

波浪水槽 制御시스템 開發 (I)

Development of Wave Generation and Data
Acquisition System (I)

1993. 8.

研 究 機 關
韓 國 海 洋 研 究 所

科 學 技 術 處

제 출 문

과 학 기 술 처 장 관 귀 하

본 보고서를 “波浪水槽 制御시스템 개발(I)” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1993. 8. 27

주관연구기관명 : 한국해양연구소

연구책임자 : 서경덕

연 구 원 : 이달수

연 구 원 : 안희도

연 구 원 : 전인식

연 구 원 : 박우선

연 구 원 : 오영민

자 문 위 원 : 윤경식

연 구 조 원 : 장세철

요 약 문

I. 제 목

波浪水槽 制御시스템 개발(I)

II. 연구개발의 목적 및 중요성

沿岸工學과 관련된 제반 연구는 크게 이론적 연구, 현장관측을 통한 연구, 수치모형을 이용한 연구, 수리실험을 통한 연구 등으로 구분할 수 있다. 연안공학 연구의 발전을 위해서는 이러한 여러 방향의 연구가 균형적으로 발전하여 상호보완적으로 사용되어야 할 것이다. 그러나 현재 우리나라의 연안공학 연구는 現場觀測과 數値模型 연구에 편중되어 있으며, 水理實驗 분야는 타 분야에 비해 낙후되어 있다. 수리실험 분야의 연구에 필수적인 장비는 파랑을 발생시킬 수 있는 조파수조인데 현재 국내 연구소 및 대학에 설치되어 있는 조파수조는 대부분 외국 기술진에 의해 제작된 것이다. 造波水槽는 크게 수조 본체와 造波機로 구성되어 있는데, 수조 본체 및 조파기 하드웨어의 일부분은 국내 기술로 제작이 가능하지만 조파기를 가동시키고 자료를 독취하는 조파수조 제어시스템은 국내 연구가 전무하여 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구의 목표는 2차원 조파수조의 제어시스템을 국내 기술로 개발하는 것이다. 이를 위한 연차별 연구계획은 1차년도에 조파수조 제어시스템을 개발하고, 2차년도에 시작품 차원에서 조파수조를 제작하고, 3차년도에 조파수조에 제어시스템을 접목시켜 개발된 제어시스템의 성능을 검증, 보완함으로써 조파수조 제작 및 제어시스템의 완전 국산화를 이룩하는 것이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 3개년으로 계획하여 실시중인 연구사업중 제1차년도 사업으로서 당해년도의 주요 연구항목은 다음과 같다.

- 국내·외 造波水槽現況 및 特性調査
- 造波機 제어시스템의 구성
- 조파수조의 예비설계 및 조파기 구동파워 결정

Ⅳ. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 국내·외 조파수조 현황 및 특성 조사

국내 대학 및 연구기관에 설치, 운용되고 있는 2차원 조파수조의 제원 및 특성을 조사하였으며, 외국의 몇몇 대학 및 연구기관에서 보유하고 있는 수리실험

시설의 현황을 조사하였다. 조사 결과 국내 대학 및 연구기관의 모든 조파수조를 합했을 때 외국의 연구소 하나가 보유하고 있는 조파수조 보유량과 비슷한 것을 알 수 있었으며, 이는 국내의 水理實驗 분야 연구가 외국에 비해 상당히 뒤떨어져 있음을 나타내는 단적인 증거라 할 수 있다.

2. 조파기 제어시스템의 구성

조파수조 내에서의 계측파랑을 목적파랑에 일치시키기 위한 순환성 제어회로를 구성하고 회로해석을 수행하여 컴퓨터로 용이하게 조파기 하드웨어를 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘의 주된 기능은 조파판에 부착된 파고계에 의해 감지되는 시그널을 이용하여 조파판에서의 파랑의 재반사를 억제하는 반사파 흡수 기능이다. 수치적으로 발생시킨 파랑에 대하여 이 알고리즘을 시험해 본 결과, 임의의 규칙 또는 불규칙 파랑에 대하여 본 제어회로의 반사파 흡수기능이 매우 탁월함을 보였다.

전체 제어회로는 세 가지 循環性 回路, 즉 LVDT를 포함하는 Servo 시스템, 반사파 흡수필터 시스템 및 수조 傳達函數 보정 시스템으로 구성되나 본 연구에서 개발된 시스템은 처음 두 가지만 포함하고 있으며, 따라서 계측파랑이 조파기 부근에서 계측되는 경우에 국한되어 있다. 세번째 순환성 회로는 조파기에서 발생된 파랑이 수조 종방향으로 진행하면서 변형되는 것을 보정하기 위한 것인데 이는 두세 차례의 스펙트럼 보정작업으로 용이하게 달성될 수 있으며, 차후 계속되는 2-3차년도 사업에서 포함시킬 예정이다.

3. 조파수조의 공간배치 및 예비설계

조파수조의 예비설계, 조파기 설계파 및 구동파워 결정 등에 대한 연구를 수행하였다. 조파수조 설치위치는 한국해양연구소 제2연구동 1층 실험실로 하였으며, 실험실의 공간적인 여건을 감안하여 수조의 크기는 길이 20m, 폭 0.6m, 높이 0.8m로 결정하였다. 조파기의 형태는 油壓式 피스톤형으로 불규칙 파랑을 발생시킬 수 있도록 하며, 파랑과 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 파랑-흐름 복합수조로 설계하기로 결정하였다. 조파기의 設計水深, 週期 및 波高는 각각 50cm, 2.0sec, 40cm로 하였으며, 이에 대한 설계 Stroke는 52cm, 조파기 구동파워는 약 1.1 Hp로 계산되었다.

4. 활용에 대한 건의

본 연구가 성공적으로 수행될 경우, 연안공학 관련 국내 대학 및 연구소에 조파수조 제어시스템을 염가로 공급함으로써 국내 연안공학 수리실험 분야 연구의 활성화에 기여할 수 있을 것이며, 차후 본 기술을 확장하여 3차원 조파수조 제어시스템 구축에 활용할 수 있을 것이다.

SUMMARY

I. Title

Development of Wave Generation and Data Acquisition System(I)

II. Objective and Significance of the Study

Research on coastal engineering has been conducted by means of theoretical development, field experiment, numerical modeling, hydraulic modeling, and so on. It is desirable for such research measures to be developed in harmony and used interdependently. However, the research on coastal engineering in Korea is biased toward field experiment and numerical modeling, and the hydraulic modeling falls behind others. One of the essential devices for coastal hydraulic modeling is a wave tank. Most of the wave tanks in the universities and research institutes of Korea were manufactured by foreign technology. A wave tank consists of main body and wavemaking system. The main body and a part of the hardware of wavemaking system can be manufactured by domestic technology, but the software system for wave generation and data acquisition has never been developed in Korea, having been imported from foreign countries.

The main objective of the present study is to develop a wave generation and data acquisition system. The yearly plan of the study is as follows. In the first year a wave generation and data acquisition system will be developed, and in the second year a wave tank will be constructed. In the third year the developed wave generating system will be mounted on the wave tank for testing and improving its performance.

III. Contents of the Study

The present study forms the first-year study of the three year consecutive project. The major subjects of the study are as follows:

- o Survey of wave tanks in Korea and foreign countries
- o Development of wavemaker control system
- o Preliminary design of wave tank and calculation of power for wavemaker

IV. Results and Recommendation

1. Survey of wave tanks in Korea and foreign countries

Survey was made for the specifications and characteristics of the wave flumes in universities and research institutes in Korea and for the

hydraulic modeling facility in several foreign universities and research institutes. The survey showed that the entire coastal hydraulic modeling facility in Korea is comparable to that in a single foreign research institute, meaning that Korea falls behind other forward developed countries in this field.

2. Development of wavemaker control system

A feed-back control circuit of wave generation was constructed and an algorithm was developed which can easily control the wave generating hardware so as to generate waves in accordance with the target waves. The major function of the algorithm is to suppress the re-reflected waves at the wave paddle by continuously sensing the reflected waves and correcting the input signal for the movement of the wave paddle. The test of the algorithm for numerically generated regular or irregular waves showed that the control circuit with the developed algorithm works quite well for suppressing the re-reflection at the wave paddle.

A complete control system consists of three parts, i.e., a servo-system including an LVDT, a reflected wave absorbing system, and a flume transfer function correction system. The system developed in the present study includes the first two so that at present its use is valid only for the case in which the waves are measured in the vicinity of the wavemaker. The third

part of the control system is for correcting the wave paddle motion in consideration of the transformation of waves in the longitudinal direction of the flume. This can be done by several times of correction of measured wave spectrum and will be included to the system later.

3. Preliminary design of wave tank and calculation of power for wavemaker

A wave flume will be located on the first floor of the R-2 laboratory of KORDI. Considering the space of the laboratory, the flume will be 20 m long, 0.6 m wide, and 0.8 m high. The wave generating system will include a hydraulic pump and a piston-type wavemaker capable of generating irregular waves. A current generating system will also be included. The water depth, wave period and height for the design of the wavemaker were chosen to be 50 cm, 2.0 s, and 40 cm, respectively, and the corresponding paddle stroke and the required power were calculated as 52 cm and 1.1 Hp, respectively.

4. Recommendation

At the completion of the present study, it may be possible to provide wave generating systems to the universities and research institutes on the cheap so that contribute for enhancement of research activities in coastal hydraulic modeling in Korea. The developed technology may be extended to the construction of a three-dimensional wave generating system.

목 차

제1장 서론 -----	21
제2장 국내·외 波浪水槽現況 및 特性調査 -----	23
제3장 造波 制御 시스템의 구성 -----	28
제1절 개요 -----	28
제2절 조파시스템의 制御回路 -----	31
제3절 反射波 吸收필터의 설계 -----	34
1. 제어회로의 해석 -----	34
2. 油壓 Servo 시스템의 傳達函數, $G_1(s)$ -----	38
3. 造波板 전달함수, $G_2(s)$ -----	40
4. 吸收필터의 離散化 -----	45
제4절 反射波 吸收필터의 성능시험 -----	48
1. 造波板 출력의 결정 -----	48
2. 성능해석 -----	50
제5절 討議 -----	63

제4장 被浪水槽의 예비설계 및 조파기 구동파워 결정 -----	64
제1절 파랑수조의 예비설계 -----	64
1. 수조의 크기 및 실험실내 위치 -----	64
2. 수조의 給·排水 및 循環 시스템 -----	65
3. 수조의 荷重 및 실험실 바닥 슬라브 지지력 검토 -----	66
제2절 조파기 설계파 및 구동파워 결정 -----	67
1. 최대파워 계산 -----	67
2. 평균파워와의 비교 -----	72
3. 설계파 및 기타 설계조건 -----	74
 제5장 결론 및 토의 -----	 77
 참고문헌 -----	 79
 부록 A1 : 조파기 제어를 위한 프로그램 List -----	 83
부록 A2 : 조파기 설계조건 계산을 위한 Fortran 프로그램	
DESIGN 및 계산결과 -----	109
부록 A3 : 조파기 설계조건에 대하여 조파판 전·후면에 작용하는	
파력 및 휨모멘트 등을 계산하기 위한 Fortran 프로그램	
FORCE 및 계산결과 -----	123

CONTENTS

Chapter 1. Introduction -----	21
Chapter 2. Survey of wave tanks in Korea and foreign countries -----	23
Chapter 3. Development of wavemaker control system ----	28
Section 1. General -----	28
Section 2. Control circuit of wavemaker system -----	31
Section 3. Design of reflected wave absorbing filter -----	34
1. Analysis of control circuit -----	34
2. Transfer function of hydraulic servo-system, $G_1(s)$ -----	38
3. Transfer function of wavemaker, $G_2(s)$ -----	40
4. Discretization of absorbing filter -----	45
Section 4. Performance test of reflected wave absorbing filter -----	48
1. Calculation of output of wavemaker -----	48
2. Performance analysis -----	50
Section 5. Discussion -----	63
Chapter 4. Preliminary design of wave flume and calculation of power required for wavemaker -----	64

Section 1. Preliminary design of wave flume -----	64
1. Dimension and location of wave flume -----	64
2. Water supply, drainage and circulation system -----	65
3. Loading of wave flume and strength analysis of laboratory bottom slab -----	66
Section 2. Calculation of design wave and power required for wavemaker -----	67
1. Calculation of maximum power -----	67
2. Comparison with mean power -----	72
3. Determination of design wave condition -----	74
Chapter 5. Conclusion and discussion -----	77
References -----	79
Appendix : A1. List of program for wavemaker control system -----	83
A2. Fortran program DESIGN for calculation of design wave condition -----	109
A3. Fortran program FORCE for calculation of wave force and bending moment -----	123

圖目次

(List of Figures)

Fig. 2.1.1	Outline of two-dimensional irregular wave generating system -----	26
Fig. 3.1.1	Schematic diagram of wave making system -----	30
Fig. 3.2.1	Overall control circuit of wave making system -----	32
Fig. 3.2.2	Feed-back circuit of hydro-servo system -----	33
Fig. 3.3.1	Modulus and phase of transfer function of wave board: (a) modulus: (b) phase -----	41
Fig. 3.3.2	Variation of filter coefficients, a and b with respect to change of water depth -----	43
Fig. 3.3.3	Comparison of exact and approximated transfer functions of wave board for $h = 0.5 m$: (a) modulus, (b) phase -----	44
Fig. 3.4.1	Results of filter application for regular wave condition($H = 0.05 m$, $T = 0.7 s$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at board face (— = exact solution, --- = discrete convolution, ° ° ° = filter) -----	52
Fig. 3.4.2	Results of filter application for regular wave condition($H = 0.15 m$, $T = 2.0 s$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at board face (— = exact solution, --- = discrete convolution, ° ° ° = filter) -----	53

Fig. 3.4.3	Spectra of input wave and board motion for irregular wave conditions: (a) $H_s = 0.05 m$, $T_s = 0.7 s$: (b) $H_s = 0.15 m$, $T_s = 2.0 s$ -----	55
Fig. 3.4.4	Results of filter application for irregular wave condition ($H_s = 0.05 m$, $T_s = 0.7 s$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at board face (— = discrete convolution, ••• = filter) -----	56
Fig. 3.4.5	Results of filter application for irregular wave condition ($H_s = 0.15 m$, $T_s = 2.0 s$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at board face (— = discrete convolution, ••• = filter) -----	57
Fig. 3.4.6	Comparison of target and realized waves without wave absorbing filter operating: (a) gradually growing reflected wave; (b) — = regular target wave, ---- = realized wave -----	58
Fig. 3.4.7	Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) reflected wave of 3 different frequency components; (b) — = regular target wave, ---- = realized wave -----	60
Fig. 3.4.8	Spectra of target and reflected waves (— = target wave, ---- = reflected wave, --- = white noise reflected wave) -----	61
Fig. 3.4.9	Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) irregular reflected wave; (b) — = irregular target wave, ---- = realized wave -----	62
Fig. 3.4.10	Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) wide-banded reflected wave; (b) — = irregular target wave, ---- = realized wave -----	62

Fig. 4.1.1 Dimensionless powers versus relative depth for $h=50\text{ cm}$ and $S=30\text{ cm}$: * * * = mean power, o o o = maximum power including only progressive wave force, — = maximum power including both progressive and standing wave forces ----- 74

表目次

(List of Tables)

Table 2.1.1 Summary of wave flumes in Korea -----	27
Table 2.1.2 Number of wave flumes and basins in foreign research institutes -----	27

제1장 서론

해양공학 또는 연안공학과 관련된 제반 연구는 크게 이론적 연구, 현장관측을 통한 연구, 수치모형을 이용한 연구, 수리실험을 통한 연구 등으로 구분할 수 있다. 이론적 연구 및 현장관측을 통한 연구는 새로운 이론의 정립 및 관측기기의 발달로 지속적인 발전을 계속해 왔으며, 특히 최근에는 대용량 고속 컴퓨터의 개발과 수치해석 기법의 발달로 인하여 수치모형을 이용한 연구가 급속한 발전을 보이고 있다. 수치모형의 장점은 개발된 수치모형의 구입 및 전수가 용이하며, 하나의 수치모형을 여러가지 경우에 쉽게 적용할 수 있다는 것이다. 수리실험은 초기투자가 크며 인력, 장비, 유지비 등이 많이 필요한 반면 이론적 또는 수치모형 연구와는 달리 가정이나 간략화 없이 해양현상을 정확히 관측할 수 있는 장점이 있다. 또한 현장관측을 통한 연구와 비교해 볼 때 水理實驗은 Scale effect 등의 문제가 있기는 하지만 원하는 해양현상을 비교적 자유롭게 제어할 수 있을 뿐만 아니라 현상을 반복해서 재현하고 원하는 지점에서 쉽게 관측을 행할 수 있는 장점이 있다.

해양공학 연구의 발전을 위해서는 위에 열거한 여러 방향의 연구가 균형적으로 발전하여 상호보완적으로 사용되어야 할 것이다. 그러나 현재 우리나라의 해양공학 연구는 현장관측과 수치모형 연구에 편중되어 있으며, 수리실험 분야는 타 분야에 비해 낙후되어 있다. 수리실험 분야의 연구에



대학에 설치되어 있는 파랑수조는 대부분 외국 기술진에 의해 제작된 것이다. 파랑수조는 크게 수조 본체와 조파기로 구성되어 있는데, 수조 본체 및 조파기 하드웨어의 일부는 국내 기술로 제작이 가능하지만 조파기를 가동시키고 자료를 독취하는 파랑수조 제어시스템은 국내 연구가 전무하여 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 선진 외국의 기술에 전적으로 의존하고 있는 파랑수조 제어시스템의 국내 개발이 시급한 실정이다.

3개년 계획으로 실시되고 있는 본 연구의 최종목표는 2차원 파랑수조의 제어시스템을 국내 기술로 개발하는 것이다. 이를 위한 연차별 연구계획은 1차년도에 파랑수조 제어시스템을 개발하고, 2차년도에 시작품 차원에서 파랑수조를 제작하고, 3차년도에는 파랑수조에 제어시스템을 접목시켜 개발된 제어시스템의 성능을 검증, 보완함으로써 파랑수조 제작 및 제어시스템의 완전 국산화를 이룩하는 것이다. 이러한 2차원 파랑수조 제어시스템의 국내 개발이 성공할 경우 해양공학 관련 국내 대학 및 연구소에 파랑수조 제어시스템을 염가로 공급함으로써 국내 해양공학 수리실험 분야 연구의 활성화에 기여할 수 있을 것이며, 차후 본 기술을 확장하여 3차원 조파수조 제작에 활용할 수 있을 것이다.

본 보고서는 1차년도 보고서로서 5개의 장으로 구성되어 있으며, 장별 주요내용은 다음과 같다. 제2장에는 국내·외 대학 및 연구소의 파랑수조 특성 및 보유현황을 조사하여 수록하였다. 제3장에는 본 보고서의 핵심부분인 파랑수조 제어 소프트웨어 개발에 대한 내용이 수록되어 있다. 제4장에는 2차년도에 시작품 차원에서 건설될 파랑수조의 공간배치 및 예비설계 내용을 수록하였다. 마지막으로 제5장에는 금년도 연구결과에 대한 고찰 및 후속 연구계획에 대한 내용이 수록되어 있다.

제2장 국내·외 波浪水槽現況 및 特性調査

파랑수조는 그 형태에 따라 2차원, 3차원, 원형 등으로 구분된다. 일반적으로 3차원 수조는 직사각형 수조의 한쪽 면을 따라 하나 또는 여러 개의 조파판이 설치되어 파랑의 방향을 고려한 3차원적 현상을 실험할 수 있도록 되어 있으며 (예로서 Wu (1985) 및 Vincent and Briggs (1989)), Dalrymple and Dean (1972)에 의해 최초로 제안된 원형 수조는 수조 중앙에 원통형 조파기를 설치하고 원통의 중앙으로부터 약간의 偏心을 갖는 축을 중심으로 원통을 회전시켜 수조의 중앙으로부터 바깥쪽으로 전파되는 나선형의 파랑을 발생시킨다. 이러한 원형 수조는 수조의 둘레를 따라 입사각 및 파고가 일정한 파랑을 발생시키기 때문에 수조벽의 內側에 모래를 쌓아 沿岸漂砂 이동실험에 이용되고 있다 (Suh and Dalrymple, 1987). 본 연구의 대상인 2차원 파랑수조는 한 방향으로 길고 폭이 좁은 수로의 한쪽 끝에 조파기를 설치하여 파랑을 발생시키는 장치로서 파랑의 방향을 고려해야 하는 실험은 할 수 없는 가장 기본적인 파랑수조이다.

2차원 파랑수조는 발생시킬 수 있는 파랑의 형태에 따라 규칙파 수조와 불규칙 파랑수조로 대별되는데, 規則波 水槽는 Motor의 회전을 Gear와 Crank wheel을 통하여 조파판의 규칙적인 운동으로 변환시키는 비교적 단조로운 조파장치를 갖는다. 불규칙 파랑수조는 Fig. 2.1.1의 계통도에 나타낸 바와 같이

복잡한 시스템으로 구성된다. 우선 컴퓨터 내에서 불규칙파의 목적파랑 스펙트럼을 전달함수를 이용하여 造波板의 운동에 관한 스펙트럼으로 변환시킨 후 이로부터 조파판의 운동에 대한 時系列 신호를 계산한다. 이와 같이 계산된 디지털 신호는 DAC (Digital/Analogue converter)를 통하여 아나로그 신호로 전환되어 일종의 自動制御裝置인 Servo-mechanism을 거쳐 Motor로 전달된다. 한편 DAC를 통하여 나온 아나로그 신호는 Analogue oscilloscope를 통하여 확인될 수 있으며, 규칙파의 경우는 컴퓨터에서 신호를 계산하는 대신 Function generator에서 나온 아나로그 신호를 직접 Servo-mechanism으로 보낼 수도 있다. Motor의 종류는 크게 유압식과 전기식으로 구분되며 Motor로부터 나온 출력은 Screw bar 또는 유압 피스톤을 통하여 조파판으로 전달되어 조파판을 움직이게 된다. 油壓 피스톤의 움직임은 Position detector에 의해 감지되어 다시 Servo-mechanism으로 전달되어 Motor의 출력을 보정하게 된다. 이와 같이 발생된 파랑은 수조내에 설치된 파고계로 측정되어 ADC (Analogue/Digital converter)를 통하여 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터에 기록된다. 파랑수조 제어시스템은 상기와 같은 造波機 制御시스템과 관측 및 분석 시스템 일체를 포함한다.

