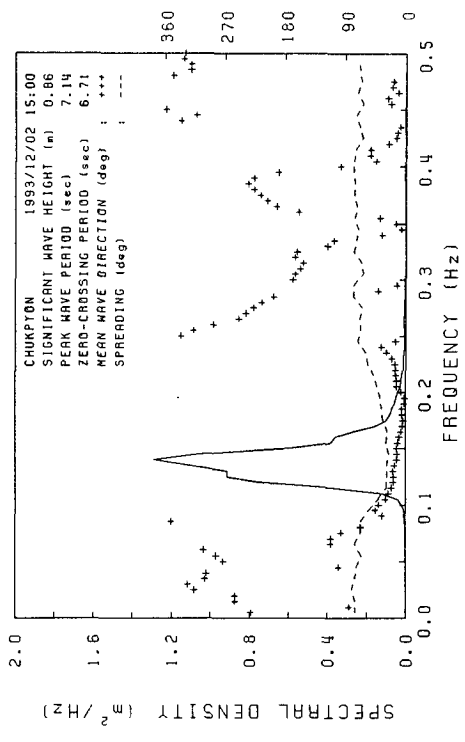
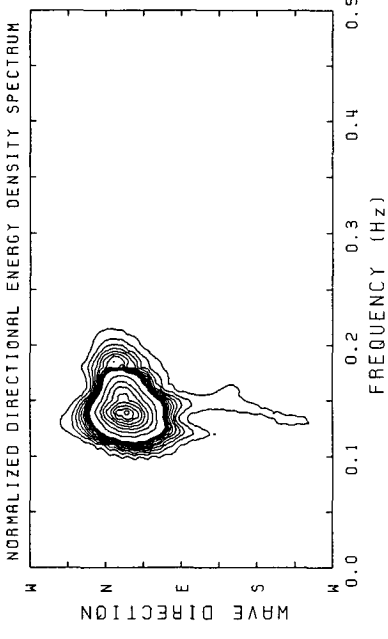
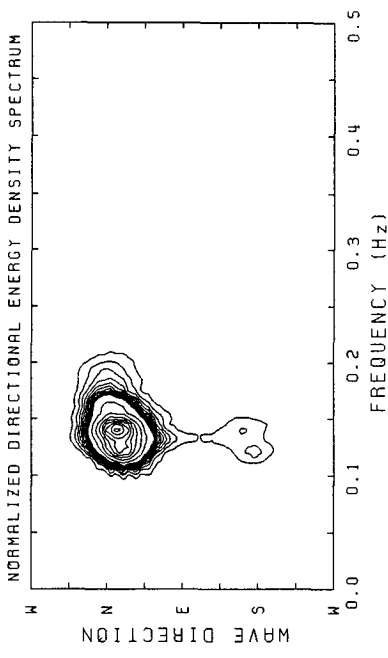


Fig. A.2.2.2. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/02 15:00)

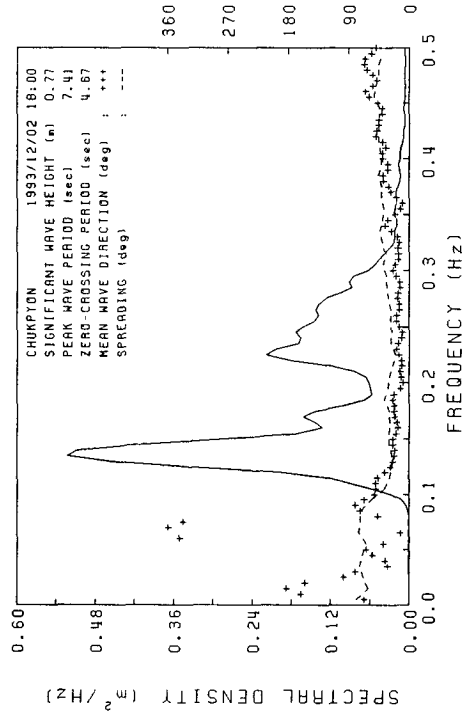
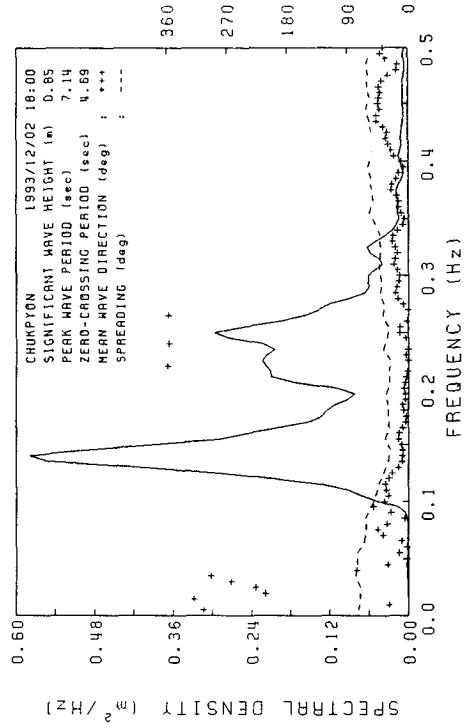
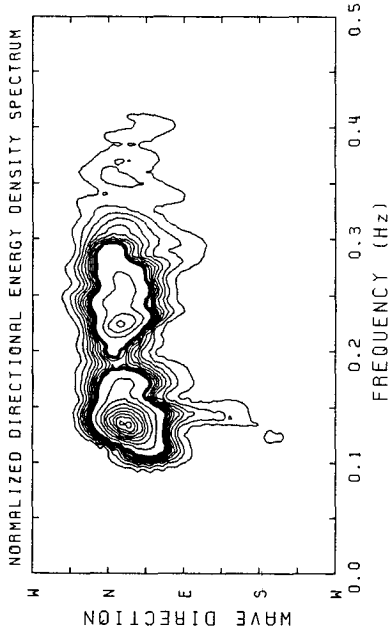
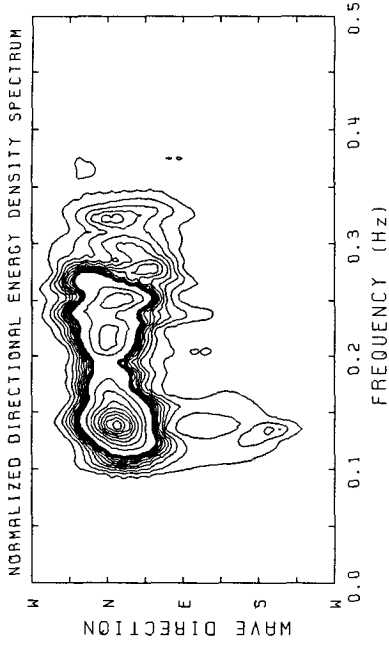


Fig. A.2.2.3. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/02 18:00)

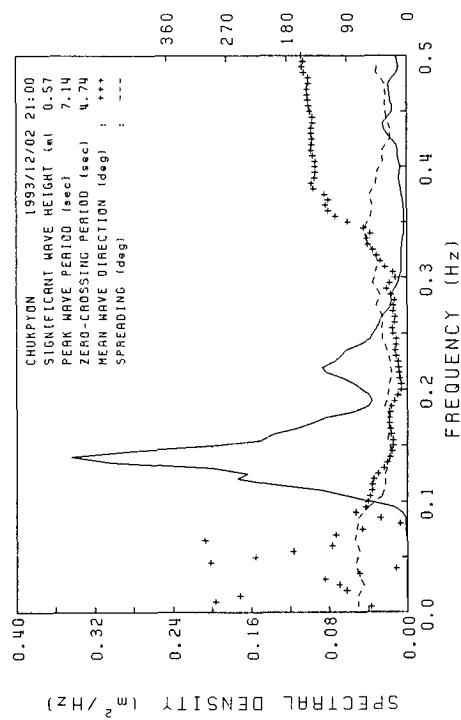
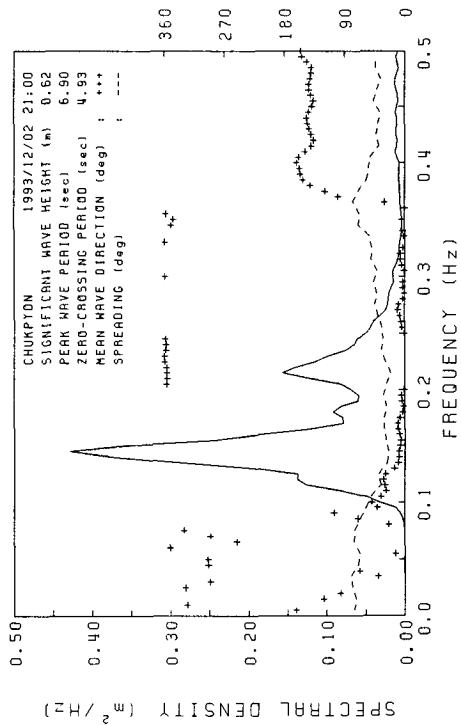
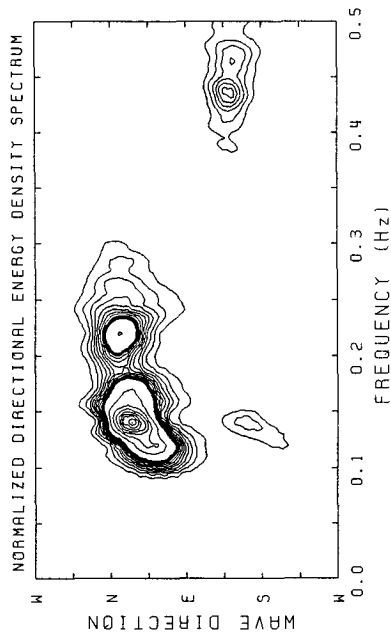
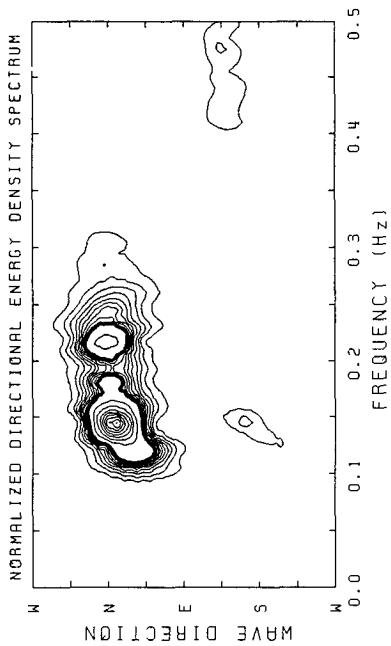


Fig. A.2.2.4. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/02 21:00)

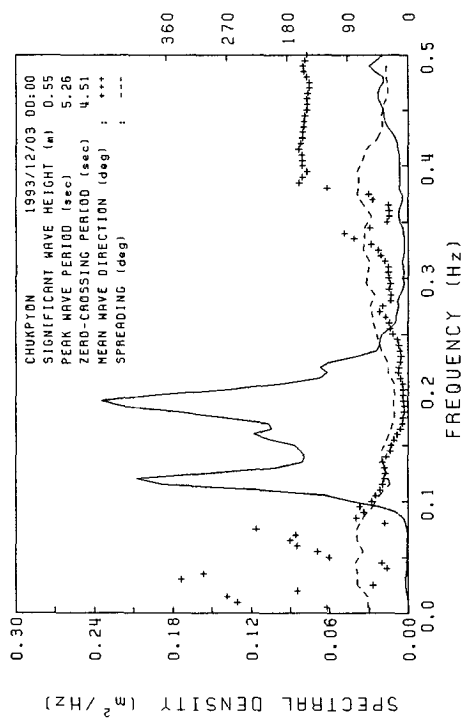
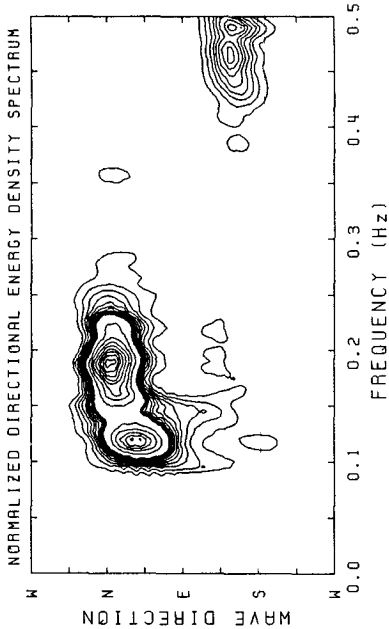
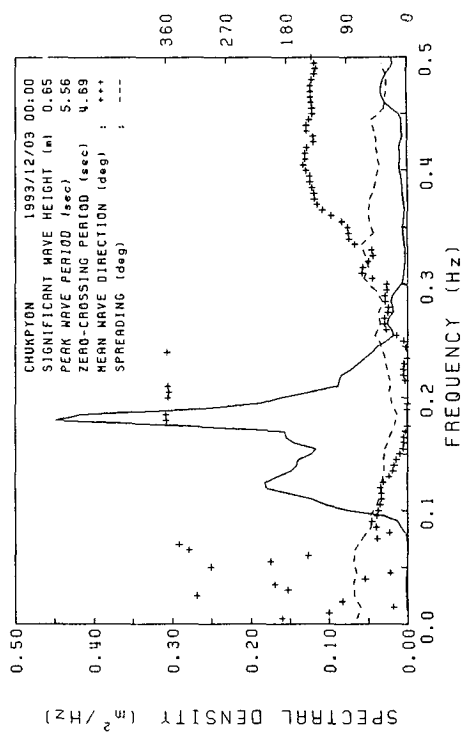
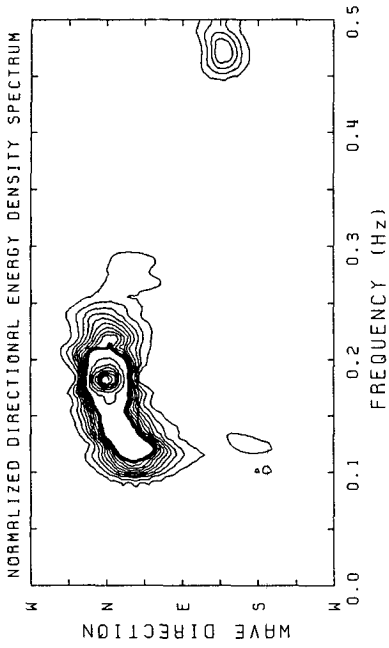


Fig. A.2.2.5. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/03 00:00)

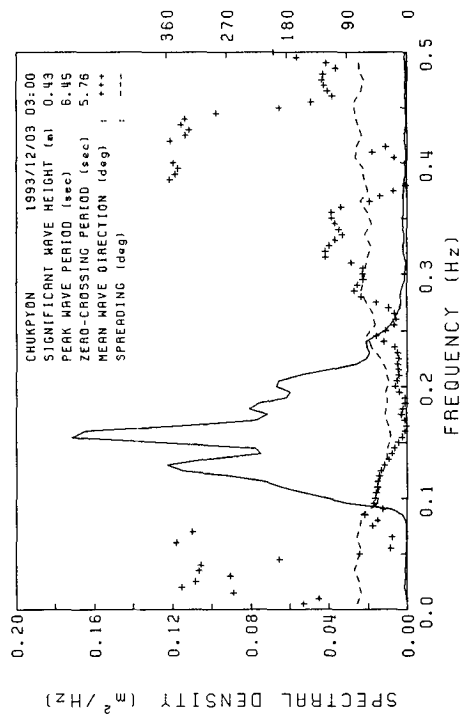
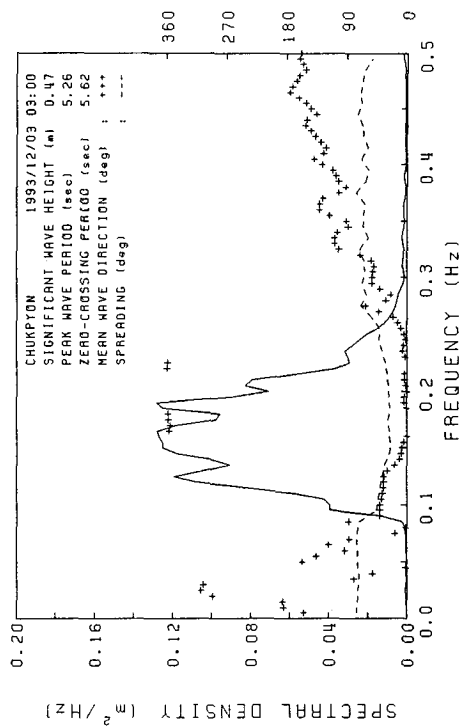
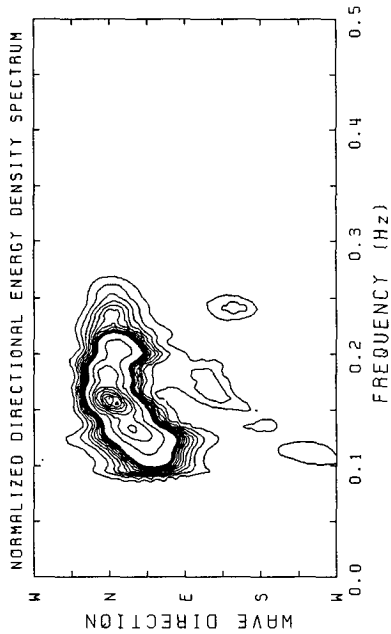
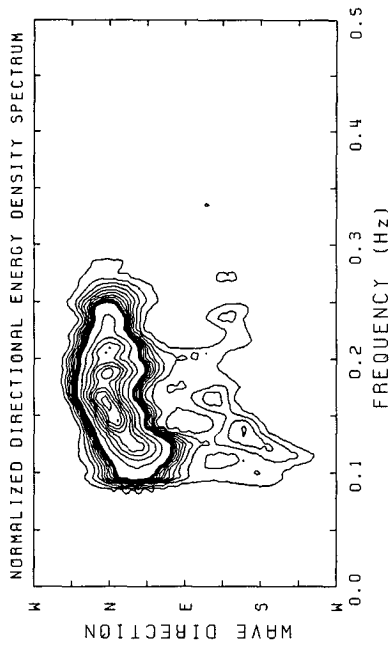


Fig. A.2.2.6. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/03 03:00)

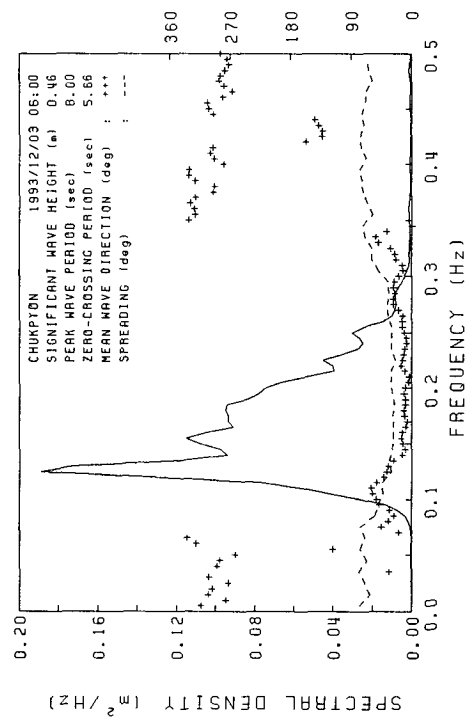
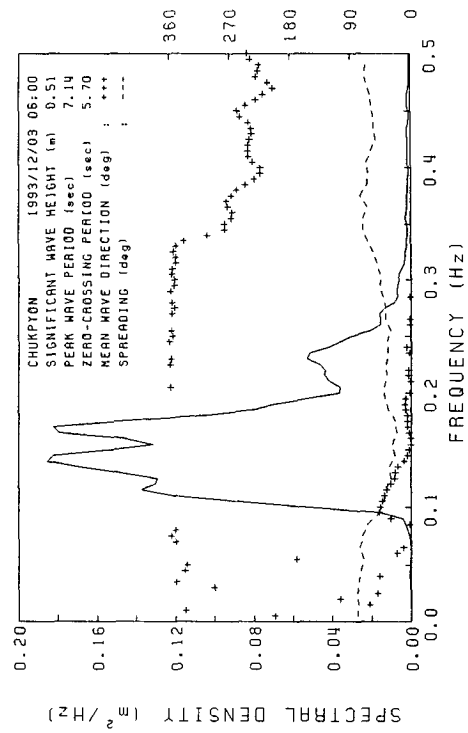
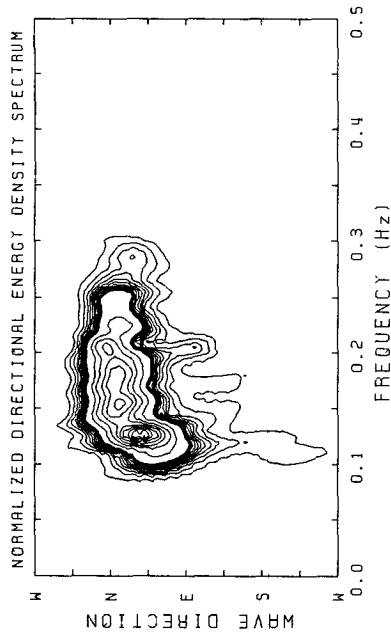
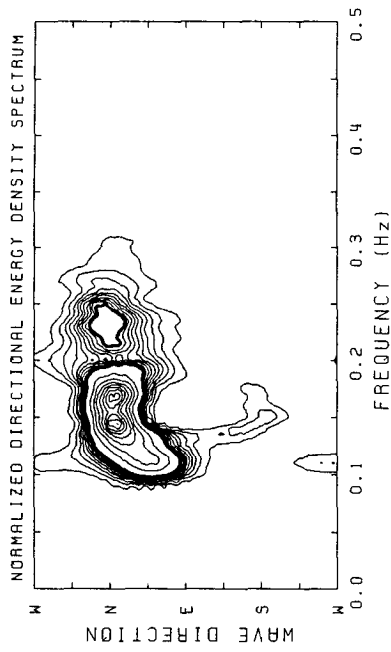


Fig. A.2.2.7. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/03 06:00)

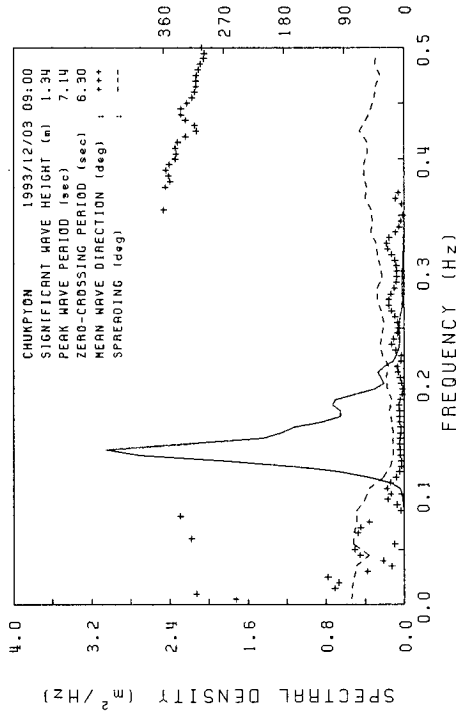
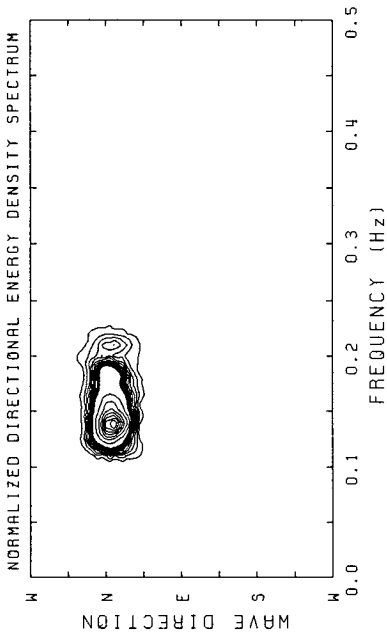
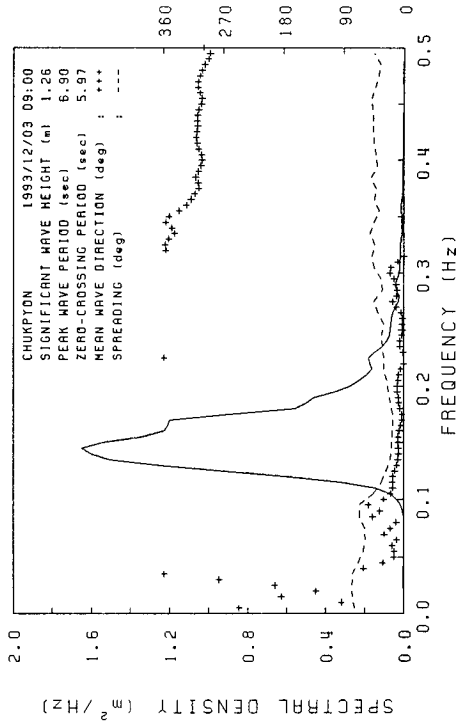
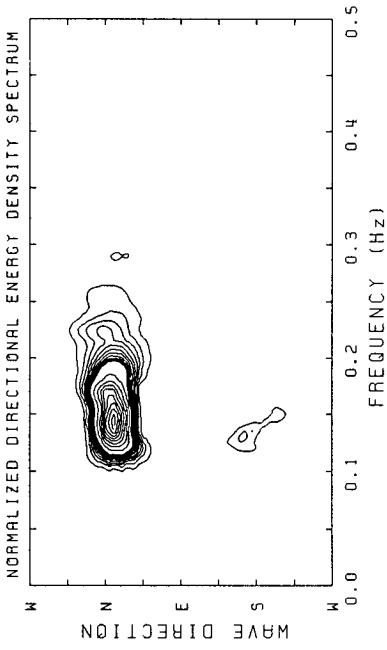


Fig. A.2.2.8. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/03 09:00)

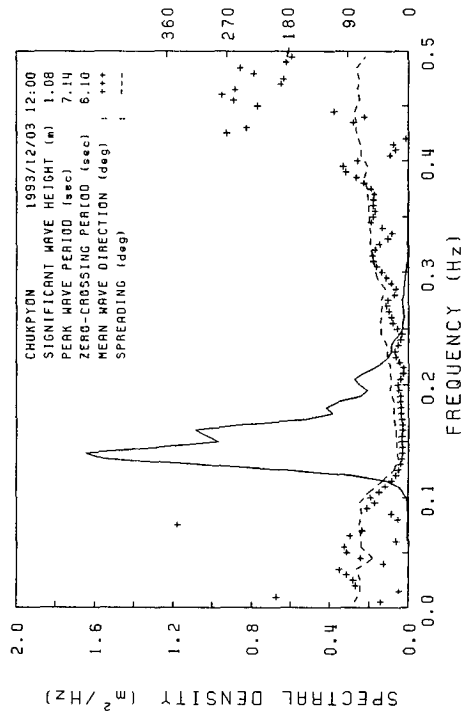
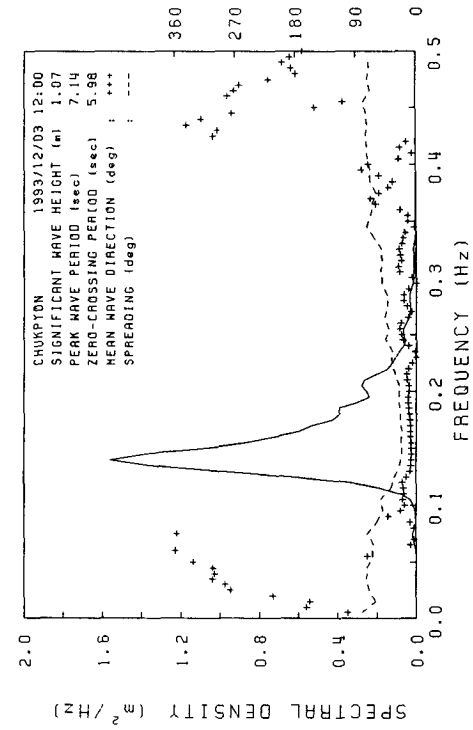
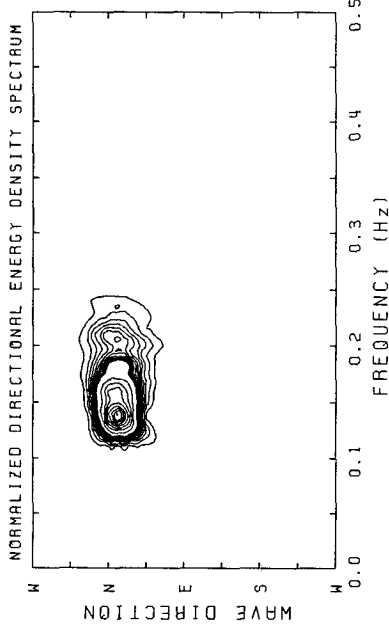
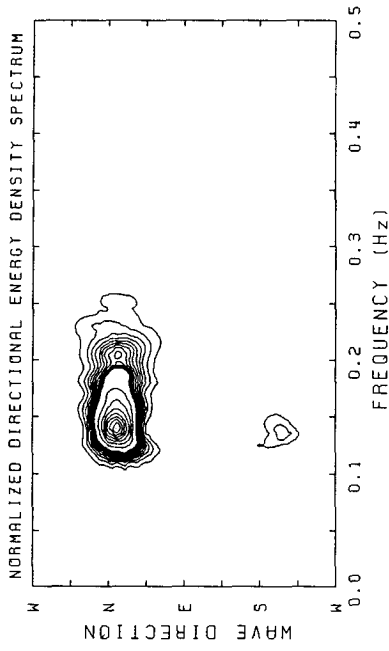


Fig. A.2.2.9. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/03 12:00)