2차원 파랑수조의 조파기 형태는 조파판 전체가 前後로 움직이는 피스톤형, 조파판의 下端이 수조 바닥에 경첩으로 연결되어 있는 Flap형, 쇄기 형태의 물체를 상하로 움직여 파랑을 발생시키는 Plunger형(Wang, 1974) 등이 있다. 현재 국내에 2차원 파랑수조를 보유하고 있는 기관은 한국해양연구소, 건설부 국립건설시험소, 농어촌진흥공사 수리시험장, 부산수산대학교, 동아대학교, 강원대학교 등이며 각 파랑수조의 제원 및 특성을 Table 2.1.1에 수록하였다. 외국의 경우는 영국의 HR, 네델란드의 DHL, 미국의 CERC, 캐나다의 NRC, 덴마크의

DHI, 일본의 PHRI 등 해양 관련 연구소들은 물론이고 해양공학 프로그램이 있는 대학들에서도 2차원 및 3차원 파랑수조를 몇 개씩 보유하고 있는 실정이다. 예로서 미국 Delaware 대학은 일반 2차원 파랑수조 3개, 바람으로 파랑을 발생시키는 풍동수조 1개, 나선형 파랑을 발생시키는 Spiral wave basin 1개, 多方向 不規則波를 발생시킬 수 있는 Snake-type 3차원 조파수조 1개 등을 보유하고 있으며, Oregon 주립대학은 길이 104.4 m, 폭 3.7 m, 깊이 4.6 m의 Super tank를 포함하여 2次元 파랑수조 2개, 3차원 파랑수조 1개, Spiral wave basin 1개 등을 보유하고 있다. 영국의 Liverpool 대학도 크고 작은 2차원 파랑수조 4개와 3차원 파랑수조 1개를 보유하고 있다. 해양연구소(1990)에 외국의 해양공학 관련 주요 연구소들의 수조 보유 현황, 제원 및 특성이 조사되어 있는데 그 보유 현황만 정리하면 Table 2.1.2와 같다. 이상의 조사 결과로 볼 때 국내 대학 및 연구소의 모든 파랑수조를 합했을 때 외국의 연구소 하나가 보유하고 있는 파랑수조 보유량과 비슷한 것을 알 수 있으며, 이는 국내의 수리실험 분야 연구가 외국에 비해 상당히 뒤떨어져 있음을 나타내는 단적인 증거라 할 수 있다.

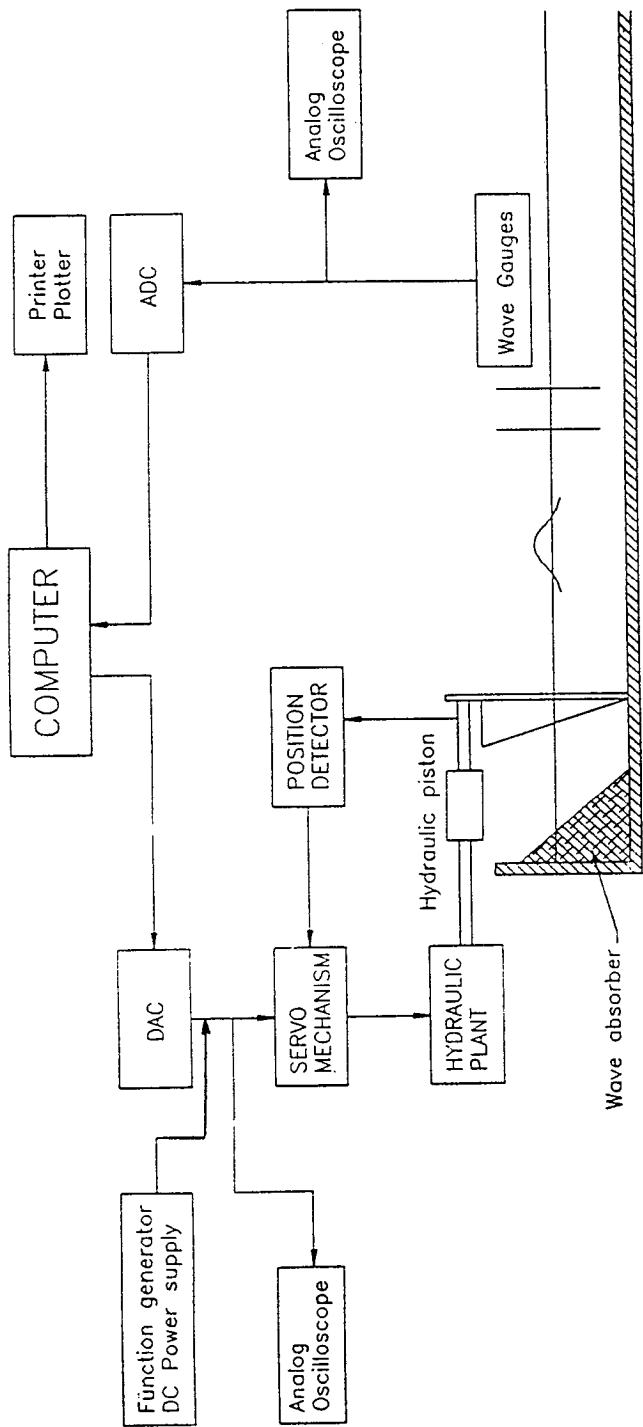


Fig. 2.1.1 Outline of the two-dimensional irregular wave generating system.

Table 2.1.1 Summary of wave flumes in Korea

기관명	파랑	Motor 형태	조파기 형태	제원 L x W x H (m)	흐름발생 장치유무	기타
한국해양연구소	불규칙	유압식	피스톤형	53.2x1.0x1.25	유	반사파 흡수필터
건설부 국립건설시험소	규칙		Flap형	36.0x0.6x1.2	무	
농어촌진흥공사 수리시험장	불규칙	유압식	피스톤형	27.0x1.5x2.5	무	풍동수조 겸용
농어촌진흥공사 수리시험장	불규칙	유압식	피스톤형	40.0x0.6x0.9	무	
부산수산대학교	규칙		Flap형	18.5x0.6x1.0	유	토사이동 시험가능
동아대학교	불규칙	유압식	피스톤형	20.0x0.8x1.0	무	
강원대학교	규칙		피스톤형	20.0x0.8x1.0	무	

Table 2.1.2 Number of wave flumes and basins in foreign research institutes

Institute	Wind Wave Flume	Wave Flume	Open Channel	3-D Basin
HR, UK	1	3	2	8
DHL, Netherland	2	3	5	1
NRC, Canada		3	1	4
PHRI, Japan	2	6	2	5

제3장 造波機 制御 시스템의 構成

제1절 概 要

造波機의 작동에 대해서는 오래전부터 많은 연구가 수행되어 왔으나 아직도 해결해야 될 몇가지 어려운 문제들이 남아 있다. 이중에 가장 중요하게 거론할 수 있는 것이 反射波 문제이다. 이것은 길이가 有限한 수조에서 항상 경험하게 되는 문제로서 조파기에서 발생한 파랑이 수조의 下流 끝 또는 水槽內에 설치된 模型構造物에서 반사되어 조파기쪽으로 진행하다가 조파기에서 再反射되는 현상에 관련된 문제이다. 재반사파는 본래 의도된 目的波浪에 부가되어 진행하고, 다시 반사되어 逆流, 재반사되는 과정을 되풀이한다. 이러한 과정중에서 主 실험구간에 서 발생하는 파랑은 목적파랑과는 상당한 정도의 차이를 보이게 되는 것이며, 이 경우에 실험결과를 목적파랑에 결부시키는 것은 중대한 實驗誤差를 야기시키는 원인이 된다고 할 수 있다. 이러한 문제는 조파기 쪽을 향하여 直立壁을 갖는 모형 구조물에 대한 수리모형실험에서 더욱 심각하게 발생한다.

이러한 반사파 문제를 해소하기 위하여 이용하는 대표적인 방법으로 다음 두 가지가 있다. 첫번째는 반사파가 조파판에서 재반사되기 전까지만 실험을 수행하는 것이다(일명 Bursting 방법). 이 방법은 아직도 防波堤의 반사특성을 파악하

는 실험에 많이 이용되고 있으며 水槽의 길이가 매우 길 경우에 (일반적으로 50 m 이상) 적용 가능하다. 그러나, 조파기 최초 稼動時에는 일반적으로 파랑이 불안정하며, 특히 조파기의 안전을 위하여 목적파랑의 수 주기에 해당하는 시간 동안 Slow start기능을 가동할 경우에는 재반사파 발생 이전의 시간중에서도 실험 목적의波浪을 재현하고 있는 區間은 얼마 되지 않기 때문에 실험자료 분석의 시간구간을 정하는 데 많은 주의를 요한다. 또한, 이러한 Bursting 방법은 규칙파 실험에서는 사용이 가능하지만, 파랑발생 시간이 어느 정도 이상 되어야 하는 불규칙파 실험에는 사용이 불가능하다. 두번째 방법은 실험구조물 부근에서 수조를 수조폭방향으로 양분하여 실험구조물을 한쪽 부분에만 설치하고 다른 한쪽은 파랑이 자유롭게 통과하도록 함으로써 조파기 부근에서의 반사파의 영향을 상대적으로 약화시키는 것이다. 이 방법은 비교적 폭이 넓으면서 (약 1.5 m 이상) 길이도 충분히 확보되어 있는 (약 50 m 이상) 수조에 적용가능하다. 그러나, 이 방법도 반사파의 수조내 累積을 완전히 해소시킬 수는 없기 때문에 실험중에도 發生波浪이 목적파랑에 符合하는지를 계속적으로 점검할 필요가 있다.

반사파 문제를 해소 또는 輕減할 수 있는 上記 두가지 방법은 흔히 설치되는 소규모의 수조(길이 30 m 이내, 폭 60 cm 내외)에서는 사용이 곤란하며 다른 방법을 강구할 필요가 있다. 최근에 컴퓨터를 이용한 전기식 또는 油壓式 Servo 시스템의 도입으로 인하여 조파판의 가동중에도 반사파를 조파판의 운동을 통하여 계속적으로 吸收할 수 있는 방법이 제시된 바 있다 (全 等, 1989; Bullock and Murton, 1989). 이 방법에는 조파판 발생파랑을 계측하는 파고계를 조파판 전면 에 설치 운영하며, 이 파고계로부터의 시그널로 목적파랑에 相應하는 시그널을 수

정하고 수정된 신호를 일종의 數値필터를 통과시켜 造波板 입력 신호를 보정하는 절차를 가진다.

이 방법은 현재 부분적으로 실용화 단계에 있으나 반사파 흡수필터의 時間領域에서의 離散的 적용방법에 대해서는 구체적으로 제시된 바가 없었다. 본 연구에서는 반사파흡수 기능을 포함하는 포괄적 制御 시스템을 재구성하고, 시간영역에서 斷續的으로 적용할 수 있는 반사파 흡수 필터의 설계를 시도하였다. 이용된 필터의 이산적 具現方式은 입력데이터와 출력데이터가 1대 1로 相應하는 방식이므로 데이터의 통계적 성격이 사전에 알려져 있지 않은 불확정적 입력데이터에 대해서도 적용이 가능하다. Fig. 3.1.1은 전체적인 조파시스템의 구성과 본 연구에 이용된 座標界를 보여준다.

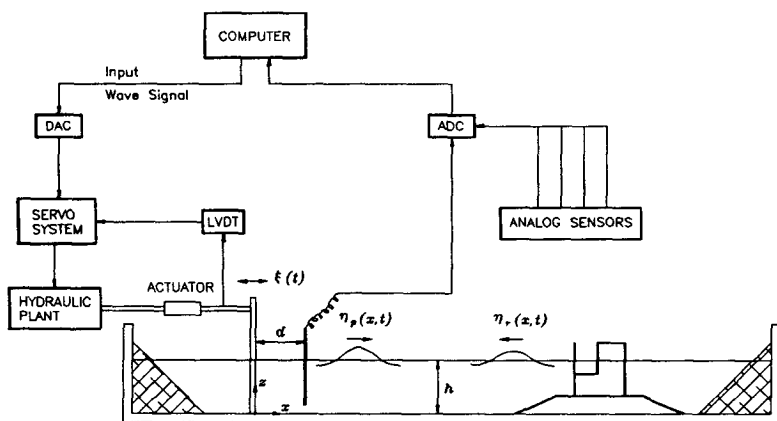


Fig. 3.1.1 Schematic diagram of wave making system.

제2절 造波시스템의 制御回路

油壓 Servo 조파시스템은 제어 컴퓨터에서 시그널을 받아 유압장치를 제어하며 최종적으로 수조에 설치된 造波板을 구동하여 파랑을 발생시키는 일련의 전기-기계 장치를 의미한다. 컴퓨터 시그널이 파랑으로 변환되는 데에는 중간의 여러 가지 부속 기계장치와 조파판 고유의 傳達函數들을 경험하게 되며 Fig. 3.2.1은 이러한 전달함수와 입출력 데이터들의 상관관계를 나타내는 전체적인 제어회로를 보여주고 있다. 조파판에 의하여 발생된 파랑은 진행하면서 수조의 형태적 특성에 의하여 변형을 하고 또한 수조의 끝 또는 실험구조물에서 발생한 반사파가 진행파에 부가, 또는 조파판에서 再反射 됨으로써 진행파의 왜곡을 초래한다. 따라서, 조파기에서 발생된 파랑을 目的波浪과 일치시키기 위해서는 수조에서의 복합된 파랑을 계속적으로 모니터링하여 입력시그널을 보정하는 循環性(Feed-back loop) 제어시스템 회로를 구성할 필요가 있다.

Fig. 3.2.1에는 각각의 전달함수를 직사각형으로 나타내었으며 이들의 적용순서는 화살표로 표시하였다. 각 전달함수의 입출력 데이터에 대해서는 화살표 진행 방향을 위로 했을 때 왼쪽에 입출력 시그널의 時系列을 Greek 문자 또는 영어 소문자로 표기하였으며, 오른쪽에는 시그널의 Laplace 변환을 영어 대문자로 표기하였다. 회로도에서 J_1 , J_2 , J_3 는 독립된 시그널들이 모이는 連結點을 의미하며 원으로 표시된 기호안의 부호는 演算의 종류를 의미한다. 실제로 J_2 , J_3 는 모니터링 波高計이며 여러 복합된 파랑의 동시 계측을 의미한다.

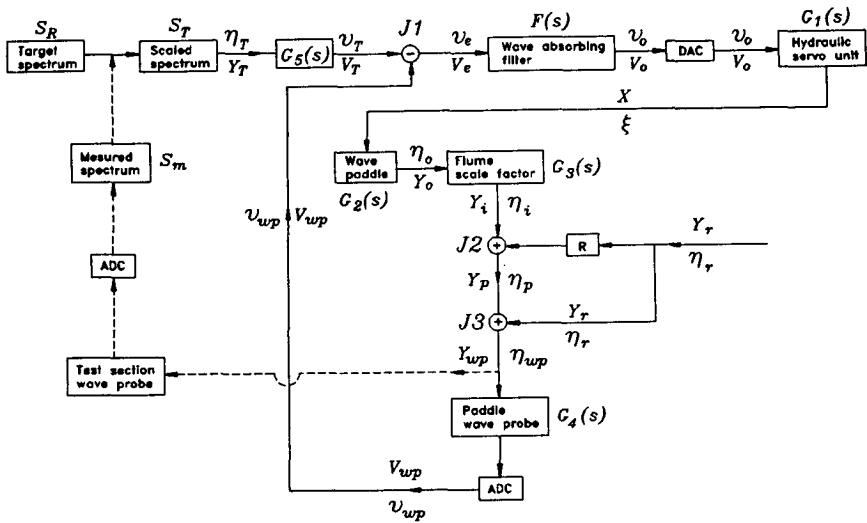


Fig. 3.2.1 Overall control circuit of wave making system.

Fig. 3.2.1의 회로도를 상세히 설명하면 임의의 規則波 또는 스펙트럼 S_R 의 불규칙파에 상응하는 컴퓨터 입력시그널 $\eta_R(t)$ 를 제조하고 이 시그널을 전달함수 $G_5(s)$ 를 적용하여 電壓 시그널 $v_T(t)$ 로 변환한다 (s 는 Laplace 연산자임). 반사파 흡수필터 $F(s)$ 는 $v_T(t)$ 를 $v_o(t)$ 로 변환시킨다. 여기까지는 제어 컴퓨터에서 이루어지며 최종값 $v_o(t)$ 는 디지털 값들이다. $v_o(t)$ 는 컴퓨터에서 출력되어 디지털-아날로그 변환기에 의하여 아날로그 시그널로 변환되며 유압시스템 및 조파판을 가동하여 파랑, $\eta_o(t)$ 를 발생시킨다. 발생된 파랑은 수조내에서 진행중 수조자체의 전달함수 $G_3(s)$ 에 의하여 자체변형을 하며 반사파 $\eta_r(t)$ 의 영향을 받아 중복된 형태의 $\eta_{wp}(t)$ 를 형성한다. $\eta_{wp}(t)$ 는 보정계수 $G_4(s)$ 를 갖는 파고

계에 의하여 $v_{wp}(t)$ 로 감지된 다음 컴퓨터에 입력되어 $G_5(s)$ 의 출력, $v_T(t)$ 를 수정시킨다. 수정된 신호는 $v_e(t)$ 로서 $F(s)$ 에 입력되고 이와같은 과정이 계속 반복되면서 파랑을 발생시키게 된다.

전달함수 $G_1(s)$ 는 Servo 유압장치에 대한 것이며 입력신호 $v_o(t)$ 에 대해 피스톤 Actuator와 이에 연결된 造波板의 운동 $\xi(t)$ 를 발생시킨다. Fig. 3.2.2에서 보이는 것처럼 Servo 유압장치도 循環性 回路로 되어 있다. Servo controller는 반사파 흡수필터 $F(s)$ 의 電壓 出力 $v_o(t)$ 를 電流 信號 $c(t)$ 로 변환한다. Servo valve는 전류구동이며 $c(t)$ 에 의하여 유압펌프의 유량 $q(t)$ 를 조절하며 최종적으로 Actuator의 운동 $\xi(t)$ 를 제어하게 된다. $\xi(t)$ 는 조파판의 위치를 감지하는 LVDT에 의하여 감지되어 전압 $v_L(t)$ 로 변환된 다음 최초 입력 전압 $v_o(t)$ 를 수정한다.

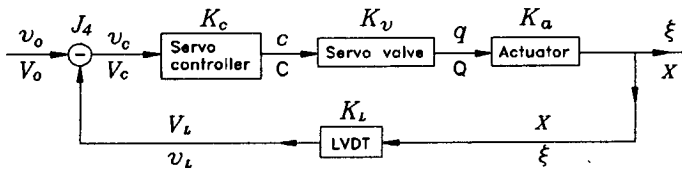


Fig. 3.2.2 Feed-back circuit of hydro-servo system.

Fig. 3.2.1에서 點線 化살표로 표시된 부분은 사전에 지정된 순환 Loop의 지속시간이 끝나고 나서 進行波(Progressive wave mode)를 파고계로 계속하여 컴퓨터에 입력된 目的의波浪과 일치하는지 확인하는 작업으로서 이들이 일치하지 않으면

목적파랑을 수정시켜 $\eta_T(t)$ 을 발생시키는 절차를 의미한다(全等, 1989). 이는 사실상 수조에 의하여 발생파랑이 변형되는 정도, 즉, Fig. 3.2.1에서 수조 전달 함수, $G_3(s)$ 를 실험적으로 결정하는 과정이라고 할 수 있다. 回路圖에는 불규칙 파의 목적파랑 스펙트럼 S_R 과 계측된 스펙트럼 S_m 이 포함되어 있다.

제3절 反射波 吸收필터의 設計

1. 制御回路의 解析

조파판에 의하여 발생된 파랑이 목적파랑과 일치하는 상태는 Fig. 3.2.1에서 $\eta_p(t)$ 가 $\eta_T(t)$ 와 일치함을 의미한다. 傳達函數들은 $G_5(s)$ 와 $F(s)$ 의 두 함수를 제외하고는 기계장치, 수조 및 계측기기에 의해서 물리적으로 구현됨을 알 수 있다. 반면에 상기 두 함수는 컴퓨터 내에서 연산에 적용되기 때문에 이들을 효과적으로 구성함으로써 발생파랑의 왜곡을 최소화할 수 있다. 이를 위한 회로분석을 시도하는 데 있어서 발생파랑 계측용 波高計는 조파판에 부착하여 사용하는 것을 전제로 하였다(즉, Fig. 3.1.1에서 $d = 0$). 이 경우에는 $G_3(s)=1$ 이며 發生波浪의 관심범위를 조파판 근처에 국한시킴을 의미한다. 즉, 회로분석에서 목적파랑을 조파판에서의 파랑과 일치시키는 것을 의미하며 실질적인 실험구간까지의 수조 전달함수의 추출과 이에 의한 수조내 재현파랑의 수정은 Fig. 3.2.1에서

의 점선 화살표 부분에 일임하기로 한다.

Fig. 3.2.1의 연결점 J1에서 入出力 데이터의 Laplace 變換을 고려하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$V_e(s) = V_T(s) - V_{wp}(s) \quad (3.3.1)$$

연결점 J2에서는 조파판 운동에 의해서 발생하는 파랑 $\eta_i(t)$ 에 反射波의 조파판에서의 再反射 파랑이 重疊되어 진행파 $\eta_p(t)$ 를 형성한다. 이를 s 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$Y_i(s) = V_e(s)F(s)G_1(s)G_2(s)G_3(s) \quad (3.3.2)$$

$$Y_p(s) = Y_i(s) + R(s) Y_r(s) \quad (3.3.3)$$

여기서, 전달함수 $R(s)$ 는 모니터링 파고계 위치에서 조파판 재반사 파랑의 반사파에 대한 位相差로 다음과 같이 나타내진다.

$$R(s) = \exp(2k_r d) \quad (3.3.4)$$

여기서, k_r 은 반사파의 波數, d 는 Fig. 3.1.1에 나타낸 바와 같이 모니터링 파고계의 조파판으로부터의 이격거리이다.

연결점 J3에서 진행파 $\eta_p(t)$ 는 반사파 $\eta_r(t)$ 와 중첩되어 결국 總波浪 $\eta_{wp}(t)$ 를 형성한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Y_{wp}(s) = Y_p(s) + Y_r(s)$$

(3.3.5)

$$V_{wp}(s) = G_4(s)Y_{wp}(s) \quad (3.3.6)$$

모니터링 파고계가 조파판에 부착되었을 때, $G_3(s)=1$, $R(s)=1$ 이 되며 식 (3.3.1), (3.3.2), (3.3.3), (3.3.5) 및 (3.3.6)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Y_p(s) = \frac{1}{1+B(s)}[F(s)G_1(s)G_2(s)V_T(s) + (1-B(s))Y_r(s)] \quad (3.3.7)$$

여기서,

$$B(s) = F(s)G_1(s)G_2(s)G_4(s) \quad (3.3.8)$$

식 (3.3.7)에서 진행파 $\eta_p(t)$ 가 반사파 $\eta_r(t)$ 에 무관하려면,

$$B(s) = 1 \quad (3.3.9)$$

이 되어야 하며, 식 (3.3.8)과 (3.3.9)를 식 (3.3.7)에 대입하면,

$$Y_p(s) = \frac{V_T(s)}{2G_4(s)} \quad (3.3.10)$$

즉,

$$Y_p(s) = \frac{G_5(s)}{2G_4(s)} Y_T(s) \quad (3.3.11)$$

이 된다. 식 (3.3.11)에서 $Y_p(s)$ 가 $Y_T(s)$ 와 일치하려면 다음의 관계식이 만족되어야 한다.

$$G_5(s) = 2G_4(s) \quad (3.3.12)$$

식 (3.3.9)는 반사파가 조파판에서 吸收됨을 나타내며 실제로는 반사파가 조파판에서 재반사되지 않고 에너지가 조파판 운동에 의해서 조파판 뒷면으로 통과되는 것을 의미한다. 결국, 目的波浪 $\eta_T(t)$ 가 모니터링 파고계에 의하여 측정되는 進行波 $\eta_p(t)$ 와 일치하려면 식 (3.3.9)와 식 (3.3.12)가 동시에 만족되어야 함을 알 수 있다.

따라서, 반사파 흡수필터에 해당하는 전달함수 $F(s)$ 는 식 (3.3.8)과 (3.3.9)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(s) = \frac{1}{G_1(s)G_2(s)G_4(s)} \quad (3.3.13)$$

여기서, $G_4(s)$ 는 波高計의 傳達函數로 일반적으로 수면변화를 電壓으로 변환하는 역할을 하며, 입력 수면변화의 주파수와 무관하게 일정한 값을 갖는다.

2. 油壓 Servo 시스템의 傳達函數, $G_1(s)$

식 (3.3.13)에서 전달함수 $G_1(s)$ 는 Fig. 3.2.2의 유압 Servo 시스템에 대한 회로분석을 통하여 구할 수 있다. 즉, 연결점 J4에서 다음의 관계식을 얻을 수 있으며,

$$V_c(s) = V_o(s) - K_L(s)X(s) \quad (3.3.14)$$

$$X(s) = V_c(s)K_c(s)K_v(s)K_a(s) \quad (3.3.15)$$

이 두 식으로부터 유압 Servo 시스템의 전달함수, $G_1(s)$ 를 구할 수 있다.

$$G_1(s) = \frac{K_c(s)K_v(s)K_a(s)}{1 + K_L(s)K_c(s)K_v(s)K_a(s)} \quad (3.3.16)$$

식 (3.3.16)의 전달함수들은 유압장치에 관련되어 있으며 모듈러스와 위상은 입력 데이터의 周波數에 따라 변하는 固有特性을 갖는다. 그러나, Actuator의 전달함수 $K_a(s)$ 를 제외한 다른 傳達函數들, $K_c(s)$, $K_v(s)$, $K_L(s)$ 는 통상의 조파기에서 채택하는 주파수 범위 (5 Hz 미만)내에서 통상 위상이 영(0)이며, 모듈러스도 거의 일정하게 나타나는 특성을 갖는다.

피스톤식 Actuator는 입력유량을 수평변위로 변환시키는 역할을 한다. 따라서, 다음의 관계식이 성립된다.

$$q(t) = A \frac{d\xi(t)}{dt} \quad (3.3.17)$$

이를 s -領域에서 표현하면 다음과 같다.

$$Q(s) = sAX(s) \quad (3.3.18)$$

여기서, A 는 Actuator의 斷面積을 의미한다. 따라서, Actuator의 전달함수 $K_a(s)$ 는 다음과 같다.

$$K_a(s) = \frac{1}{As} \quad (3.3.19)$$

식 (3.3.19)를 식 (3.3.16)에 대입하면 전달함수 $G_1(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_1(s) = K_1(s) \frac{s}{K_L(s)[s+K_1(s)]} \quad (3.3.20)$$

여기서,

$$K_1(s) = \frac{K_e(s)K_v(s)K_L(s)}{A} \quad (3.3.21)$$

3. 造波板 傳達函數, $G_2(s)$

식 (3.3.13)에서 조파판 전달함수 $G_2(s)$ 는 매우 복잡한 波數의 함수형태로 나타내지며, 선형 조파이론에 근거하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Dean and Dalrymple, 1984; 全 等, 1993).

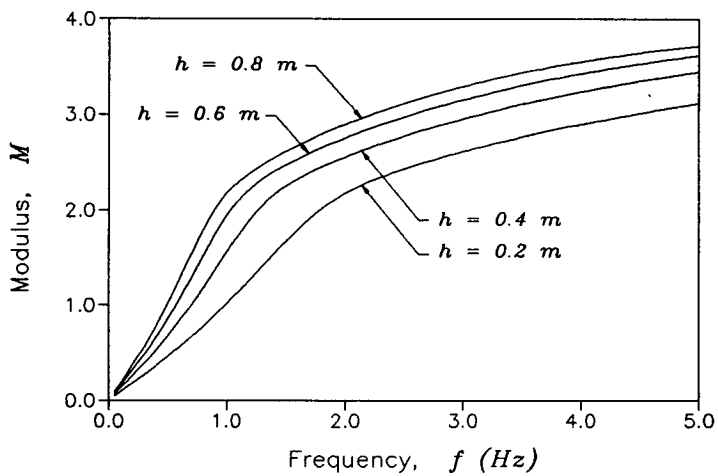
$$G_2(s) = M \exp(i\delta) \quad (3.3.22)$$

여기서,

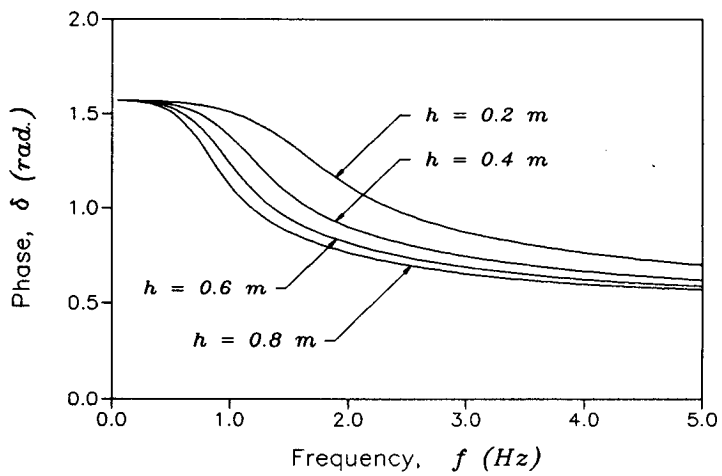
$$M = \sqrt{E^2 + P^2}, \quad \delta = \tan^{-1}\left(\frac{P}{E}\right) \quad (3.3.23)$$

$$E = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \sin^2(k_m h)}{2k_m h + \sin(2k_m h)}, \quad P = \frac{4 \sinh^2(k_p h)}{2k_p h + \sinh(2k_p h)} \quad (3.3.24)$$

전달함수, $G_2(s)$ 의 모듈러스, M 과 위상, δ 는 수심과 입력 주파수의 함수로 Fig. 3.3.1에 보인 바와 같이 수심이 증가함에 따라 모듈러스는 증가하고 위상은 감소하며, 결국 각각 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3.3.1 Modulus and phase of transfer function of wave board: (a) modulus; (b) phase.

식 (3.3.24)에서 波數 k_p 와 k_m 은 각각 進行波 성분과 消滅波 성분을 나타내며 다음과 같은 分散 關係式으로부터 구할 수 있다.

$$\omega^2 = gk_p \tanh k_p h \quad (3.3.25)$$

$$\omega^2 = -gk_m \tan k_m h \quad (3.3.26)$$

ω 는 파랑의 角주파수이며 Laplace 演算子 s 와의 관계는 $s=i\omega$ 와 같다. 상기 식 (3.3.22)에 의하여 주어지는 $G_2(s)$ 는 그 함수형태의 복잡성으로 인하여 이를 조파기 회로 구성에 직접적으로 이용하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 이를 다음과 같이 유리함수(Rational function) 형태를 갖는 근사식으로 표현하였다(全 等, 1993).

$$G_2(s) = \frac{bs}{s+a} \quad (3.3.27)$$

여기서, a 와 b 는 水深에 따라 변하는 상수이다. 式 (3.3.27)에 因果性和 安定性을 賦與하기 위해서는 收斂域이 s 領域에서 Pole $s=-a$ 의 오른쪽에 위치해야 하며, 虛數軸을 포함해야 한다(Oppenheim et al., 1983). 따라서, 常數 a 는 陽의 값을 가져야 한다.

式 (3.3.27)의 演算子 s 를 $i\omega$ 로 代置하여 식(3.3.22)와 같은 형태로 쓰면 다음과 같다.

$$G_2(s) = \bar{M} \exp(i\bar{\delta}) \quad (3.3.28)$$

여기서,

$$\bar{M} = \frac{\omega b}{\sqrt{\omega^2 + a^2}}, \quad \bar{\delta} = \tan^{-1}\left(\frac{a}{\omega}\right) \quad (3.3.28)$$

常數 a 와 b 는 \bar{M} 와 $\bar{\delta}$ 및 式 (3.3.22)에서의 理論值, 즉, M 과 δ 에 대하여 任意의 限界 주파수까지 最小自乘法을 적용하여 결정할 수 있다. N_f 개의 個別 주파수에 대하여 \bar{M} 와 $\tan(\bar{\delta})$ 의 自乘誤差는 다음과 같다.

$$E_M = \sum_{i=1}^N \left[M_i - \frac{\omega_i b}{\sqrt{\omega_i^2 + a^2}} \right]^2 \quad (3.3.29)$$

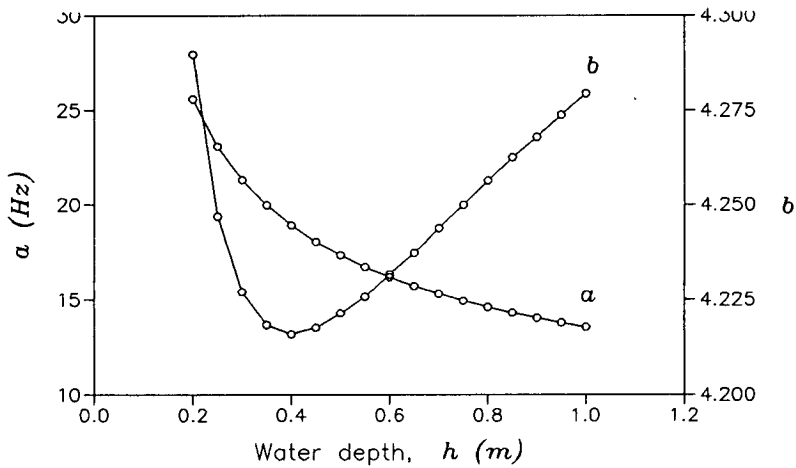
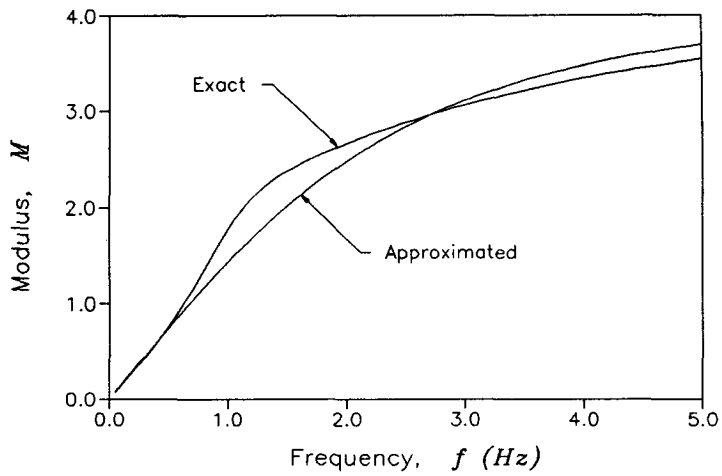
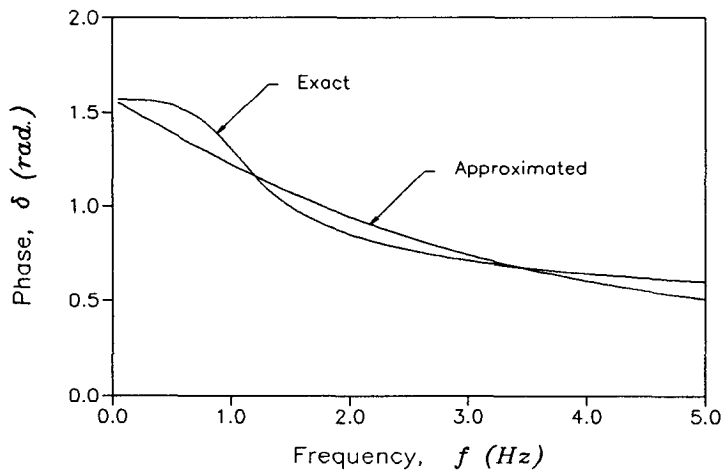


Fig. 3.3.2 Variations of filter coefficients, a and b with respect to change of water depth.



(a)



(b)

Fig. 3.3.3 Comparison of exact and approximated transfer function of wave board for $h = 0.5$ m: (a) modulus; (b) phase.

$$E_p = \sum_{i=1}^N \left[\tan(\delta_i) - \frac{a}{\omega_i} \right]^2 \quad (3.3.30)$$

常數 a 와 b 는 $\partial E_p / \partial a = 0$ 와 $\partial E_M / \partial b = 0$ 에서 얻어진 두개의 聯立方程式을 풀어 各各 결정할 수 있다. 卽,

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\tan(\delta_i)}{\omega_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\omega_i^2}}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{M_i \omega_i}{\sqrt{(\omega_i^2 + a^2)}}}{\sum_{i=1}^N \frac{\omega_i^2}{\sqrt{(\omega_i^2 + a^2)}}} \quad (3.3.31)$$

본 연구에서는 限界周波數를 실제 造波水槽에서 발생하는 파랑의 주파수 한계를 고려하여 5 Hz를 택하였다. Fig. 3.3.2는 이와 같이 결정한 常數 a 와 b 의 水深에 따른 변화를 보여주며, Fig. 3.3.3은 水深 0.5m에서 近似된 모듈러스와 位相의 理論値와의 비교를 나타내고 있다.

4. 吸收필터의 離散化

식 (3.3.20)과 (3.3.27)을 식 (3.3.13)에 대입하면 반사파 흡수필터 $F(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(s) = K_2 \left[(a + K_1) + s + \frac{aK_1}{s} \right] \quad (3.3.32)$$

여기서,

$$K_2 = \frac{K_L}{bK_1G_4} \quad (3.3.33)$$

식 (3.3.32)는 s 영역으로 표현되어 있으며 $v_e(t)$ 의 離散的 時系列 $v_{e,n}$ 에 적용하여 $v_{o,n}$ 을 출력시키기 위해서는 식 (3.3.32)를 먼저 時間領域으로 표현하여야 한다. 시간영역에서 식 (3.3.32)는 다음과 같이 표현된다.

$$v_o(t) = K_2[(a+K_1)v_e(t) + \frac{dv_e(t)}{dt} + aK_1 \int_0^t v_e(\tau) d\tau] \quad (3.3.34)$$

식 (3.3.34)를 데이터 독취간격 Δt 에 대하여 이산적으로 구현하면 다음과 같다.

$$v_{o,n} = K_p (v_{e,n}) + K_i \left[0.5 \sum_{i=1}^n (v_{e,i} + v_{e,i-1}) \right] + K_d (v_{e,n} - v_{e,n-1}), \quad (3.3.35)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$

여기서 K_p , K_i , K_d 는 상수들로서 다음과 같이 정의된다.

$$K_p = K_2(a+K_1) \quad (3.3.36)$$

$$K_i = a K_1 K_2 \Delta t \quad (3.3.37)$$

$$K_d = \frac{K_2}{\Delta t} \quad (3.3.38)$$

상기 제어해석에서 반사파 흡수기능을 포함시키지 않을 때는 Fig.3.2.1의 연결점 J1에서 단순히 $v_{wp} = 0$ 이며, 반사파가 조파판에 도달하기 이전에는 $\eta_T = \eta_i$ 가 성립되어야 한다. 이를 s -領域에서 표현하면,

$$\frac{Y_i(s)}{Y_T(s)} = G_5(s)F(s)G_1(s)G_2(s)G_3(s) = 1 \quad (3.3.39)$$

이 된다. 이로 부터 反射波 非吸收時의 필터를 $\bar{F}(s)$ 로 나타내면,

$$\bar{F}(s) = \frac{1}{G_1(s)G_2(s)G_5(s)} \quad (3.3.40)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (3.3.13)과 식 (3.3.40)을 비교하고 식 (3.3.12)를 참조하면

$$\bar{F}(s) = \frac{F(s)}{2} \quad (3.3.41)$$

임을 알 수 있다. 식 (3.3.40)의 시간영역에서의 이산적 구현형태는 식 (3.3.35)와 동일하나 $\bar{F}(s)$ 에 해당하는 상수들은 흡수필터를 가동할 경우의 반으로 다음과 같다.

$$\bar{K}_p = 0.5 K_p, \quad \bar{K}_i = 0.5 K_i, \quad \bar{K}_d = 0.5 K_d \quad (3.3.42)$$

제4절 反射波 吸收필터의 性能試驗

앞에서 제시한 반사파 흡수필터 (식 (3.3.35))를 포함하는 조파제어 및 실험 자료 독취용 프로그램을 C-언어를 사용하여 개발하였다 (부록 A1 참조). 아직은 완벽한 형태를 갖추고 있지는 않으나 골격은 거의 완성된 상태이다. 미비한 부분은 본 연구사업의 2차 및 3차년도를 통하여 수정 보완할 예정이다.

조파제어용 프로그램에 내장된 반사파 흡수필터의 성능을 파악하기 위하여 수치적으로 규칙 또는 불규칙 입력조건에 대한 예제해석을 시도하였다. 필터의 성능은 임의의 반사파량 $\eta_r(t)$ 에 대하여 시스템입력 $\eta_T(t)$ 가 Fig. 3.1.1에서 수조 내 진행파량 $\eta_p(t)$ 와 일치하는 정도로서 판별하였다.

1. 造波板 出力의 決定

반사파 흡수필터에 의하여 출력된 電壓 $v_o(t)$ 는 유압장치와 조파판의 작용에 의하여 造波板 出力, $\eta_i(t)$ 로 변환된다. 전체적인 조파시스템의 하드웨어가 구성되지 않은 현 상태에서 흡수필터의 성능을 확인하기 위해서는 조파판 출력, $\eta_i(t)$ 를 적절히 예측하여야만 한다. 따라서, 본 1차년도 사업에서는 이를 수치적으로 결정하였다.

조파판 출력, $\eta_i(t)$ 는 s -영역에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_i(s) = [G_1(s)G_2(s)G_3(s)]V_o(s)$$

(3.4.1)

앞서 언급한 것처럼, 모니터링 파고계가 조파판 전면에 부착되어 있는 경우 $G_3(s)=1$ 이며 $G_1(s)$ 는 식 (3.3.20)에 의하여 정확히 표현된다. 현재의 반사파 흡수필터의 수치적 성능확인을 위해서 조파판의 자연적 전달작용을 나타내기 위해서는 최소한 식 (3.3.22)를 정확히 만족시키는 $G_2(s)$ 를 사용해야 한다. 식 (3.3.22)에 의한 $G_2(s)$ 의 周波數帶가 데이터 득취율에 상응하는 限界周波數대로 한정되어 있다면 식 (3.3.22)의 逆離散的 Fourier 變換, 즉 一定衝動量(Impulse invariance)이 시간영역에서 가장 정확한 이산적 필터작용을 한다. 그러나, 현재의 $G_2(s)$ 의 주파수대가 한정되어 있지 않고 오히려 高周波數 通過필터와 유사한 역할을 하기 때문에, 일정충동량을 이용하는 방법을 적용하는 것은 적절하지 않다. 따라서, 여기에서도 식 (3.3.27)에 의한 근사 조파판 전달함수를 이용하였다. 즉,

$$Y_i(s) = \frac{1}{K_L(s+K_1)} \frac{bs}{s+a} V_o(s) \quad (3.4.2)$$

이를 정리하면,

$$[s+(a+K_1)+\frac{1}{s}aK_1]Y_i(s) = \frac{bK_1}{K_L} V_o(s) \quad (3.4.3)$$

와 같다. 다시, 이를 시간영역에서 표현하면,

$$\eta_{i,n} = \frac{1}{R_1} [R_2 v_{\alpha,n} + R_3 \eta_{i,n-1} + R_4 (\sum_{j=1}^{n-1} 0.5(\eta_{ij} + \eta_{ij-1}) + R_5 \eta_{i,n-1})], \quad (3.4.4)$$

$n=1, 2, 3, \dots$

이 된다. 여기서,

$$R_1 = a + K_1 + \frac{1}{\Delta t} + \frac{a K_1 \Delta t}{2} \quad (3.4.5)$$

$$R_2 = \frac{bK_1}{K_L} \quad (3.4.6)$$

$$R_3 = \frac{1}{\Delta t} \quad (3.4.7)$$

$$R_4 = -aK_1 \quad (3.4.8)$$

$$R_5 = \frac{\Delta t}{2} \quad (3.4.9)$$

2. 성능해석

성능확인 예제계산은 최초 目的波浪 시그널 $\eta_{T,1}$ 에 식 (3.3.12)에 의하여 정의되는 전달함수 $G_5(s)$ 를 적용하여 최초 에러 시그널 $v_{e,1}$ 을 결정하고 여기에 식

(3.3.35)과 (3.4.4)를 적용하여 出力波 浪 $\eta_{i,1}$ 을 계산한다 (Fig. 3.2.1 참조). 여기에 반사파 성분 $\eta_{r,1}$ 을 추가하여 시스템 출력파랑 $\eta_{p,1}$ 과 총파랑 $\eta_{wp,1}$ 을 결정하며 이에 상응하는 $v_{wp,1}$ 을 구하고 $\eta_{T,2}$ 와의 두번째 에러 시그널 $v_{e,2}$ 를 결정하여 식 (3.3.35)에 입력한다. 이와 같은 계산을 離散的 目的波 浪의 데이터 갯수만큼 계속 반복한다.

목적파랑으로는 파고, H 와 주기, T 로 나타내지는 규칙파와 스펙트럼으로 나타내지는 불규칙파를 대상으로 하였다. 불규칙파의 스펙트럼으로는 천해역의 파랑을 비교적 잘 나타내는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하였다. 수심은 0.5 m 를 가정하였다. Actuator의 단면적은 0.002 m^2 로 하였으며, 입력파랑의 주파수에 관계없이 값이 일정한 전달함수 또는 Gain들, 즉 K_c , K_v , K_L 과 G_4 는 일반적인 유압 Servo 시스템과 波高計 사양을 참조하여 각각 $K_c = 20\text{ mdc/volts}$, $K_v = 0.0057\text{ m}^{-3}/\text{mdc}$, $K_L = 28.6\text{ volts/m}$, $G_4 = 25\text{ volts/m}$ 로 설정하였다.

성능해석은 먼저 근사적으로 결정한 식 (3.3.27)의 조파판 전달함수, $G_2(s)$ 와 식 (3.3.32)의 반사파 흡수필터, $F(s)$ 에 대해 수행하였다.