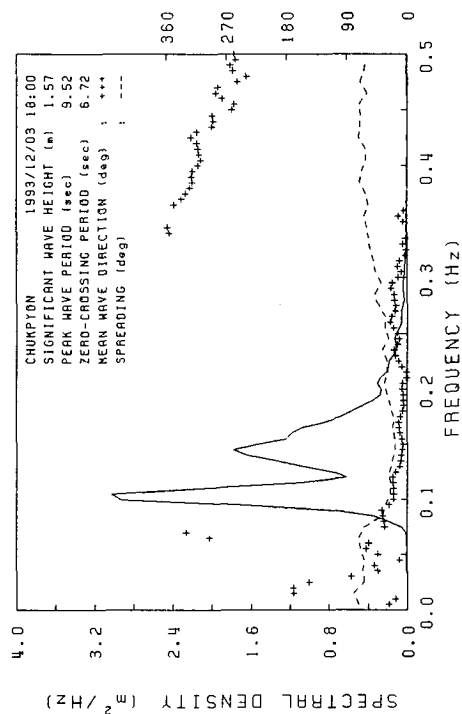
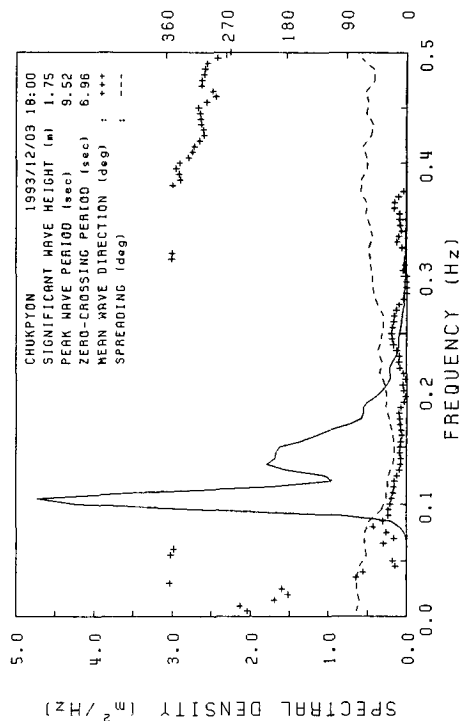
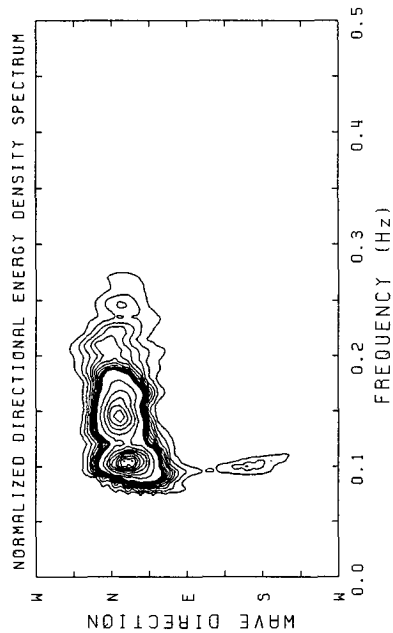
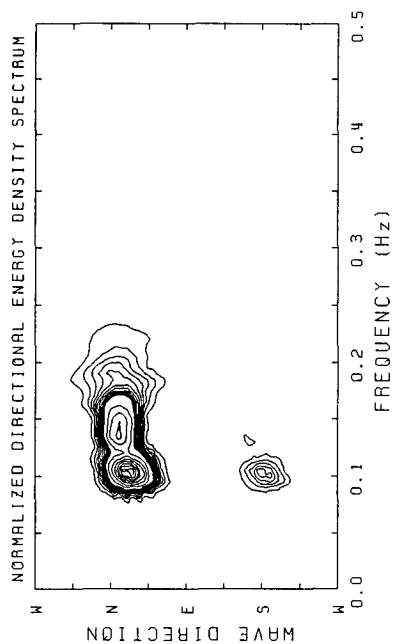


Fig. A.2.2.10. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/03 18:00)

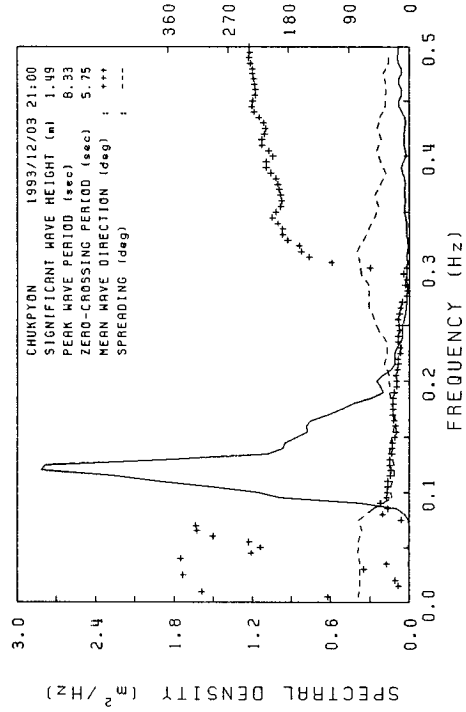
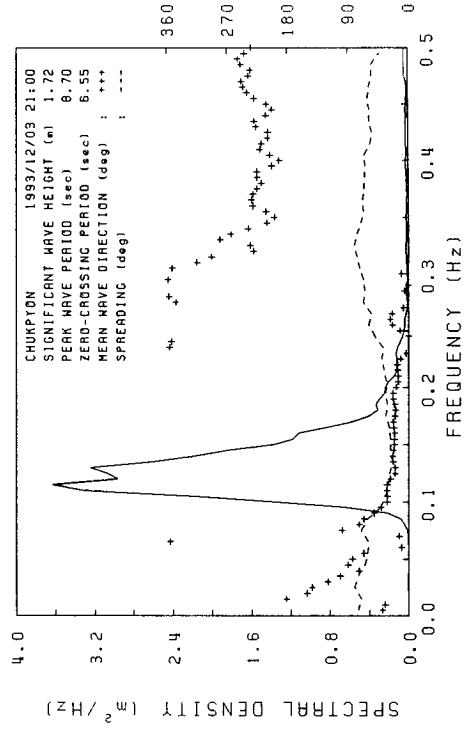
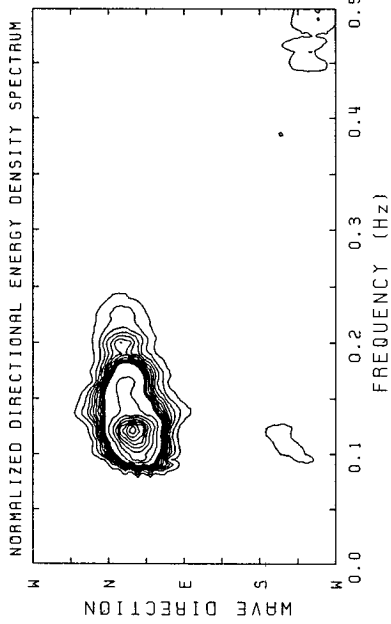
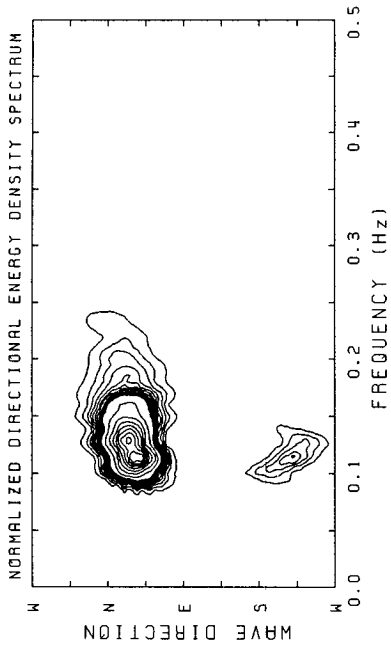


Fig. A.2.2.11. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/03 21:00)

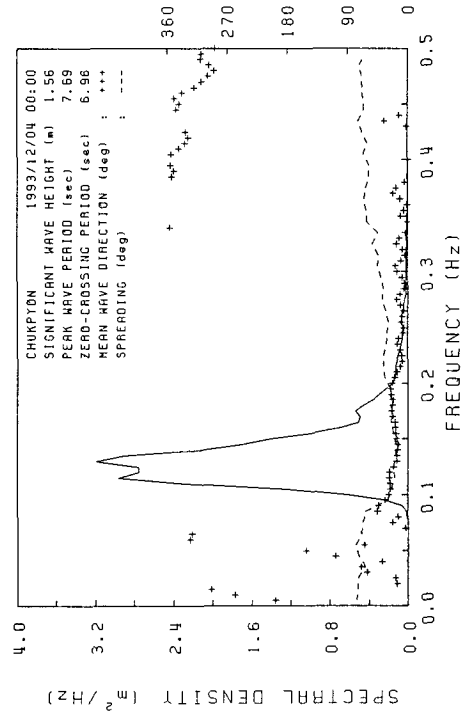
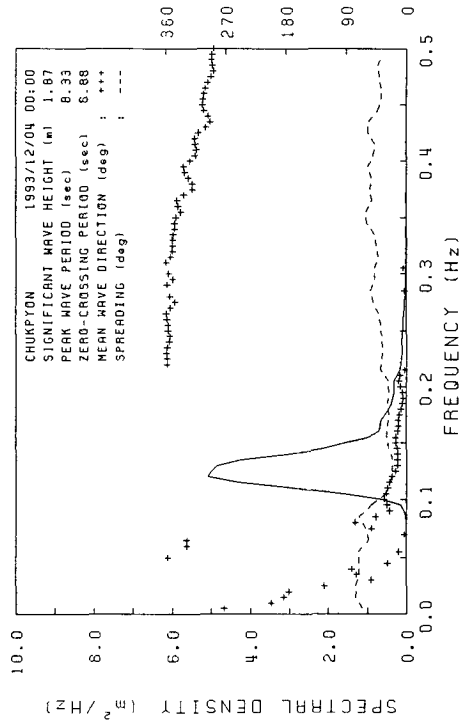
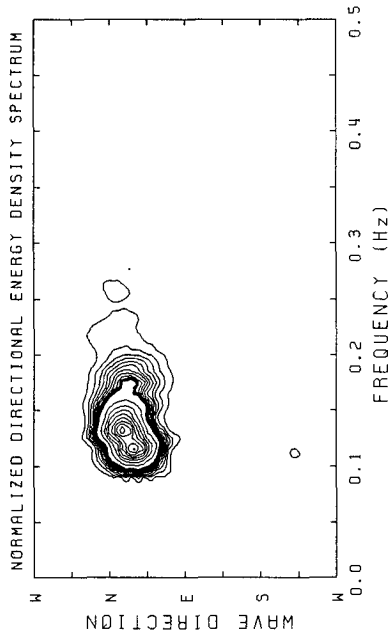
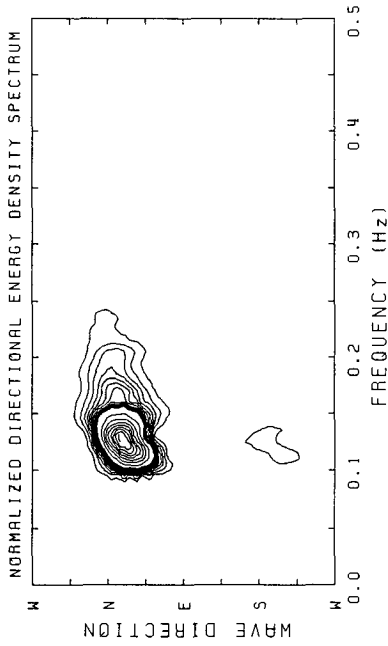


Fig. A.2.2.12. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 00:00)

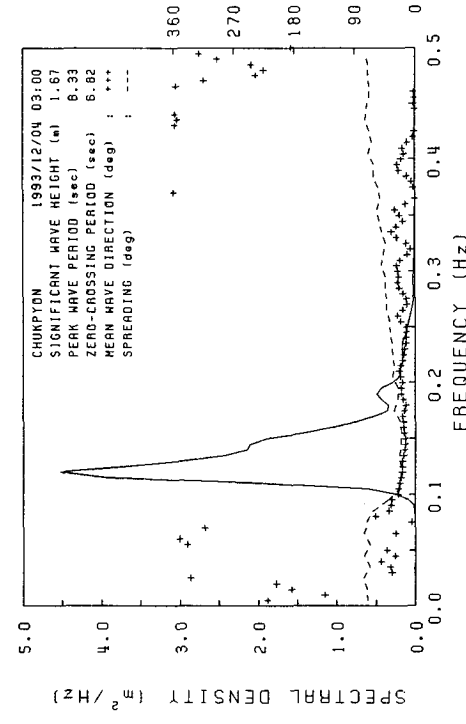
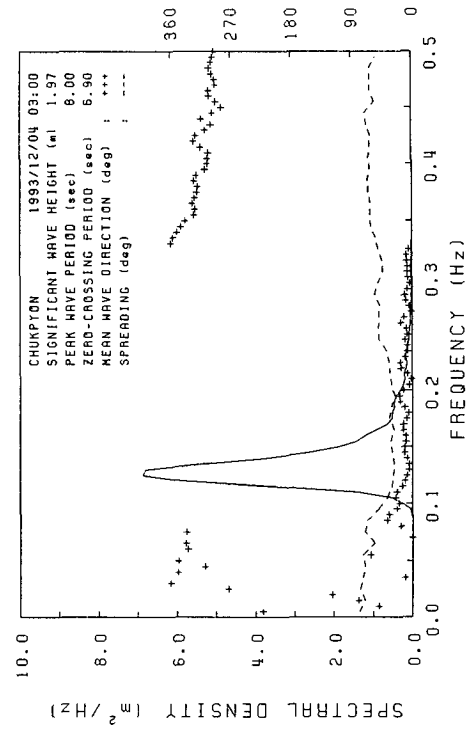
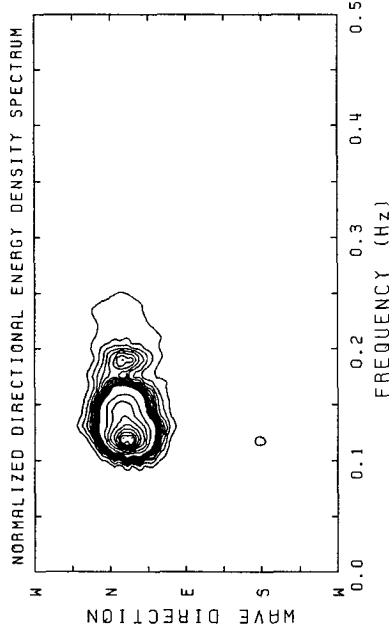
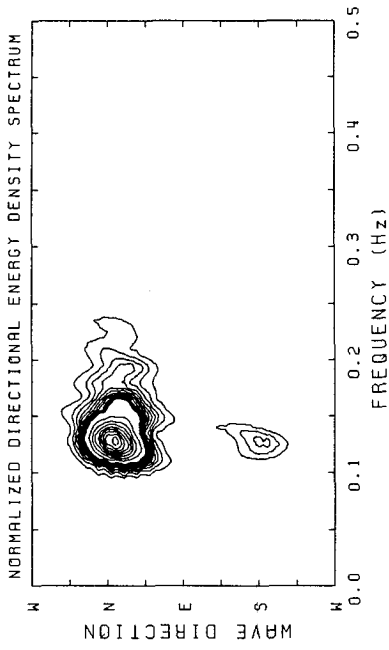


Fig. A.2.2.13. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 03:00)

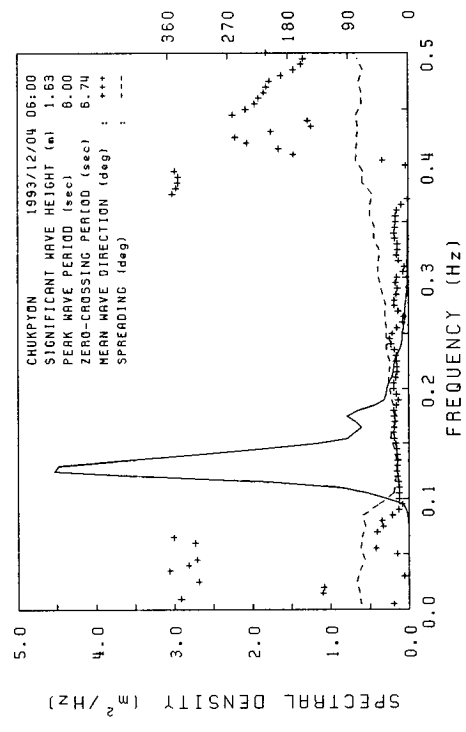
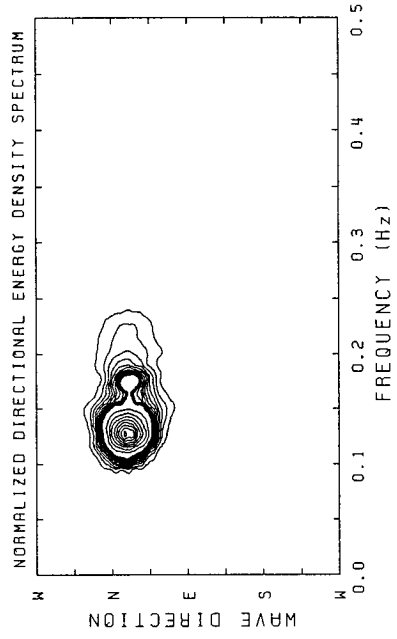
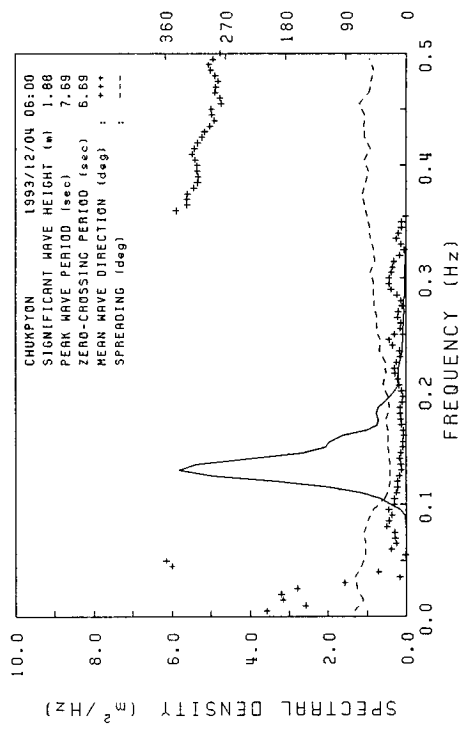
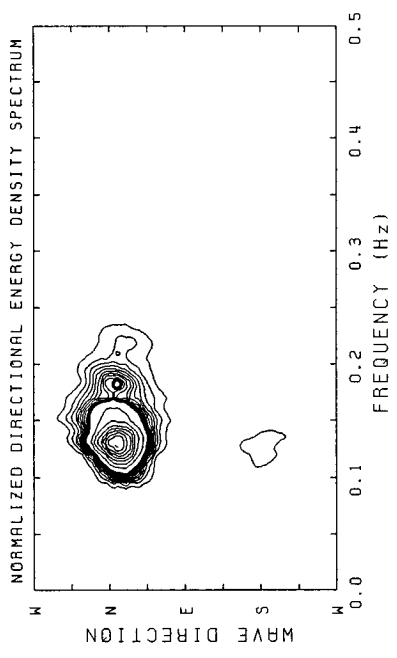


Fig. A.2.2.14. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 06:00)

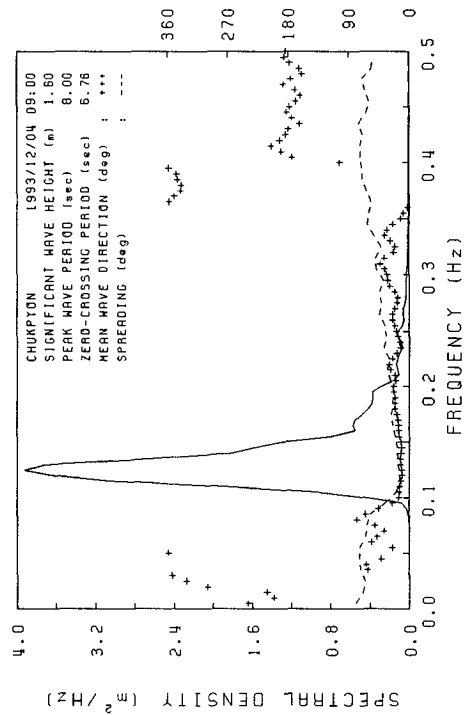
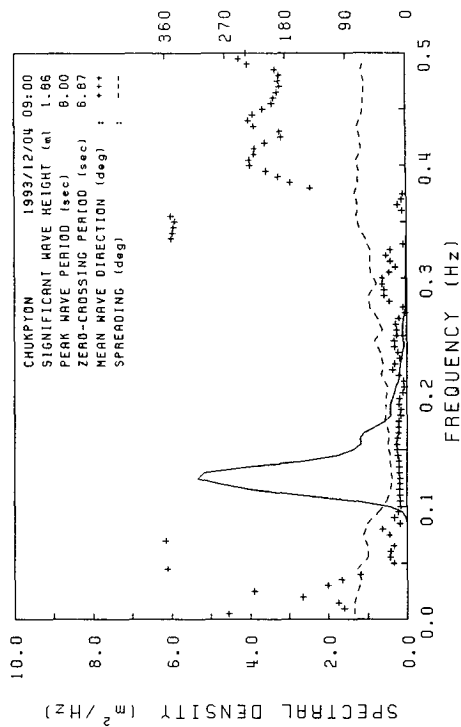
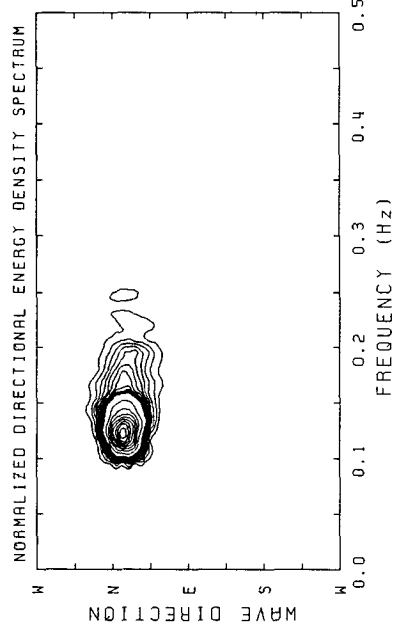
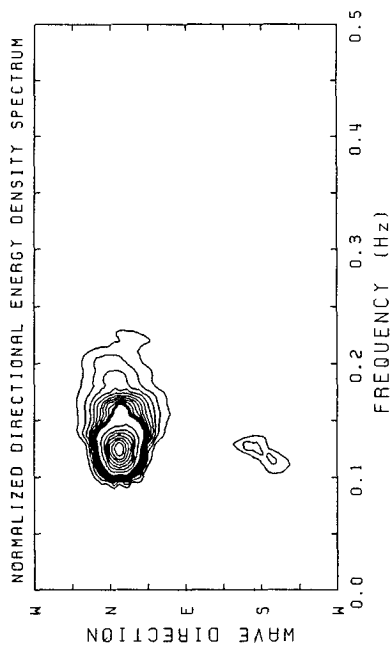


Fig. A.2.2.15. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 09:00)

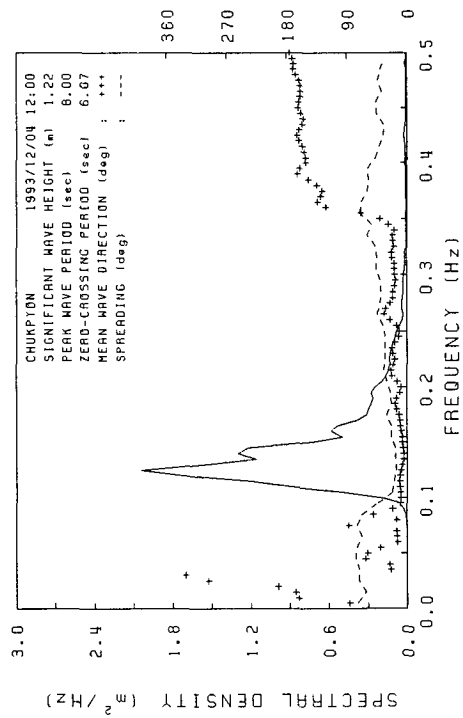
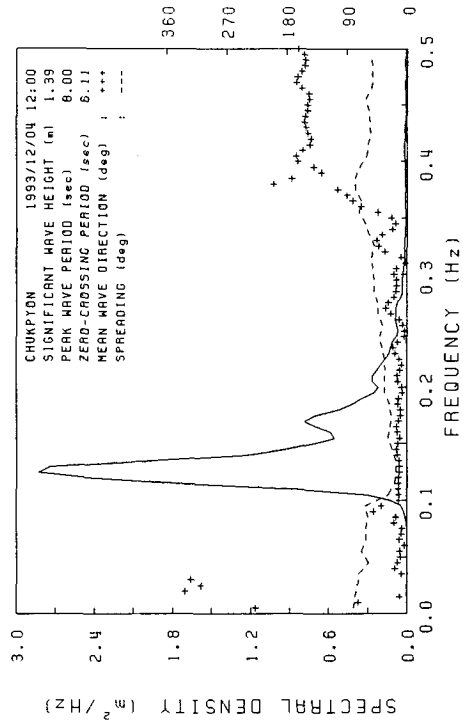
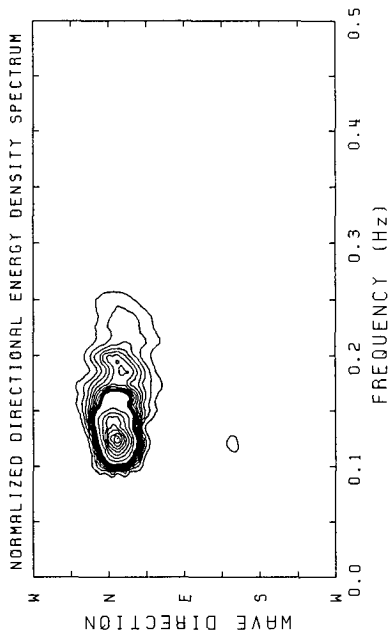
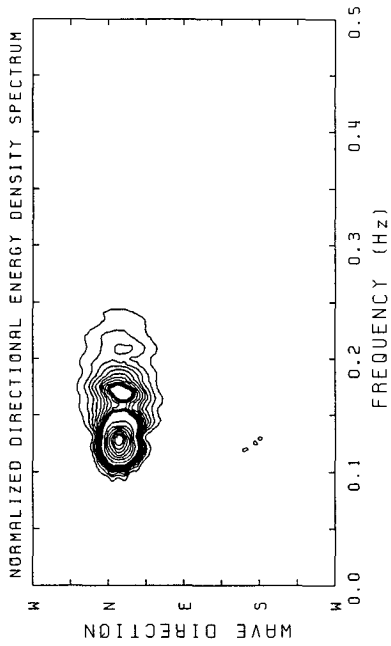


Fig. A.2.2.16. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 12:00)

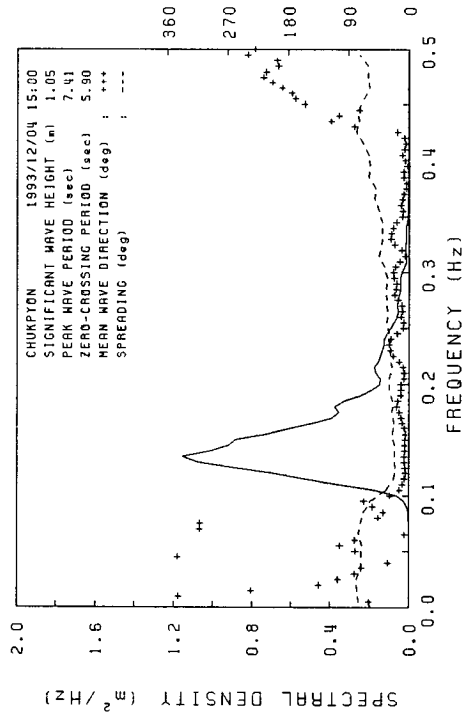
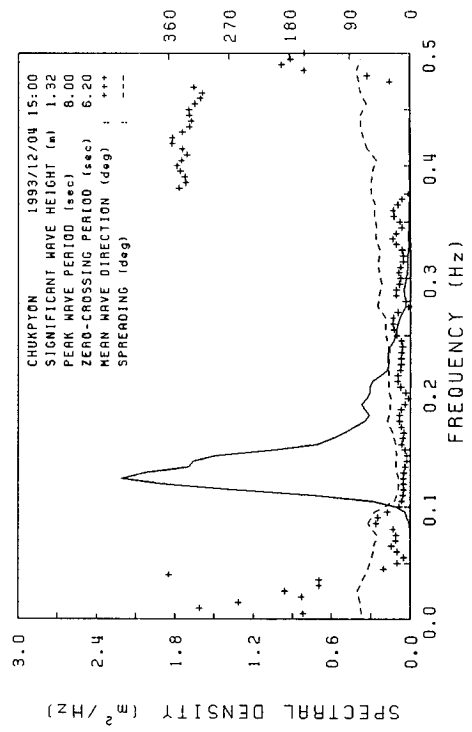
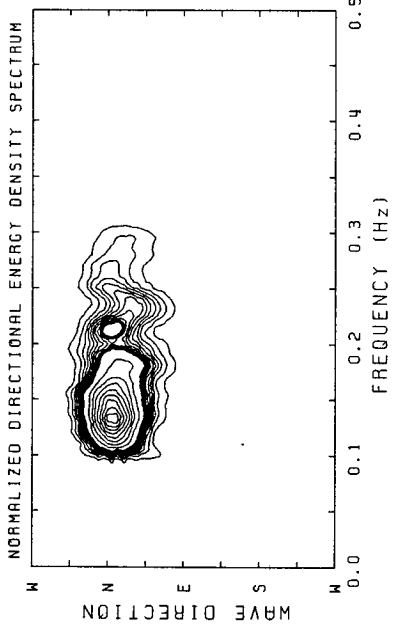
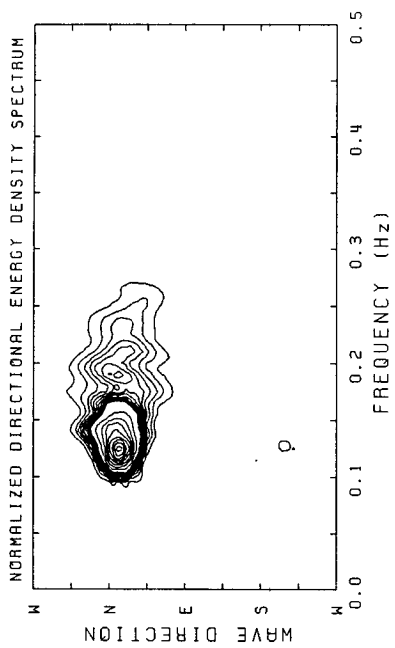