가. 조파판 전달함수, $G_2(s)$ 의 성능해석

근사된 조파판 전달함수, $G_2(s)$ 의 성능을 확인하기 위하여 規則波와 不規則

波 입력조건을 가지고 數值的으로 試驗하였다. 규칙파는 서로 다른 週期和 波高의 組合, 즉 (0.7 sec, 0.05 m)와 (2.0 sec, 0.15 m)를 別途로 시도하였다. 불규칙파에 대해서는 입력조건으로서 波浪 스펙트럼을 사용하였으며 스펙트럼의 變數, 즉 有義波 주기와 파고는 上記 규칙파 組合과 同一하게 取하였다. 여기에서는 스펙트럼으로 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼 (Mitsuyasu, 1970; Goda, 1985 and 1987)을 사용하였다. 上記 입력파랑들은 消滅波 성분이 거의 排除된, 조파판에서 상당히 離隔된 지점에서의 入射波 성분에 대한 것이다. 水深은 共히 0.5m로 하였

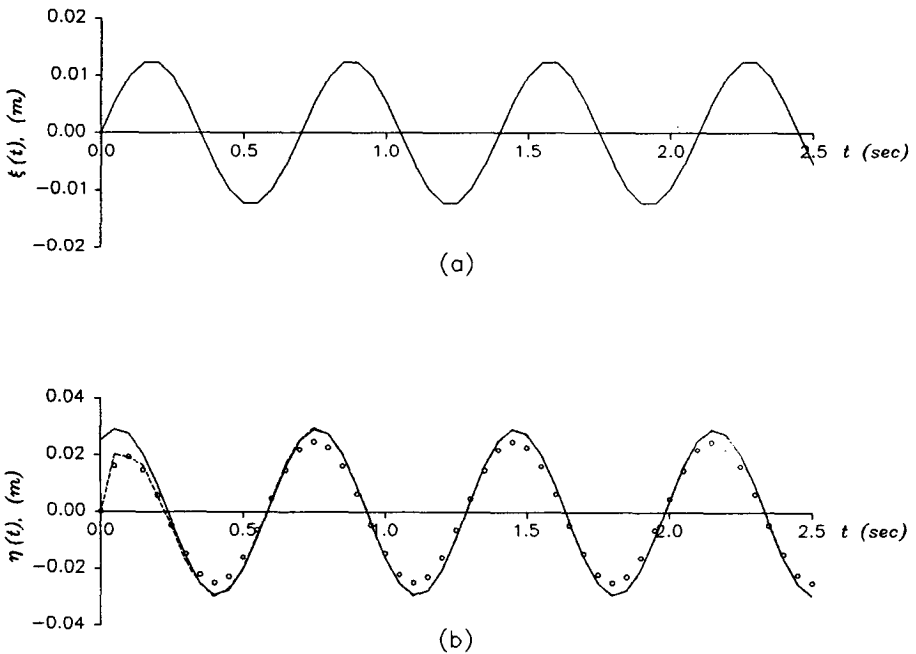


Fig. 3.4.1 Results of filter application for regular wave condition ($H = 0.05\text{ m}$, $T = 0.7\text{ s}$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at the board face (— = exact solution; --- = discrete convolution; $\circ \circ \circ$ = filter).

으며, 데이터 讀取間隔 Δt 는 0.05 秒로 하였다. 비교를 목적으로 FFT를 이용한 離散廻積(Discrete convolution)에 의한 해석도 수행하였다. 離散廻積의 적용시 한계주파수는 10 Hz로 취하였으며, 個別 주파수의 갯수는 使用 FFT의 조건을 만족 시키기 위해 1024개로 하였다.

규칙파에 대한 적용 결과를 Fig. 3.4.1과 3.4.2에 나타내었다. 각 그림에서 윗 부분은 조파판의 운동 時系列 $\xi(t)$ 를 나타낸다. 그림들은 필터의 결과가 理論値와 매우 잘 일치함을 보여주고 있다. 離散廻積의 결과는 초기에는 理論値와

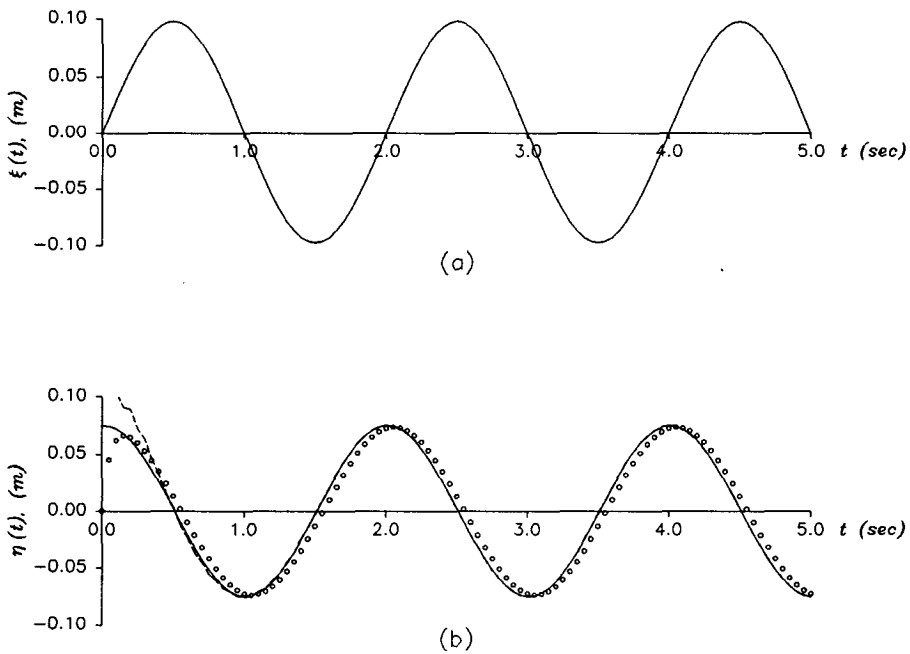
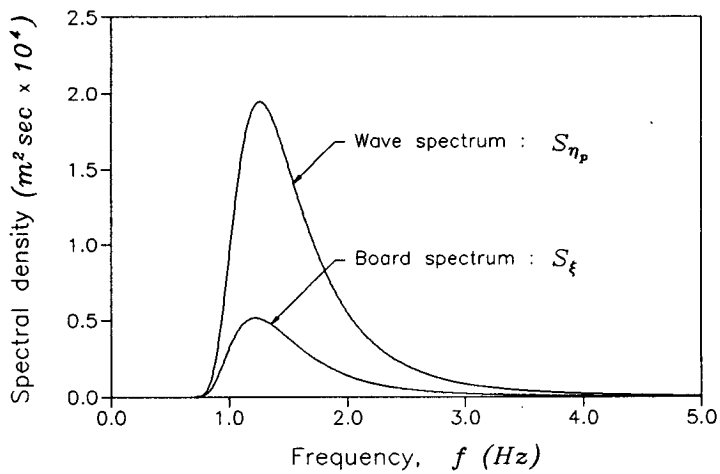


Fig. 3.4.2 Results of filter application for regular wave condition($H = 0.15\text{ m}$, $T = 2.0\text{ s}$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at the board face (— = exact solution; --- = discrete convolution; ○ ○ ○ = filter).

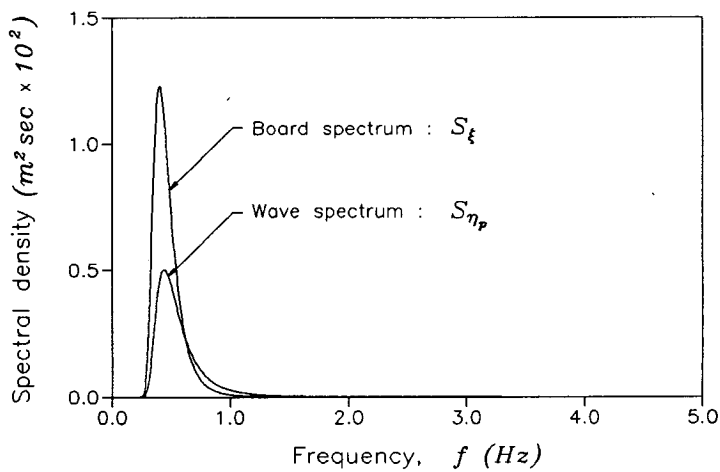
다소 차이를 보이거나 시간이 經過하면서 理論値와 정확히 일치함을 알 수 있다. 이는 理論的 출력이 명확히 數式으로 提示되지 않는 불규칙 入力條件에 대해서도 필터의 正確性을 확인하는 데 離散廻積이 이용될 수 있음을 立證한다고 볼 수 있다.

Fig. 3.4.3에 보인 바와 같은 不規則 파랑조건에 대한 적용 결과를 Fig. 3.4.4와 Fig. 3.4.5에 나타내었다. 근사된 조파판 전달함수를 이용한 결과와 離散廻積에 의한 결과가 서로 잘 一致함을 알 수 있다.

上記 離散廻積의 결과는 統計的 특성을 처음부터 알고 있는 確定的 (Deterministic) 조파판 입력에 根據를 두고 있다. 그러나, 일반적인 循環的 回路(Closed loop)를 갖는 조파시스템에서는 確定的 조파판 입력이 不可한 경우가 있다. 왜냐하면, 確定的 시스템 입력이 造波機 기계장치에 出力되었다 하더라도 조파판 入力 데이터는 水槽안에 既 설치된 檢證用 波高計로부터의 不規則 시그날에 의하여 계속적으로 修正을 받게 되고 결국은 不確定的(Nondeterministic)으로 되기 때문이다. 불확정적 造波板 입력에 대한 조파판 出力을 예측하기 위하여 離散廻積 방법을 다른 式으로 사용하는 것을 고려하여 볼 수도 있다. 즉, 特定 길이로 貯藏된 과거 입력 데이터의 Fourier 變換을 이용하는 것이다. 그러나, 이 방법은 過去 데이터가 조파판 入力 데이터의 統計的 성질을 충분히 반영하고 있다는 假定하에 유효하기 때문에 入力 데이터의 통계적 특성이 一定한 (Stationary) 경우에 適用 가능하다. 또한, 이 방법은 FFT 계산에 상당히 긴 時間이 所要될 것이 예상되기 때문에 造波機 제어시스템의 설계에 包含시키기는 어렵다. 또한, 離散廻積 방법은, 確定的 조파판 入力에 있어서도 현재의 造波板 傳達函數의 周波數帶가 限定되어 있지 않다는 점에서 또 다른 문제를 야기시킬 수 있다. 이미 서



(a)



(b)

Fig. 3.4.3 Spectra of input wave and board motion for random wave conditions: (a) $H_s = 0.05 \text{ m}$, $T_s = 0.7 \text{ s}$; (b) $H_s = 0.15 \text{ m}$, $T_s = 2.0 \text{ s}$.

술한 例示에서 離散廻積은 단지 조파판 입력이 限定(Band-limited) 周波數帶를 가지고 있었기 때문에 적용이 가능했다고 볼 수 있다. 만약, 周波數帶가 최소한 $1/(2 \Delta t)$ 의 周波數內에서 限定되지 않았다면 결국은 소위 周波數 錯覺(Aliasing) 문제가 발생하여 不正確한 결과가 발생했을 것이다. 물론, 이 문제는 데이터 讀取間隔을 微小하게 함으로써 어느정도 緩和할 수 있지만 造波幾 시스템에서 데이터 독취간격은 기계장치의 反應時間을 고려하여 결정되는 것이 일반적이기 때문에 무한정 작게할 수도 없는 실정이라 이의 적용은 상당히 어려운 것으로 판단된다.

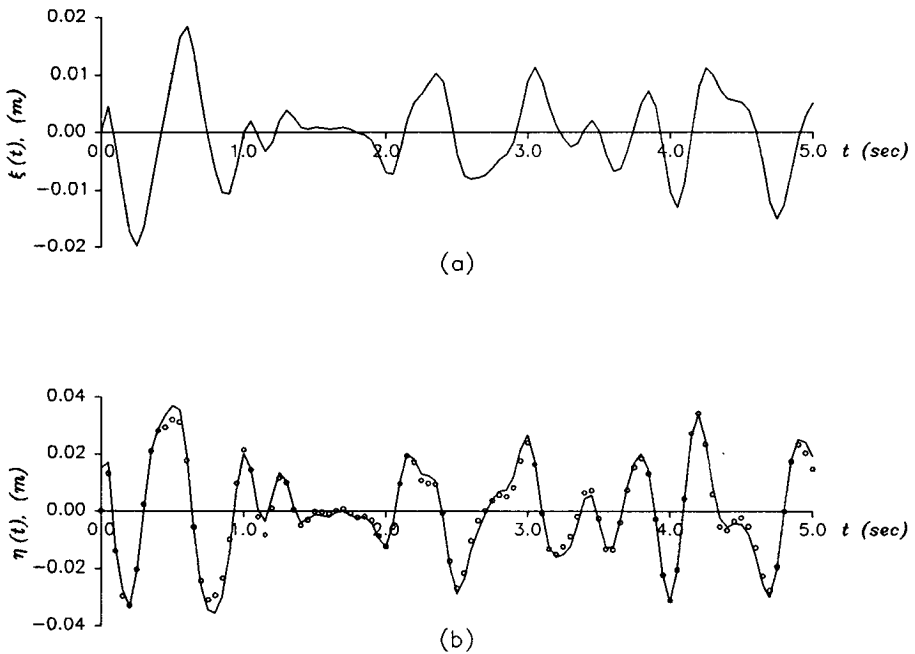
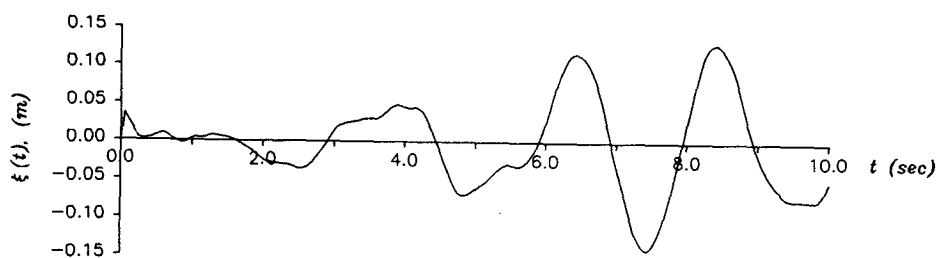
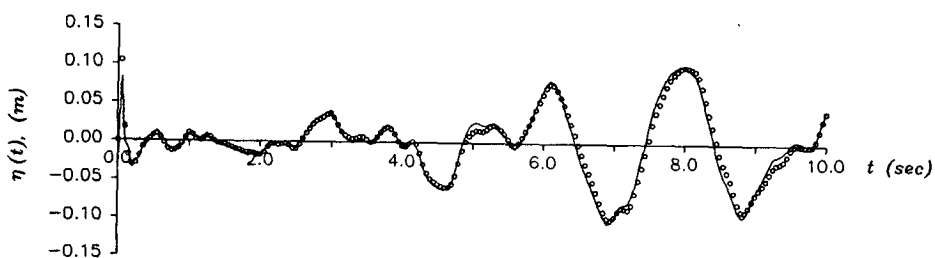


Fig. 3.4.4 Results of filter application for irregular wave condition ($H_s = 0.05 \text{ m}$, $T_s = 0.7 \text{ s}$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at the board face (— = discrete convolution; $\circ \circ \circ$ = filter).



(a)



(b)

Fig. 3.4.5 Results of filter application for irregular wave condition ($H_s = 0.15 \text{ m}$, $T_s = 2.0 \text{ s}$): (a) board input signal, (b) water surface fluctuation at the board face (— = discrete convolution; \dots : filter).

나. 반사파 흡수필터, $F(s)$ 의 성능해석

반사파 흡수필터, $F(s)$ 의 성능해석을 위하여 다음의 총 4가지 경우에 대하여 적용을 시도하였다.

- ① 反射波 非吸收時 규칙 正弦波 입력과 반사파의 조합
- ② 반사파 흡수시 규칙 정현파 입력과 3개 주파수 성분을 갖는 반사파의 조합
- ③ 반사파 흡수시 不規則波 入力과 불규칙 반사파의 조합
- ④ 반사파 흡수시 불규칙파 입력과 白色 雜音 성격을 갖는 반사파의 조합

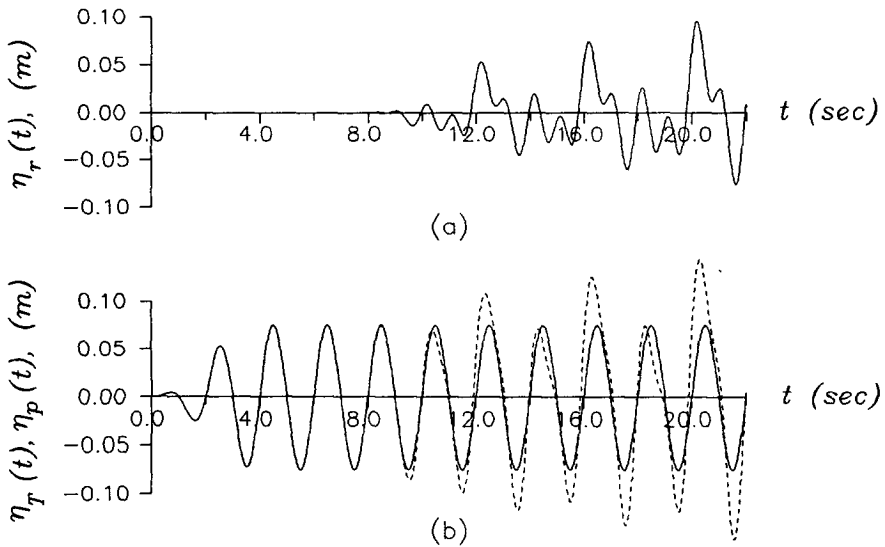


Fig. 3.4.6 Comparison of target and realized waves without wave absorbing filter operating: (a) gradually growing reflected wave; (b) — = regular target wave, ---- = realized wave.

경우 ①에서는 제어시스템에서 반사파 흡수기능을 제외시킨 경우에 해당하며 이때의 반사파 흡수필터는 식 (3.3.40)의 $\overline{F}(s)$ 를 이용하였다. 실제로 조파수조 내에서 반사파는 최초 조파기 가동후 어느 정도 시간이 흘러야 조파판에서 출력파랑과 중첩이 되기 시작한다. 이때 반사파가 吸收 또는 제거되지 않으면 反射波는 시간경과에 따라 增幅되는 성향을 갖는다. 따라서 본 예제에서의 반사파 변화 양상은 Fig. 3.4.6(a)에서 보인 것처럼 서서히 증폭되는 것으로 취하였다. Fig. 3.4.6(b)에서 알 수 있듯이 反射波가 造波板에 도래하기 이전의 시간구간에서는 목적파랑과 출력파랑이 완전히 동일하게 나타난다. 그러나, 반사파가 도래하여 증폭되는 구간에서는 시스템 출력파랑도 시간경과에 따라 증폭되며 목적파랑과 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 실제 조파수조에서도 反射波 非吸收時에 이러한 반사파랑과 시스템 출력파랑의 上昇作用이 나타나며 결국에는 碎波限界에 도달하거나, 長週期 파랑의 경우에는 수조 밖으로 물이 넘치는 경우도 발생한다.

경우 ②에 해당하는 正弦波와 反射波는 각각 다음과 같이 설정하였다.

$$\eta_T(t) = \left[\frac{H}{2} \sin(\omega t) \right] Z(t)$$

$$\eta_r(t) = \frac{H}{4} \left[\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \sin\left(\frac{\omega}{2} + \frac{\pi}{3}\right) + \sin\left(2\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \right]$$

여기서, $Z(t)$ 는 조파기 최초 가동시 조파기의 급격한 움직임을 방지하기 위한 Slow start 기능을 하는 함수이며 다음과 같이 취하였다.

$$Z(t) = 0.5 \left[1 - \cos\left(-\frac{\pi}{2T} t\right) \right], \quad 0 \leq t \leq 2T$$

이와 같이 주어진 入力條件에 대하여 반사파 흡수필터를 가동하고 시스템 출력 $\eta_p(t)$ 를 계산하여 그 결과를 目的波 $\eta_T(t)$ 와 비교하였다. Fig. 3.4.7에서 이들 시그널은 서로 매우 잘 일치하며 반사파 흡수필터의 성능이 잘 반영되고 있음을 알 수 있다.

경우 ③과 ④는 不規則 入力波와 반사파랑에 대한 것이며 이들 파랑의 스펙트럼은 Fig. 3.4.8과 같다. 경우 ③의 反射波는 有義波高 0.1 m, 週期 1.0 sec 인 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하였으며, 경우 ④에서의 반사파는 0 - 2 Hz의 주파수 범위내에서 스펙트럼 密度 0.0015 m^2sec 의 白色 雜音 성격을

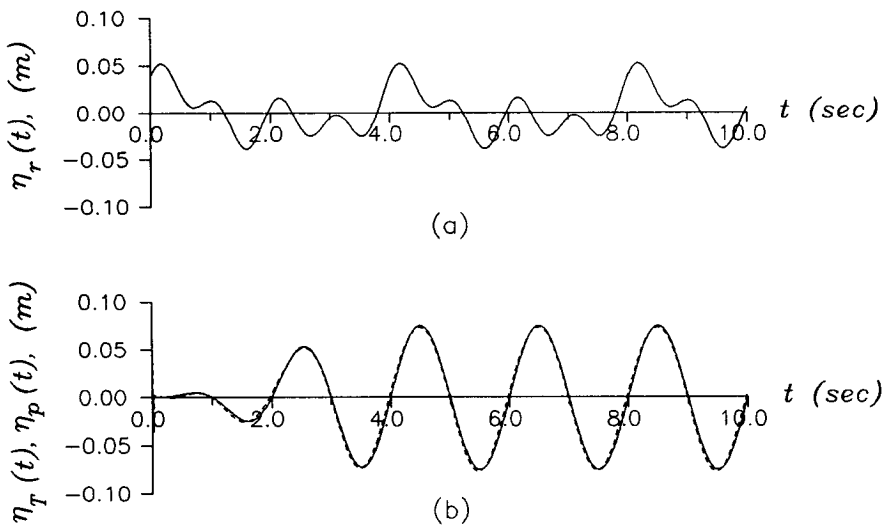


Fig. 3.4.7 Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) reflected wave of 3 different frequency components: (b) — = regular target wave, ---- = realized wave.

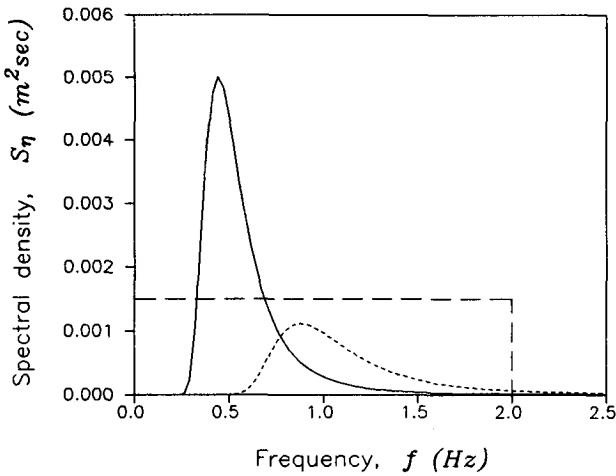


Fig. 3.4.8 Spectra of target and reflected waves (— = target wave, ---- = reflected wave, - - - = white noise reflected wave)

갖는 파랑을 선택하였다. Fig. 3.4.9와 Fig. 3.4.10은 각각 경우 ③과 ④에 대한 결과를 보여준다. 두 그림에서 알 수 있듯이 불규칙 파랑의 경우에도 전반적으로 出力波浪은 目的波浪의 시그널에 매우 잘 일치하나 ④의 경우에는 시그널이 급격하게 변하는 구간, 즉, 고주파수에 해당하는 구간에서는 다소의 차이가 있음을 관찰할 수 있다.

상기 예제해석의 결과에서 反射波 吸收필터의 성능은 입력 목적파랑과 반사파랑의 규칙 또는 불규칙성에 관계없이 매우 우수하게 나타남을 알 수 있다. 일반적인 수조실험에서 반사파는 대략적으로 目的波浪과 유사한 주파수대를 가지고 있으며, 따라서 백색잡음형태의 반사파에 대해서 시험한 경우 ④에서 나타났던 高周波數 부근에 존재하는 약간의 부정확성조차 현실적으로는 발생하지 않을 것으로 판단된다(실제 파랑에 있어서는 고주파수대 부근의 반사파 에너지가 적음).

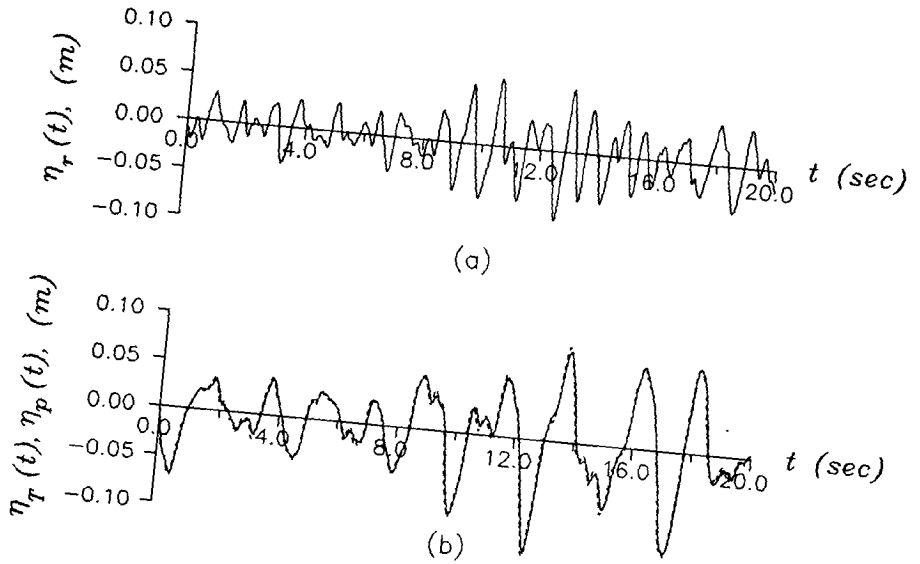


Fig. 3.4.9 Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) irregular reflected wave; (b) — = irregular target wave, ---- = realized wave.

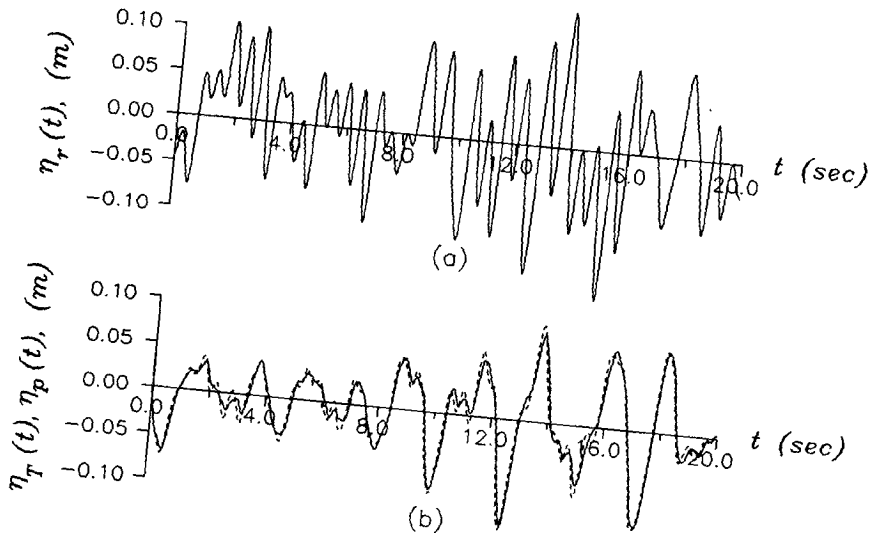


Fig. 3.4.10 Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) wide-banded reflected wave; (b) — = irregular target wave, ---- = realized wave.

제5절 討 議

파랑수조를 이용하는 수리실험 결과의 신빙도는 목적파랑을 얼마나 장시간 수조내에 유지시킬 수 있는가에 달려있다. 본 연구에서는 계측파랑을 목적파랑에 일치시키기 위한 순환성 制御回路를 구성하고 회로해석을 수행하여 컴퓨터로 용이하게 조파기 하드웨어를 제어할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘의 주된 기능은 조파판에 부착된 파고계에 의해 감지되는 시그널을 이용하여 조파판에서의 再反射를 억제하는 反射波 흡수필터이다. 예제해석을 통하여 알고리즘을 수치시험해 본 결과, 임의의 規則 또는 不規則 反射波 시그널에 대해서 본 제어회로의 반사파 흡수기능이 매우 탁월함을 보였다.

전체 제어회로는 세 가지 순환성 회로, 즉 LVDT를 포함하는 Servo 시스템, 반사파 흡수필터 시스템, 水槽 傳達函數 補正 시스템으로 구성되나 여기에서는 처음 두가지만 포함하였으며, 따라서 계측파랑은 조파기 근방에만 국한하였다. 세번째 순환성 회로는 조파기 발생파랑이 水槽 縱方向으로 진행하면서 변형하는 것을 보정하기 위한 것이며 이는 2 - 3 차례 스펙트럼 보정작업으로 용이하게 달성할 수 있다.

제4장 波浪水槽의 예비설계 및 조파기

구동파워 결정

제1절 파랑수조의 예비설계

1. 수조의 크기 및 실험실내 위치

파랑수조의 설치 위치는 본 연구소 제2연구동 1층으로 하였으며, 실험실의 공간적인 여건을 감안하여 수조의 크기는 길이 20 m, 폭 0.6 m, 높이 0.8 m로 결정하였다. 수조의 받침대로서는 높이 30 cm의 콘크리트 받침대를(가로, 세로 길이는 차후 결정) 수조길이 방향으로 적당한 간격으로 실험실 바닥에 설치하며, 수조 본체와 콘크리트 받침대 사이에 높이 30 cm인 H형강을 설치하여 콘크리트 받침대와 H형강을 볼트로 고정시킴으로써 수조의 바닥이 실험실 바닥으로부터 60 cm 떨어지도록 한다.

조파기의 형태는 油壓式 피스톤형으로 불규칙 파랑을 발생시킬 수 있도록 한다. 수조의 양쪽 끝에는 알루미늄 또는 스텐레스 스틸의 선반가공에서 생기는 찌꺼기들을 적재하여 적당한 경사를 갖는 消波裝置를 설치한다. 수조의 바닥 및

한쪽 측벽은 철판으로 제작하며, 나머지 한쪽 측벽은 실험시 관측을 위하여 중앙의 10 m 구간은 두께 1 cm 정도의 강화유리로 하고 상·하류 5 m씩은 철판으로 제작한다.

2. 水槽의 給·排水 및 循環 시스템

지하 물탱크로부터 수조로의 급수 및 수조로부터 옥외 배수관으로의 배수를 위하여 내경 100 mm PVC 파이프를 사용하며, 급수를 위하여 5 마력 펌프를 설치한다. 배수관 내의流速, V 는 수조내에 물이 약 1/3 정도 차있을 때를 기준으로 ($h = 0.8/3 = 0.267$ m) 계산하면

$$V = \sqrt{2gh} = 2.28 \text{ m/s} \quad (4.1.1)$$

가 되며, 배수관 내의 유량, Q 는

$$Q = AV = 0.018 \text{ m}^3/\text{s} \quad (4.1.2)$$

가 되어, 管摩擦을 고려하고 수조내에 60 cm의 물을 채웠다고 가정할 때 배수시간은 약 8분 정도가 된다.

수조는 파랑 및 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 파랑-흐름 복합수조로 설계한다. 흐름의 출입구는 수조 兩端으로부터 각각 4 m씩 떨어지도록 수조

바다에 설치하여 중앙의 약 12 m 구간에서 흐름을 발생시킬 수 있도록 한다. 흐름의 출입구는 多孔板으로 하며 출입구 밑에는 흐름을 水槽幅 방향으로 분산시킬 수 있도록 造流 박스를 설치한다. 흐름 출입구의 다공판은 흐름을 발생시키지 않는 일반 실험시 無孔板으로 대체시킬 수 있도록 조립식으로 한다. 흐름은 順方向 및 逆方向 흐름을 모두 발생시킬 수 있도록 하는데, 순환펌프는 일방향 펌프를 사용하며 흐름의 방향은 순환 파이프에 설치되는 밸브의 개폐 조작에 의해 조정한다. 흐름의 순환 시스템은 수조내 0.4 m 수심에서 최대 0.3 m/sec의 平均流速을 발생시킬 수 있도록 설계하는데, 순환 시스템의 파이프 직경 및 순환펌프의 용량 등은 파이프 및 파이프의 연결을 위한 엘보우 및 T자관, 흐름조정 밸브, 조류 박스의 다공판 등에 의한 損失水頭를 고려하여 2차년도에 파랑수조 정밀설계시 결정되어야 한다.

3. 수조의 荷重 및 실험실 바닥 슬라브 支持力 검토

실험실 바닥 슬라브의 지지력 검토를 위하여 수조의 하중을 결정해야 한다. 수조의 하중은 수조 자체의 하중 및 수조내에 채워진 물의 하중을 포함하는데, 수조 자체의 하중은 部材의 종류가 다양하여 수조의 정밀설계가 이루어지기 전에는 정확한 계산이 어렵다. 따라서 바다 슬라브의 지지력 검토를 위한 수조 하중은 수조 자체의 하중은 무시하고 수조내에 모래를 가득 채운 경우 모래의 무게로 대신하였다. 모래의 비중을 2.7 ton/m^3 , 孔隙率을 0.4로 할 때 수조의 설계하중은 수조의 길이 1 m 당 0.78 ton의 連續荷重이 된다. 본 연구소 건설과에서 이 설계하중에 대한 실험실 바닥 슬라브 지지력을 검토한 결과 수조

설치 위치의 바다 콘크리트보 下部에 보강이 필요한 것으로 판단되어 지하 전기실내 3지점과 물탱크내 2지점에 보강공사를 실시할 예정이다.

제2절 조파기 設計波 및 구동파워 결정

조파기 하드웨어를 설계하기 위해서는 우선 수조내에서 발생시켜야 하는 최대파랑, 즉 設計波를 결정하고 이에 따라 조파판에 작용하는 파압, 모멘트 등을 계산하여야 한다. 또한 설계파를 발생시키기 위하여 필요한 조파기의 구동파워를 계산하여 유압펌프의 용량을 결정하게 된다.

1. 最大파워 계산

본 사업에서 개발되는 조파기 제어 시스템은 不規則波를 대상으로 하지만 조파기 설계에 필요한 동력학적 조건에 대하여 불규칙파에 대해서는 이론이 잘 정립되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 규칙파에 대한 동력학적 분석을 실시하였다. 아래에 제시되는 내용은 Dean and Dalrymple(1984)의 선형 조파기 이론을 기초로 하고 있다. 조파기 뒷면에도 물이 채워져 있는 경우로 가정하고, x 축의 양의 방향을 조파기로부터 전방으로 취하고 z 축의 양의 방향을 靜止水面으로부터 鉛直上方으로 취하면, 조파기 전면에서의 속도포텐셜, ϕ_f 및

수면변위, η_f 는 각각

$$\begin{aligned} \phi_f &= A_p \cosh [k_p (h+z)] \sin (k_p x - \omega t) \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{-k_m x} \cos [k_m (h+z)] \cos \omega t \end{aligned} \quad (4.2.1)$$

$$\eta_f = -\omega g A_p \cosh k_p h \cos (k_p x - \omega t) - \frac{\omega}{g} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-k_m x} \cos k_m h \sin \omega t \quad (4.2.2)$$

로 표시되며, 여기서 스트로크 S 를 갖는 피스톤형 조파기에 대해서

$$A_p = -\frac{2S\omega \sinh k_p h}{k_p (\sinh 2k_p h + 2k_p h)} \quad (4.2.3)$$

$$C_m = \frac{2S\omega \sin k_m h}{k_m (\sin 2k_m h + 2k_m h)} \quad (4.2.4)$$

가 된다. 여기서 h 는 수심, ω 는 角周波數, g 는 중력가속도를 나타내며, k_p 및 $k_m (m=1$ 부터 $\infty)$ 는 각각 進行波 및 消滅波의 波數로서 식 (3.3.25) 및

(3.3.26)의 분산관계식으로부터 구해진다.

조파판 전면에서의 動壓力은 $z \leq 0$ 인 구간에서는

$$\begin{aligned}
 p_{d_f} = & -\rho\omega A_p \cosh[k_p(h+z)] \cos(k_px - \omega t) \\
 & -\rho\omega \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{-k_mx} \cos[k_m(h+z)] \sin\omega t
 \end{aligned} \tag{4.2.5}$$

으로 주어지며 평균수면 이상인 구간 ($0 \leq z_1 < \eta_f$)에서는

$$p_{d_f}(z_1) = \rho g(\eta_f - z_1) \tag{4.2.6}$$

으로 주어진다.

위와 비슷한 과정을 반복하면 조파판 후면에서의 수면변위와 동압력은 각각

$$\begin{aligned}
 \eta_b = & \frac{\omega}{g} A_p \cosh k_p h \cos(k_px + \omega t) \\
 & + \frac{\omega}{g} \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{k_mx} \cos k_m h \sin\omega t
 \end{aligned} \tag{4.2.7}$$

$$p_{d_b} = \rho\omega A_p \cosh[k_p(h+z)] \cos(k_px + \omega t)$$

$$+ \rho\omega \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{k_m x} \cos[k_m(h+z)] \sin\omega t \quad (4.2.8)$$

으로 주어진다.

조파판의 속도는

$$u_p = \frac{S}{2} \omega \cos\omega t \quad (4.2.9)$$

로 주어지므로, 조파판의 단위폭당 파워는

$$P(t) = u_p \left\{ \int_{-h}^{\eta_s(x=0)} p_{d_f}(x=0) dz - \int_{-h}^{\eta_b(x=0)} p_{d_b}(x=0) dz \right\} \quad (4.2.10)$$

로 계산된다. 최대파워, P_{\max} 는 파랑 한주기 동안 시간을 조금씩 증가시키면서
 윗식으로 순간파워를 계산하여 최대값을 취함으로써 구할 수 있다. 그러나
 최대파워에 대한 근사적인 이론해를 다음과 같이 구할 수가 있다. 식
 (4.2.10)에서 적분들의 上限値를 영으로 취하고

$$F_p = \int_{-h}^0 -\rho\omega A_p \cosh[k_p(h+z)] dz = \frac{2\rho\omega^2 S \sinh^2 k_p h}{k_p^2 (\sinh 2k_p h + 2k_p h)} \quad (4.2.11)$$

$$F_s = \sum_{m=1}^{\infty} \int_{-h}^0 \rho \omega C_m \cos[k_m(h+z)] dz = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2\rho\omega^2 S \sin^2 k_m h}{k_m^2 (\sin 2k_m h + 2k_m h)} \quad (4.2.12)$$

으로 정의하면 식 (4.2.10)은 근사적으로

$$P(t) \approx \omega S (F_p \cos^2 \omega t - F_s \cos \omega t \sin \omega t) \quad (4.2.13)$$

가 된다. F_p 와 F_s 는 각각 조파판의 한쪽면에 작용하는, 조파판의 속도와 위상이 같은 抵抗力 및 조파판의 가속도와 위상이 같은 慣性力의 진폭을 나타내며, 이들은 각각 진행파 및 소멸파에 의해 발생하는 힘들이다. 최대파워가 발생하는 위상을 구하기 위해 위식을 시간에 대해 1차 微分한 것을 영으로 놓으면

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \omega^2 S (F_p \sin 2\omega t + F_s \cos 2\omega t) = 0 \quad (4.2.14)$$

최대파워가 발생하는 위상, $(\omega t)_{\max}$ 은

$$(\omega t)_{\max} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(-\frac{F_s}{F_p} \right) \quad (4.2.15)$$

가 된다. 이것을 식 (4.2.13)에 대입하면 최대파워는

$$P_{\max} = \omega S (F_p \cos^2(\omega t)_{\max} - F_s \cos(\omega t)_{\max} \sin(\omega t)_{\max}) \quad (4.2.16)$$

가 된다.

2. 평균파워와의 비교

조파판의 한쪽면에서의 단위 폭당 평균파워는 Dean and Dalrymple(1984)에서와 같이 조파기로부터 멀리 떨어진 지점에서의 에너지 Flux로 주어진다. 즉

$$\bar{P} = EC_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 \frac{\omega}{k_p} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2k_p h}{\sinh 2k_p h} \right) \right] \quad (4.2.17)$$

여기서 E 는 단위 평면적당 평균 파랑에너지, C_g 는 파의 群速度, H 는 파고이다. 한편 Gilbert et al.(1971)은 좀 더 직접적인 방법으로 조파판의 한쪽면에 작용하는 진행파의 파력에 의해 발생하는 파워를 파랑의 한주기 동안 평균함으로써 평균파워를

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T u_p F_p \cos \omega t \, dt = \frac{\pi S}{2T} F_p \quad (4.2.18)$$

으로 표시하였다.

$$H = -2\omega g A_p \cosh k_p h \quad (4.2.19)$$

의 관계를 이용하여 정리하면 식 (4.2.17)과 (4.2.18)은 동일한 식임을 증명할 수 있다. 조파판 후면에도 물이 채워져 있는 경우, 조파판의 전후면을 모두 고려하면 평균파워는 식 (4.2.17) 또는 (4.2.18)에 의하여 계산되는 값의 두배가 되어야 한다.

최대파워와 평균파워를 비교하기 위하여 $h = 50\text{cm}$, $S = 30\text{cm}$ 에 대하여 相對水深, $k_p h$ 를 0.1부터 5.0까지 변화시키며 계산하였다. 계산에는 처음 20개의 소멸파를 포함시켰다. $\rho g S^2 h / T$ 에 대해 無次元化 시킨 파워를 Fig. 4.2.1에 제시하였다. 소멸파의 중요성을 파악하기 위하여 진행파만을 포함시켜 계산한 최대파워를 그림에 포함시켰다. 진행파만을 포함시켜 계산한 무차원 최대파워와 무차원 평균파워는 상대수심의 변화에 대해 똑같은 변화양상을 보이지만 그 크기에 있어서 최대파워가 평균파워보다 훨씬 큰 것을 알 수 있다. 소멸파의 영향은 상대수심이 작을 때에는 무시할 수 있지만 상대수심이 커짐에 따라 그 영향이 커짐을 알 수 있다.

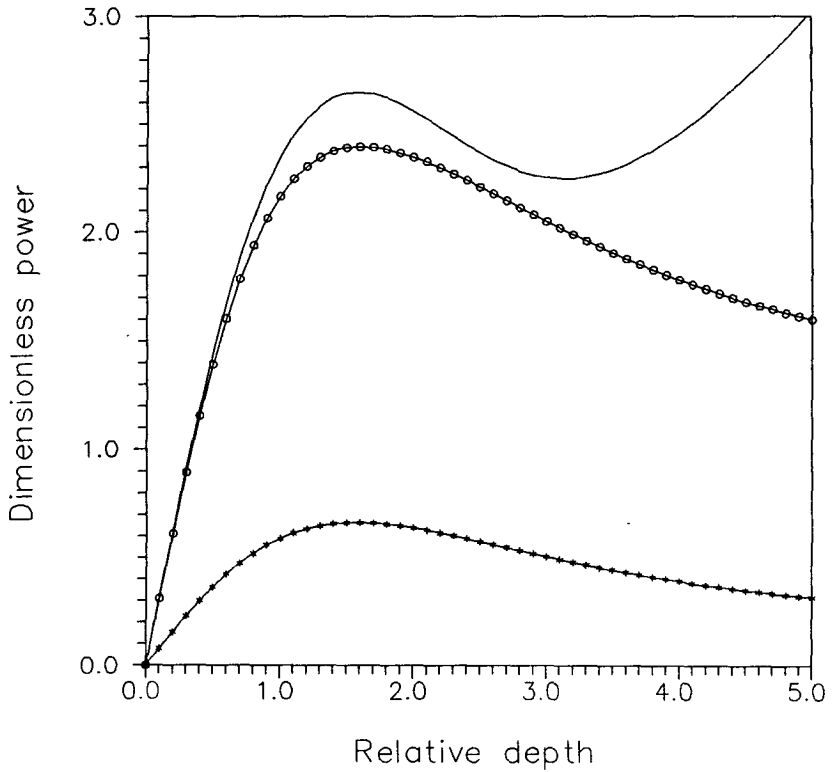


Fig. 4.2.1 Dimensionless powers versus relative depth for $h=50\text{ cm}$, and $S=30\text{ cm}$: * * * = mean power, o o o = maximum power including only progressive wave force, — = maximum power including both progressive and standing wave forces.

3. 設計波 및 기타 설계조건

우선 설계파 및 설계수심을 결정하기 위하여 수심을 20cm 부터 50cm 까지 5cm 간격으로 증가시키고 각 수심에 대하여 주기를 0.4초부터 3.0초까지 0.1초씩 증가시키면서 각 경우에 대하여 波長, 조파판의 스트로크, 조파판 전면에서의 최대수위, 조파판의 최대속도, 최대파워, 최대 토크모멘트 등을 계산하였다.

조파판의 높이는 수조의 높이와 같은 80cm로 가정하였고 조파판에 걸리는 휨모멘트는 조파판을 상단이 고정된 鉛直 Cantilever로 보고 계산하였다. 각 경우에 소멸파 성분은 처음 20개를 포함시켰으며 파고는 쇄파한계인 수심의 0.8배로 하였다. 이들을 계산하기 위한 Fortran 프로그램 DESIGN 및 계산결과를 부록 A2에 수록하였다.

부록 A2의 계산결과에서 볼 수 있듯이 전반적으로 수심 및 주기가 증가할수록 최대파워 및 최대 휨모멘트가 증가함을 알 수 있다. 따라서 설계수심은 수조의 높이 80cm를 고려하여 조파판 전면에서 순간 최대수위가 靜水面上 약 23cm 되는 ($h = 50\text{cm}$, $H = 40\text{cm}$, $T = 0.7\text{s}$) 수심 50cm로 정하였다. 설계파의 주기는 2초로 하였으며 이는 축척 1:50의 경우 현장에서 약 14초에 해당하며, 縮尺 1:100의 경우 현장에서 20초에 해당한다. 설계파고는 설계수심 50cm에서의 쇄파한계인 40cm로 하였다. 이러한 설계파에 대하여 파장은 약 4m, 피스톤형 조파기의 스트로크는 52cm, 조파판 전면의 순간 최대수위는 정수면상 20cm, 조파판의 순간 최대속도는 약 82 cm/s로 계산된다. 조파기의 단위폭당 작용하는 순간 최대파워 및 순간 최대 휨모멘트는 1.8 Hp 및 788 N-m로서 조파기의 폭 60cm를 고려하면 조파기의 구동파워는 1.08 Hp, 순간 최대 휨모멘트는 473 N-m로 계산된다.

조파기의 정밀설계를 위해서는 조파판의 전후면에 작용하는 파력 및 이로 인한 휨모멘트의 파랑 한주기당 변화를 계산할 필요가 있다. 이에 대한 Fortran 프로그램 FORCE 및 계산결과를 부록 A3에 수록하였다. 여기서 여러가지 설계조건은 프로그램 DESIGN에서 수심 50cm, 주기 2초에 대하여 계산된 결과와 같으며 순간 최대 휨모멘트가 발생하는 순간의 조파판 상단으로부터의 모멘트

팔의 길이, 단위 면적당 파력, 토크모멘트 등이 조파판 전후면에 대해서 계산되어
제시되었다.