Fig. A.2.2.17. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 15:00)

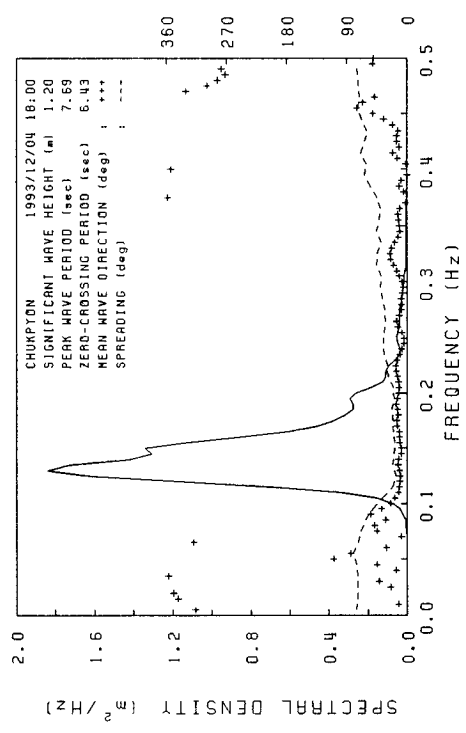
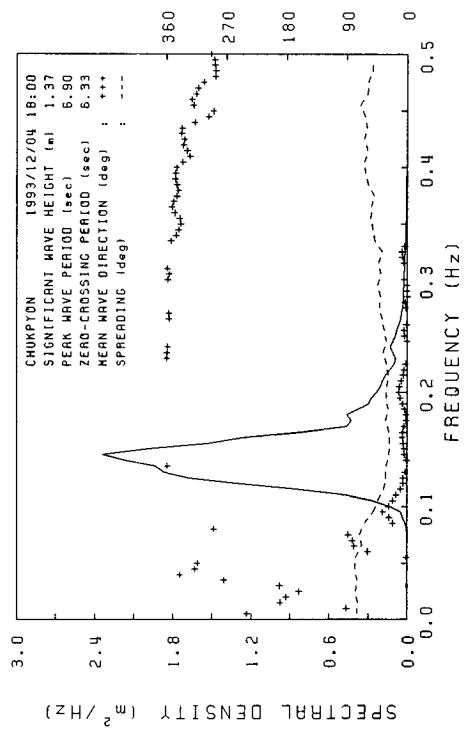
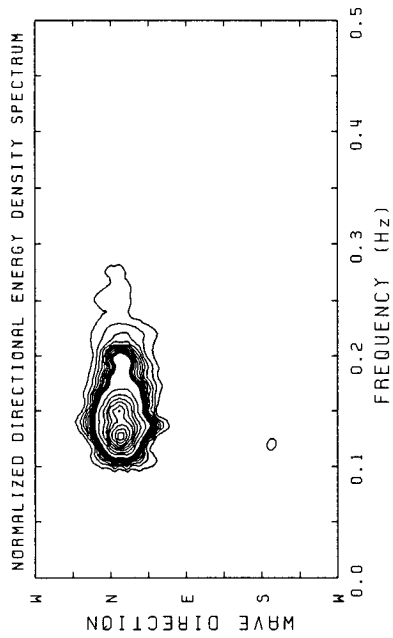
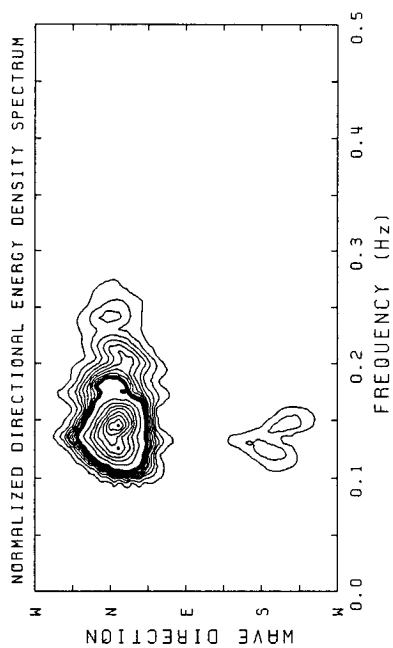


Fig. A.2.2.18. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 18:00)

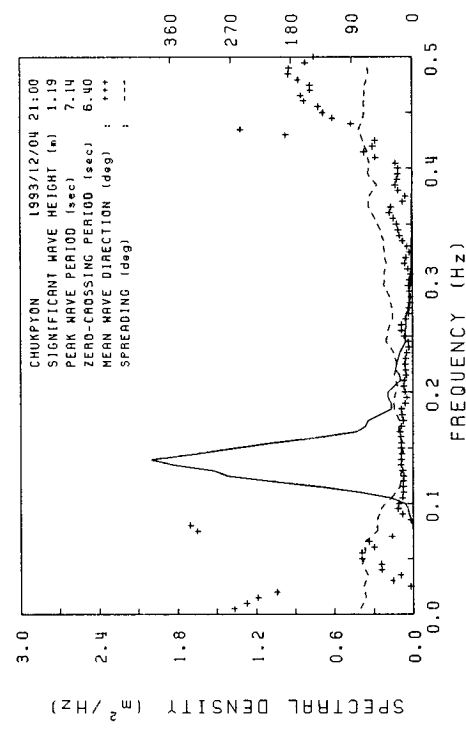
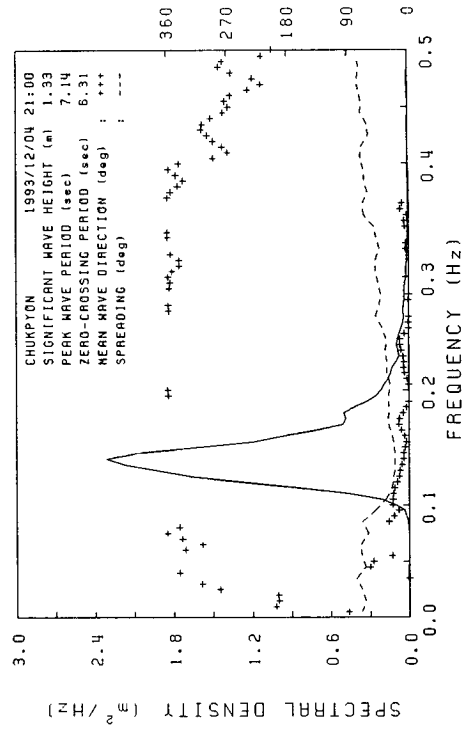
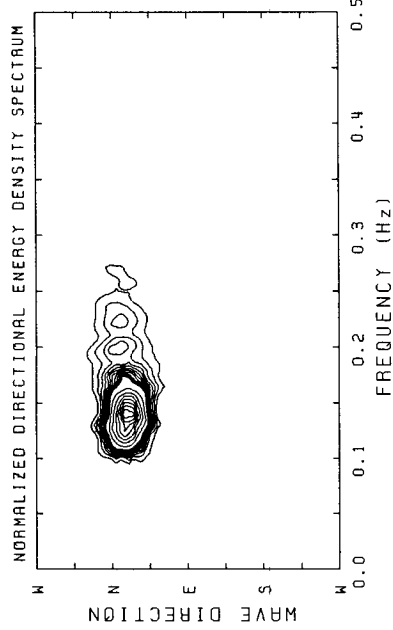
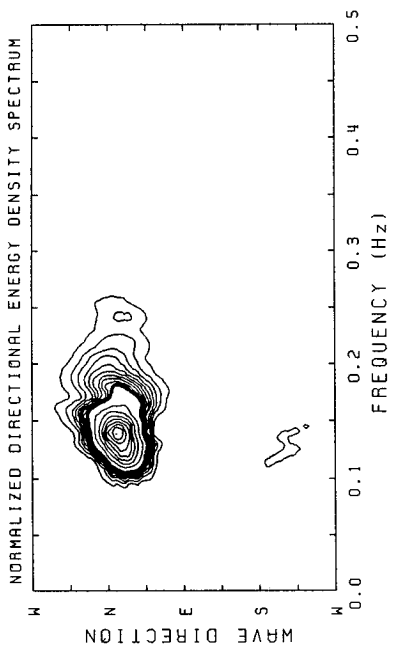


Fig. A.2.2.19. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/04 21:00)

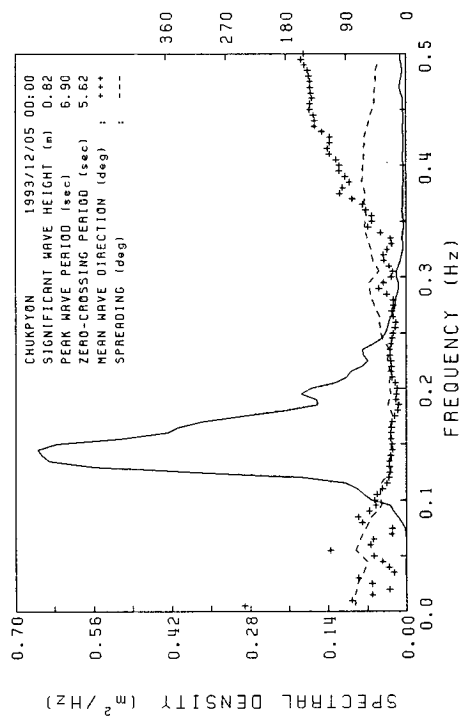
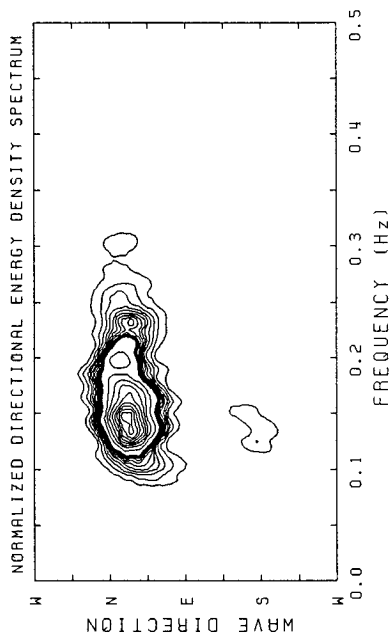
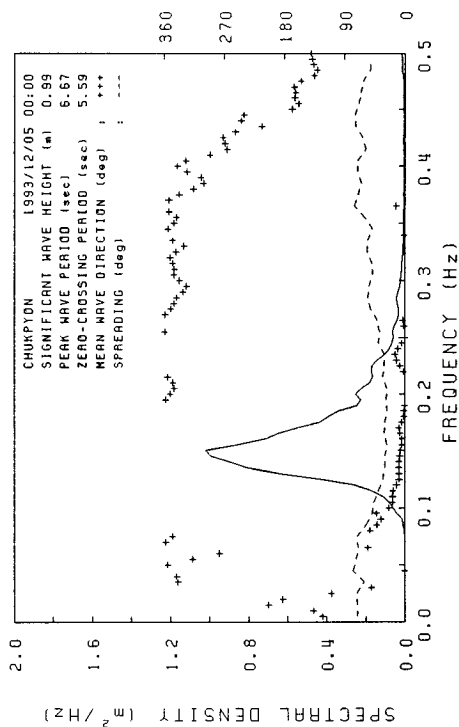
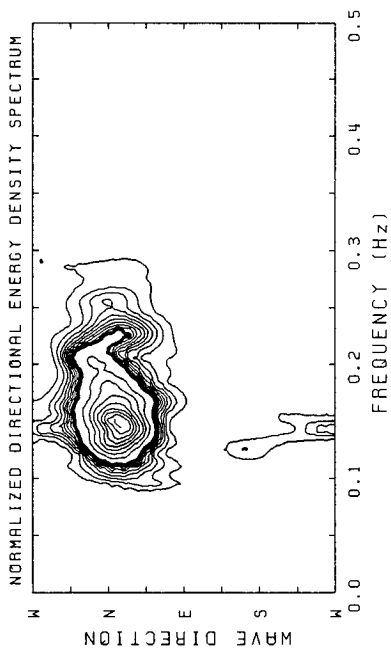


Fig. A.2.2.20. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/05 00:00)

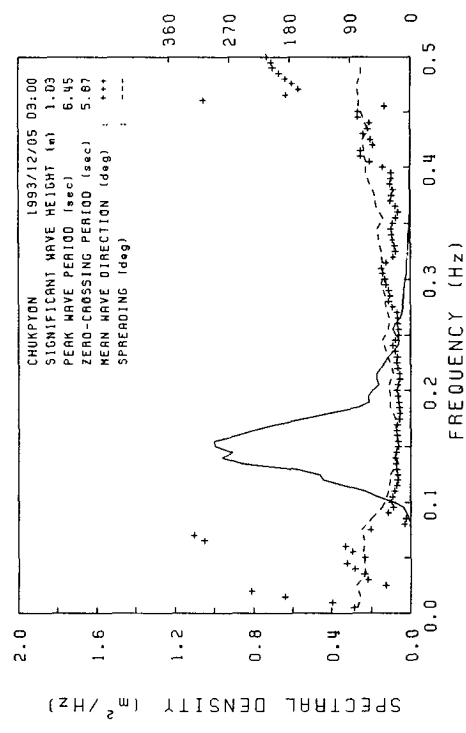
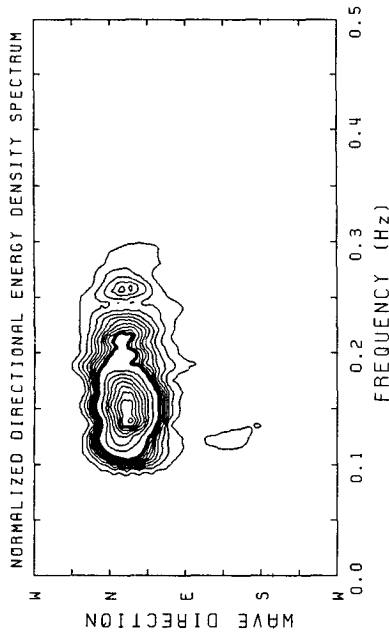
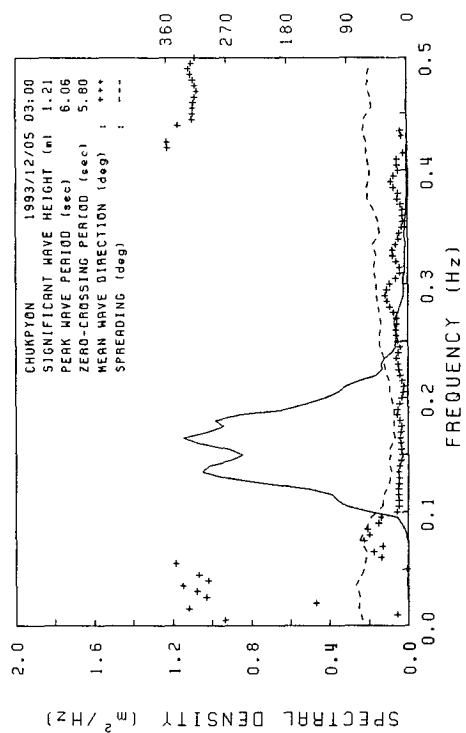
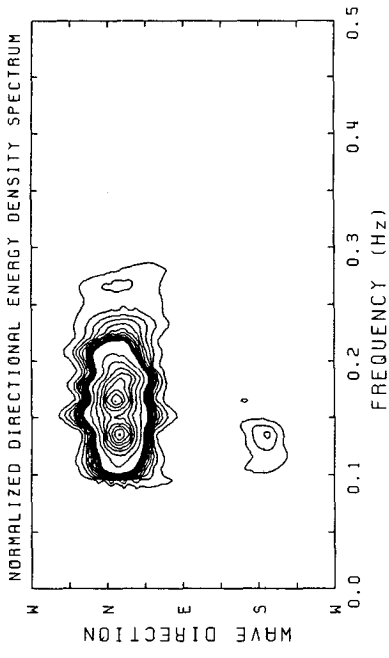


Fig. A.2.2.21. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/05 03:00)

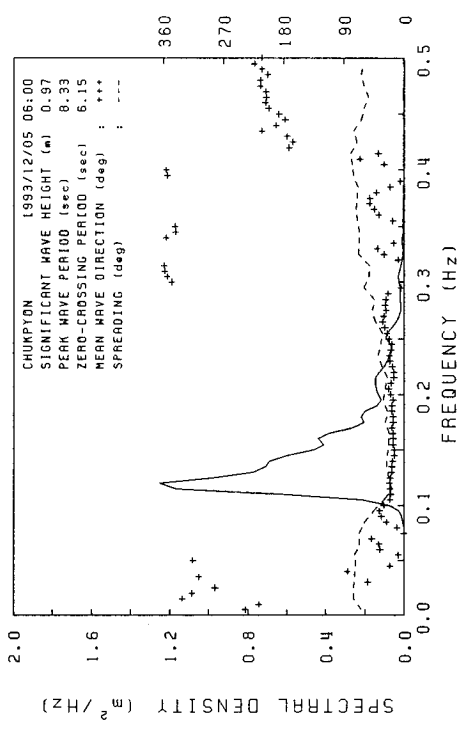
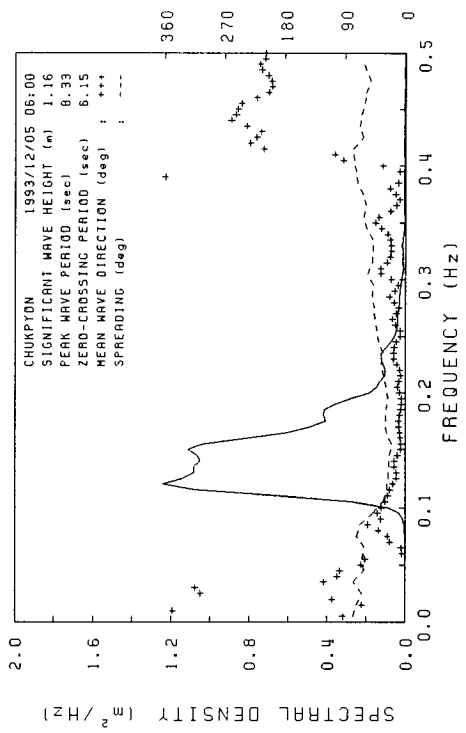
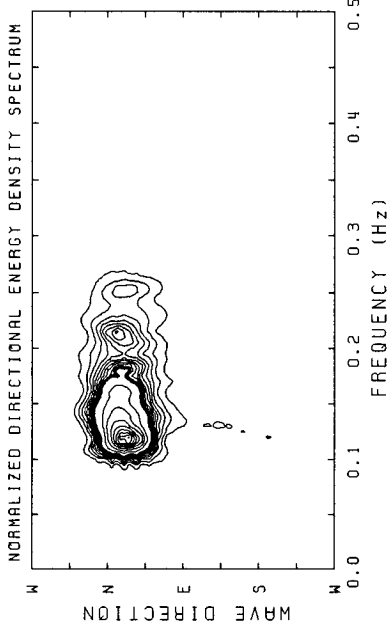
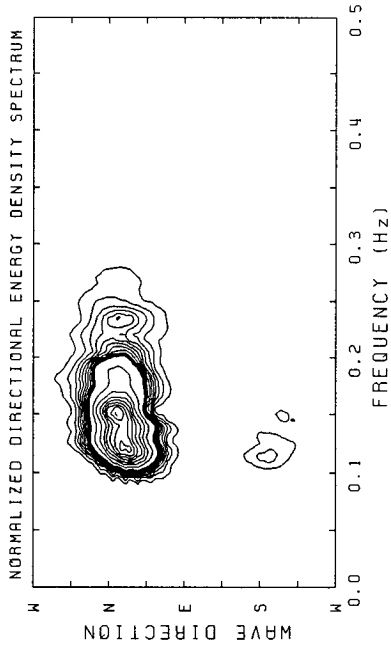


Fig. A.2.2.22. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/05 06:00)

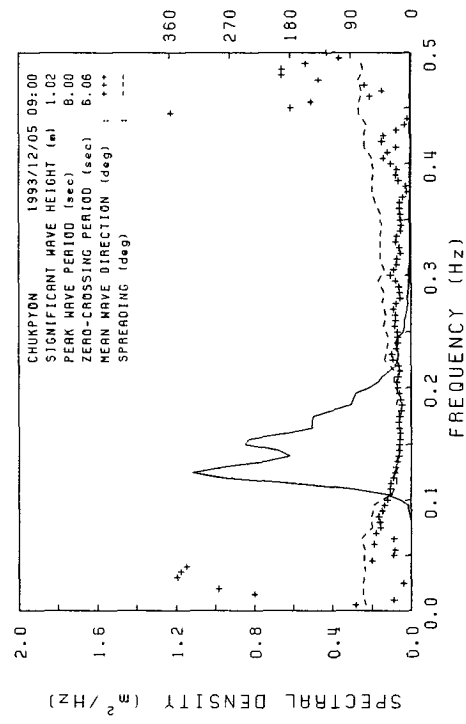
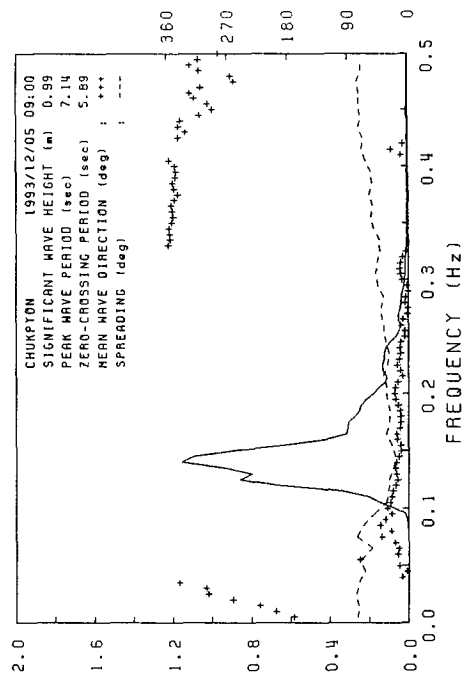
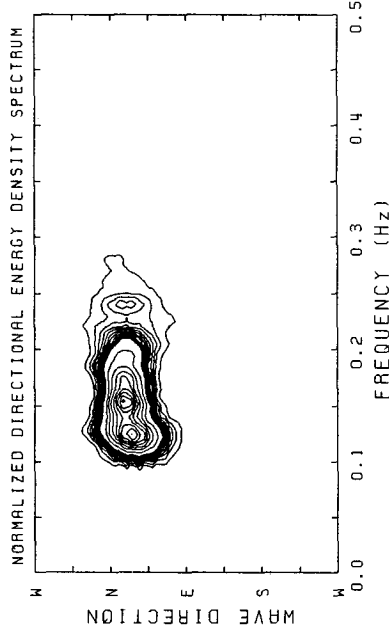
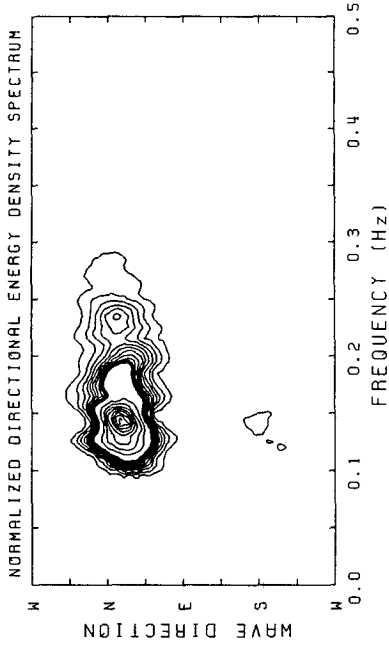


Fig. A.2.2.23. Directional wave spectra measured at WW1 and WW2 station around Chukpyon Harbor(1993/12/05 09:00)

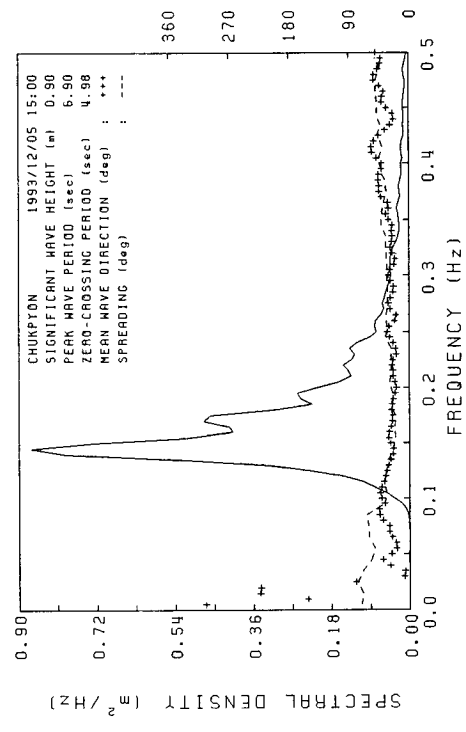
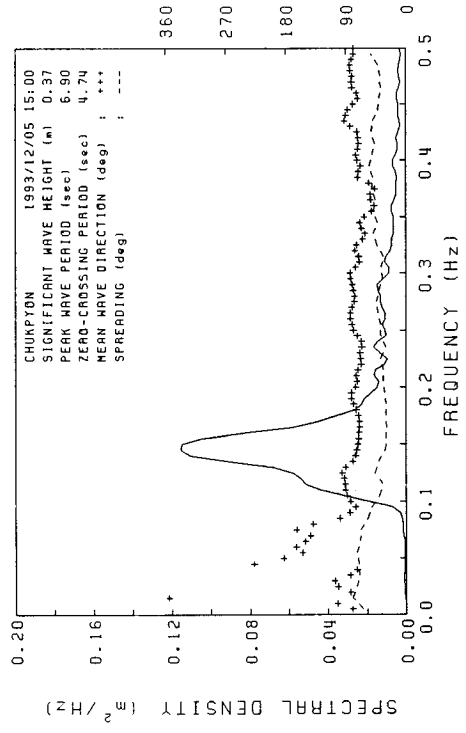
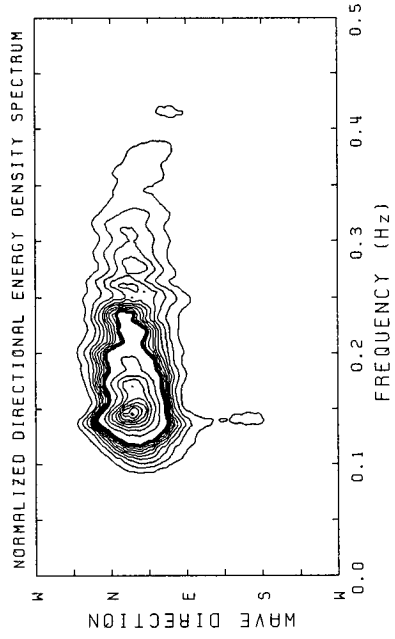
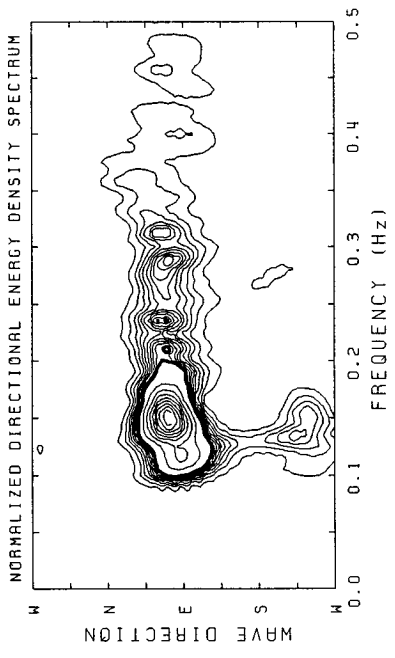


Fig. A.2.2.24. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/05 15:00)