제5장 결론 및 토의

국내·외 해양공학 관련 대학 및 연구소의 파랑수조 특성 및 보유현황을 조사, 정리한 결과 국내 대학 및 연구소의 모든 파랑수조를 합했을 때 외국의 연구소 하나가 보유하고 있는 파랑수조 보유량과 비슷한 것을 알 수 있었으며, 이는 국내의 수리실험 분야 연구가 외국에 비해 상당히 뒤떨어져 있음을 나타내는 단적인 증거라 할 수 있다. 국내 수리실험 분야의 연구를 활성화시키기 위해서는 파랑수조를 저렴한 가격으로 공급할 수 있어야 하는데, 현재 파랑수조의 핵심부분인 제어 시스템에 대해서는 국내 연구가 전무하여 전량 수입에 의존하고 있는 실정이므로 본 연구를 통한 파랑수조 제어 시스템의 국산화 필요성이 절실히 요구된다.

불규칙 조파수조를 이용하는 수리실험 결과의 신빙도는 일차적으로 목적파랑을 얼마나 장시간 수조내에 유지시킬 수 있는가에 달려 있다. 본 연구에서는 계측파랑을 목적파랑에 일치시키기 위한 순환성 제어회로를 구성하고 회로해석을 수행하여 컴퓨터로 용이하게 조파기 하드웨어를 제어할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘의 주된 기능은 조파판에 부착된 파고계에 의해 감지되는 시그널을 이용하여 조파판에서의 파랑의 재반사를 억제하는 반사파 흡수 기능이다. 수치적으로 발생시킨 파랑에 대하여 이 알고리즘을 시험해 본 결과, 임의의 규칙 또는 불규칙 파랑에 대하여 본 제어회로의 반사파 흡수기능이 매우 탁월함을 보였다. 전체 제어회로는 세 가지 순환성 회로, 즉 LVDT를 포함하는 Servo 시스템, 반사파 흡수필터 시스템 및 수조 전달함수 보정 시스템으로

구성되나 본 연구에서 개발된 시스템은 처음 두 가지만 포함하고 있으며, 따라서 계속파랑이 조파기 부근에서 계속되는 경우에 국한되어 있다. 세번째 순환성 회로는 조파기에서 발생한 파랑이 수조 종방향으로 진행하면서 변형되는 것을 보정하기 위한 것인데 이는 두세 차례의 스펙트럼 보정작업으로 용이하게 달성될 수 있으며, 차후 계속되는 2-3차년도 사업에서 포함시킬 예정이다.

개발된 파랑수조 제어 시스템을 탑재하여 그 성능을 실제로 시험하기 위해서는 파랑수조 시작품의 제작이 병행되어야 한다. 이는 2-3차년도 사업내용인데, 1차년도인 금년도 사업에서는 파랑수조의 예비설계, 조파기 설계파 및 구동파워 결정 등에 대한 연구를 수행하였다. 파랑수조 설치위치는 한국해양연구소 제2연구동 1층 실험실로 하였으며, 실험실의 공간적인 여건을 감안하여 수조의 크기는 길이 20 m, 폭 0.6 m, 높이 0.8 m로 결정하였다. 조파기의 형태는 유압식 피스톤형으로 불규칙 파랑을 발생시킬 수 있도록 하며, 파랑과 흐름을 동시에 발생시킬 수 있는 파랑-흐름 복합수조로 설계하기로 결정하였다. 조파기의 설계수심, 주기 및 파고는 각각 50 cm, 2.0 sec, 40 cm로 하였으며, 이에 대한 설계 Stroke는 52 cm, 조파기 구동파워는 약 1.1 Hp로 계산되었다.

후속연구 계획으로는 2차년도에 조파수조의 정밀설계, 수조본체 시작품의 건설, 조파기제어 소프트웨어 개선, 조파기 하드웨어의 정밀설계 등을 수행할 예정이며, 3차년도에는 조파기 하드웨어를 수조내에 적재, 결합하여 실제로 조파함으로써 개발된 제어 시스템의 성능시험 및 보안을 실시하여 파랑수조 제작기법의 정립 및 실용화를 이룩할 예정이다.

참고문헌 (References)

전인식, 오영민, 정신탉, 송원오. (1989). “反射波 吸收필터를 이용한 不規則波 재현방법”. 해양연구. 제11권 제2호, 23-29.

전인식, 박우선, 오영민, (1993). “時間領域에서 造波板 傳達函數의 離散的 適用”. 한국해양·해양공학회지, 5(2), 133-142.

해양연구소. (1990). “2차원 波浪-흐름 복합수조 건설 및 운용”. Rep. No. BSPE 00166-276-2.

Bracewell, R.N. (1978). The Fourier transform and its application. McGraw-Hill.

Bullock, G.N. and Murton, G.J. (1989). “Performance of a wedge-type absorbing wave maker”. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 115(1), 1-17.

Dalrymple, R.A. and Dean, R.G. (1972). “The spiral wavemaker for littoral drift studies”. Proc. 13th Coast. Eng. Conf., ASCE, 689-705.

Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (1984). Water wave mechanics for engineers and scientists, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Gilbert, G., Thompson, D.M. and Brewer, A.J. (1971). “Design curves for regular and random wave generators”. J. Hydr. Res., 9(2), 163-196.

- Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures, Univ. of Tokyo Press.
- Goda, Y. (1987). "Standard spectra and statistical properties of numerically simulated waves." Proc. 34th Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, 131-135 (in Japanese).
- Kanasewich, E.R. (1981). Time sequence analysis in geophysics. The University of Alberta Press.
- Mitsuyasu, H. (1970). "On the growth of the spectrum of wind-generated waves.", Proc. 17th Japanese Conf. on Coastal Eng., JSCE, 1-7 (in Japanese).
- Oppenheim, A.V., Willsky, A.S. and Young, I.T. (1983). Signals and system. Prentice-Hall.
- Peebles, Jr. P. Z. (1980). Probability, random variables, and random signal principles, McGraw-Hill.
- Ploeg, J. and Funke, E.R.,(1980). "A survey of random wave generation techniques". Proc. 17th, Coastal Eng. Conf., ASCE, 1, 135-153.
- Suh, K.D. and Dalrymple, R.A. (1987), "Offshore breakwaters in laboratory and field". J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 113(2), 105-121.
- Vincent, C.L. and Briggs, M.J. (1989). "Refraction-diffraction of irregular waves over a mound". J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 115(2), 269-284.

Wang, S. (1974). "Plunger-type wavemakers : Theory and experiment". J. Hydr. Res., 12(3).

Wu, Y.-C. (1985). Directional wavemaker: Theory and experiment. PhD dissertation, Univ. of Delaware, Newark, Delaware, USA.

부록 A1

조파기 제어를 위한 프로그램 List


```

//-----//
//
//          Data Translation Interface Card DT2811          //
//          Wave Generation and Data Acquisition Program ver 2.0 //
//
//          [KORDI] KOREA Ocean Research and Development Institute //
//
//
//          Developed date : 1993.2.18 //
//
//-----//

```

```

#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <dir.h>
#include <math.h>
#include <bios.h>
#include <io.h>

```

```

// Define of Each DT2811 Registers.
// Base Address 218h (Factory Configuration)

```

```

#define BASE_ADD 0x218
#define ADCSR    BASE_ADD + 0 // A/D Control/Status Register Address
#define ADGCR    BASE_ADD + 1 // A/D Gain/Channel Register Address
#define ADDAT    BASE_ADD + 2 // A/D and DAC0 Data Register Address
#define ADDATL   BASE_ADD + 2 // A/D and DAC0 Data Register Address
#define ADDATH   BASE_ADD + 3 // A/D and DAC0 Data Register Address
#define DADAT    BASE_ADD + 4 // DAC1 Data Register Address
#define DADATL   BASE_ADD + 4 // DAC1 Data Register Address
#define DADATH   BASE_ADD + 5 // DAC1 Data Register Address
#define DIOP     BASE_ADD + 6 // Digital Data I/O Port 0,1 Address
#define TMRCTR   BASE_ADD + 7 // Timer/Counter Register Address

```

```

#define ALL      1
#define SELECTED 0
#define YES      1
#define NO       0
#define LIMIT    4096
#define MAX_CH   16

```

```

char SelectCH[16 + 1] = { 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
                          10, 11, 12, 13, 14, 15 }, MaxCH = 16;
char PRJ[20],
      DataFileN[20];

float Ks, Kv, Ka, A, Ky, G4, Wb, K1,
      K2, Kp, Ki, Kd, Depth, Area,
      Vwpp, Ve, Vel, DiffVe, SumVe,
      Vwp, Vo, Vadc, Waveprobe;
float temp1, temp2, temp3, temp4,
      A, B, R1, R2, R3, R4, R5,
      ETA, ETAP, ETAR, ETAWP, ETAPR,
      SumE, SumETA, TempETA[20];

unsigned long DataFileSize;

int Gain,
    AD_Data[LIMIT],
    GetData[16],
    Steady[16],
    DataType,
    TestTemp[12000]={1, },
    Test[8000]={1, },
    count=0,
    Getdata1,
    Interval;

char old_dir[MAXDIR],
     new_dir[MAXDIR],
     Header[16];

void Split80x25(void);
void MakePRJdir(void);
void MakeHeader(int mode);
void SelectChannels(int mode);
void SetExpCondition(void);
void InitDT2811(void);
void InitGValue(void);
void InitFlap(void);
void PrsHdlsys(void);
void StdStDataAqu(void);

```

```

void WaveFileRead(void);
void GetClock(unsigned long *t);
void DataAquisite(void);
void DataConverting(void);
void DataView(void);
void DataAnalysis(void);
void MainMenu(void);
void Title(void);

```

```

void main(void)
{
    randomize();
    Title();
    MainMenu();
}

```

```

void Title(void)
{

```

```

    Split80x25();
    textattr(0x30);

```

```

    cprintf("\r\n");
    cprintf("\r\n");
    cprintf("          Data Translation Interface Card DT2811          \r\n");
    cprintf("      Wave Generation and Data Acquisition Program ver 2.0      \r\n");
    cprintf("\r\n");
    cprintf("      [KORDI] KOREA Ocean Research and Development Institute      \r\n");
    cprintf("\r\n");
    cprintf("                                Developed date : 1993.2.16        \r\n");
    cprintf("\r\n");
    cprintf("\r\n");

```

```

    textattr(0x0f);

```

```

    cprintf("\r\n\r\n\r\n\r\n");

```

```

    cprintf(" This Program is Wave Generate and Data Aquisite Utility.\r\n");

```

```

    cprintf(" All Program Operations need DT2811 Data Translation Card and\r\n");

```

```

    cprintf(" It will be good operated with 80386(58MHz) System.\r\n\r\n\r\n");

```

```

    textattr(0x8f);

```

```

    cprintf("Press Any Key to Process...");

```

```

    getch();

```

```

    textattr(0x0f);

```

```

}

```

```

void MainMenu(void)
{
    int i,Kflag=YES,a,b,c;

    a=b=c=0x1e;
    while (Kflag) {
        Split80x25();
        gotoxy(10,4);
        printf("***** Wave Generate And Data Aquisite Utility *****\n\n");
        textattr(0x1e);
        cprintf("\r\n");textattr(a);
        cprintf(" 1. Set Experimental Condition \r\n");textattr(b);
        cprintf(" 2. Initialize Groval Value \r\n");textattr(c);
        cprintf(" 3. Get Steady State Of Each Channel \r\n");textattr(0x1e);
        cprintf(" 4. Wave Generate And Data Aquisite \r\n");
        cprintf(" 5. Analysis Data File \r\n");
        cprintf(" 6. Exit \r\n");
        cprintf("\r\n");
        textattr(0x0f);
        printf("\n\nIf you want to operate Wave generator with getting Data,\n");
        textattr(0x8d);
        cprintf("Caution!! Select Numbers 1,2,3,4 Sequentialy..\r\n");
        textattr(0x0f);
        printf("Else you just want to view Data File, Select Number 5.\n");
        printf("During Operate Main Menu, If you have any troble in (1,2,3,4)\n");
        printf("Operation, you can Modify though Select Number Again.\n\n");
        printf("Select Number -- ");
        scanf("%d",&i);

        switch(i){
            case 1: SetExpCondition();a=0x10;break;
            case 2: InitGValue(); b=0x10;break;
            case 3: StdStDataAqu(); c=0x10;break;
            case 4: DataAquisite(); a=b=c=0x1e;break;
            case 5: DataAnalysis(); break;
            default: {Kflag=NO;break;}
        }
    }
}

```



```

void SetExpCondition(void)
{
    Split80x25();
    gotoxy(10,4);
    printf(" **** Set Experimental Condition ****\n\n");
    textattr(0x1e);
    cprintf(" 1. Type Project Name \r\n");
    scanf("%s",&PRJ);
    cprintf(" 2. Type Data File Name(Number) \r\n");
    scanf("%s",&DataFileN);
    cprintf(" 3. Type Data File Mode( 1: ALL Channel, 2: Selected Channel ) \r\n");
    scanf("%d",&DataType);

    textattr(0x0f);
    printf("\n\n");
    if ( DataType == 1 )
        SelectChannels(ALL);
    else if ( DataType == 2 )
        SelectChannels(SELECTED);
}

```

```

void InitDT2811(void)
{
    outportb(ADCSR, 0x00);
    delay(1000);
    inportb(ADDATL);
    inportb(ADDATH);
    outportb(ADCSR, 0x14);
}

```

```

void InitGValue(void)
{
    char c,s;
    int flag=YES,Kflag=NO;

    Ks=20.0;
    Kv=0.057;
    Area=0.002;
    Ky=28.6;
    G4=25.0;
    Depth=0.5;
}

```

```

do{
Split80x25();
gotoxy(10,4);
printf(" **** Initialize All Gloval Variable ****\n\n");
textattr(0x1e);
cprintf("                \r\n");
cprintf(" 1. Input Servo controller gain : %9.5f          \r\n",Ks);
cprintf(" 2. Servo Valve : %9.5f                          \r\n",Kv);
cprintf(" 3. Actuator Cross-sectional Area : %9.5f        \r\n",Area);
cprintf(" 4. LVDT gain : %9.5f                             \r\n",Ky);
cprintf(" 5. Calibration factor of the paddle wave gauge : %9.5f \r\n",G4);
cprintf(" 6. Water Depth : %9.5f                          \r\n",Depth);
cprintf("                \r\n");
textattr(0x0f);
printf("\n\nAll Value is correct ? (Y/n)");
printf("\nIf you want to set NEW Initial value type 'n' !!!");
c=getch();
if(c == 'y' || c == '\r') flag=NO;
if(c == 'n') Kflag=YES;

while(Kflag){

Split80x25();
gotoxy(10,4);
printf(" **** Initialize NEW All Gloval Variable ****\n\n");
printf(" 1. Input Servo controller gain : ");
scanf("%f",&Ks);
printf("\n 2. Servo Valve : ");
scanf("%f",&Kv);
printf("\n 3. Actuator Cross-sectional Area : ");
scanf("%f",&Area);
printf("\n 4. LVDT gain : ");
scanf("%f",&Ky);
printf("\n 5. Calibration factor of the paddle wave gauge : ");
scanf("%f",&G4);
printf("\n 6. Water Depth : ");
scanf("%f",&Depth);

printf("\n\nAll NEW Value is correct ? (Y/n)");
c=getch();
if(c == 'y' || c == '\r') Kflag=NO;

```

```

}

}while(flag):

    temp1 = pow(Depth, 2.0);
    temp2 = pow(Depth, 3.0);
    temp3 = pow(Depth, 4.0);
    temp4 = pow(Depth, 5.0);

    A = 51.42 - 212.75*Depth + 566.61*temp1 - 804.85*temp2 + 576.65*temp3 - 163.69*temp4;

    B = 5.63 - 10.31*Depth + 30.32*temp1 - 44.87*temp2 + 32.75*temp3 - 9.37*temp4;

    K1 = (Ky * Ks * Kv) / Area ;
    K2 = Ky / (B * K1 * G4) ;
    Kp = K2 * ( A + K1 ) ;
    Ki = K2 * A * K1 * (1./60) ;
    Kd = K2 * 60;

    R1 = A + K1 + 60 + 0.5*(1./60)*A*K1;
    R2 = (K1 / Ky) * B;
    R3 = 60.;
    R4 = -A * K1;
    R5 = 0.5 * (1./60);

printf("\n\nDo you want to operate wave absorbing Filter? (Y/n)\n");
s=getch();
if (s == 'n') { printf("\a\nNot Operating Filter!!\n");
    printf("Setting Kp = 0.5 * Kp , Ki = 0.5 * Ki,, Kd = 0.5 * Kd\n");
    Kp = 0.5 * Kp ; Ki = 0.5 * Ki ; Kd = 0.5 * Kd ;
    printf("Press Any Key..");
    getch();}
else printf("\nOperate Wave Absorbing Filter !!\nPress Any Key.."),getch();

}

void MakePRJdir(void)
{

int status;

status = mkdir(PRJ);

```

```

(!status) ? (printf("Directory created\n")) :
             (printf("Already Exist..Unable to create directory\n"));

if (getcurdir(0, old_dir))
{
    perror("getcurdir()");
    exit(1);
}
printf("Current directory is: \\%s\n", old_dir);

if (chdir(PRJ))
{
    perror("chdir()");
    printf("\a\nCheck Directory !\n");exit(1);
}

if (getcurdir(0, new_dir))
{
    perror("getcurdir()");
    exit(1);
}
printf("Current directory is now: \\%s\n", new_dir);
printf("Press Any Key to Start Operation..\n\n");
getch();
}

void MakeHeader(int mode)
{
    int i, j;

    if (mode == SELECTED) {
        for (i = 0; i < MAX_CH; i++) Header[i] = -1;
        i = j = 0;
        do {
            Header[SelectCH[i++]] = j++;
        } while (SelectCH[i] != -1); }
    else {
        for (i = 0; i < MAX_CH; i++) Header[i] = i;
    }
}
}

```

```

void SelectChannels(int mode)
{

    int temp1, i, k = 2;

    Split80x25();
    printf("          ***** Selected Channel Aquisition *****\n\n");
    textattr(0x1e);

    cprintf(" Input Channel Gain \r\n");
    textattr(0x1e);
    scanf("%d",&DataType);
    textattr(0x8d);
    cprintf("\n\nThe ADC#0 Channel is Reserved to DAC#0 Wave Generator. \r\n");
    textattr(0x0f);
    printf(" When Input Complete, Type '-1'\n");
    if (mode == SELECTED) {
        printf("\n Enter a Channel Number [0..15] : ");
        MaxCH = 0;
        do {
            gotoxy(1, k++ + 10);
            printf("What channel ? : ");
            scanf("%d", &temp1);
            SelectCH[MaxCH++] = temp1;
            if (temp1 > 15){ printf("\a\nError!\nInput Again!!"); MaxCH--;}

        } while (temp1 != -1);
        if (MaxCH > 17) {
            Split80x25();
            printf("\aError !!!");
            exit(1);
        }
        MaxCH--; }
    else {
        printf("\n !!! All Channel Selected !!!\n");
        for (i = 0; i < MAX_CH; i++) SelectCH[i] = i;
        MaxCH = 16;
    }
    MakeHeader(mode);
    printf("\nPress Any Key to Main Menu.....");
    getch();
}

```

```

void InitFlap(void)
{
    outportb(ADDATH, 0x08);
    outportb(ADDATL, 0x00);
}

void PrsHdlsys(void)
{
    outportb(DADATH, 0x0f);
    outportb(DADATL, 0xff);
}

void StdStDataAqu(void)
{
    int i,j,bflag=YES;
    unsigned long k=0,ch = 0;
    FILE *fp;

    InitDT2811();
    InitFlap();

    Split80x25();
    printf(" ***** Establish Steady State of Data Aquisition Channel *****\n\n");
    printf("\n");
    textattr(0x1e);
    cprintf("Control Voltage Level of Each Sensor !\r\n");
    textattr(0x0f);
    for (i = 0; i < 16 ; i++){
        textattr(0x0e);
        cprintf("\r\nChannel %2d:",i );
    }
    printf("\r\n\r\n Press Any Key ...");
    getch();
    textattr(0x0f);
    while (bflag) {
        outportb(ADGCR, ch % 16);
        while (!(inportb(ADCSR) & 0x80));
        j=inport(ADDAT);
        Steady[ ch % 16 ] = j;
        gotoxy( 15 , 6 + k % 16 );
    }
}

```

```

cprintf("%x",j);
k++; ch++ ;
if (bioskey(1)) { bioskey(0); bflag=N0 ;}
}
PrsHdlsys();
gotoxy(25,20);
printf("\n\n Press Any Key to Main Menu...\n");

getch();

}

//----- Wave File Read Routine -----

void WaveFileRead(void)
{

FILE *fpl;
int i, handle;
char Dir[30],Data[20];
Split80x25();
textattr(0x1f);
cprintf("Type Wave File Name(ex:wave.reg) \r\n");
scanf("%s",&Data);
textattr(0x0f);
fpl = fopen(Data, "rb");
DataFileSize = filelength(fileno(fpl));
if (DataFileSize >= 24000)
    printf("\a\n Warning ! Data File Size is Too Large!!\n"),
    printf(" Size is Limited 24000 Byte."),exit(1);

printf("\nFind File..\n");
if (fread((void *)TestTemp, 2, (DataFileSize/2), fpl) != (DataFileSize/2))
    printf("\a\nAbnormal file read !!!\n\nPress any key\n"),exit(1);
fclose(fpl);
for(i = 1; i < ((DataFileSize/2)/2+1) ; i++ ) Test[i-1] = TestTemp[2*i-1];
MakePRJdir();

}

```

```

//-----
void GetClock(unsigned long *t)
{
    unsigned long far *time = (unsigned long far *)0x0040006CL;

    *t = *time;
}

void DataAquisite(void)
{
    FILE *fp;
    char c,s;
    int Sm=0, i, j1, bflag = YES, Hflag=NO,
        Tflag=YES, Fflag=NO, TimeD=YES, bCont=NO,
        cCH=0, j, TempD[101]={0,}, CHintv;
    unsigned long SamplingRate1=0L, SamplingRate2=0L, Total=0L, Cflag=0L, cIndex = 0L;
    unsigned long start, startD, end, endD;
    unsigned hours, minutes, seconds;
    unsigned hoursD, minutesD, secondsD;
    float SlowS, SlowD, Smooth, Sum, TempData, temp, Ramp = 240;

    InitDT2811();
    Split80x25();
    WaveFileRead();

    fp = fopen(DataFileN, "wb");
    if (!fp) return;
    if (fwrite((void *)Steady, 2, 16, fp) != 16)
    { printf("\a\aFile Write Error.. Abnormal File Write !\n\n"
        "Press any key\n");
        getch();
        return;
    }
    if (fwrite(Header, 1, MAX_CH, fp) != MAX_CH) {
        printf("\a\a\nAbnormal file write for Header !!!\n\n"
            "Press any key\n");
        getch();
        return;
    }
    Split80x25();
}

```



```

printf("\n**** Operate Wave Flap and Data Aquisite ****\n");
gotoxy(15,7);
textattr(0x8d);
cprintf("Processing....\r\n");

```

```

if( MaxCH = 1) CHintv = 10288, Interval= 10300;
if( MaxCH = 2) CHintv = 5088, Interval= 5100;
if( MaxCH = 3) CHintv = 3298, Interval= 3320;
if( MaxCH = 4) CHintv = 2428, Interval= 2450;
if( MaxCH = 5) CHintv = 1918, Interval= 1930;
if( MaxCH = 6) CHintv = 1575, Interval= 1580;
if( MaxCH = 7) CHintv = 1338, Interval= 1340;
if( MaxCH = 8) CHintv = 1143, Interval= 1160;
if( MaxCH = 9) CHintv = 978, Interval= 995;
if( MaxCH = 10) CHintv = 875, Interval= 885;
if( MaxCH = 11) CHintv = 768, Interval= 787;
if( MaxCH = 12) CHintv = 688, Interval= 718;
if( MaxCH = 13) CHintv = 608, Interval= 638;
if( MaxCH = 14) CHintv = 563, Interval= 583;
if( MaxCH = 15) CHintv = 518, Interval= 540;
if( MaxCH = 16) CHintv = 473, Interval= 494;

```

```

Sm=i=j1=0;bflag=YES;Hflag=NO;Tflag=YES;Fflag=NO;TimeD=YES;
bCont=NO;
cCH=j=0;

```

```

textattr(0x0f);
printf("\n\nIs the wave aborbing Filer Working? (y/N)");
s=getch();
if( s =='y') { Tflag=YES;printf("\nOperate Aborbing Filer!!\n"),
               printf("\nWaveProbe Value is 0");}
else { Tflag=NO;printf("\a\nNot Operate Aborbing Filer!!\n");}

```

```

textattr(0x2e);
cprintf(" Type 'F1' Key to Start Data Aquisition !           \r\n");
cprintf(" Press Double ESC Key to Exit Without Data Aquisition! \r\n");
cprintf(" %4d DAC#0 Interval, %d Channel Seleted and %4d
        Delay \r\n",Interval,MaxCH,CHintv);
textattr(0x0f);
printf("\nPress Any Key to Start!\n\n");
getch();

```

```

textattr(0x8e);
cprintf("Wave Generate Start!!\r\n");

ETA = ETAR = ETAPR = SumE = ETAWP = Waveprobe = Vwpp = Vwp =SamplingRate2 = 0L;
Sum=count = 0; Vo = 2048; Ve = Vel = SumVe =Total=SamplingRate1=0L;
j=0;

GetClock(&start);

//----- Data Aquisition Routine -----
while(bflag){
  outportb(ADGCR, SelectCH[cCH] | (Gain << 6));
  do {
    c = inportb(ADCSR);
  } while (!(c & 0x80));
  TempData=inport(ADDAT);

  for(i=0;i<Interval;i++);

  Total++;

  if (SelectCH[cCH] == 0) {

//----- Slow start and decay -----

    if(!Hflag) {if (j<=Ramp) { temp = 0.5*(1 - cos((j/Ramp)*(M_PI)));j++;}}
    else{ if(Hflag){ temp = 0.5*(1 - cos((j/Ramp)*(M_PI)));j--;}
      else temp = 1; }

//-----

    if ((Cflag * 2)==0){
      SlowS = temp * (Test[count]-2047.5);
      if (Tflag) Waveprobe=0;
      Ve = 2*SlowS - (Waveprobe);
      DiffVe = Ve - Vel;
      SumVe = SumVe + 0.5 * (Ve + Vel);
      Vo = Kp * Ve + Ki * SumVe + Kd * DiffVe;
      Vel = Ve;
      if (Vo < -2048) Vo = -2048;

```

```
if (Vo > 2047) Vo = 2047;
Vo = Vo + 2048;
```

```
//----- Smoothing -----
```

```
Sm++;
if(Sm <= 4) {
TempD[Sm] = TempData;
Sum = Sum + TempData;
Smooth = Sum / Sm;
}
else if (Sm > 4) {
j1 = Sm * 4;
if(j1==0) j1=4;
Sum = Sum - TempD[j1] + TempData;
TempD[j1] = TempData;
Smooth = Sum / 4.;
}
}
```

```
//-----
```

```
ETAWP = Smooth;
Vwp = ETAWP;
Waveprobe = Vwp - 2047.5;
```

```
outport(ADDAT, (int)Vo);
```

```
SamplingRate1++;
if (count==(DataFileSize/2)/2-1) count=0, count--;
count++;
}
Cflag++;
```

```
}
```

```
//----- 0 - 15 Channel Aquisition -----
```

```
if(bCont != bioskey(1)){
if (bCont != bioskey(0)==0x3b00) {
SamplingRate2++;
Interval=CHintv;
bCont = YES;
if(TimeD==YES) GetClock(&startD), textattr(0x8e), cprintf("Reading Data!!
\r\n"), TimeD=NO;
```

```

    GetData[cIndex * MaxCH]=TempData;
    if (cCH == MaxCH-1) Fflag=YES;
    if (Fflag){
        if (fwrite((void *)GetData, 2, MaxCH, fp) != MaxCH) {
            printf("\a\a\nAbnormal file write !!!\nPress any key\n");
        }
        Fflag=NO;
    }
}
else {if (bioskey(0)==0x11b) printf("\nOperation Completed!\n"),Hflag=YES;}
}

//-----
    if (j < 0) bflag=NO;
    if (++cCH >= MaxCH) cCH = 0;
    cIndex++;
    if (bioskey(1)){
        if (bioskey(0)==0x11b) printf("\nOperation Completed!\n"),Hflag=YES;
    }
}

GetClock(&end);
GetClock(&endD);
end -= start;
hours = (unsigned)(end / 65543.0);
end -= hours * 65543;
minutes = (unsigned)(end / 1092.0);
end -= minutes * 1092;
seconds = (unsigned)(end / 18.2) + minutes * 60 + hours * 3600;
textattr(0x0f);
printf("\nTotal %lu Sampled during %u seconds\n",Total, seconds);
printf("DAC #0 -- %lu Sampled\n",SamplingRate1);
printf("Sampling rate = %5.3f Hz\n",((float)(SamplingRate1 / (float)seconds)));
endD -= startD;
hoursD = (unsigned)(endD / 65543.0);
endD -= hoursD * 65543;
minutesD = (unsigned)(endD / 1092.0);
endD -= minutesD * 1092;
secondsD = (unsigned)(endD / 18.2) + minutesD * 60 + hoursD * 3600;

printf("\nData Aquisite %lu Sampled During %u second\n"

```

```

        "Sampling rate per channel = %5.3f Hz\n\n",
        SamplingRate2,secondsD,((float)(SamplingRate2 / (float)secondsD)) / (float)MaxCH);
    if (getcurdir(0, new_dir))
    {
        perror("getcurdir()");
        exit(1);
    }
    printf("\n\nCurrent directory is now: \\%s\n", new_dir);
    if (chdir("../"))
    {
        perror("chdir()");
        exit(1);
    }
    printf("Changing back to original directory: \\%s\n", old_dir);

fclose(fp);

printf("\n Press Any Key to Main Menu..");
getch();

}

void DataAnalysis(void)
{

    int i,flag=YES;

    while(flag){
    Split80x25();
    gotoxy(10,4);
    printf("\n\n      ***** Wave and Analog Data Analysis *****\n\n\n");
    textattr(0x1e);
    cprintf("                \r\n");
    cprintf(" 1. View Data File          \r\n");
    cprintf(" 2. Convert Data File for Graphic Display \r\n");
    cprintf(" 3. Exit                    \r\n");
    cprintf("                \r\n");
    textattr(0x0f);
    printf("\n\nIf you want to plot data, you must select '2'\n");
    printf("for using Graphic Package\n\n");
    printf("Select Number --");

```

```

scanf("%d",&i);
switch (i){
    case 1 : DataView();break;
    case 2 : DataConverting();break;
    default : {flag=NO;break;}
}
}
return:
}

```

```

void DataView(void)
{

```

```

FILE *fp;
int i,j,k,readsize;
int templ, t = 2;
char Dir[20],Data[20],model;

Split80x25();
gotoxy(10,4);
printf("***** Data Converting for Graphic Display *****\n\n");
textattr(0x1e);
cprintf("Input Project Directory \r\n");
scanf("%s",Dir);
chdir(Dir);
cprintf("\nInput Data File Name \r\n");
scanf("%s",&Data);
fp=fopen(Data,"rb");
if (!fp) printf("\a\n File Not Found !!"),exit(1);
if (fread((void *)Steady, 2,16,fp) != 16)
{ printf("\a\nFile Read Error.. Abnormal File Read !\n\n"
        "Press any key\n");
  getch();
  return;
}
printf("\n\n");
textattr(0x4f);
cprintf("Steady State Value of Each Channel\r\n");
textattr(0x0f);
printf("\n");
for(i=0;i<8;i++)

```

```

printf("CH%2d:%x ",i,Steady[i]);
printf("\n");
for(i=8;i<16;i++)
printf("CH%2d:%x ",i,Steady[i]);
printf("\nPress Any Key..\n");
getch();

if (fread(Header, 1, MAX_CH, fp) != MAX_CH) {
printf("\a\a\nAbnormal file Read for Header !!!\n\n"
"Press any key\n");
getch();
return;
}
for (j = MaxCH = 0; j < MAX_CH; j++) {
for (i = 0; i < MAX_CH; i++)
if (Header[i] == j) SelectCH[MaxCH++] = i;
}

Split80x25();
printf(" ***** Selected Display Channel *****\n\n");
printf("Data File Name : %s ",Data);
textattr(0x1f);
cprintf("\r\n- Aquisited Channel ");
for (i=0; i<MaxCH; i++) {textattr(0x0e);cprintf(" %d",SelectCH[i]);}
textattr(0x0f);
printf("\n\nDo you want to Display All Data Channel (Y/n)?");
printf("\n\n (If you Select Channel mode,When Input Complete, Type '-1')\n");

model=getch();
if (model == 'n') {
printf("\n Enter a Channel Number [0..15] : ");
MaxCH = 0;
do {
gotoxy(1, t++ + 11);
printf("What channel ? : ");
scanf("%d", &templ);
SelectCH[MaxCH++] = templ;
if (templ > 15){ printf("\a\nError!\nInput Again!!"); MaxCH--;}
} while (templ != -1);
if (MaxCH > 17) {

```

```

        Split80x25();
        printf("\aError !!!");
        exit(1);
    }
    MaxCH--; }
else {
    printf("\n All Channel Display \n");
    for (i = 0; i < MAX_CH; i++) SelectCH[i] = i;
    MaxCH = 16;
}

while(!feof(fp)){
    readsize = fread((void *)AD_Data, 2, LIMIT, fp);
    readsize /= 2;
    for (j = 0; j < MaxCH; j++) {
        printf("CH%2d\n", SelectCH[j]);
        for (i = j, k = 0; i < readsize; i += MaxCH, k++) {
            printf("%04X ", AD_Data[i]);
            if ((k * 15) == 14) printf("\n");
            if (bioskey(1)) {
                if (bioskey(0) == 0x11b) { j = 16; break; }
                else if (getch() == '\r') break;
            }
        }
        printf("\n\n");
    }
    if(!feof(fp)) printf("more?\n");
    else printf("\a\nEOF!\n"),printf("Press ESC Key to Main Menu");
    getch();
}

fclose(fp);
chdir("..");
while (bioskey(0) != 0x11b);
return;
}

```



```

void DataConverting(void)
{

FILE *fp,*fpl;
int i,j,k,readsize,count;
unsigned long countl;
int templ;
char Dir[20],Data[20],Data1[20],model;

Split80x25();
gotoxy(10,4);
printf("***** Data Converting for Graphic Display *****\n\n\n");
textattr(0x1e);
cprintf("Input Project Directory \r\n");
scanf("%s",Dir);
chdir(Dir);
cprintf("Input Data File Name \r\n");
scanf("%s",&Data);
cprintf("Input Graphic Data File Name \r\n");
scanf("%s",&Data1);
textattr(0x0f);
fp=fopen(Data,"rb");
fpl=fopen(Data1,"wt");

if (!fp) printf("\a\n File Not Found !!"),exit(1);
fread((void *)Steady, 2,16, fp);
if (fread(Header, 1, MAX_CH, fp) != MAX_CH) {
    printf("\a\nAbnormal file Read for Header !!!\n\n"
        "Press any key\n");
    getch();
    return;
}
for (j = MaxCH = 0; j < MAX_CH; j++) {
    for (i = 0; i < MAX_CH; i++)
        if (Header[i] == j) SelectCH[MaxCH++] = i;
}
for(i=0;i<MaxCH;i++)
fprintf(fpl,"%d ",SelectCH[i]);
fprintf(fpl,"\n");
count=countl=0;
fread((void *)AD_Data, 2, MaxCH, fp);

```

```

while(!feof(fp)){

    fread((void *)AD_Data, 2, MaxCH, fp);
    fprintf(fpl, "%d ", count);
    for (j = 0; j < MaxCH; j++) {
        fprintf(fpl, "%d ", AD_Data[j]);
    }
    count++;
    fprintf(fpl, "\n");
    gotoxy(10, 20);
    printf("Converting. . ");
    printf(" %1u Byte", count1=count1+32);
    count1++;
}

fclose(fp);
fclose(fpl);

printf("\a\nEOF!\n"), printf("Press Any Key to Main Menu..");
getch();
chdir("../");
return;

}

```

```

void Split80x25(void)
{
    char far *temp = (char far *)0xb8000000L, far *l, far *r;
    int i, j;

    switch (random(8)) {
        case 0 :
            for (i = 0; i < 80; i++) {
                l = temp;
                l += (79 - i) * 2;
                for (j = 0; j < 25; j++) {
                    *(l + j * 160 + 1) = 0x00;
                }
                delay(5);
            }
            break;
    }
}

```

```

case 1 :
  for (i = 0; i < 80; i++) {
    l = temp;
    l += i * 2;
    for (j = 0; j < 25; j++) {
      *(1 + j * 160 + 1) = 0x00;
    }
    delay(5);
  }
  break:

```

```

case 2 :
  for (j = 0; j < 25; j++) {
    l = temp;
    l += (24 - j) * 160;
    for (i = 0; i < 80; i++) {
      *(1 + i * 2 + 1) = 0x00;
    }
    delay(5);
  }
  break:

```

```

case 3 :
  for (j = 0; j < 25; j++) {
    l = temp;
    l += j * 160;
    for (i = 0; i < 80; i++) {
      *(1 + i * 2 + 1) = 0x00;
    }
    delay(5);
  }
  break:

```

```

case 4 :
  for (i = 0; i < 40; i++) {
    l = r = temp;
    l += (39 - i) * 2; r += (40 + i) * 2;
    for (j = 0; j < 25; j++) {
      *(1 + j * 160 + 1) = 0x00;
      *(r + j * 160 + 1) = 0x00;
    }
  }

```

```

        delay(10);
    }
    break;

case 5 :
    for (j = 0; j < 13; j++) {
        l = r = temp;
        l += (12 - j) * 160; r += (13 + j) * 160;
        for (i = 0; i < 80; i++) {
            *(l + i * 2 + 1) = 0x00;
            *(r + i * 2 + 1) = 0x00;
        }
        delay(10);
    }
    break;

case 6 :
    for (j = 0; j < 13; j++) {
        l = r = temp;
        l += j * 160; r += (24 - j) * 160;
        for (i = 0; i < 80; i++) {
            *(l + i * 2 + 1) = 0x00;
            *(r + i * 2 + 1) = 0x00;
        }
        delay(10);
    }
    break;

case 7 :
    for (i = 0; i < 40; i++) {
        l = r = temp;
        l += i * 2; r += (79 - i) * 2;
        for (j = 0; j < 25; j++) {
            *(l + j * 160 + 1) = 0x00;
            *(r + j * 160 + 1) = 0x00;
        }
        delay(10);
    }
    break;
}
clrscr();
}

```

부록 A2

조파기 설계조건 계산을 위한 Fortran 프로그램

DESIGN 및 계산결과

PROGRAM DESIGN

```

C
  PARAMETER(NEVAN=20)
  DIMENSION WKS(NEVAN),CN(NEVAN)
  REAL KH
  OPEN(UNIT=11,FILE='OUTPUT.DAT',STATUS='UNKNOWN')
  G=9.806
  RHO=1000.
  PI=4.*ATAN(1.0)
C
C READ PARAMETERS FOR WAVE-PADDLE AND WAVE CONDITION:
C
  WRITE(*,*) 'Paddle height (m) ? '
  READ(*,*) PH
  WRITE(*,*) 'Number of evanescent modes to be included ? '
  READ(*,*) NEV
  WRITE(11,103) PH,NEV
  WRITE(11,*) '
C
C DO LOOP FOR DEPTH
C
  DO 60 IH=1,7
  H=0.15+0.05*FLOAT(IH)
  WRITE(*,200) H
200  FORMAT(1X,'WATER DEPTH = ',F5.2)
  WH=0.8*H
  WRITE(11,104) H,WH
  WRITE(11,*) '
C
C DO LOOP FOR WAVE PERIOD
C
  WRITE(11,105)
  DO 50 IP=1,27
  T=0.4+0.1*FLOAT(IP-1)
  WRITE(*,201) T
201  FORMAT(3X,'WAVE PERIOD = ',F5.2)
  SIGMA=2.0*PI/T
  CALL WAVENO(SIGMA,H,WK)
  KH=WK*H
  WL=2.0*PI/WK
  S=G*WH*WK*(SINH(2.0*KH)+2.0*KH)/(4.0*SIGMA**2*SINH(KH)*COSH(KH))
  AP=-2.*S*SIGMA*SINH(KH)/(WK*(SINH(2.0*KH)+2.0*KH))

```

```

      UMAX=0.5*S*SIGMA
      DO 10 I=1,NEV
        II=I
        CALL EVANES(II,SIGMA,G,H,WKS(I))
        CN(I)=2.*S*SIGMA*SIN(WKS(I)*H)/
*          (WKS(I)*(SIN(2.*WKS(I)*H)+2.*WKS(I)*H))
10    CONTINUE
C
C    COMPUTE SURFACE ELEVATION, FORCE, POWER AND BENDING MOMENT:
C
      DT=T/50.
      TM=-25.0*DT
      ETAMAX=0.0
      BMMAX=0.0
      DO 30 IT=1,50
        SIGMAT=SIGMA*TM
        U=UMAX*COS(SIGMAT)
        ETAF=- (SIGMA/G)*AP*COSH(WK*H)*COS(SIGMAT)
        DO 11 N=1,NEV
          ETAF=ETAF-(SIGMA/G)*CN(N)*COS(WKS(N)*H)*SIN(SIGMAT)
11    CONTINUE
        IF(ETAF.GT.ETAMAX) ETAMAX=ETAF
        ETAB=-ETAF
        DZF=(ETAF+H)/50.0
        DZB=(ETAB+H)/50.0
        PF=0.0
        BM=0.0
        ZD=-H
        PFD=-RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZD))*COS(SIGMAT)
        DO 12 N=1,NEV
          PFD=PFD-RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZD))*SIN(SIGMAT)
12    CONTINUE
        DO 14 NZ=1,50
          ZU=-H+FLOAT(NZ)*DZF
          IF(ZU.GE.0.0) THEN
            PFU=RHO*G*(ETAF-ZU)
          ELSE
            PFU=-RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZU))*COS(SIGMAT)
            DO 13 N=1,NEV
              PFU=PFU-RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZU))*SIN(SIGMAT)
13    CONTINUE
          END IF

```



```

PF=PF+(PFD+PFU)*DZF/2.0
ARM=PH-H-(ZU+ZD)/2.0
BM=BM+ARM*(PFD+PFU)*DZF/2.0
PFD=PFU
ZD=ZU
14 CONTINUE
PB=0.0
ZD=-H
PBD=RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZD))*COS(SIGMAT)
DO 15 N=1,NEV
PBD=PBD+RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZD))*SIN(SIGMAT)
15 CONTINUE
DO 17 NZ=1,50
ZU=-H+FLOAT(NZ)*DZB
IF(ZU.GE.0.0) THEN
PBU=RHO*G*(ETAB-ZU)
ELSE
PBU=RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZU))*COS(SIGMAT)
DO 16 N=1,NEV
PBU=PBU+RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZU))*SIN(SIGMAT)
16 CONTINUE
END IF
PB=PB+(PBD+PBU)*DZB/2.0
ARM=PH-H-(ZU+ZD)/2.0
BM=BM-ARM*(PBD+PBU)*DZB/2.0
PBD=PBU
ZD=ZU
17 CONTINUE
IF(BM.GT.BMMAX) BMMAX=BM
TM=TM+DT
30 CONTINUE
FP=2.0*RHO*SIGMA**2*S*SINH(KH)**2/(WK*WK*(SINH(2.0*KH)+2.0*KH))
FS=0.0
DO 18 IEV=1,NEV
FS=FS+2.0*RHO*SIGMA**2*S*SIN(WKS(IEV)*H)**2/
1 (WKS(IEV)**2*(SIN(2.0*WKS(IEV)*H)+2.0*WKS(IEV)*H))
18 CONTINUE
PHM=0.5*ATAN(-FS/FP)
PMA=SIGMA*S*(FP*COS(PHM)**2-FS*COS(PHM)*SIN(PHM))
WRITE(11,106) T,WL,S,ETAMAX,UMAX,PMA/746.0,BMMAX
50 CONTINUE
WRITE(11,*) '

```

```

60     CONTINUE
103    FORMAT(9X, 'PADDLE HEIGHT (M) = ', F4.2, /
*      9X, 'NUMBER OF EVANESCENT MODES = ', I2)
104    FORMAT(9X, 'WATER DEPTH (M) = ', F4.2, /
*      9X, 'WAVE HEIGHT (M) = ', F4.2)
105    FORMAT(19X, 'WAVE', 13X, 'MAX', 6X, 'MAX', 6X, 'MAX', 6X, 'MAX', /9X,
* 'PERIOD', 3X, 'LENGTH', 3X, 'STROKE', 3X, 'ELEV', 3X, 'VELOCITY', 3X,
* 'POWER', 3X, 'MOMENT' /10X, '(S)', 6X, '(M)', 6X, '(M)', 5X, '(M)', 5X,
* '(M/S)', 5X, '(HP)', 4X, '(N-M)' /)
106    FORMAT(5X, 7F9.3)
      STOP
      END

C
C*****
C
      SUBROUTINE WAVENO(SIGMA, H, WK)
C
C Compute wavenumber by Hunt(1979) formula (see Dean & Dalrymple, p72)
C
      DIMENSION D(6)
      DATA (D(K), K=1, 6) /0.6666666666, 0.3555555555, 0.1608465608,
*          0.0632098765, 0.0217540484, 0.0065407983/
      G=9.806
      Y=SIGMA*SIGMA*H/G
      SUM=1.0
      DO 50 J=1, 6
          DUM=Y**J
          SUM=SUM+D(J)*DUM
50     CONTINUE
      WKH=SQRT(Y*Y+Y/SUM)
      WK=WKH/H
      RETURN
      END

C
C*****
C
      SUBROUTINE EVANES(I, SIGMA, G, H, WK)
      DELTA=1.0E-5
      PI=4.*ATAN(1.0)
      X=(FLOAT(I)-0.25)*PI
10     F=SIGMA*SIGMA+(G*X/H)*TAN(X)
      FP=(G/H)*(TAN(X)+X/(COS(X)*COS(X)))