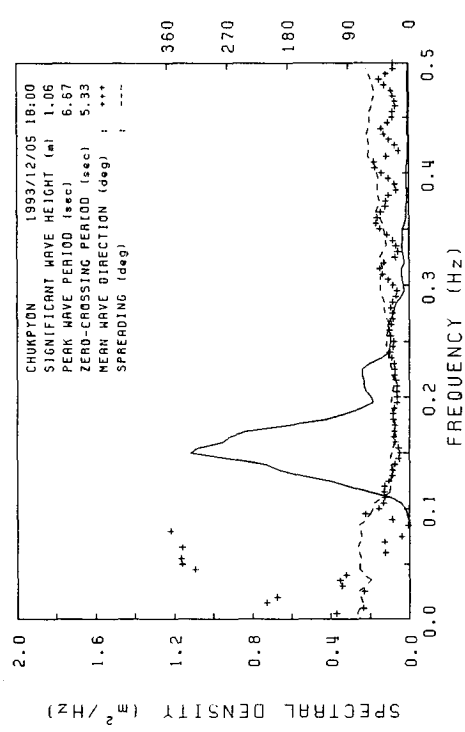
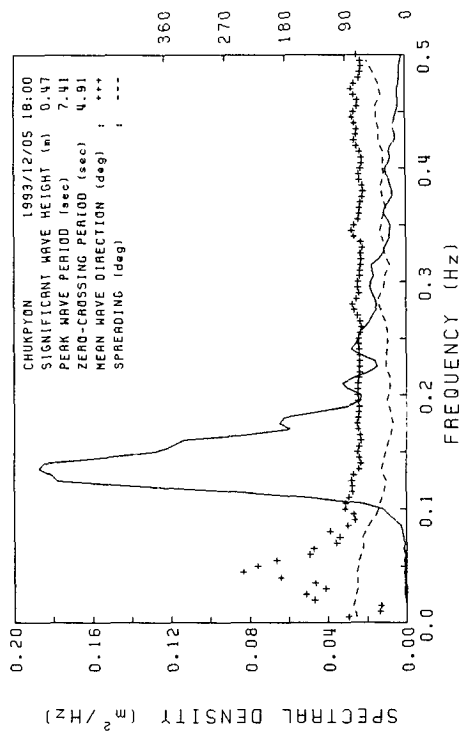
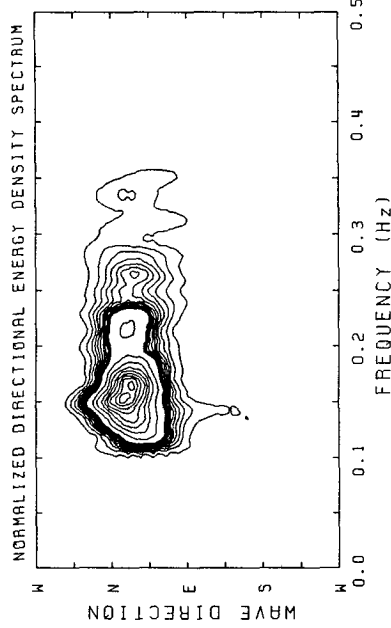
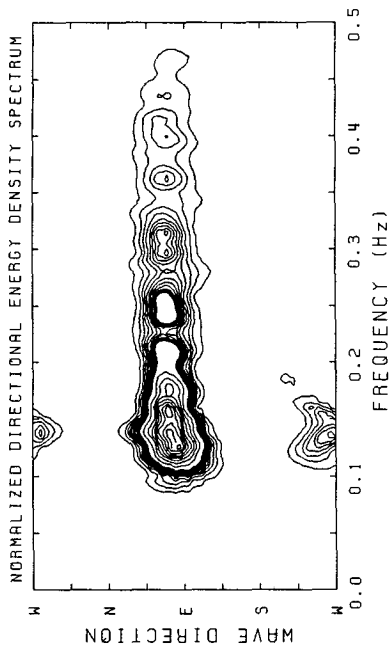


Fig. A.2.2.25. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/05 18:00)

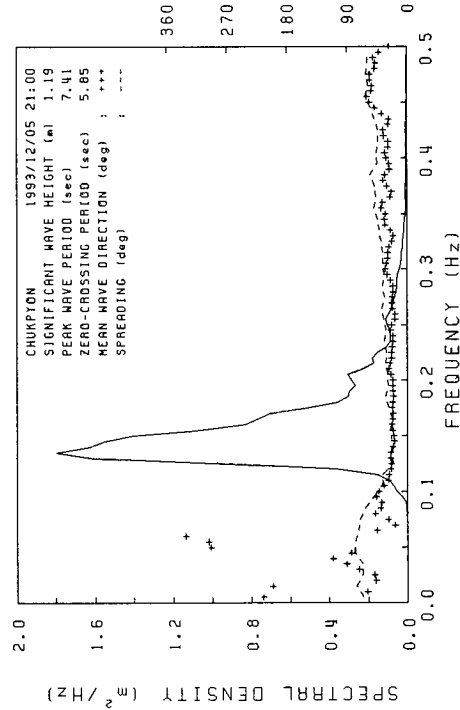
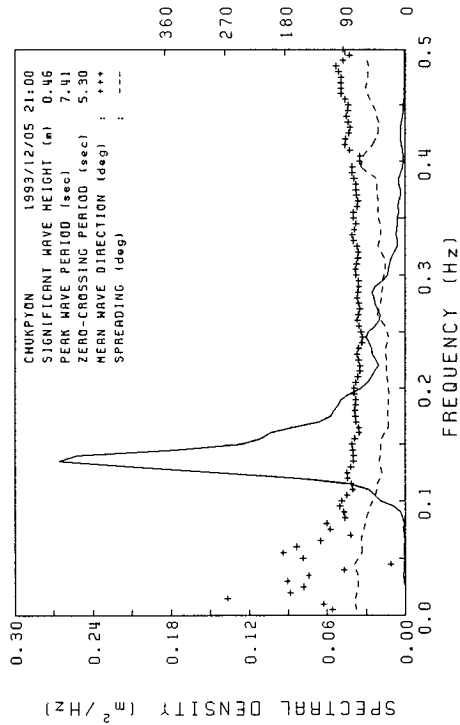
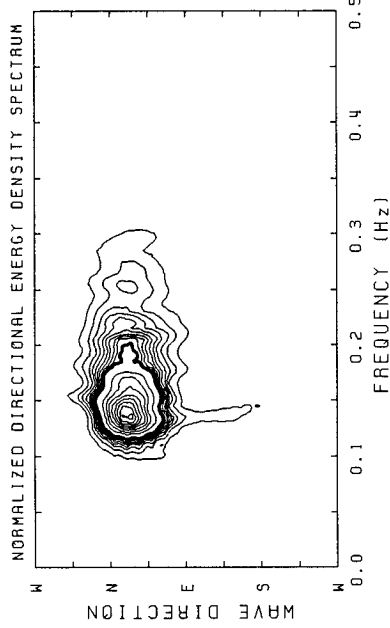
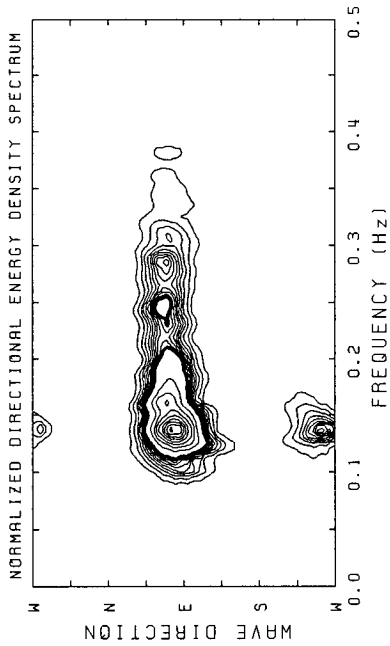


Fig. A.2.2.26. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/05 21:00)

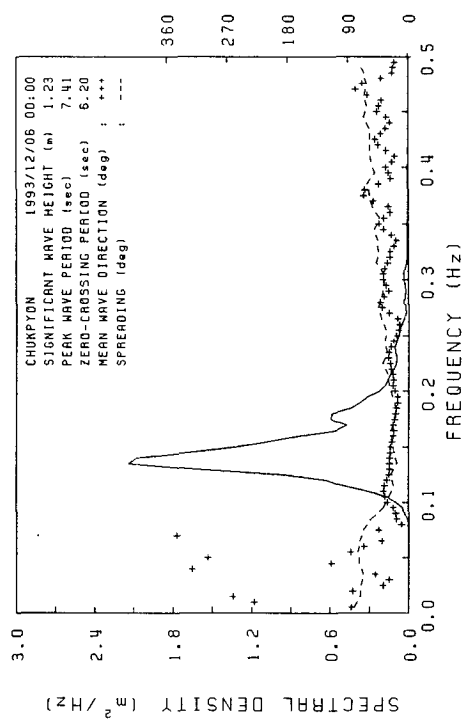
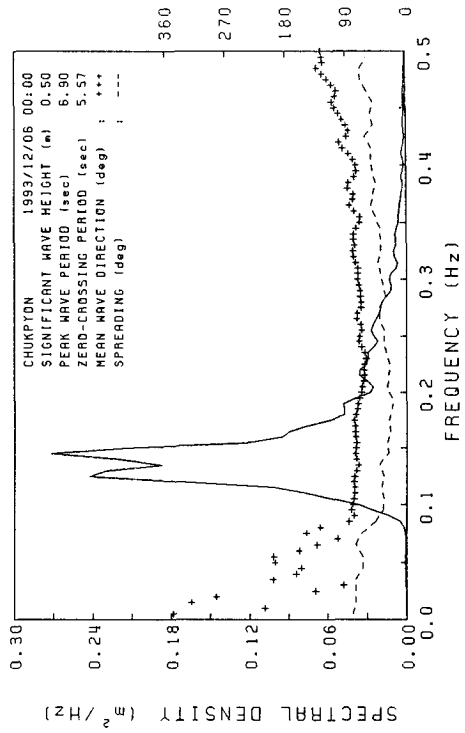
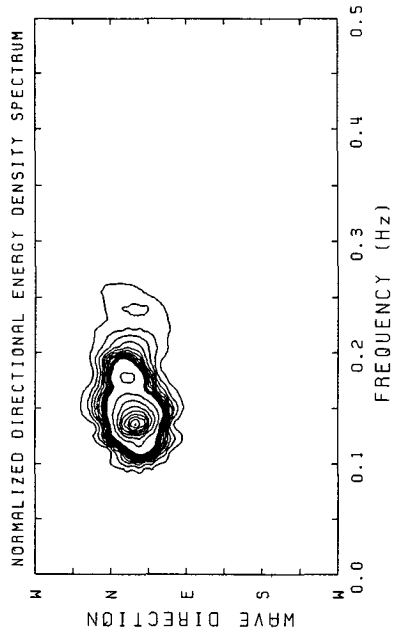
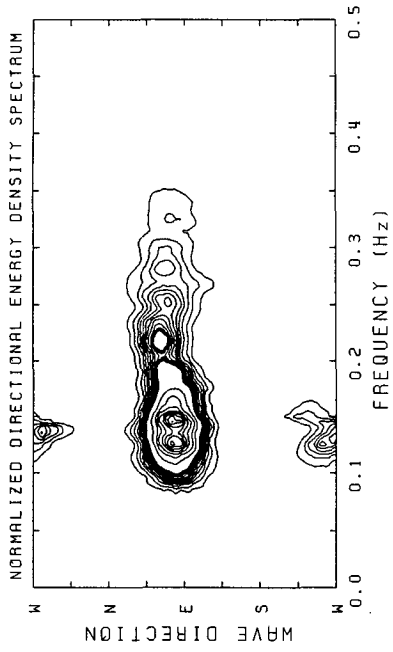


Fig. A.2.27. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 00:00)

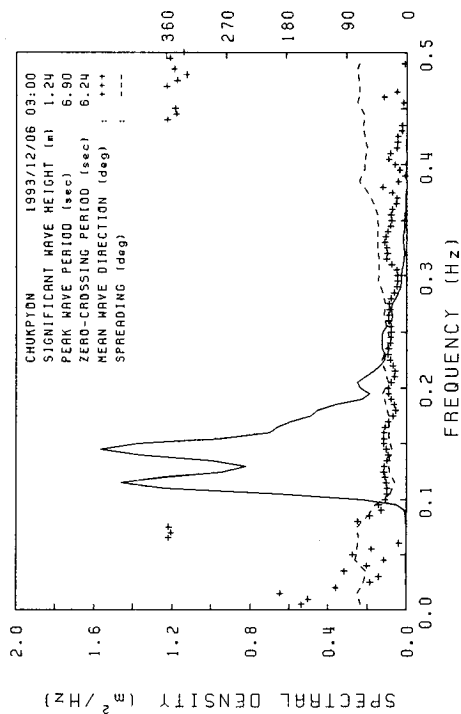
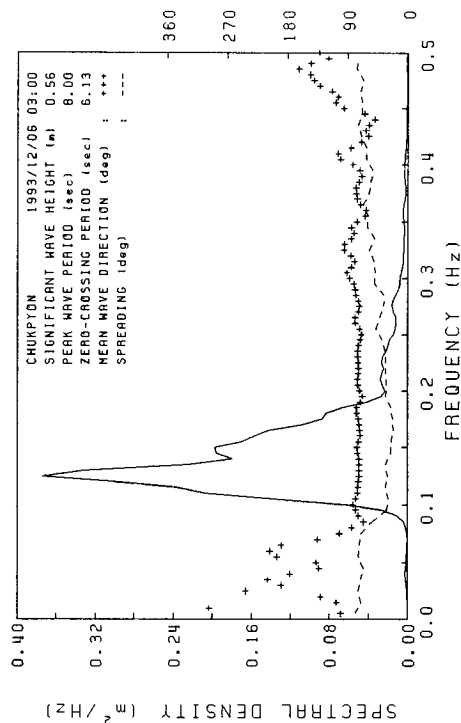
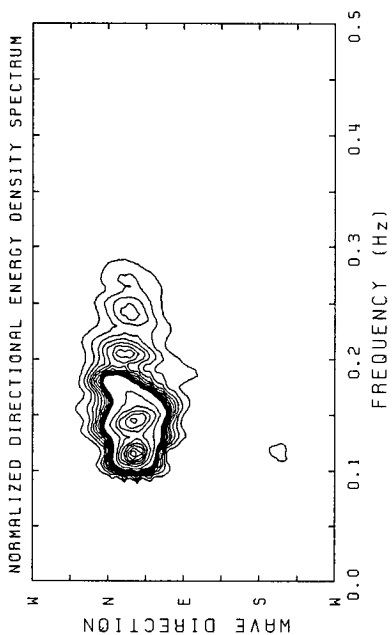
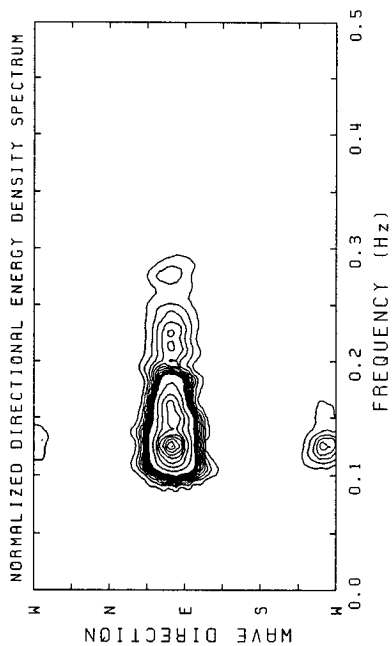


Fig. A.2.2.28. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 03:00)

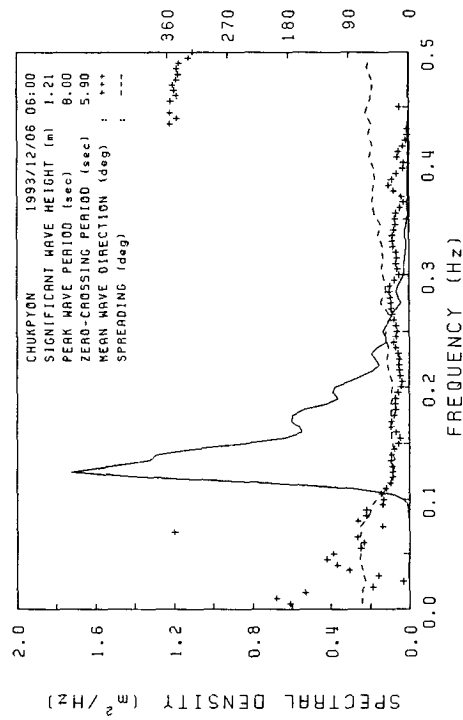
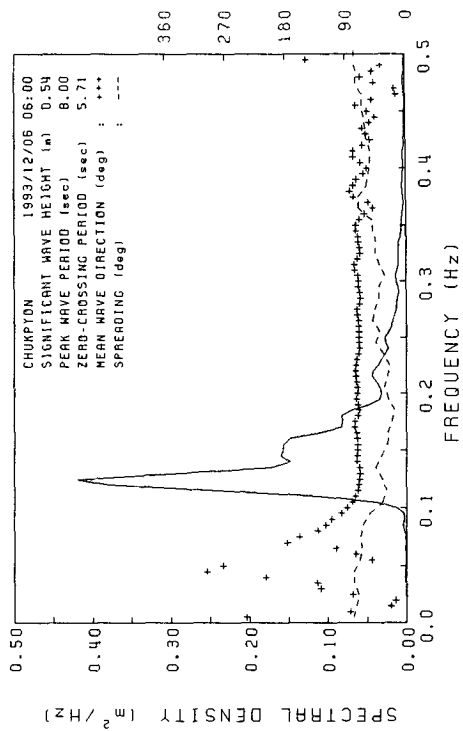
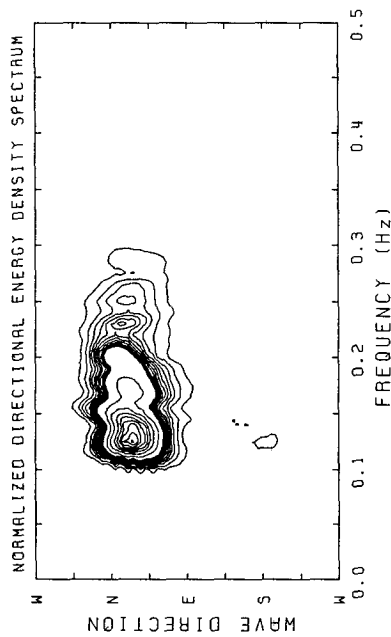
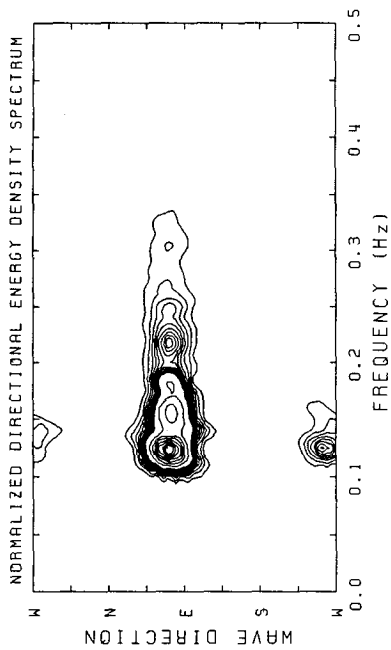


Fig. A.2.2.29. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 06:00)

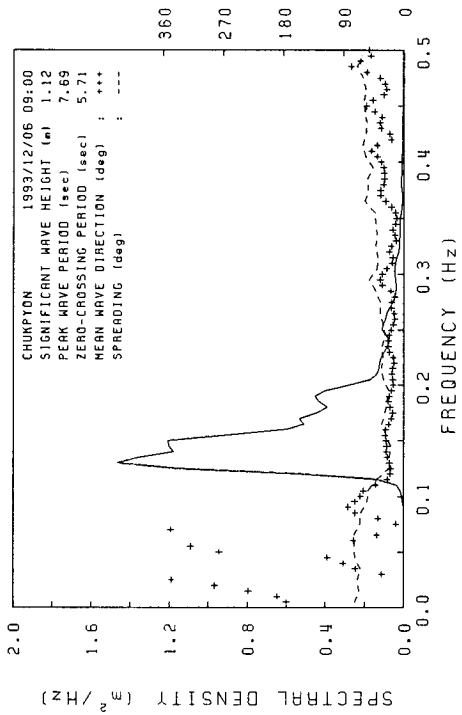
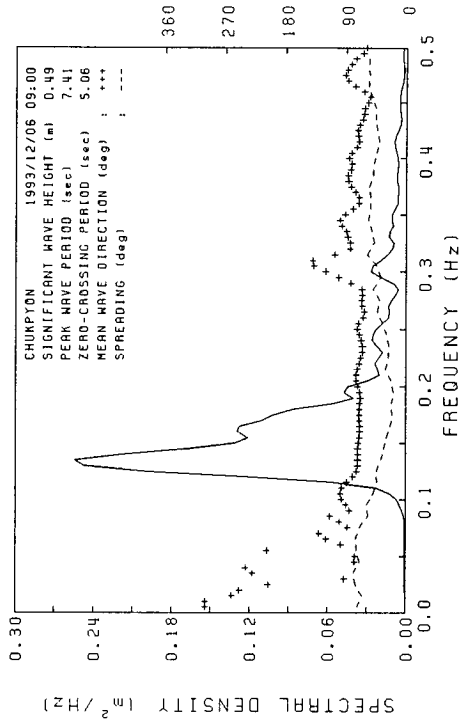
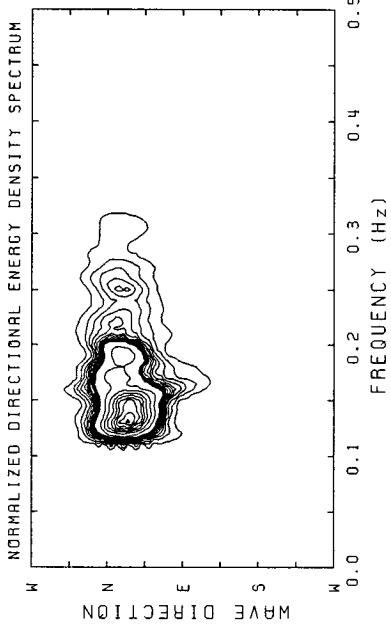
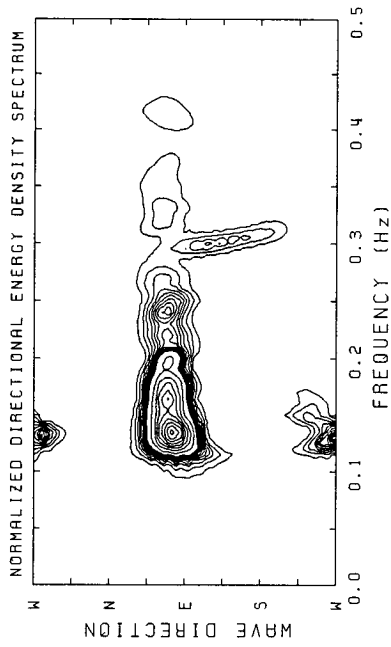


Fig. A.2.2.30. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 09:00)

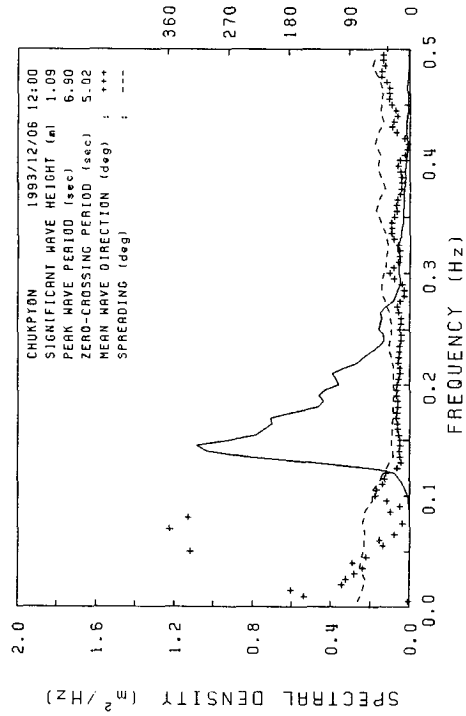
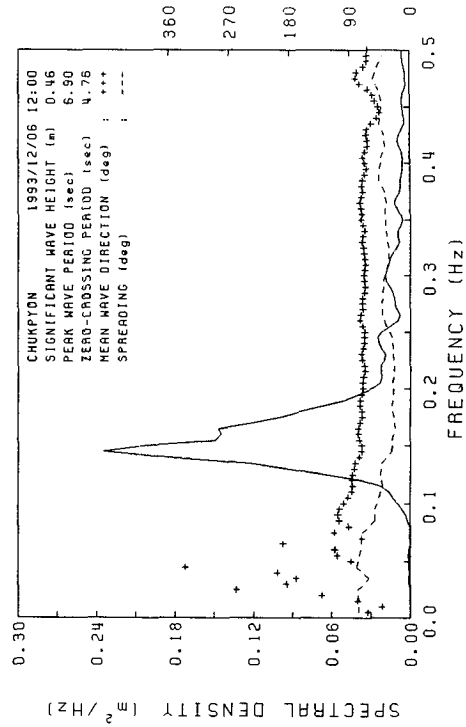
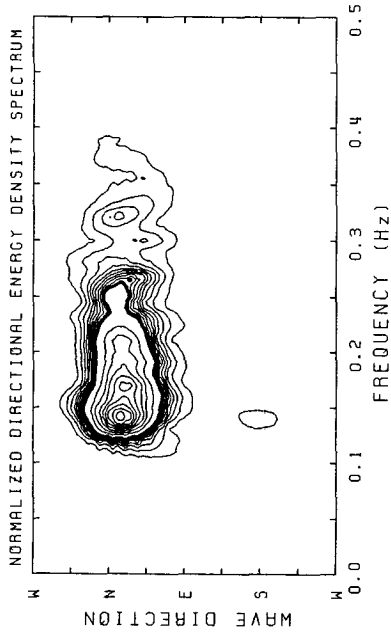
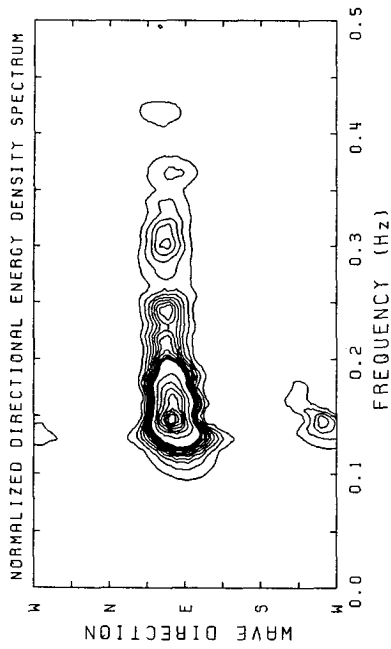


Fig. A.2.2.31. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 12:00)

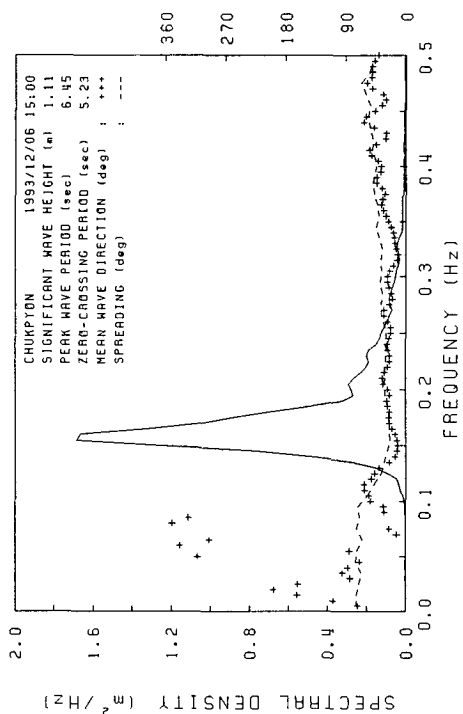
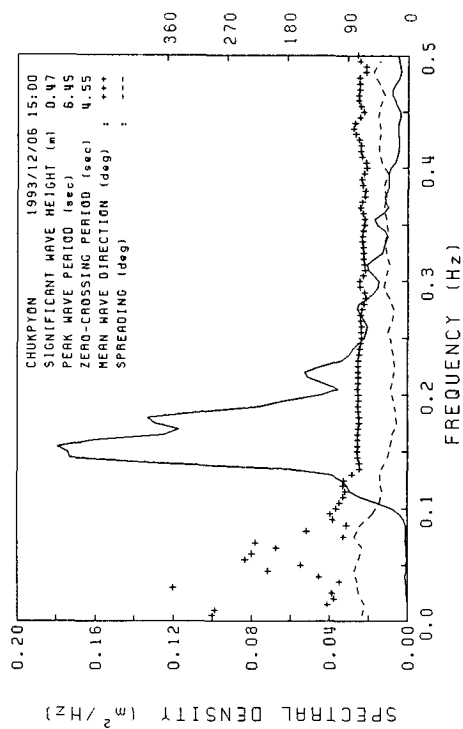
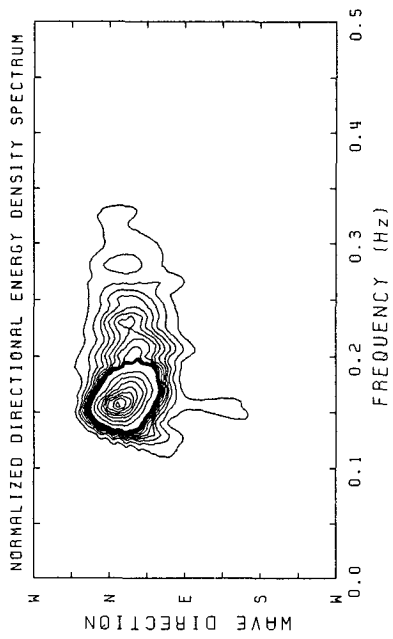
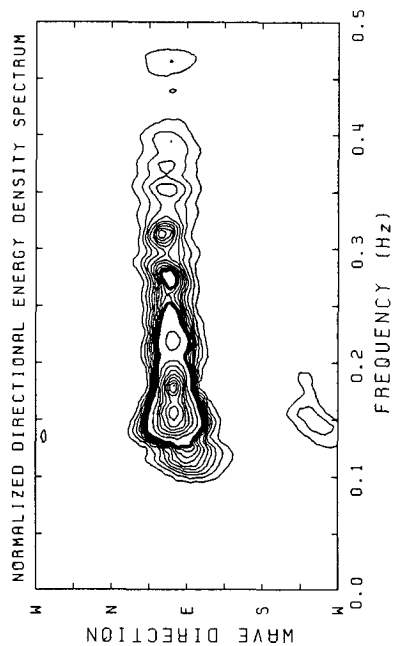


Fig. A.2.2.32. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 15:00)

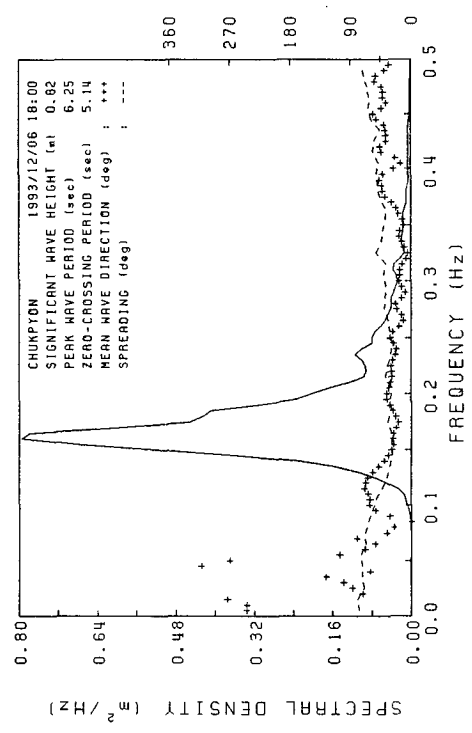
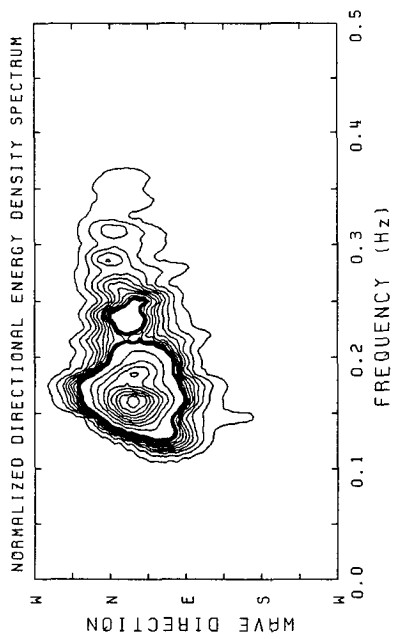
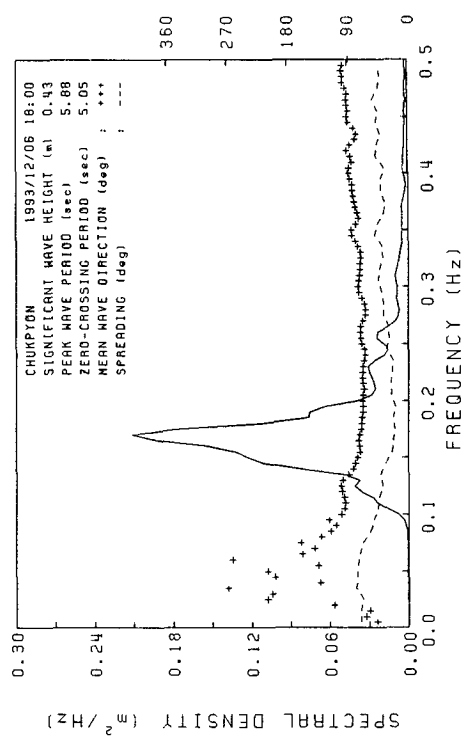
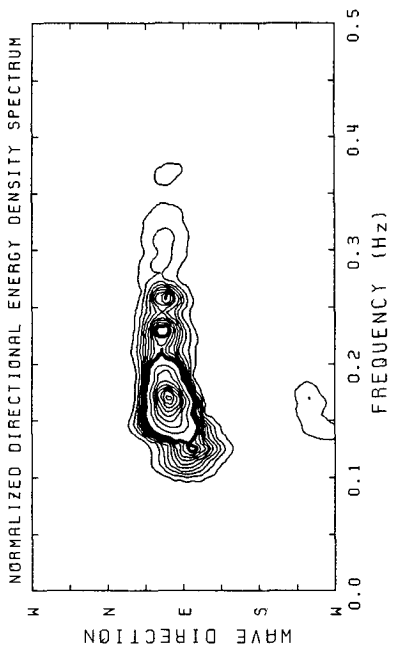


Fig. A.2.2.33. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 18:00)

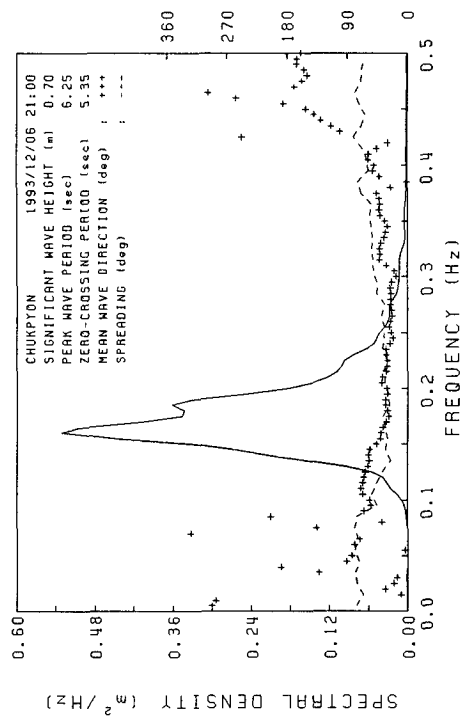
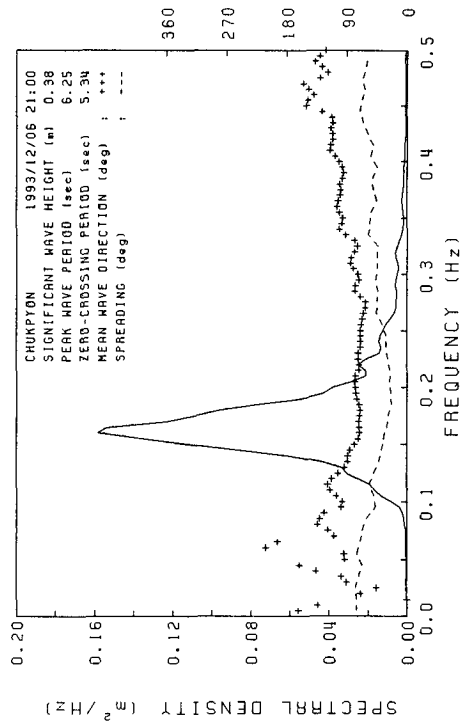
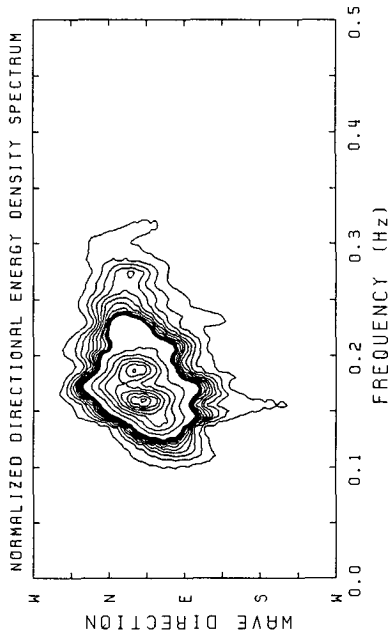
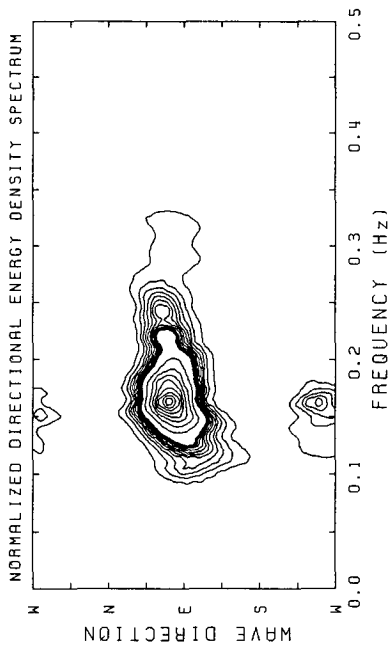


Fig. A.2.2.34. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/06 21:00)

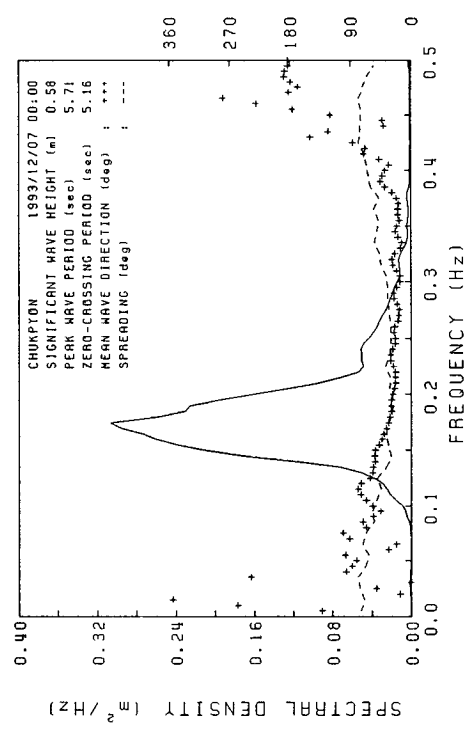
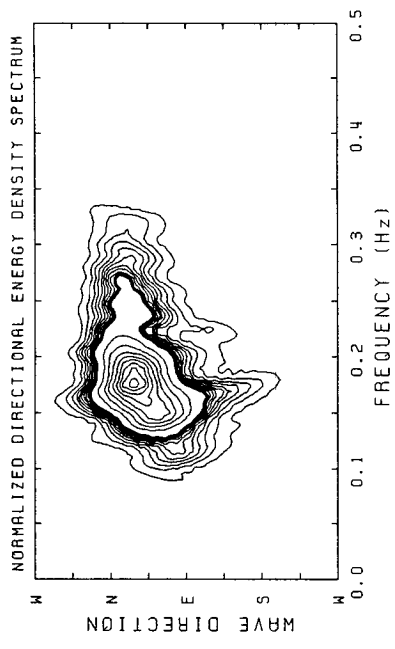
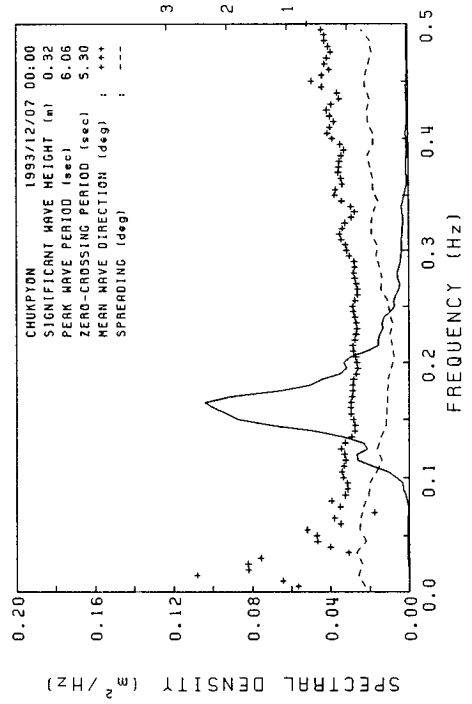
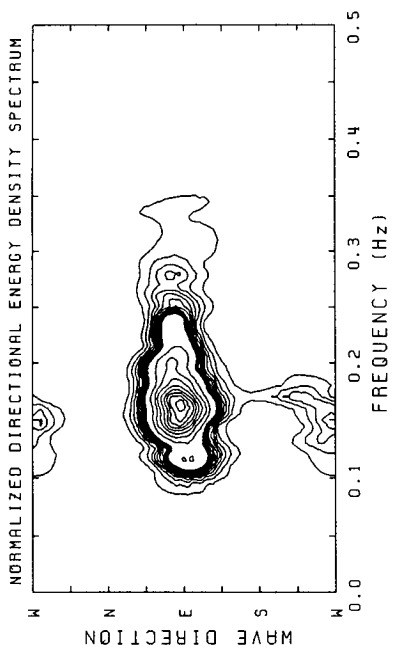


Fig. A.2.2.35. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/07 00:00)

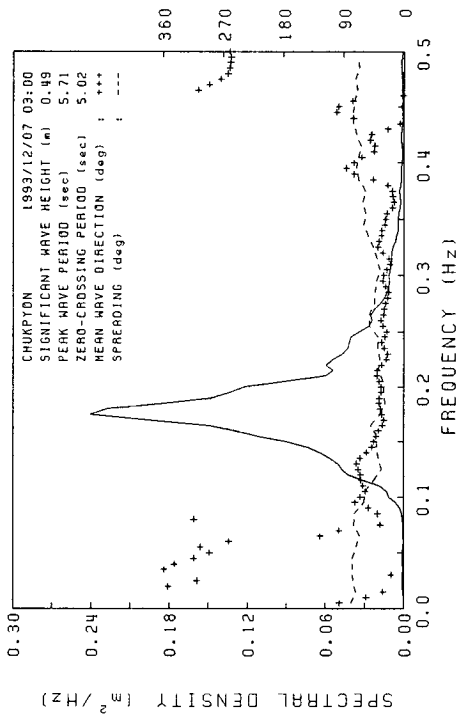
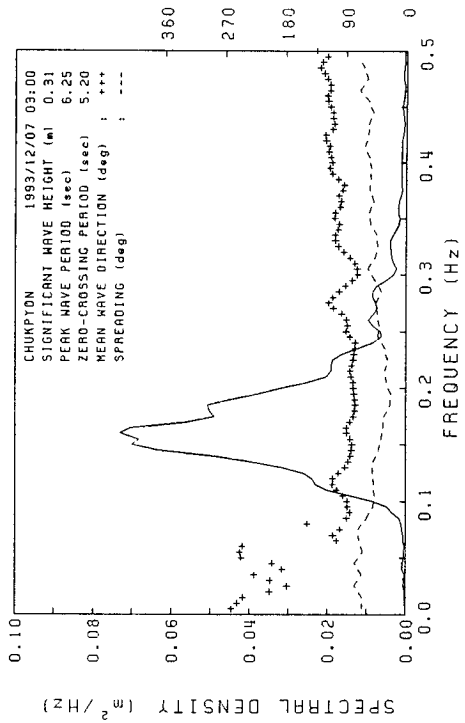
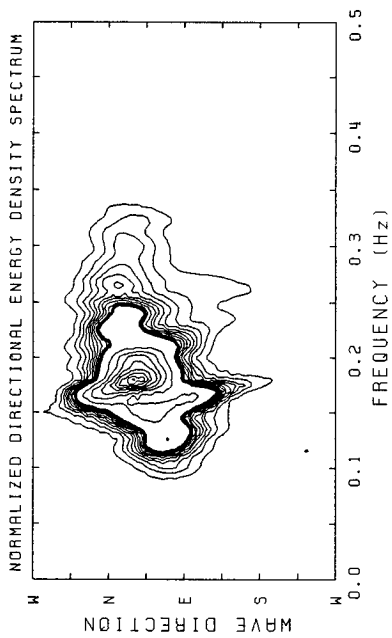
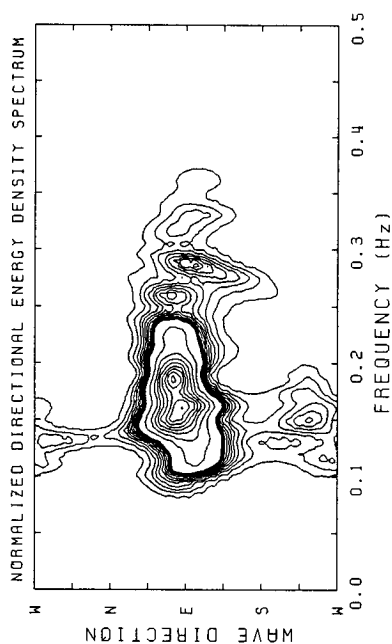


Fig. A.2.2.36. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/07 03:00)

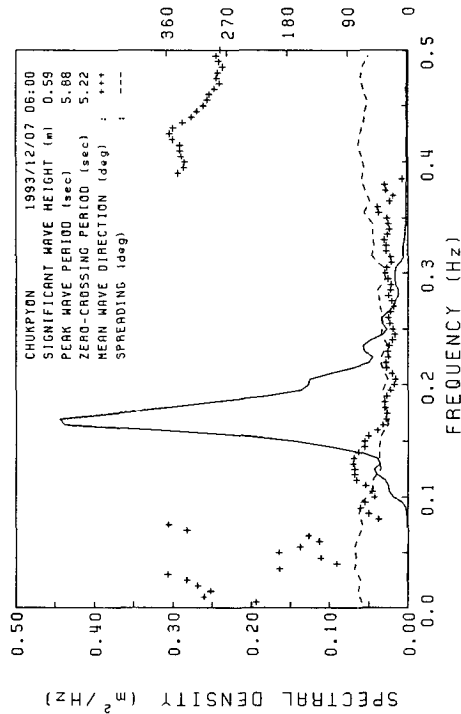
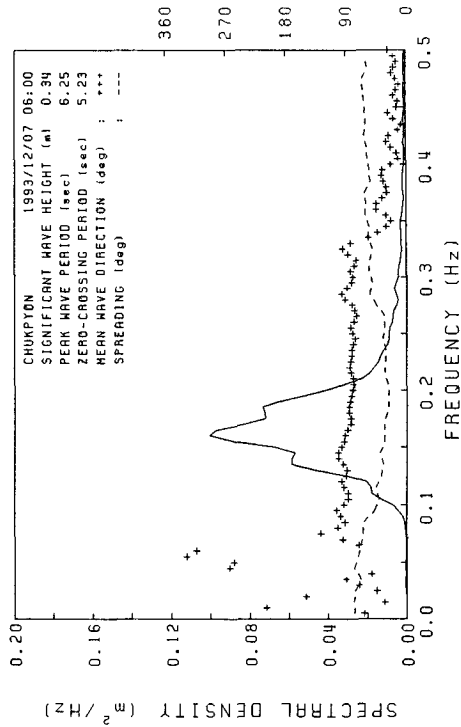
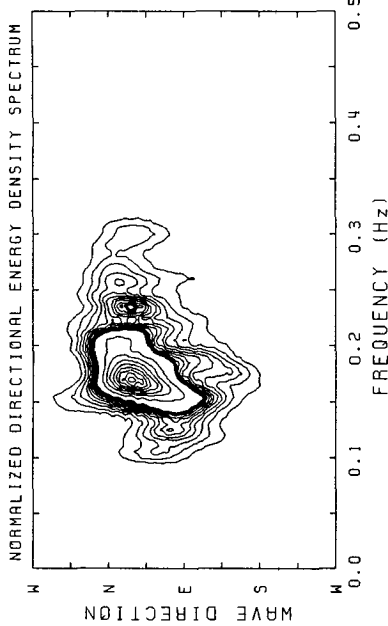
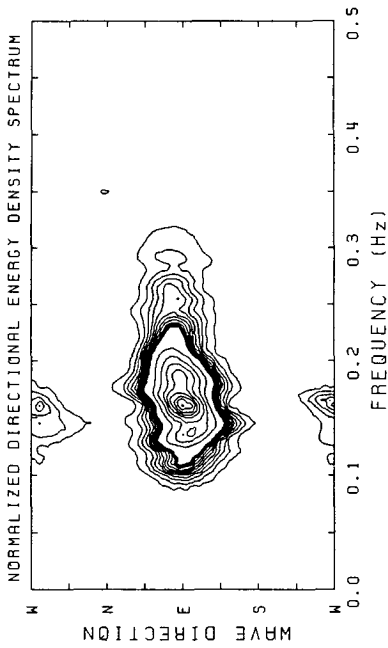


Fig. A.2.2.37. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/07 06:00)

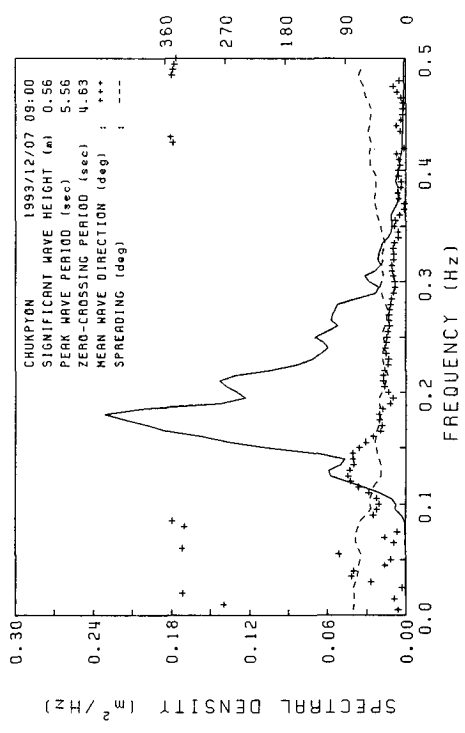
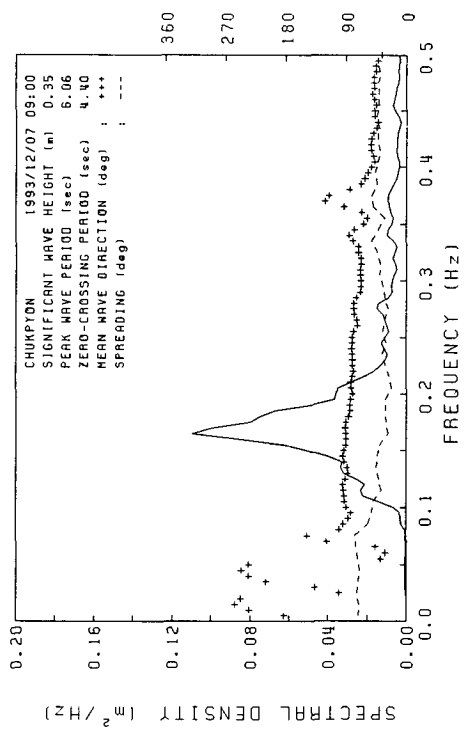
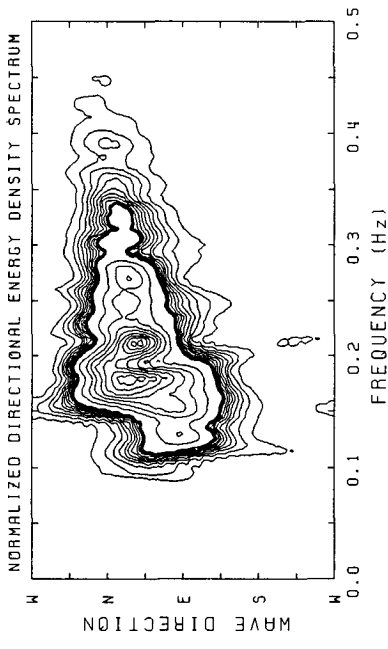
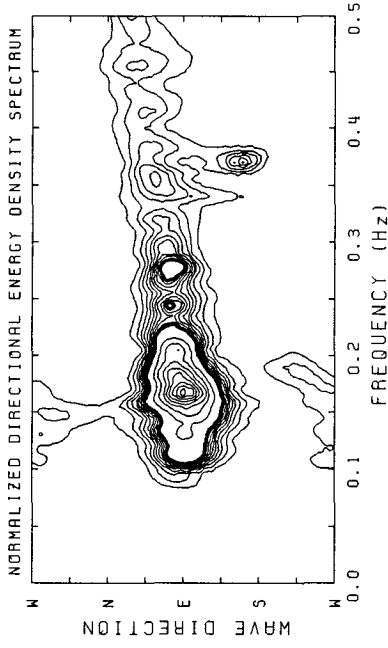


Fig. A.2.2.38. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/07 09:00)

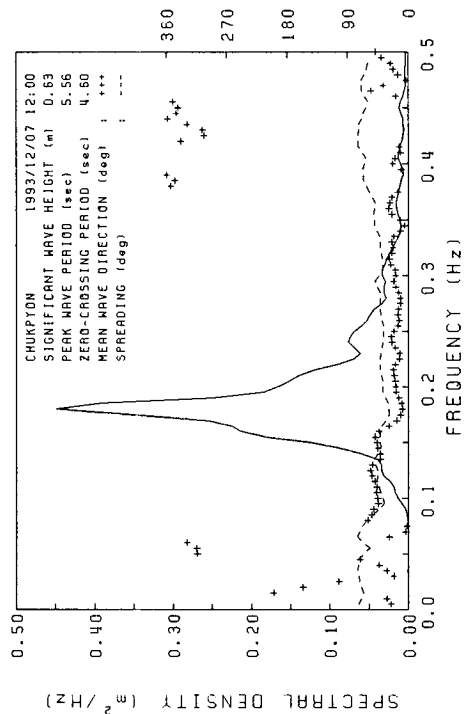
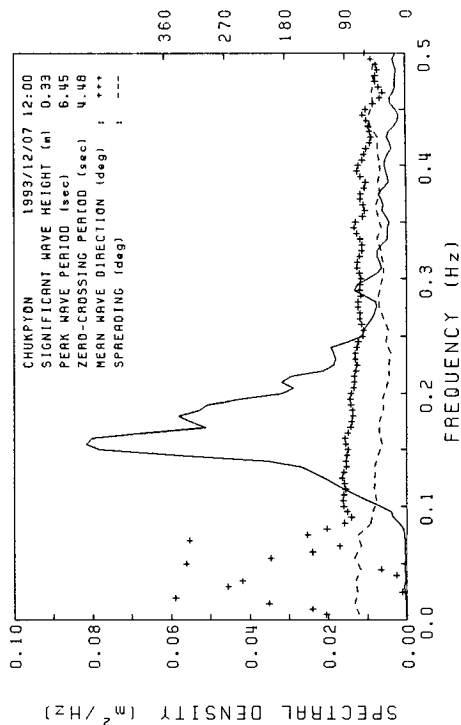
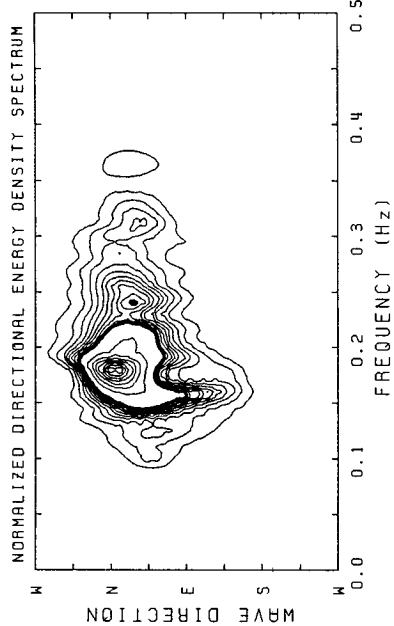
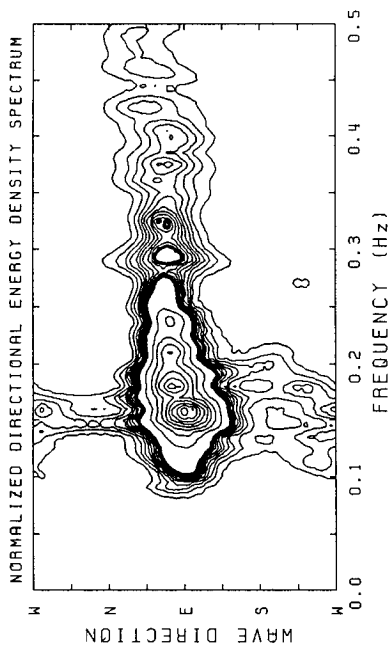


Fig. A.2.2.39. Directional wave spectra measured at WW1 and WW3 station around Chukpyon Harbor(1993/12/07 12:00)

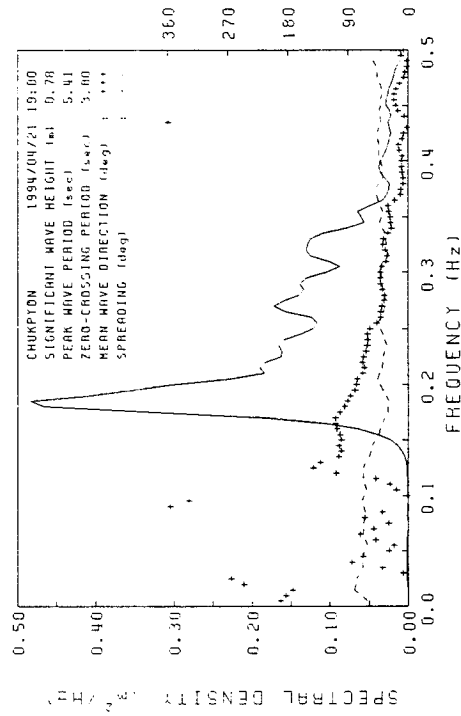
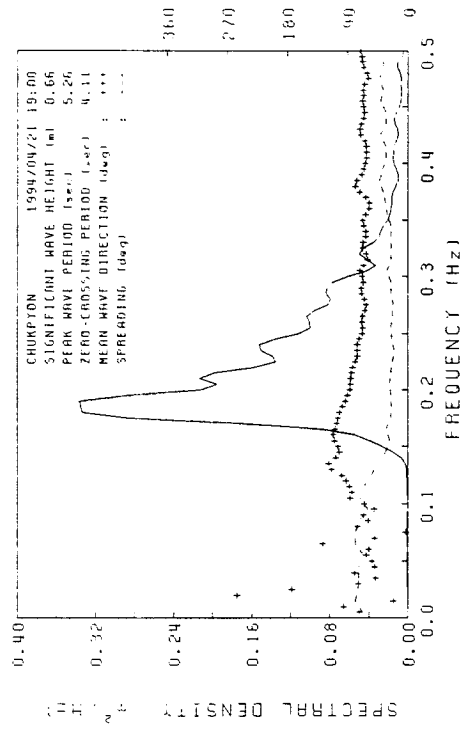
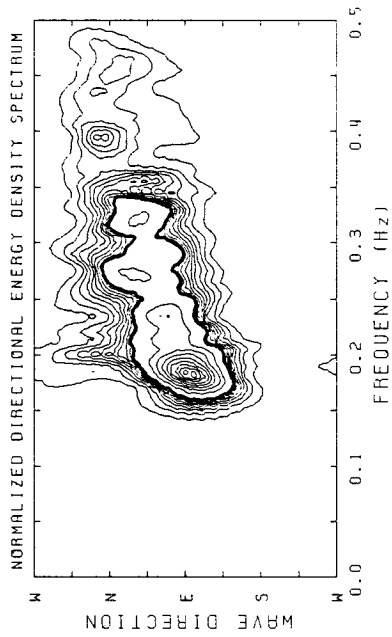
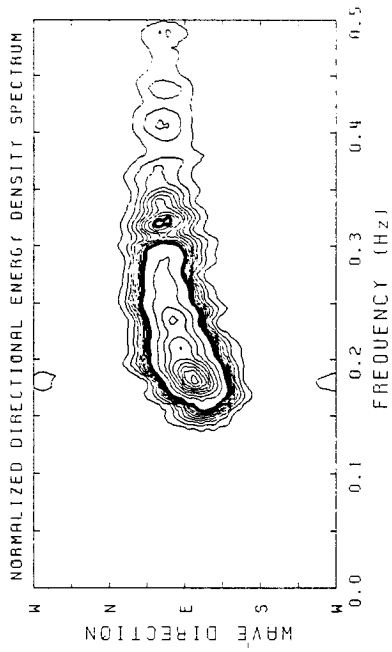


Fig. A.2.2.40. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/21 19:00)

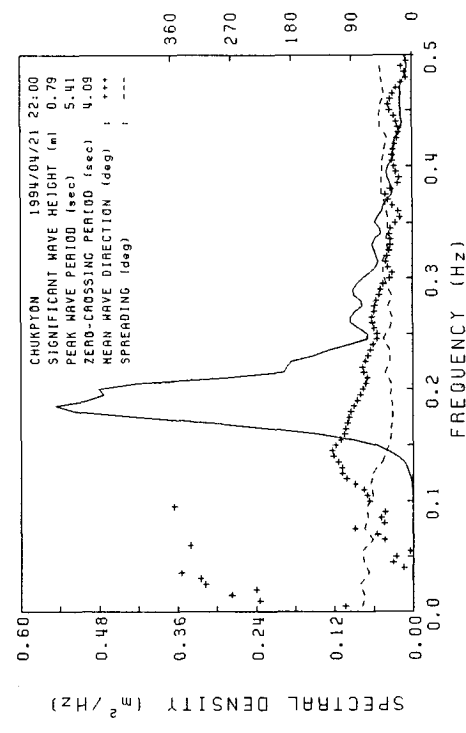
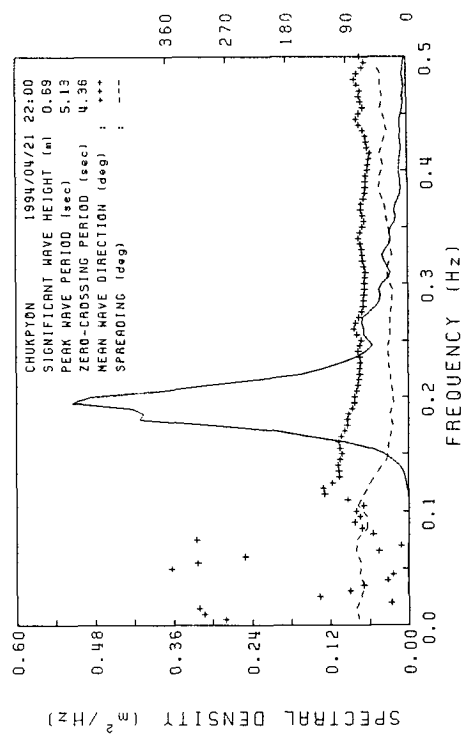
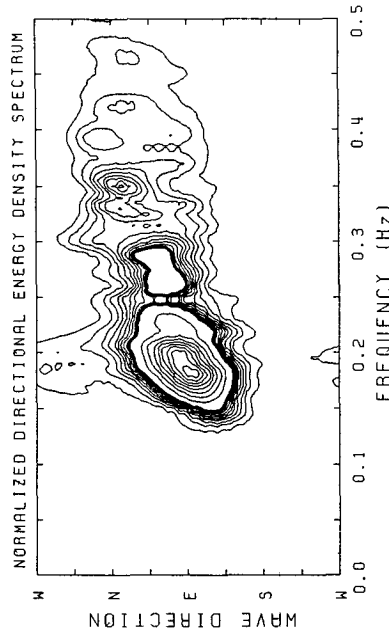
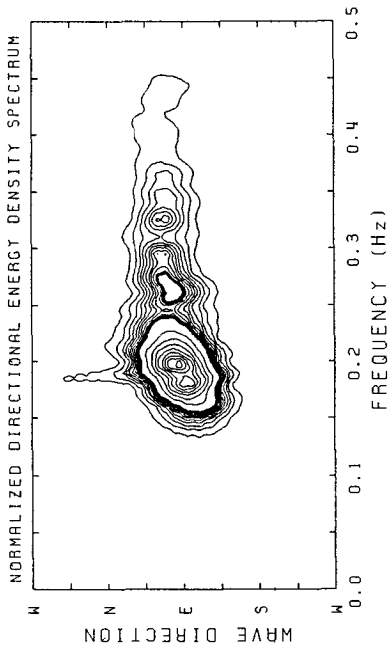


Fig. A.2.2.41. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/21 22:00)

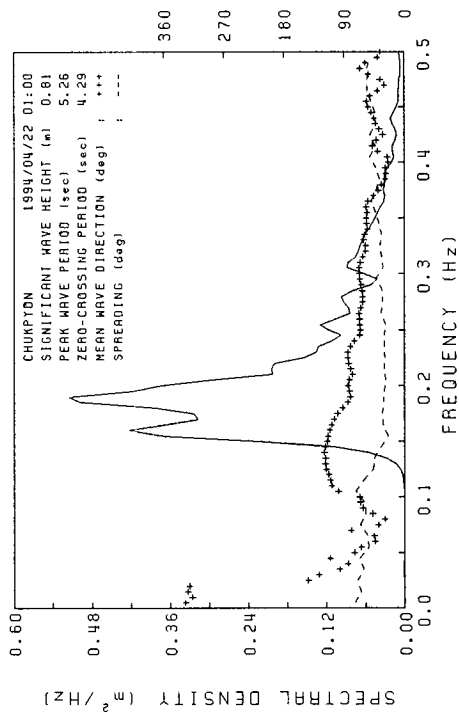
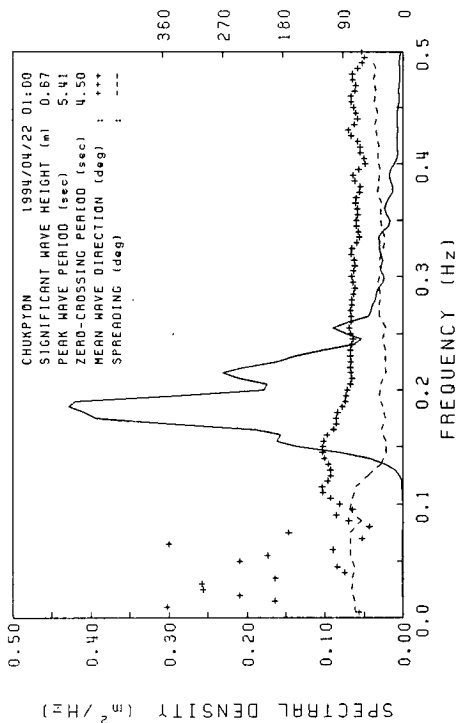
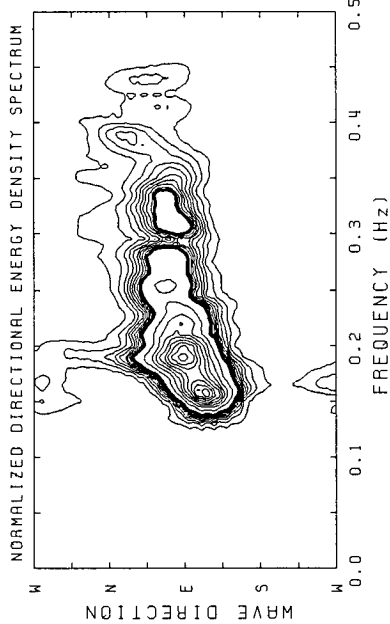
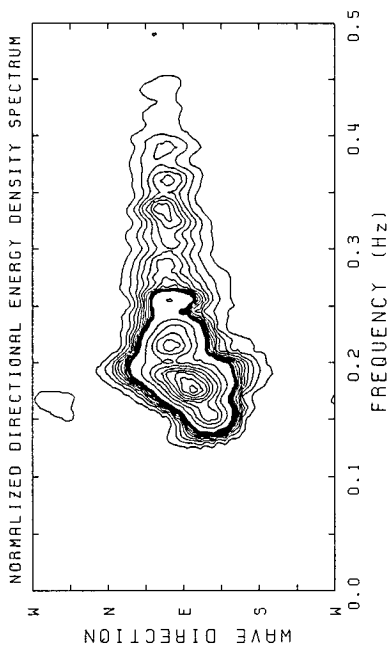


Fig. A.2.2.42. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 01:00)

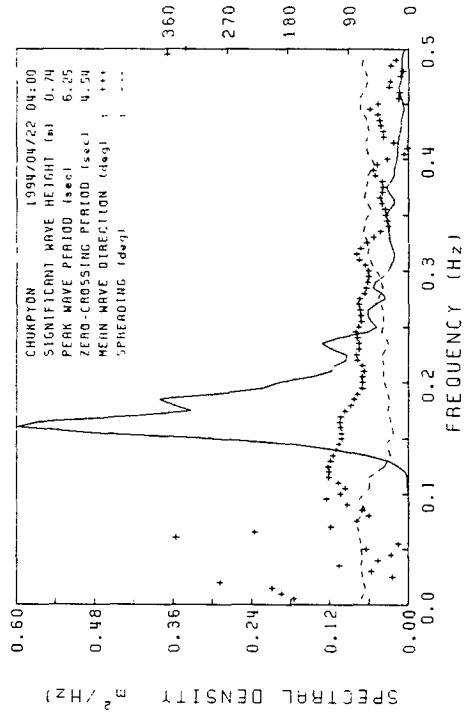
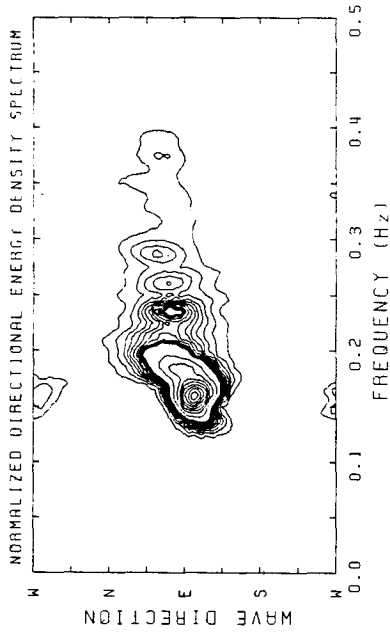
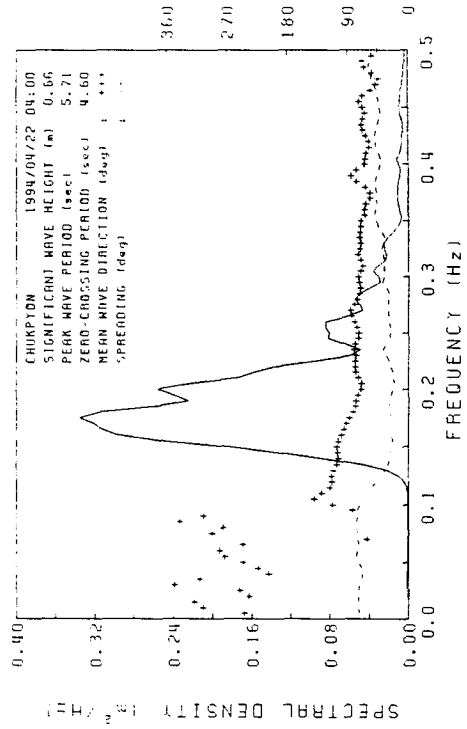
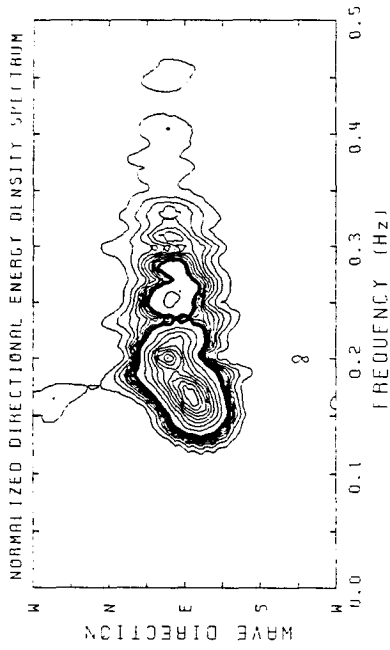


Fig. A.2.2.43. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 04:00)

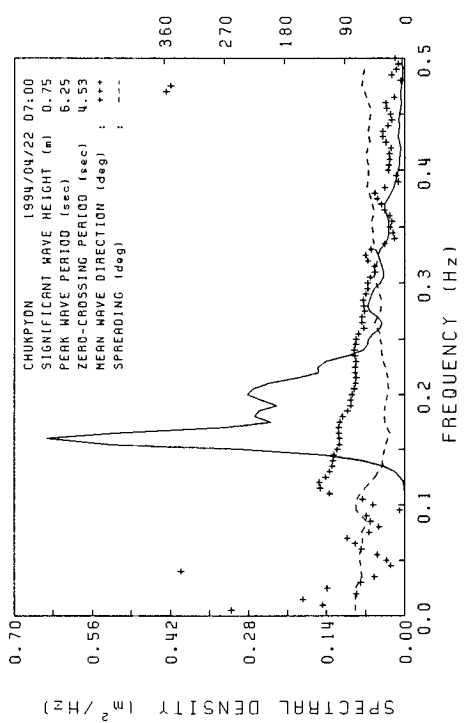
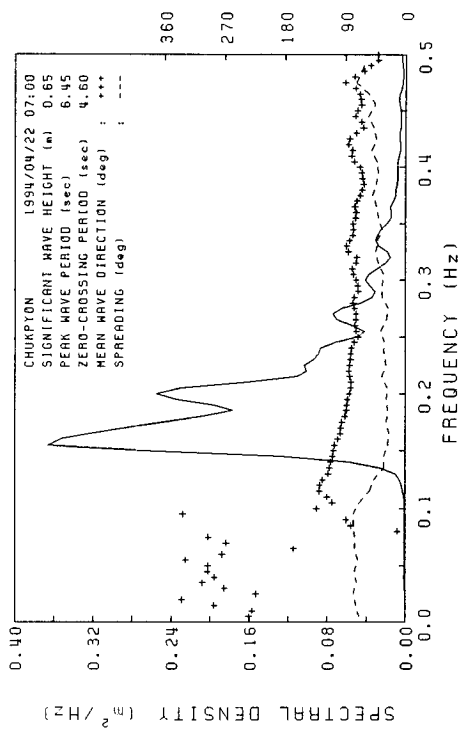
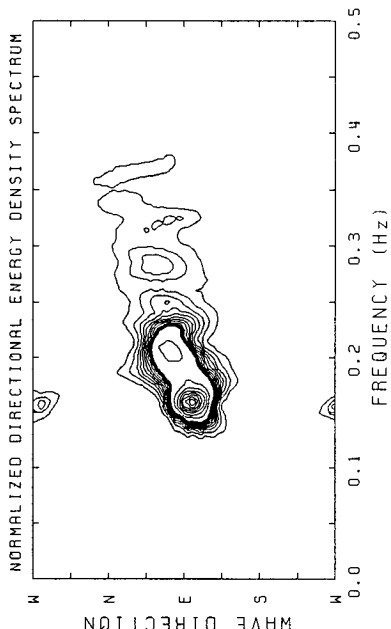
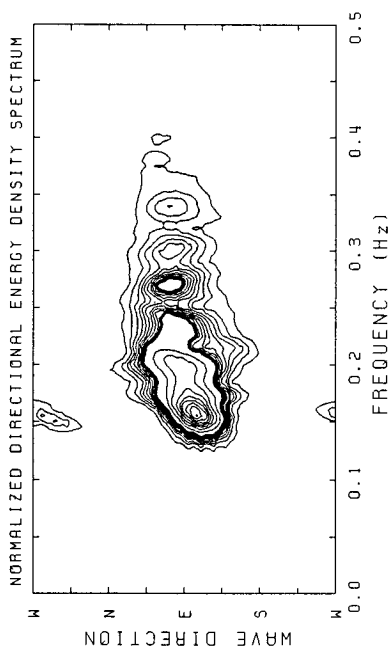


Fig. A.2.2.44. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 07:00)

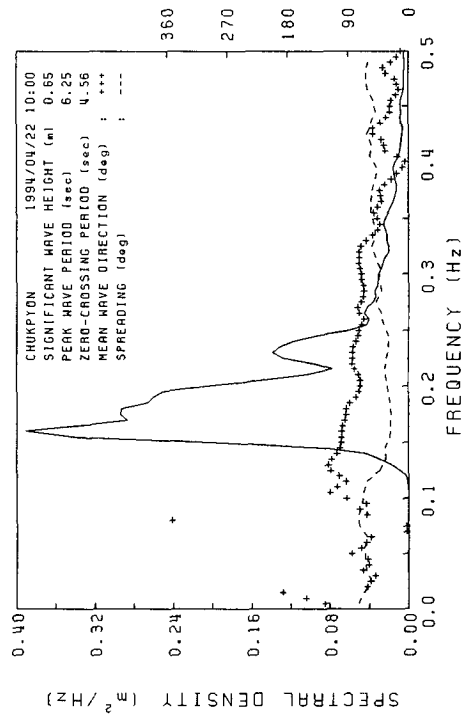
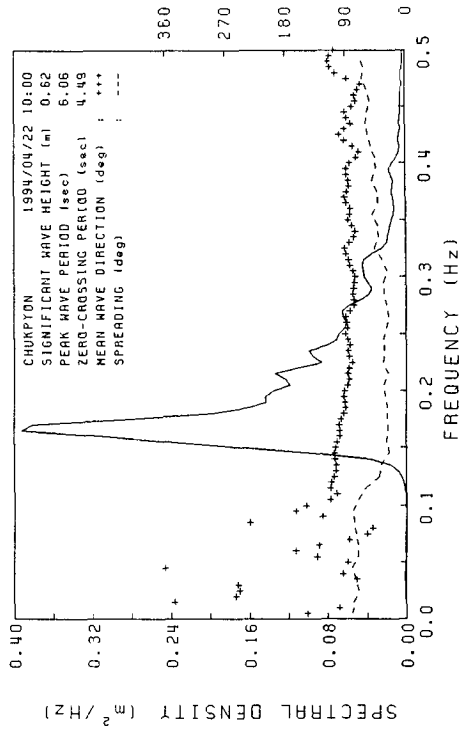
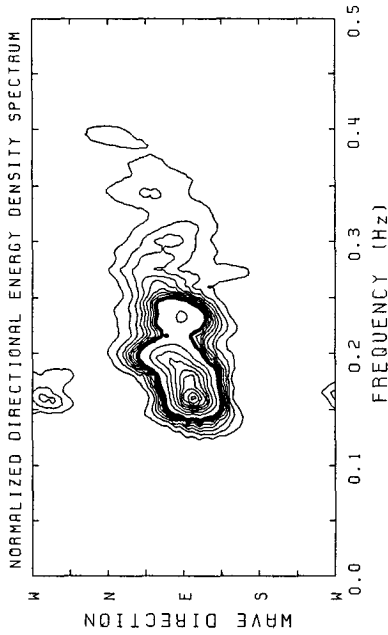
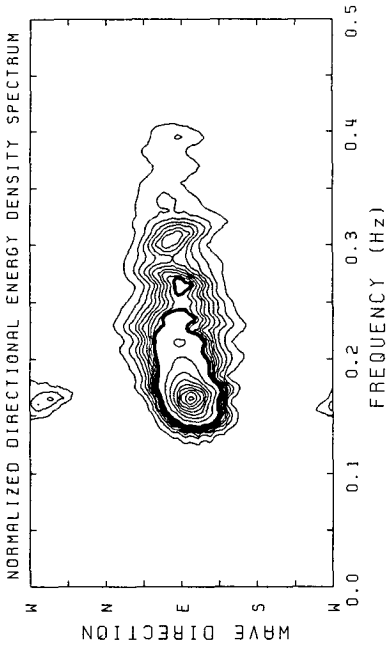


Fig. A.2.2.45. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 10:00)

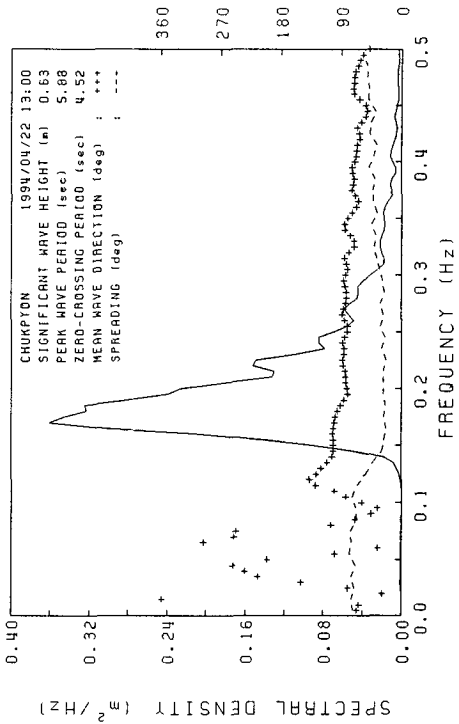
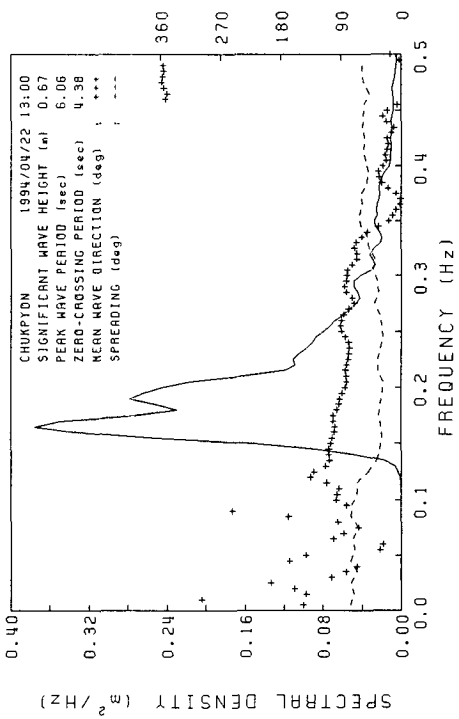
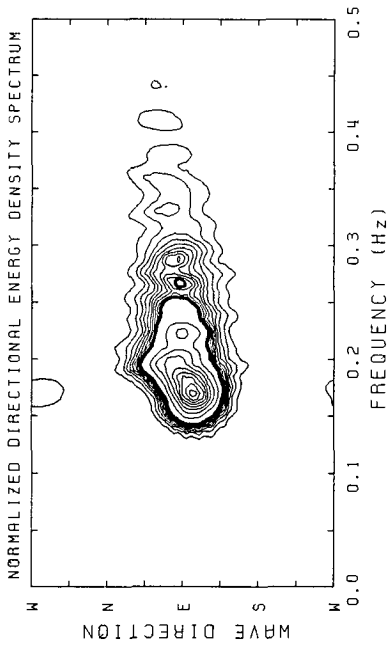
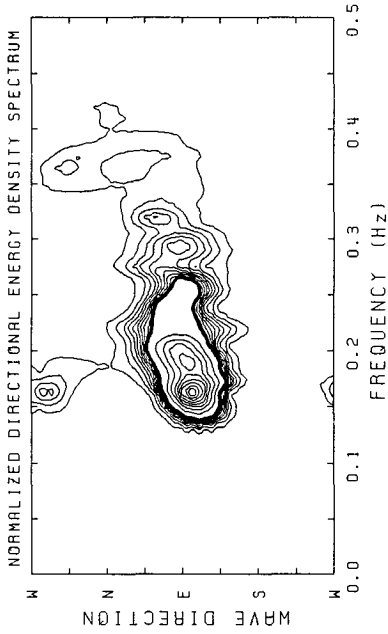


Fig. A.2.2.46. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 13:00)

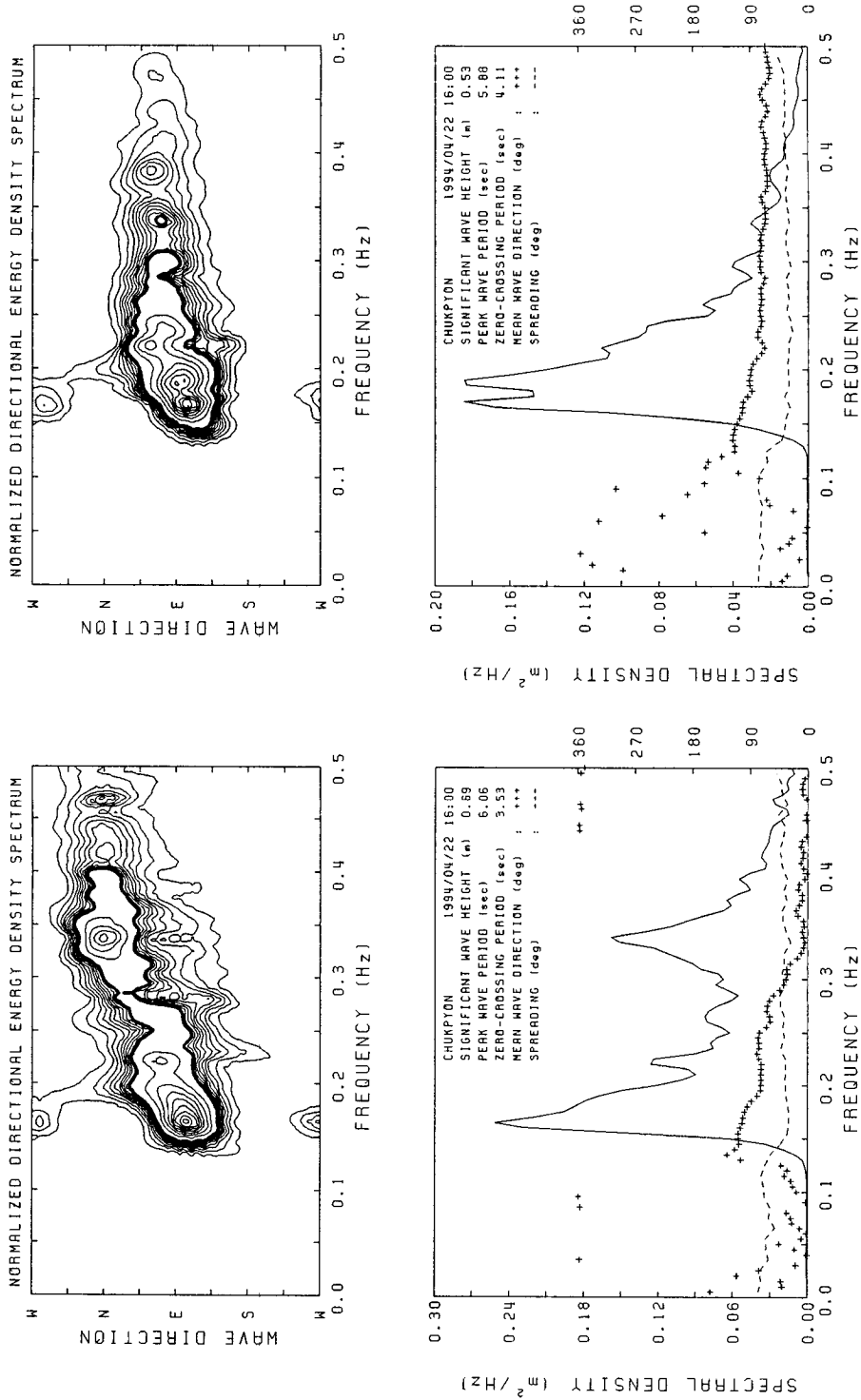


Fig. A.2.2.47. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 16:00)

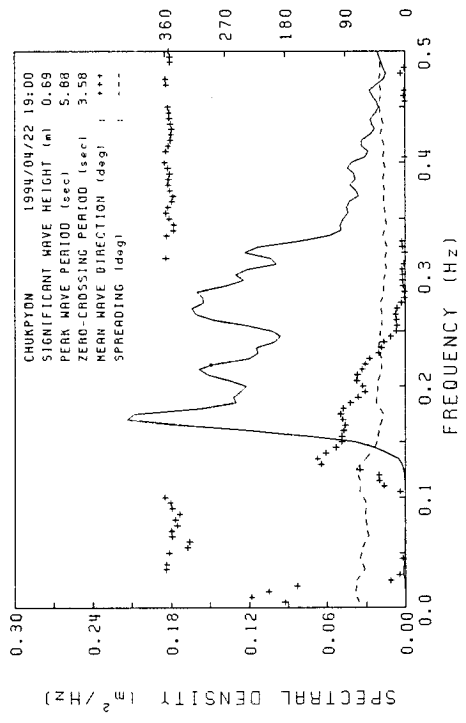
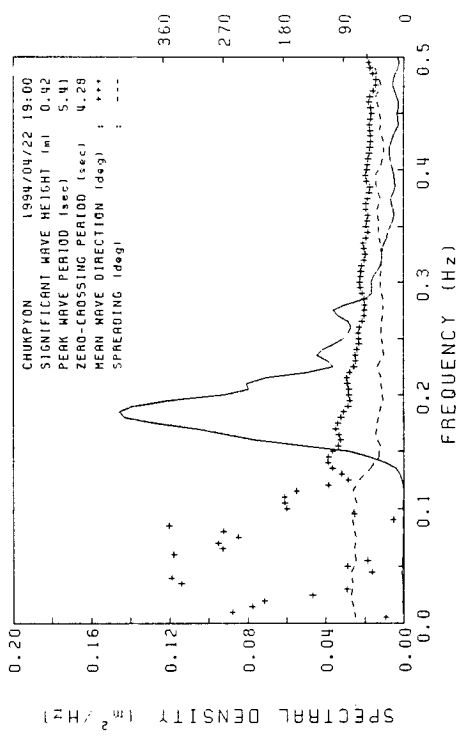
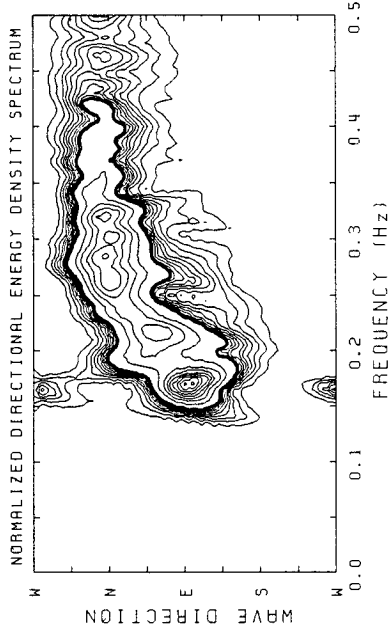
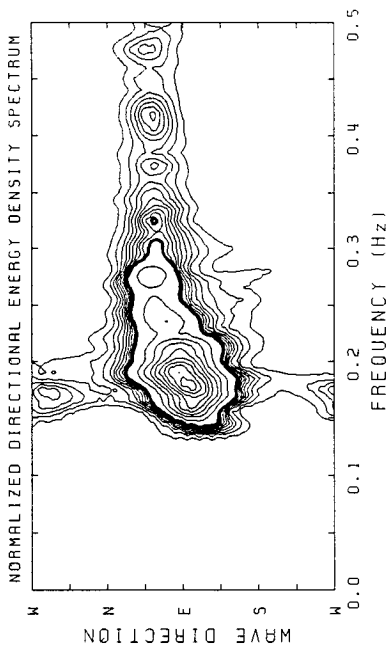


Fig. A.2.2.48. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 19:00)

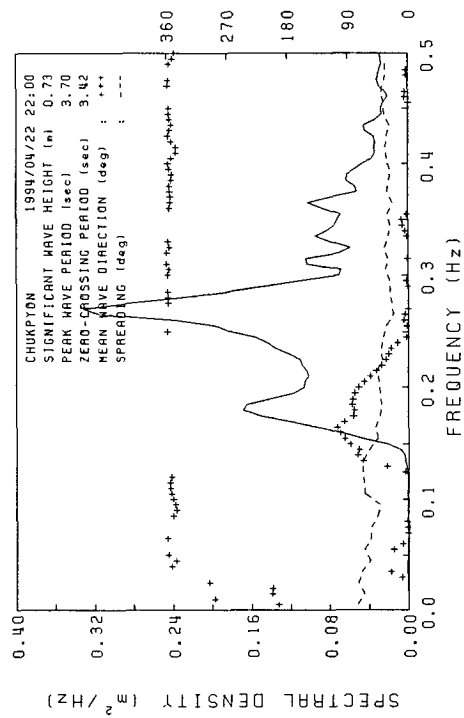
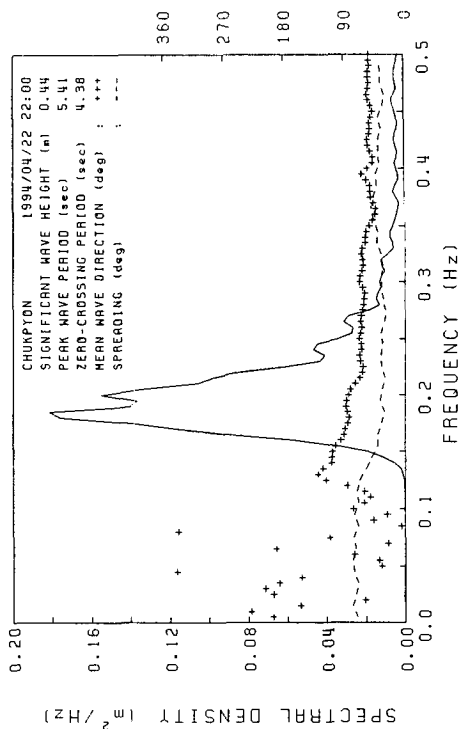
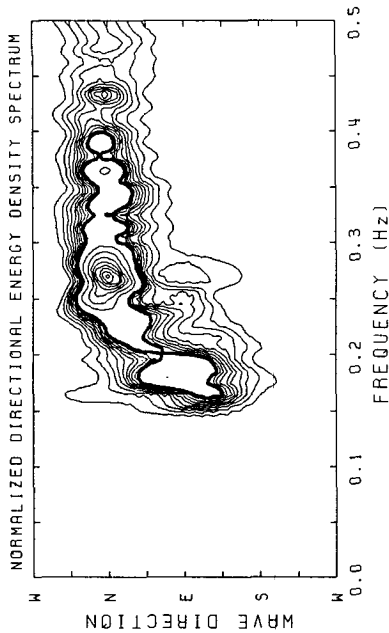
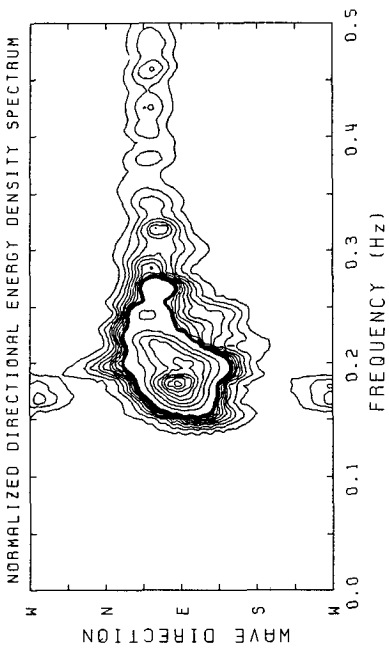


Fig. A.2.2.49. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/22 22:00)

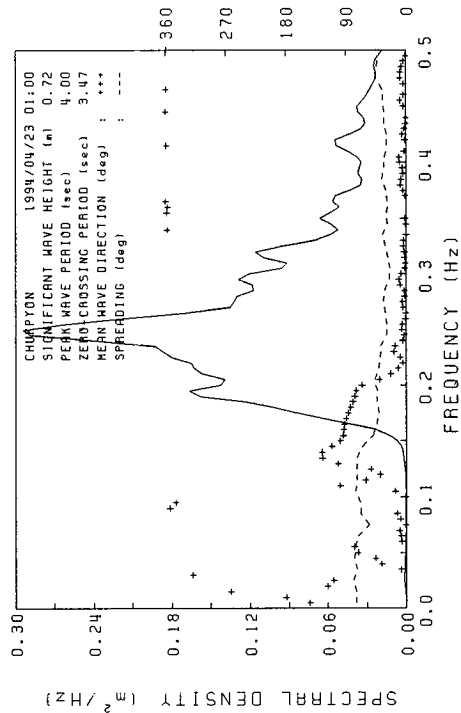
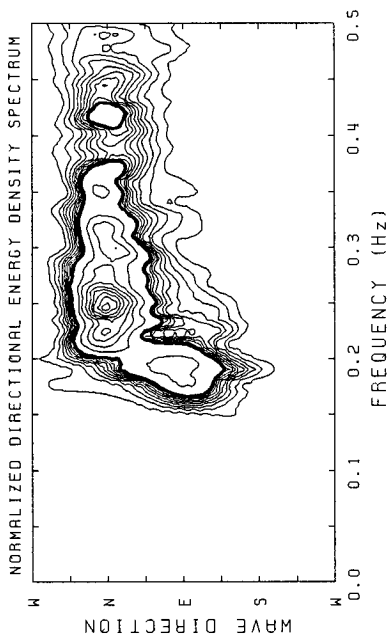
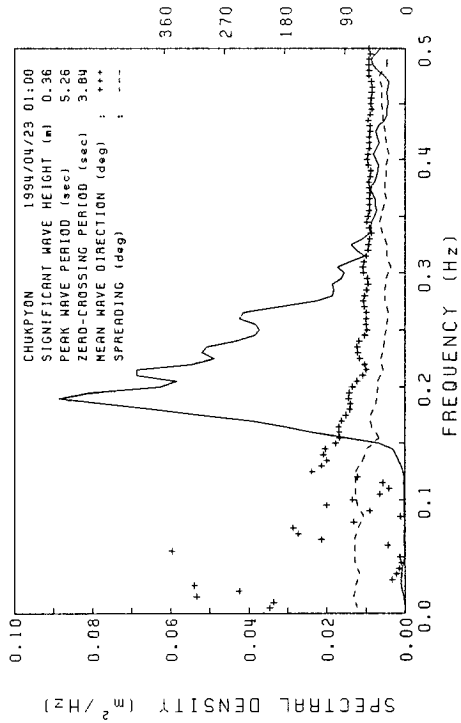
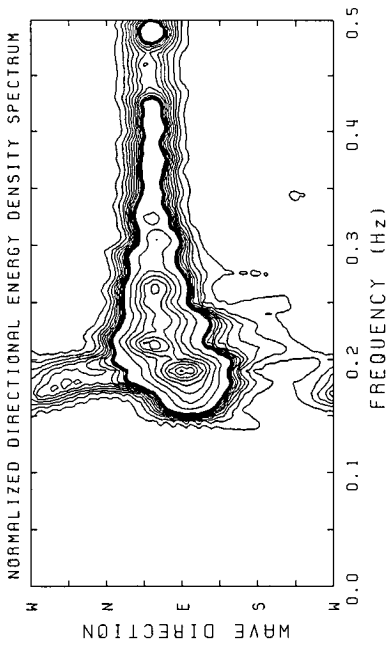


Fig. A.2.2.50. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 01:00)

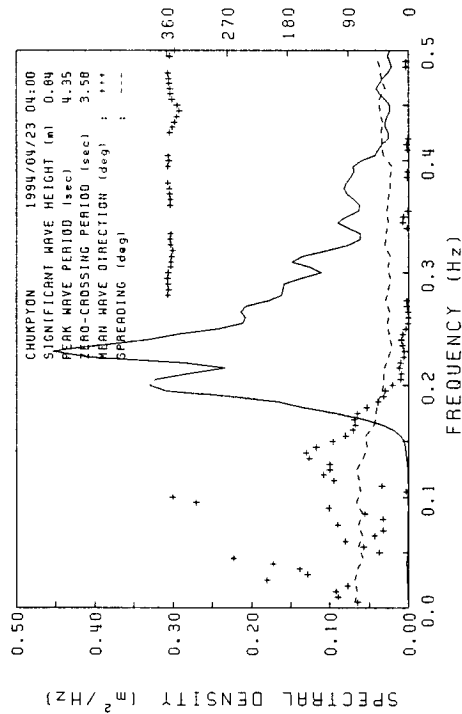
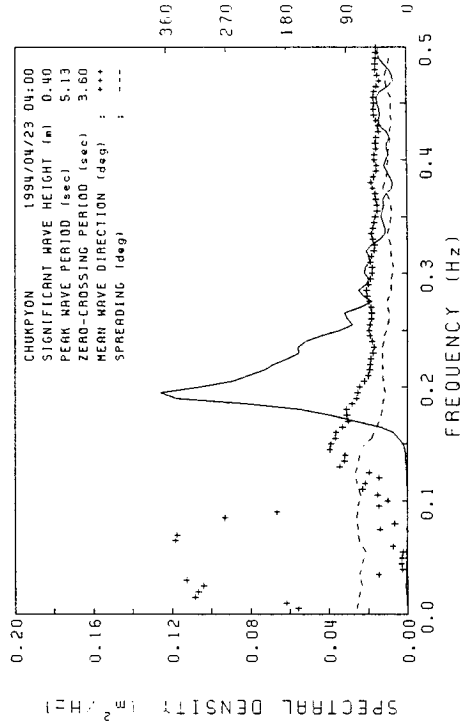
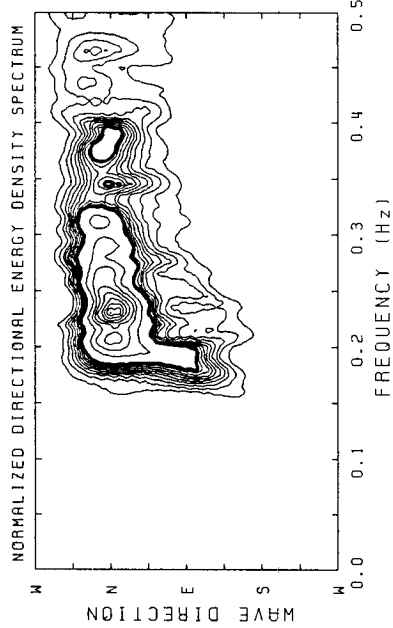
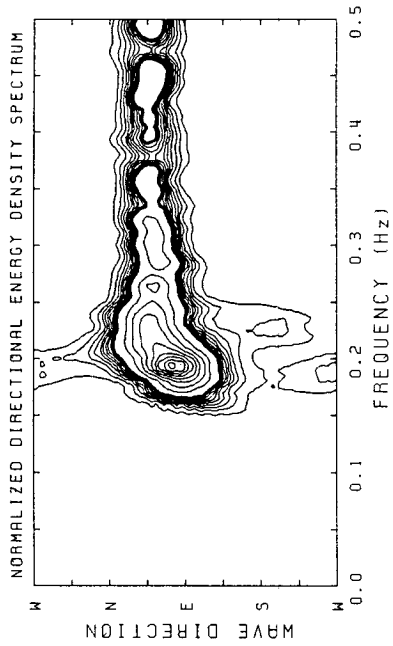


Fig. A.2.2.51. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 04:00)

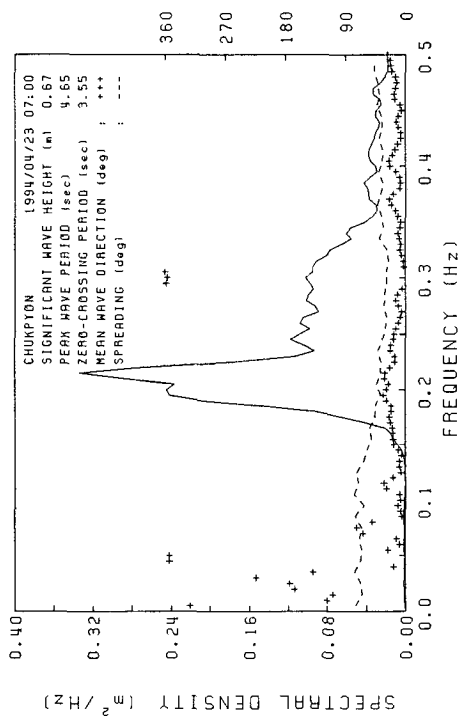
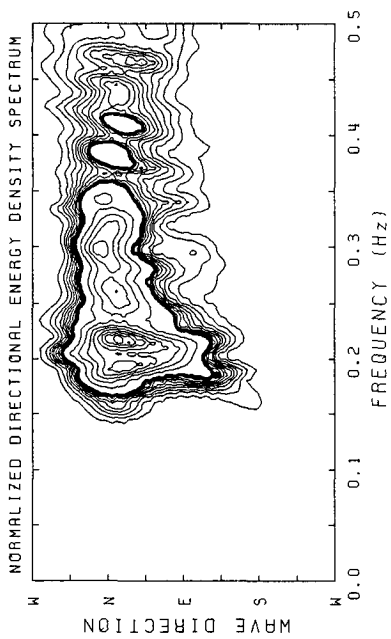
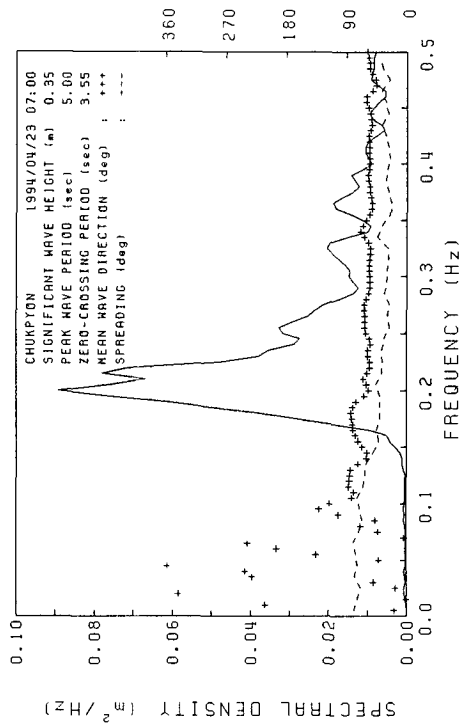
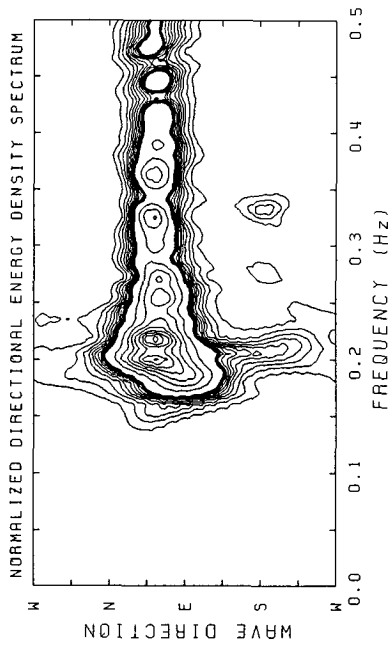


Fig. A.2.2.52. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 07:00)

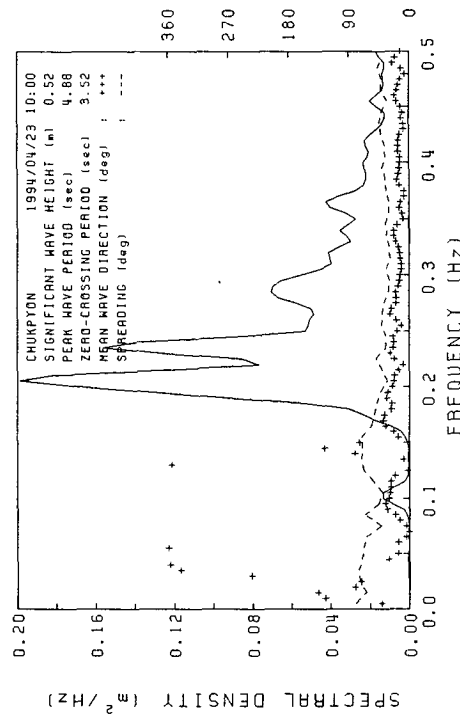
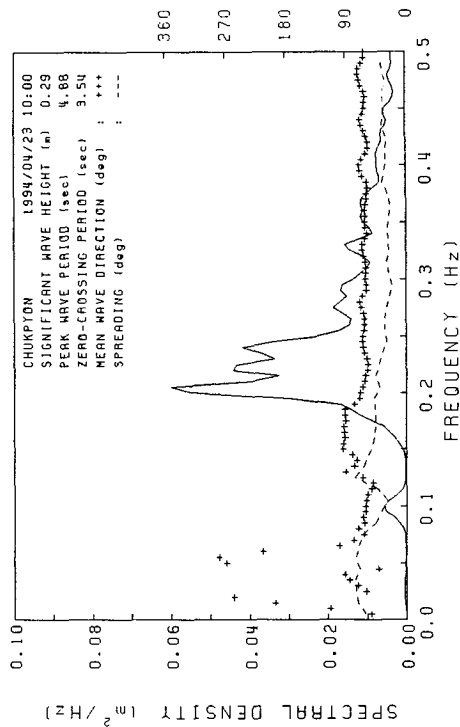
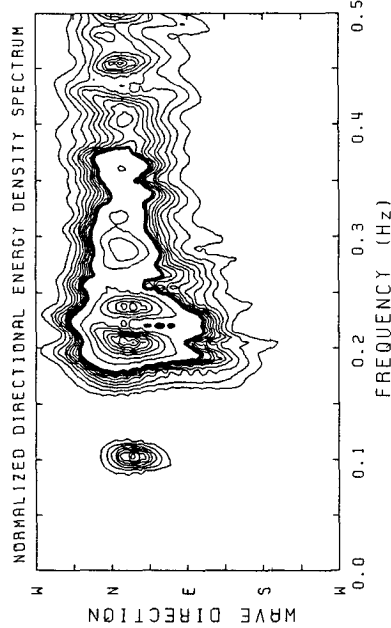
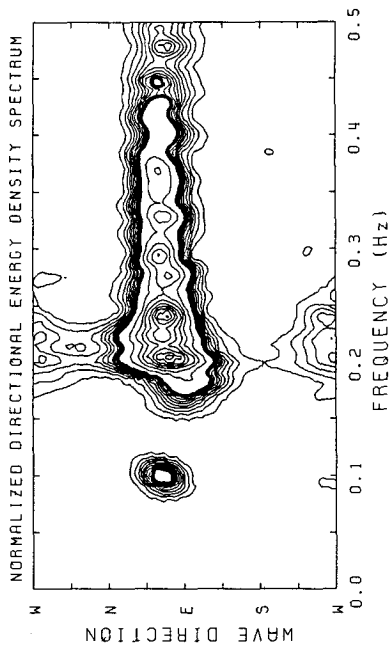


Fig. A.2.2.53. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 10:00)

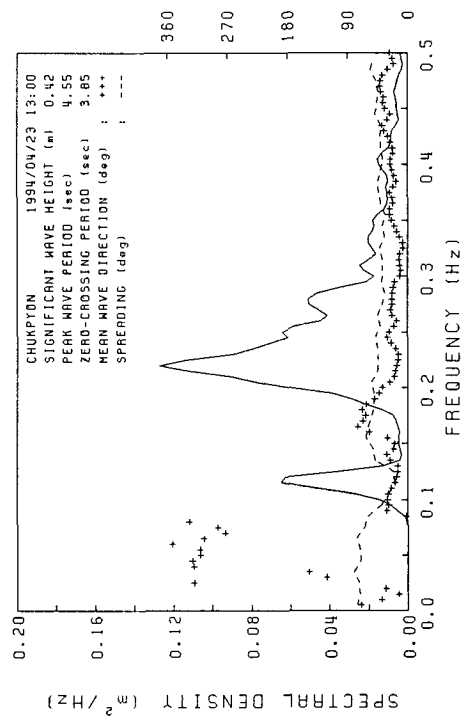
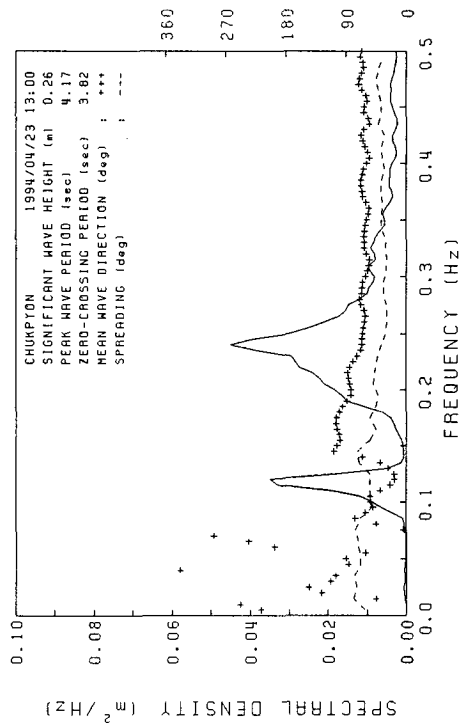
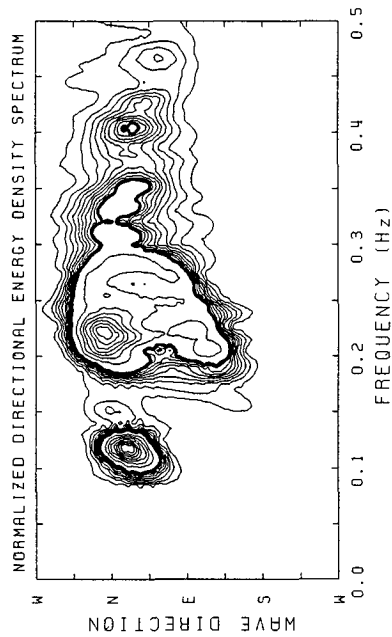
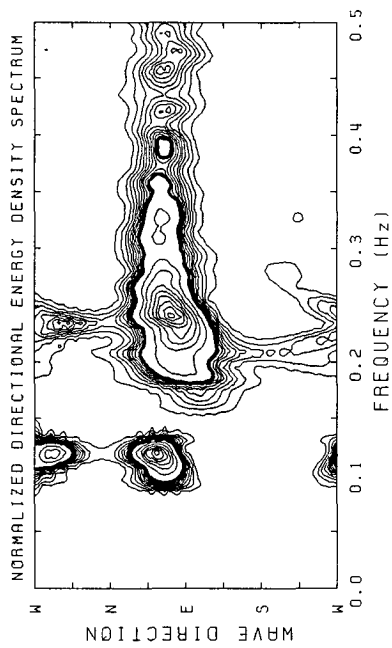


Fig. A.2.2.54. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 13:00)

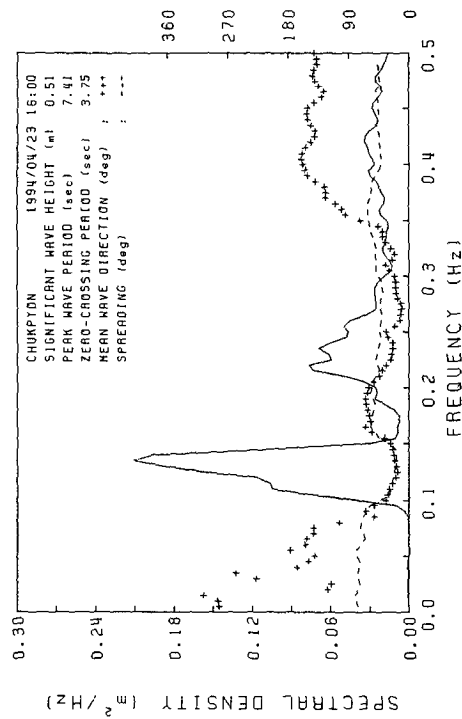
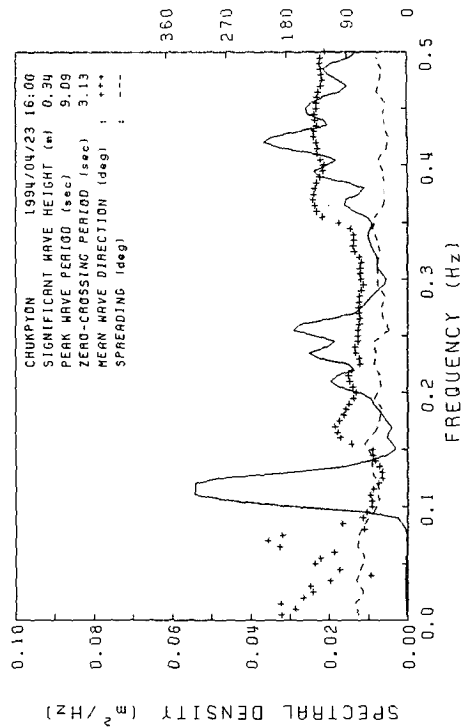
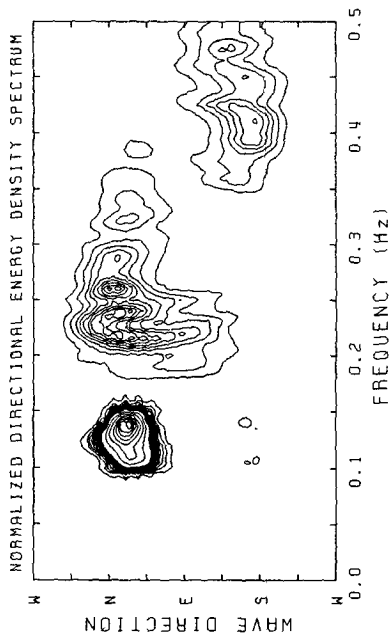
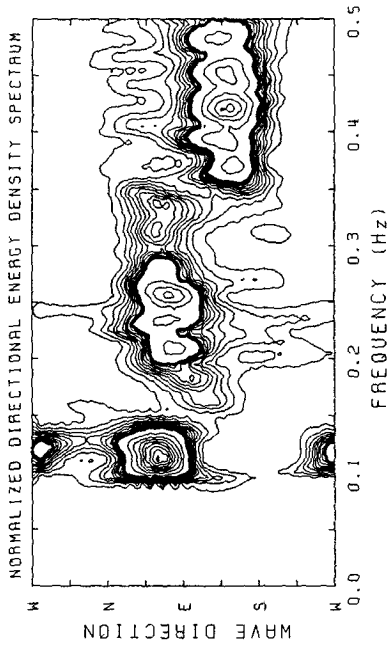


Fig. A.2.2.55. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 16:00)

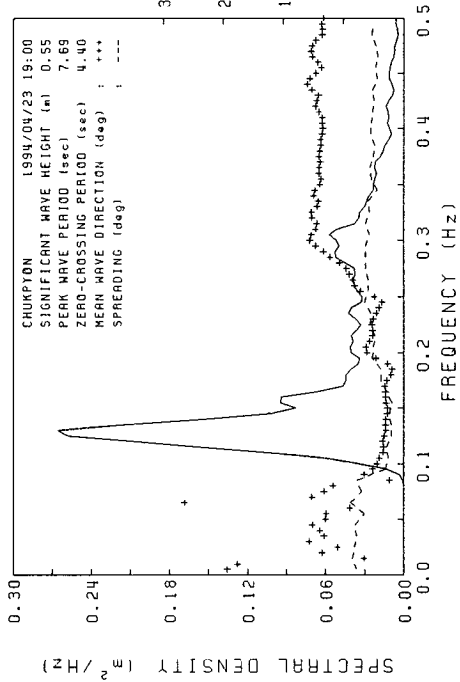
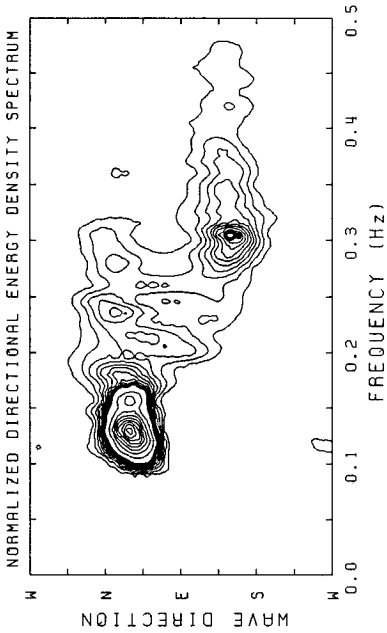
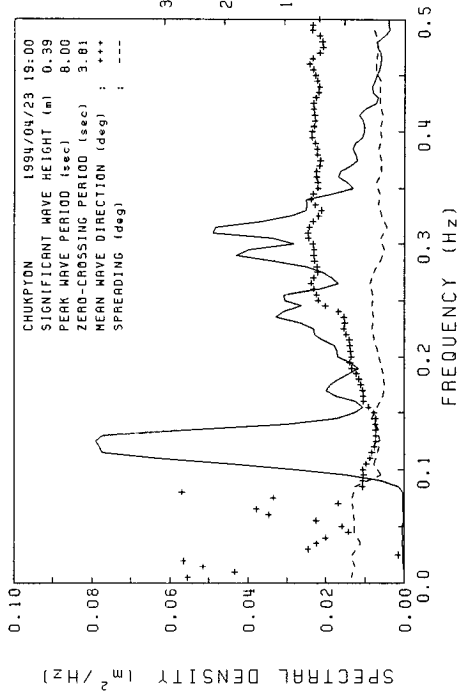
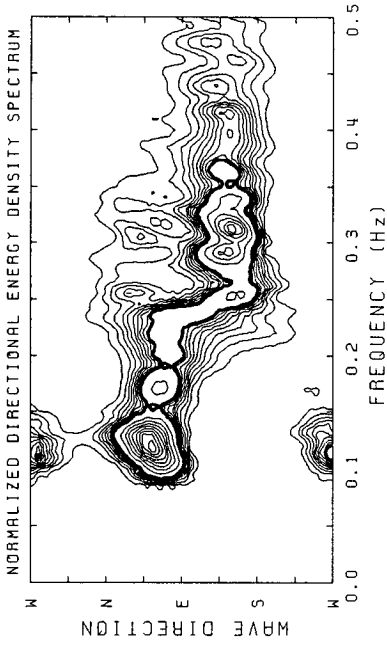


Fig. A.2.2.56. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 19:00)

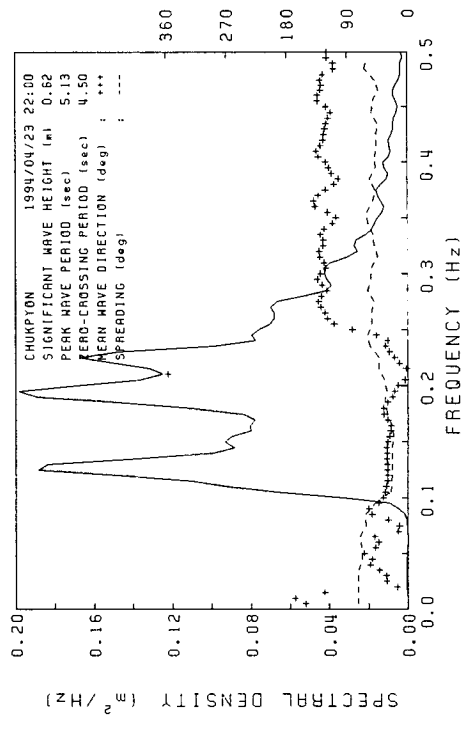
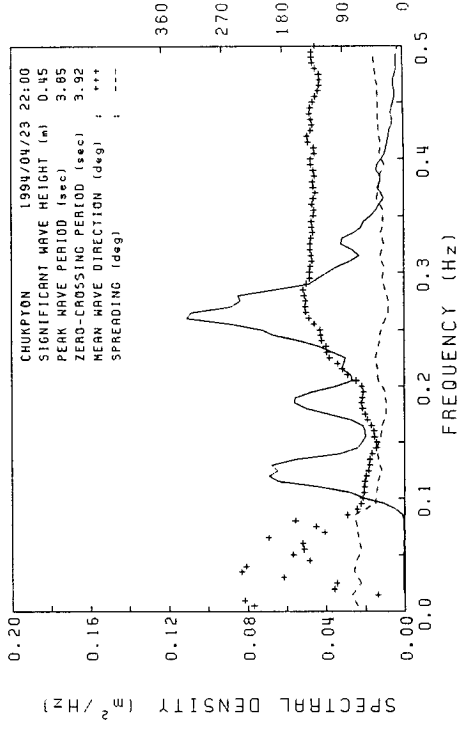
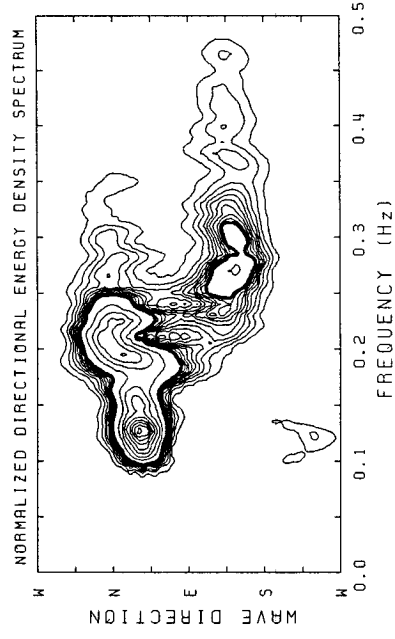
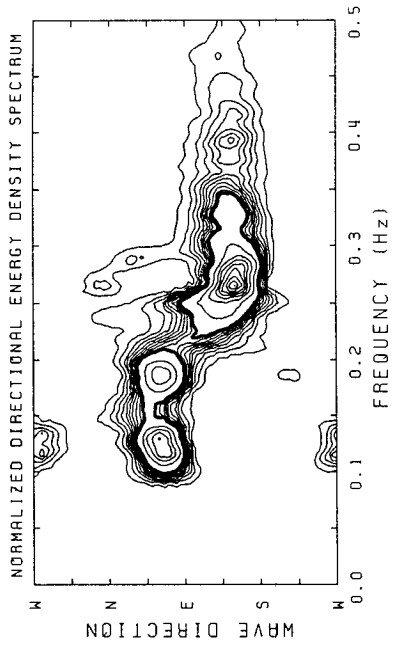


Fig. A.2.2.57. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/23 22:00)

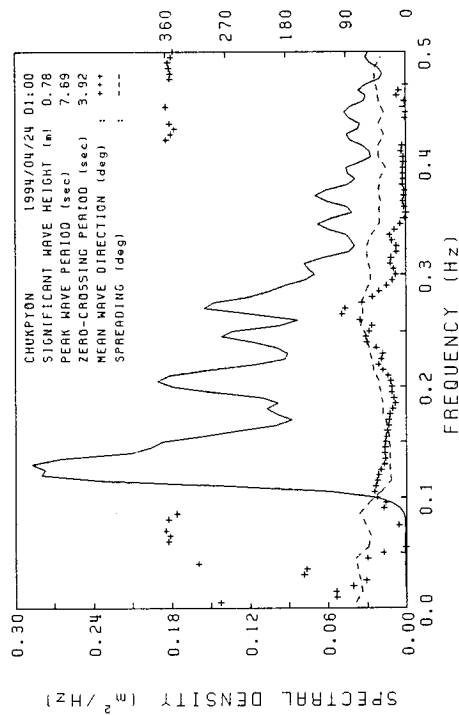
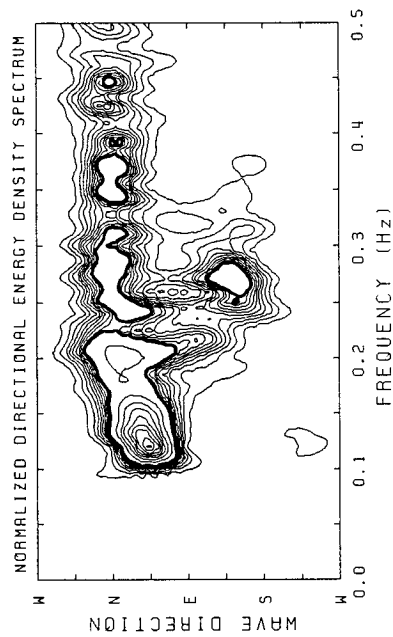
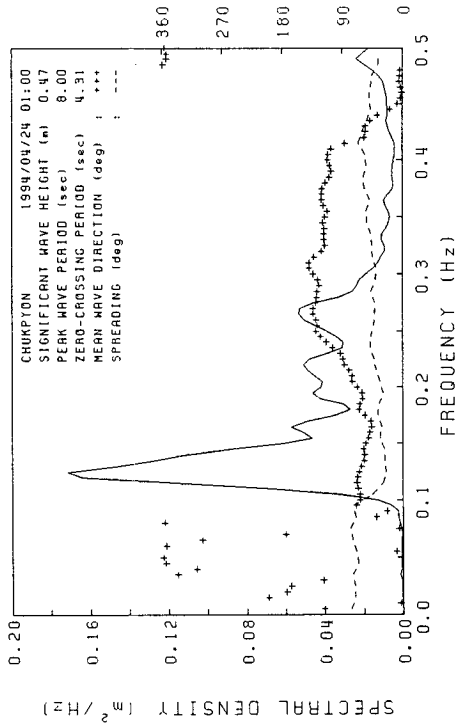
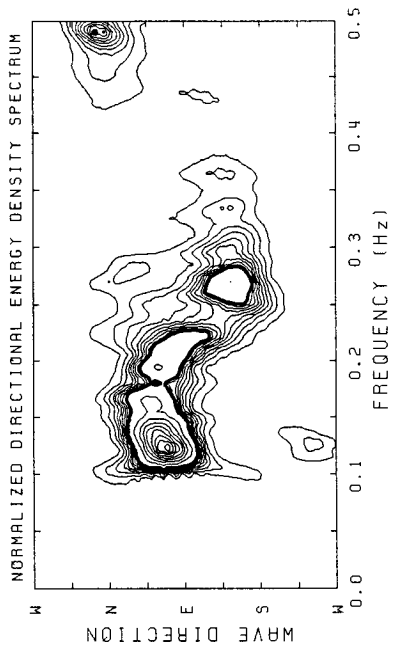


Fig. A.2.2.58. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/24 01:00)

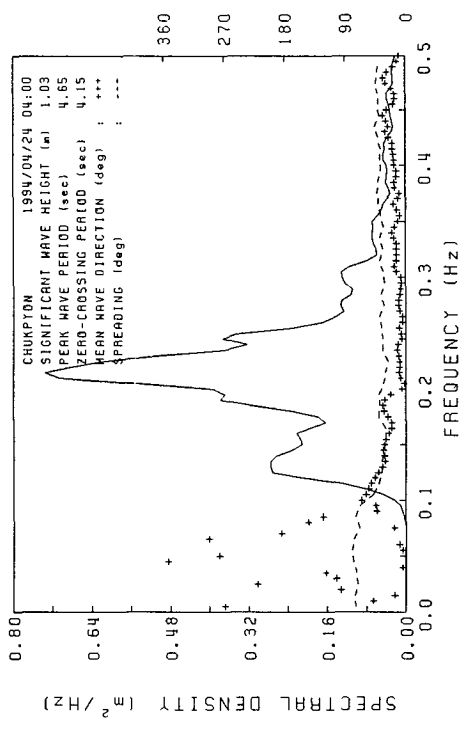
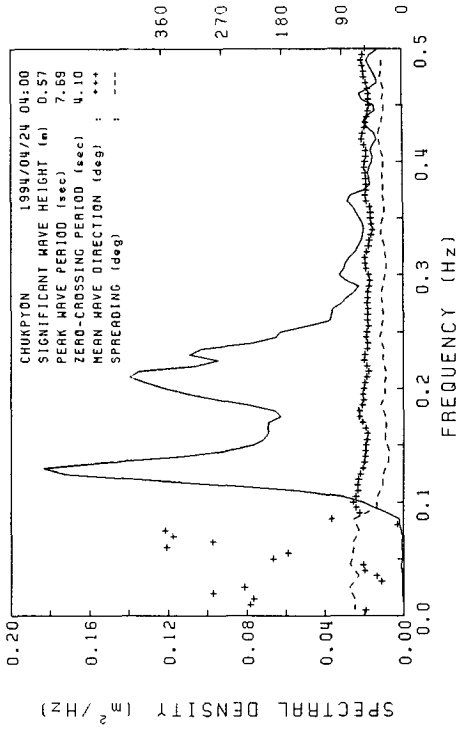
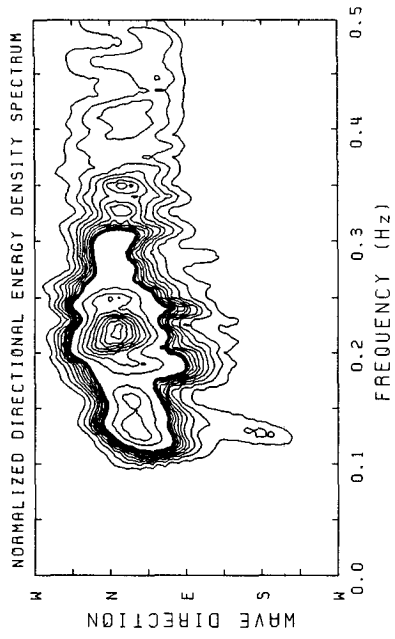
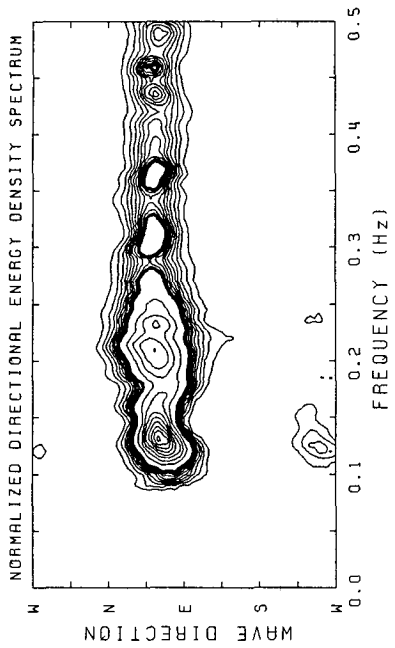


Fig. A.2.2.59. Directional wave spectra measured at SW1 and SW2 station around Chukpyon Harbor(1994/04/24 04:00)

Fig. A2.4.1. Bathymetric chart from the survey in May 1993.

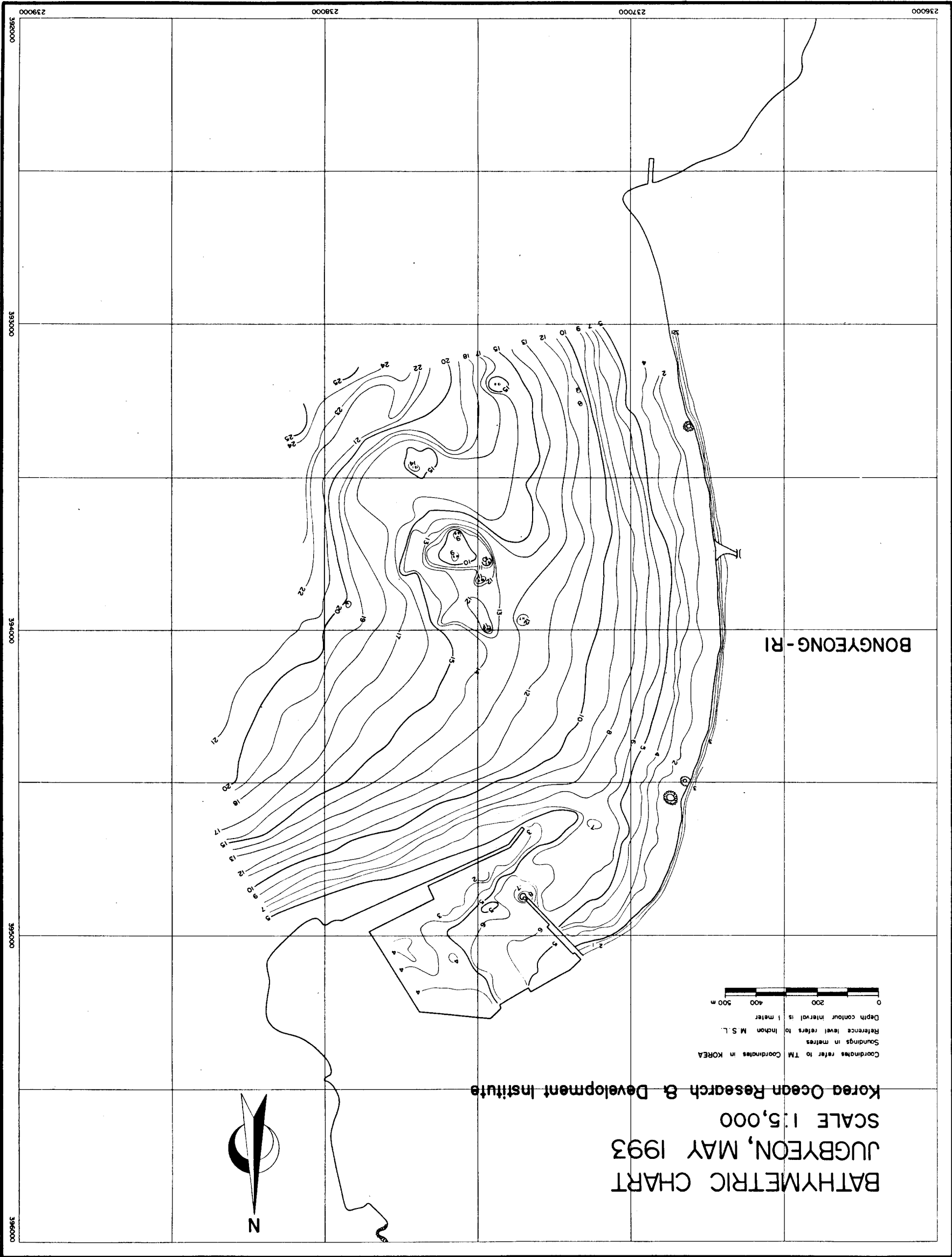


Fig. A2.4.2. Bathymetric chart from the survey in Oct. 1993.

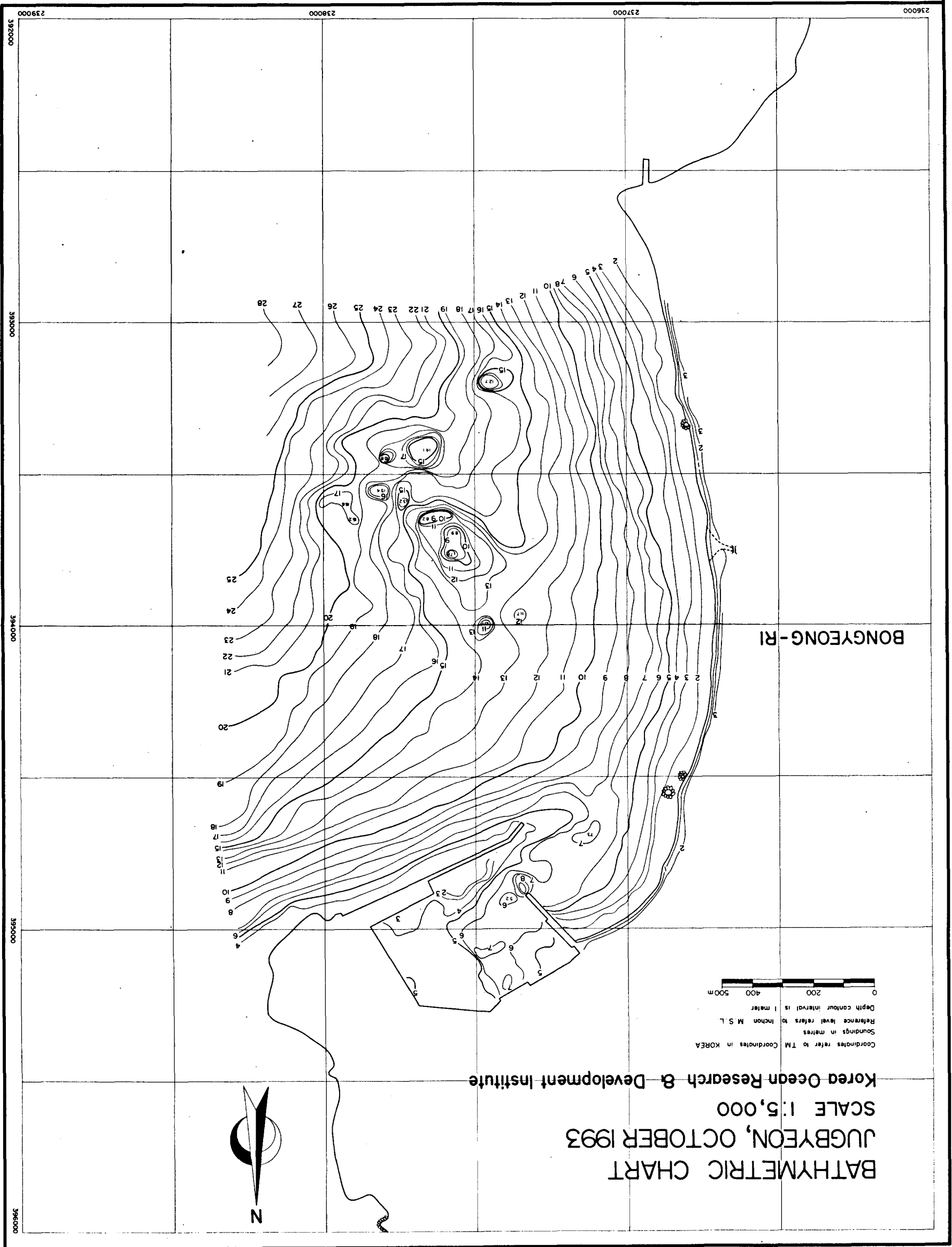
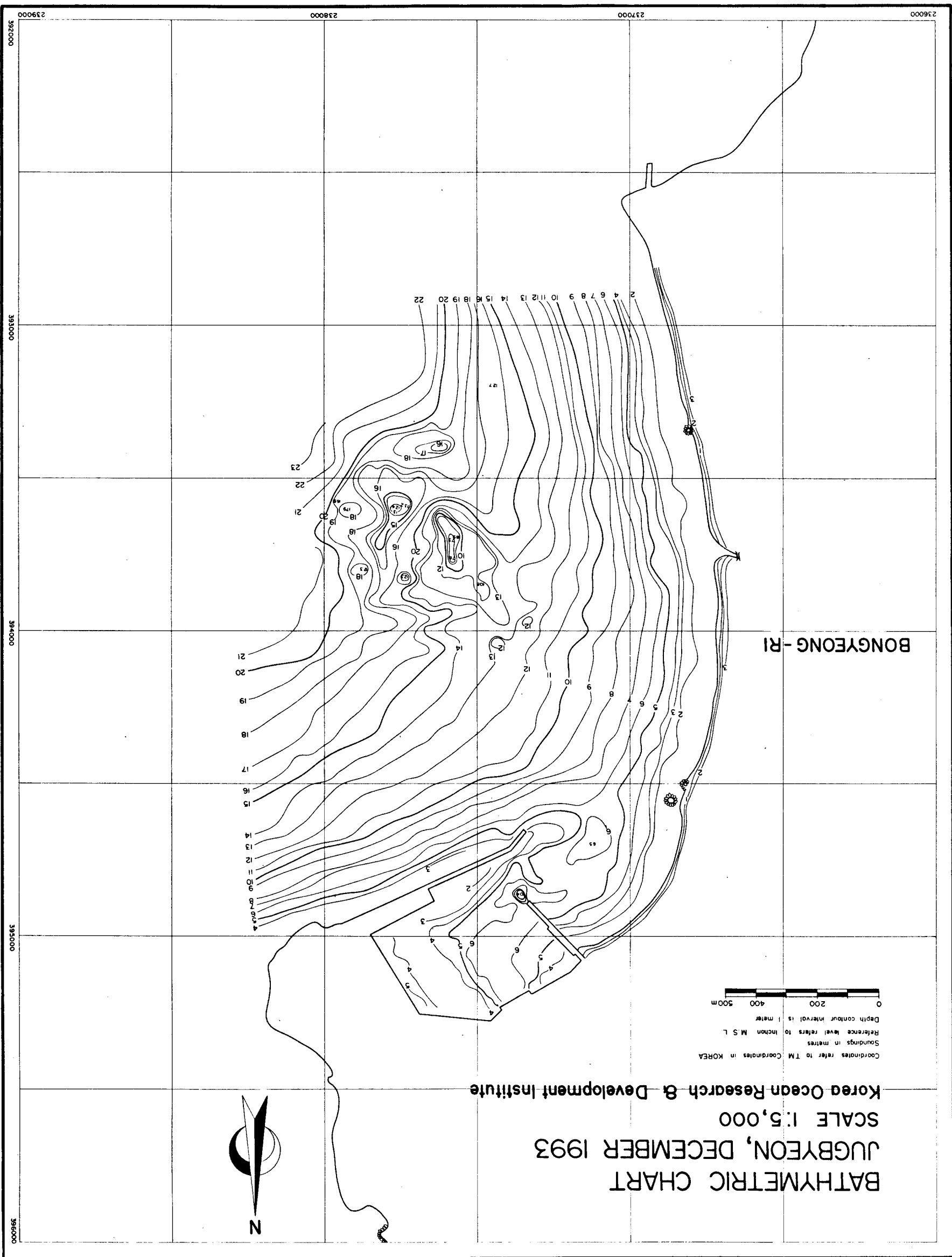
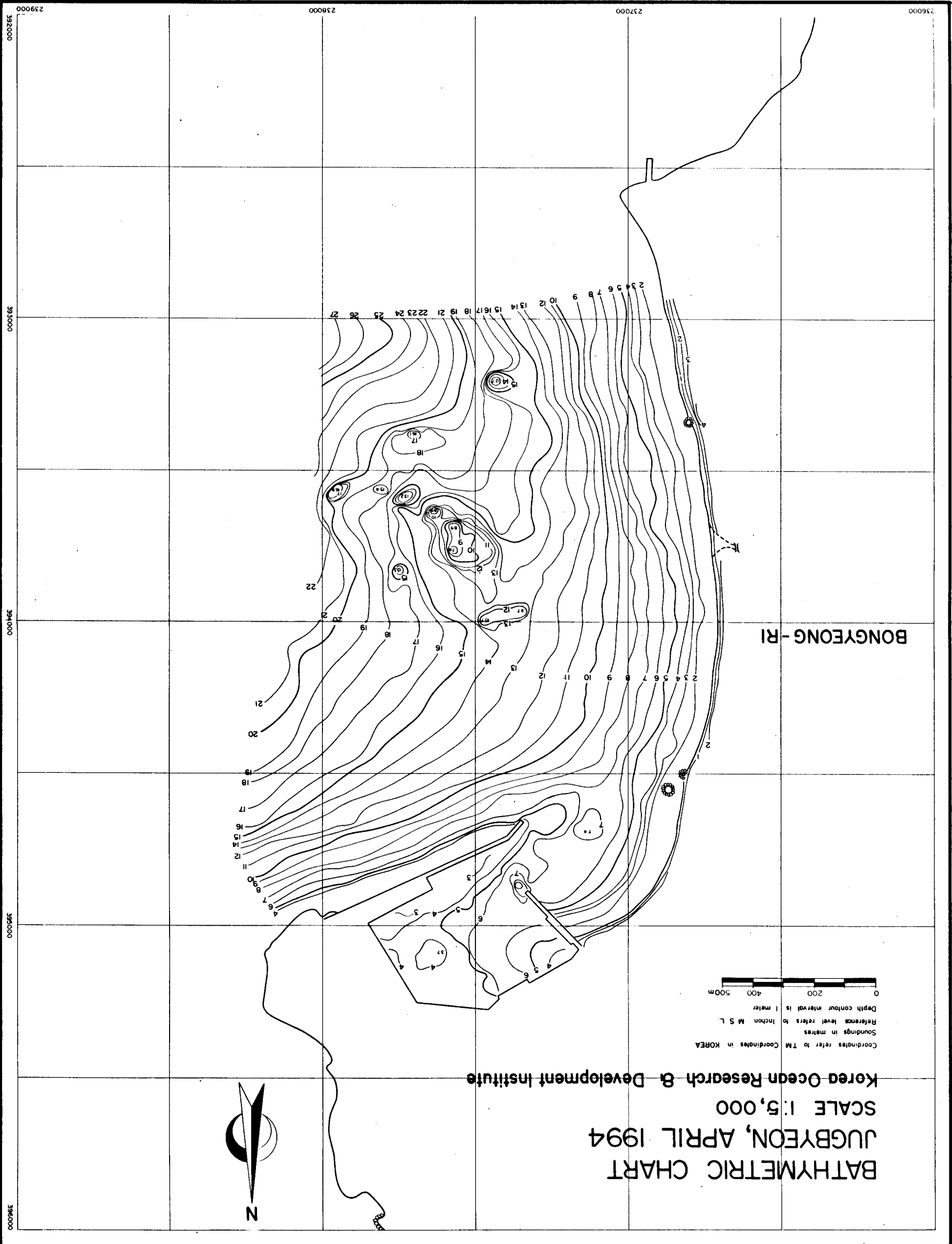


Fig. A2.4.3. Bathymetric chart from the survey in Dec. 1993.





236000
237000
238000
239000

392000
393000
394000
395000

Fig. A2.4.4. Bathymetric chart from the survey in Apr. 1994.