```

```
XNEW=X-F/FP
DIF=ABS(XNEW-X)
IF(DIF.LE.DELTA) GO TO 50
X=XNEW
GO TO 10
50 X=XNEW
   WK=X/H
   RETURN
   END
C
C----- End of Program -----
```

PADDLE HEIGHT (M) = 0.80
 NUMBER OF EVANESCENT MODES = 20

WATER DEPTH (M) = 0.20
 WAVE HEIGHT (M) = 0.16

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
0.400	0.250	0.080	0.097	0.629	0.128	178.485
0.500	0.388	0.082	0.089	0.515	0.079	93.682
0.600	0.549	0.090	0.084	0.469	0.086	86.712
0.700	0.719	0.103	0.081	0.463	0.105	104.308
0.800	0.887	0.120	0.081	0.472	0.125	121.357
0.900	1.052	0.139	0.080	0.484	0.142	135.208
1.000	1.212	0.158	0.080	0.495	0.156	145.937
1.100	1.369	0.177	0.080	0.505	0.168	154.248
1.200	1.523	0.196	0.080	0.512	0.177	160.766
1.300	1.675	0.215	0.080	0.519	0.185	165.950
1.400	1.826	0.234	0.080	0.524	0.191	170.129
1.500	1.975	0.252	0.080	0.528	0.196	173.541
1.600	2.123	0.271	0.080	0.532	0.201	176.360
1.700	2.270	0.290	0.080	0.535	0.205	178.713
1.800	2.416	0.308	0.080	0.538	0.208	180.697
1.900	2.562	0.327	0.080	0.540	0.210	182.384
2.000	2.707	0.345	0.080	0.542	0.213	183.830
2.100	2.851	0.363	0.080	0.544	0.215	185.079
2.200	2.995	0.382	0.080	0.545	0.217	186.164
2.300	3.139	0.400	0.080	0.546	0.218	187.114
2.400	3.283	0.418	0.080	0.547	0.220	187.949
2.500	3.426	0.436	0.080	0.548	0.221	188.687
2.600	3.569	0.455	0.080	0.549	0.222	189.343
2.700	3.711	0.473	0.080	0.550	0.223	189.928
2.800	3.854	0.491	0.080	0.551	0.224	190.452
2.900	3.996	0.509	0.080	0.551	0.225	190.924
3.000	4.139	0.527	0.080	0.552	0.225	191.349

WATER DEPTH (M) = 0.25

WAVE HEIGHT (M) = 0.20

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
0.400	0.250	0.100	0.107	0.786	0.309	373.691
0.500	0.390	0.101	0.116	0.632	0.164	191.624
0.600	0.557	0.105	0.108	0.549	0.137	128.118
0.700	0.742	0.116	0.104	0.520	0.158	135.104
0.800	0.932	0.132	0.102	0.519	0.189	159.843
0.900	1.119	0.151	0.101	0.528	0.219	182.550
1.000	1.303	0.172	0.100	0.540	0.246	201.345
1.100	1.483	0.193	0.100	0.552	0.269	216.399
1.200	1.659	0.214	0.100	0.561	0.288	228.362
1.300	1.833	0.236	0.100	0.570	0.304	237.960
1.400	2.004	0.257	0.100	0.577	0.317	245.745
1.500	2.173	0.278	0.100	0.583	0.328	252.129
1.600	2.340	0.299	0.100	0.588	0.337	257.419
1.700	2.507	0.320	0.100	0.592	0.345	261.848
1.800	2.672	0.341	0.100	0.595	0.352	265.588
1.900	2.836	0.362	0.100	0.598	0.357	268.775
2.000	3.000	0.383	0.100	0.601	0.362	271.509
2.100	3.163	0.403	0.100	0.603	0.367	273.873
2.200	3.325	0.424	0.100	0.605	0.371	275.930
2.300	3.487	0.444	0.100	0.607	0.374	277.730
2.400	3.648	0.465	0.100	0.608	0.377	279.315
2.500	3.809	0.485	0.100	0.610	0.380	280.716
2.600	3.970	0.506	0.100	0.611	0.382	281.962
2.700	4.130	0.526	0.100	0.612	0.384	283.073
2.800	4.290	0.546	0.100	0.613	0.386	284.070
2.900	4.450	0.567	0.100	0.614	0.388	284.966
3.000	4.609	0.587	0.100	0.615	0.389	285.776

WATER DEPTH (M) = 0.30

WAVE HEIGHT (M) = 0.24

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
0.400	0.250	0.120	0.124	0.943	0.121	59.790
0.500	0.390	0.120	0.145	0.755	0.332	361.447
0.600	0.560	0.122	0.134	0.641	0.222	208.975
0.700	0.753	0.130	0.127	0.584	0.225	173.548
0.800	0.959	0.144	0.124	0.567	0.264	195.135
0.900	1.167	0.163	0.122	0.570	0.309	226.558
1.000	1.372	0.185	0.121	0.580	0.352	254.641
1.100	1.573	0.207	0.120	0.592	0.390	278.176
1.200	1.770	0.231	0.120	0.604	0.423	297.492
1.300	1.963	0.254	0.120	0.614	0.450	313.151
1.400	2.154	0.277	0.120	0.622	0.474	325.941
1.500	2.342	0.301	0.120	0.630	0.494	336.484
1.600	2.528	0.324	0.120	0.636	0.510	345.254
1.700	2.712	0.347	0.120	0.641	0.525	352.616
1.800	2.895	0.370	0.120	0.646	0.537	358.848
1.900	3.076	0.393	0.120	0.650	0.548	364.165
2.000	3.257	0.416	0.120	0.653	0.557	368.736
2.100	3.437	0.438	0.120	0.656	0.565	372.692
2.200	3.616	0.461	0.120	0.658	0.572	376.136
2.300	3.794	0.484	0.120	0.661	0.579	379.154
2.400	3.972	0.506	0.120	0.663	0.584	381.811
2.500	4.149	0.529	0.120	0.665	0.589	384.163
2.600	4.326	0.551	0.120	0.666	0.593	386.254
2.700	4.503	0.574	0.120	0.668	0.597	388.122
2.800	4.679	0.596	0.120	0.669	0.601	389.796
2.900	4.855	0.618	0.120	0.670	0.604	391.303
3.000	5.030	0.641	0.120	0.671	0.607	392.664

WATER DEPTH (M) = 0.35

WAVE HEIGHT (M) = 0.28

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
0.400	0.250	0.140	0.141	1.100	0.161	66.949
0.500	0.390	0.140	0.140	0.880	0.201	88.106
0.600	0.561	0.141	0.162	0.739	0.369	344.015
0.700	0.759	0.146	0.152	0.656	0.317	237.792
0.800	0.975	0.158	0.146	0.619	0.351	232.094
0.900	1.199	0.175	0.143	0.612	0.409	265.561
1.000	1.424	0.197	0.142	0.618	0.471	303.368
1.100	1.644	0.220	0.141	0.629	0.528	336.401
1.200	1.861	0.245	0.140	0.641	0.579	364.344
1.300	2.073	0.270	0.140	0.653	0.623	387.717
1.400	2.282	0.295	0.140	0.663	0.661	406.968
1.500	2.488	0.320	0.140	0.671	0.693	422.928
1.600	2.691	0.346	0.140	0.679	0.721	436.262
1.700	2.892	0.371	0.140	0.685	0.744	447.489
1.800	3.092	0.396	0.140	0.691	0.765	457.017
1.900	3.290	0.421	0.140	0.695	0.783	465.162
2.000	3.487	0.445	0.140	0.700	0.798	472.174
2.100	3.682	0.470	0.140	0.703	0.812	478.250
2.200	3.877	0.495	0.140	0.706	0.824	483.547
2.300	4.071	0.519	0.140	0.709	0.834	488.191
2.400	4.264	0.544	0.140	0.712	0.843	492.283
2.500	4.457	0.568	0.140	0.714	0.852	495.908
2.600	4.649	0.593	0.140	0.716	0.859	499.132
2.700	4.840	0.617	0.140	0.718	0.866	502.013
2.800	5.031	0.641	0.140	0.719	0.872	504.597
2.900	5.222	0.665	0.140	0.721	0.877	506.923
3.000	5.412	0.690	0.140	0.722	0.882	509.025

WATER DEPTH (M) = 0.40

WAVE HEIGHT (M) = 0.32

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
0.400	0.250	0.160	0.168	1.257	0.237	73.751
0.500	0.390	0.160	0.171	1.005	1.042	936.318
0.600	0.561	0.160	0.190	0.840	0.609	545.216
0.700	0.762	0.164	0.179	0.734	0.452	342.941
0.800	0.985	0.172	0.170	0.677	0.457	283.758
0.900	1.221	0.188	0.166	0.656	0.523	302.929
1.000	1.462	0.209	0.163	0.655	0.602	345.155
1.100	1.701	0.232	0.162	0.664	0.681	388.825
1.200	1.935	0.258	0.161	0.676	0.754	426.312
1.300	2.166	0.285	0.160	0.688	0.819	458.257
1.400	2.392	0.311	0.160	0.699	0.875	485.399
1.500	2.615	0.338	0.160	0.709	0.924	508.050
1.600	2.835	0.365	0.160	0.717	0.966	527.065
1.700	3.053	0.392	0.160	0.725	1.003	543.133
1.800	3.268	0.419	0.160	0.731	1.034	556.805
1.900	3.482	0.446	0.160	0.737	1.062	568.519
2.000	3.694	0.472	0.160	0.742	1.086	578.619
2.100	3.905	0.499	0.160	0.746	1.107	587.383
2.200	4.115	0.525	0.160	0.750	1.126	595.032
2.300	4.323	0.552	0.160	0.754	1.142	601.744
2.400	4.531	0.578	0.160	0.757	1.157	607.664
2.500	4.738	0.604	0.160	0.759	1.170	612.911
2.600	4.944	0.630	0.160	0.762	1.182	617.580
2.700	5.150	0.656	0.160	0.764	1.192	621.755
2.800	5.355	0.683	0.160	0.766	1.202	625.500
2.900	5.560	0.709	0.160	0.768	1.210	628.874
3.000	5.764	0.734	0.160	0.769	1.218	631.922

WATER DEPTH (M) = 0.45

WAVE HEIGHT (M) = 0.36

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
0.400	0.250	0.180	0.192	1.414	0.326	78.329
0.500	0.390	0.180	0.192	1.131	0.355	97.456
0.600	0.562	0.180	0.219	0.944	0.975	814.860
0.700	0.763	0.182	0.206	0.817	0.655	496.927
0.800	0.990	0.188	0.196	0.740	0.594	362.902
0.900	1.236	0.201	0.188	0.703	0.652	345.865
1.000	1.490	0.221	0.185	0.693	0.746	382.889
1.100	1.745	0.244	0.182	0.698	0.849	432.919
1.200	1.996	0.270	0.182	0.708	0.946	481.226
1.300	2.244	0.298	0.181	0.720	1.036	522.633
1.400	2.487	0.326	0.180	0.732	1.115	558.128
1.500	2.727	0.355	0.180	0.743	1.185	588.707
1.600	2.963	0.383	0.180	0.752	1.245	614.513
1.700	3.196	0.412	0.180	0.761	1.298	636.407
1.800	3.427	0.440	0.180	0.769	1.345	655.093
1.900	3.656	0.469	0.180	0.775	1.385	671.138
2.000	3.883	0.497	0.180	0.781	1.420	684.999
2.100	4.108	0.525	0.180	0.786	1.452	697.045
2.200	4.332	0.554	0.180	0.791	1.479	707.569
2.300	4.555	0.582	0.180	0.795	1.504	716.814
2.400	4.776	0.610	0.180	0.798	1.525	724.974
2.500	4.997	0.638	0.180	0.801	1.545	732.212
2.600	5.217	0.665	0.180	0.804	1.562	738.657
2.700	5.436	0.693	0.180	0.807	1.578	744.422
2.800	5.655	0.721	0.180	0.809	1.592	749.597
2.900	5.873	0.749	0.180	0.811	1.605	754.260
3.000	6.090	0.776	0.180	0.813	1.616	758.475

WATER DEPTH (M) = 0.50

WAVE HEIGHT (M) = 0.40

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
0.400	0.250	0.200	0.220	1.571	0.452	82.134
0.500	0.390	0.200	0.207	1.257	0.426	93.971
0.600	0.562	0.200	0.203	1.048	0.494	124.790
0.700	0.764	0.201	0.233	0.903	0.952	710.697
0.800	0.994	0.206	0.221	0.807	0.778	479.354
0.900	1.245	0.216	0.213	0.755	0.803	404.756
1.000	1.510	0.234	0.207	0.734	0.905	420.174
1.100	1.779	0.256	0.204	0.732	1.029	470.979
1.200	2.046	0.282	0.202	0.739	1.154	526.585
1.300	2.310	0.311	0.201	0.750	1.272	578.649
1.400	2.570	0.340	0.201	0.762	1.378	623.441
1.500	2.825	0.370	0.200	0.774	1.473	662.014
1.600	3.077	0.400	0.200	0.785	1.556	695.677
1.700	3.326	0.430	0.200	0.794	1.630	724.362
1.800	3.571	0.460	0.200	0.803	1.694	748.923
1.900	3.814	0.490	0.200	0.810	1.751	770.068
2.000	4.055	0.520	0.200	0.817	1.801	788.371
2.100	4.295	0.550	0.200	0.823	1.845	804.301
2.200	4.532	0.580	0.200	0.828	1.884	818.238
2.300	4.768	0.609	0.200	0.833	1.919	830.494
2.400	5.003	0.639	0.200	0.837	1.950	841.321
2.500	5.237	0.669	0.200	0.840	1.977	850.930
2.600	5.470	0.698	0.200	0.844	2.002	859.494
2.700	5.702	0.727	0.200	0.846	2.024	867.158
2.800	5.934	0.757	0.200	0.849	2.045	874.040
2.900	6.164	0.786	0.200	0.851	2.063	880.245
3.000	6.394	0.815	0.200	0.854	2.080	885.855

부록 A3

조파기 설계조건에 대하여 조파판 전·후면에
작용하는 파력 및 휨모멘트 등을 계산하기 위한
Fortran 프로그램 FORCE 및 계산결과

PROGRAM FORCE

```
C
PARAMETER(NEVAN=20)
DIMENSION WKS(NEVAN), CN(NEVAN)
DIMENSION PFM(50), FARM(50), FBM(50), PBM(50), BARM(50), BBM(50)
DIMENSION FARMX(50), FPX(50), FBMX(50), BARMX(50), BPX(50), BBM(50)
REAL KH
OPEN(UNIT=11, FILE='OUTPUT.DAT', STATUS='UNKNOWN')
G=9.806
RHO=1000.
PI=4.*ATAN(1.0)

C
C READ PARAMETERS FOR WAVE-PADDLE AND WAVE CONDITION:
C
WRITE(*,*) 'Paddle height (m) ? '
READ(*,*) PH
WRITE(*,*) 'Number of evanescent modes to be included ? '
READ(*,*) NEV
WRITE(11,103) PH,NEV
WRITE(11,*) '

C
C
WRITE(*,*) 'Water depth (m) ? '
READ(*,*) H
WH=0.8*H
WRITE(11,104) H,WH
WRITE(11,*) '

C
C
WRITE(11,105)
WRITE(*,*) 'Wave period (sec) ? '
READ(*,*) T
SIGMA=2.0*PI/T
CALL WAVENO(SIGMA, H, WK)
KH=WK*H
WL=2.0*PI/WK
S=G*WH*WK*(SINH(2.0*KH)+2.0*KH)/(4.0*SIGMA**2*SINH(KH)*COSH(KH))
AP=-2.*S*SIGMA*SINH(KH)/(WK*(SINH(2.0*KH)+2.0*KH))
UMAX=0.5*S*SIGMA
DO 10 I=1,NEV
  II=I
  CALL EVANES(II, SIGMA, G, H, WKS(I))
```

```

          CN(I)=2. *S*SIGMA*SIN(WKS(I)*H)/
*          (WKS(I)*(SIN(2. *WKS(I)*H)+2. *WKS(I)*H))
10      CONTINUE
C
C      COMPUTE SURFACE ELEVATION, FORCE, POWER AND BENDING MOMENT:
C
          DT=T/50.
          TM=-25. 0*DT
          ETAMAX=0. 0
          BMMAX=0. 0
          DO 30 IT=1, 50
          SIGMAT=SIGMA*TM
          U=UMAX*COS(SIGMAT)
          ETAF=-(SIGMA/G)*AP*COSH(WK*H)*COS(SIGMAT)
          DO 11 N=1, NEV
              ETAF=ETAF-(SIGMA/G)*CN(N)*COS(WKS(N)*H)*SIN(SIGMAT)
11      CONTINUE
          IF(ETAF. GT. ETAMAX) ETAMAX=ETAF
          ETAB=-ETAF
          DZF=(ETAF+H)/50. 0
          DZB=(ETAB+H)/50. 0
          PF=0. 0
          BM=0. 0
          ZD=-H
          PFD=-RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZD))*COS(SIGMAT)
          DO 12 N=1, NEV
              PFD=PFD-RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZD))*SIN(SIGMAT)
12      CONTINUE
          DO 14 NZ=1, 50
          ZU=-H+FLOAT(NZ)*DZF
          IF(ZU. GE. 0. 0) THEN
              PFU=RHO*G*(ETAF-ZU)
          ELSE
              PFU=-RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZU))*COS(SIGMAT)
              DO 13 N=1, NEV
                  PFU=PFU-RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZU))*SIN(SIGMAT)
13      CONTINUE
          END IF
          PF=PF+(PFD+PFU)*DZF/2. 0
          ARM=PH-H-(ZU+ZD)/2. 0
          BM=BM+ARM*(PFD+PFU)*DZF/2. 0
          PFM(NZ)=(PFD+PFU)/2. 0

```

```

FARM(NZ)=ARM
FBM(NZ)=PFM(NZ)*FARM(NZ)
PFD=PFU
ZD=ZU
14 CONTINUE
PB=0.0
ZD=-H
PBD=RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZD))*COS(SIGMAT)
DO 15 N=1,NEV
PBD=PBD+RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZD))*SIN(SIGMAT)
15 CONTINUE
DO 17 NZ=1,50
ZU=-H+FLOAT(NZ)*DZB
IF(ZU.GE.0.0) THEN
  PBU=RHO*G*(ETAB-ZU)
ELSE
  PBU=RHO*SIGMA*AP*COSH(WK*(H+ZU))*COS(SIGMAT)
  DO 16 N=1,NEV
  PBU=PBU+RHO*SIGMA*CN(N)*COS(WKS(N)*(H+ZU))*SIN(SIGMAT)
16 CONTINUE
END IF
PB=PB+(PBD+PBU)*DZB/2.0
ARM=PH-H-(ZU+ZD)/2.0
BM=BM-ARM*(PBD+PBU)*DZB/2.0
PBM(NZ)=(PBD+PBU)/2.0
BARM(NZ)=ARM
BBM(NZ)=PBM(NZ)*BARM(NZ)
PBD=PBU
ZD=ZU
17 CONTINUE
IF(BM.GT.BMMAX) THEN
BMMAX=BM
DO 20 NZ=1,50
FARMX(NZ)=FARM(NZ)
FPX(NZ)=PFM(NZ)
FBMX(NZ)=FBM(NZ)
BARMX(NZ)=BARM(NZ)
BPX(NZ)=PBM(NZ)
BBMX(NZ)=BBM(NZ)
20 CONTINUE
END IF
TM=TM+DT

```

```

30    CONTINUE
      FP=2.0*RHO*SIGMA**2*S*SINH(KH)**2/(WK*WK*(SINH(2.0*KH)+2.0*KH))
      FS=0.0
      DO 18 IEV=1,NEV
        FS=FS+2.0*RHO*SIGMA**2*S*SIN(WKS(IEV)*H)**2/
1      (WKS(IEV)**2*(SIN(2.0*WKS(IEV)*H)+2.0*WKS(IEV)*H))
18    CONTINUE
      PHM=0.5*ATAN(-FS/FP)
      PMAX=SIGMA*S*(FP*COS(PHM)**2-FS*COS(PHM)*SIN(PHM))
      WRITE(11,106) T, WL, S, ETAMAX, UMAX, PMAX/746.0, BMMAX
      WRITE(11,*) ' '
      WRITE(11,107)
      DO 40 NZ=1,50
        WRITE(11,108) FARMX(NZ), FPX(NZ), FBMX(NZ), BARMX(NZ), BPX(NZ),
*          BBMX(NZ)
40    CONTINUE
103   FORMAT(9X, 'PADDLE HEIGHT (M) = ', F4.2, /
*     9X, 'NUMBER OF EVANESCENT MODES = ', I2)
104   FORMAT(9X, 'WATER DEPTH (M) = ', F4.2, /
*     9X, 'WAVE HEIGHT (M) = ', F4.2)
105   FORMAT(19X, 'WAVE', 13X, 'MAX', 6X, 'MAX', 6X, 'MAX', 6X, 'MAX', /9X,
*   'PERIOD', 3X, 'LENGTH', 3X, 'STROKE', 3X, 'ELEV', 3X, 'VELOCITY', 3X,
*   'POWER', 3X, 'MOMENT'/10X, '(S)', 6X, '(M)', 6X, '(M)', 5X, '(M)', 5X,
*   '(M/S)', 5X, '(HP)', 4X, '(N-M)')
106   FORMAT(5X, 7F9.3)
107   FORMAT(19X, 'FRONT', 30X, 'BACK', /11X, 'ARM', 5X, 'FORCE', 4X, 'MOMENT',
*   12X, 'ARM', 5X, 'FORCE', 4X, 'MOMENT' /, 11X, '(M)', 6X, '(N)',
*   5X, '(N-M)', 13X, '(M)', 6X, '(N)', 5X, '(N-M)')
108   FORMAT(5X, 3F10.3, 5X, 3F10.3)
      STOP
      END

C
C*****
C
      SUBROUTINE WAVENO(SIGMA, H, WK)
C
C   Compute wavenumber by Hunt(1979) formula (see Dean & Dalrymple, p72)
C
      DIMENSION D(6)
      DATA (D(K), K=1, 6)/0.6666666666, 0.3555555555, 0.1608465608,
*     0.0632098765, 0.0217540484, 0.0065407983/
      G=9.806

```



```

        Y=SIGMA*SIGMA*H/G
        SUM=1.0
        DO 50 J=1,6
            DUM=Y**J
            SUM=SUM+D(J)*DUM
50      CONTINUE
        WKH=SQRT(Y*Y+Y/SUM)
        WK=WKH/H
        RETURN
        END
C
C*****
C
        SUBROUTINE EVANES(I, SIGMA, G, H, WK)
        DELTA=1.0E-5
        PI=4.*ATAN(1.0)
        X=(FLOAT(I)-0.25)*PI
10      F=SIGMA*SIGMA+(G*X/H)*TAN(X)
        FP=(G/H)*(TAN(X)+X/(COS(X)*COS(X)))
        XNEW=X-F/FP
        DIF=ABS(XNEW-X)
        IF(DIF.LE.DELTA) GO TO 50
        X=XNEW
        GO TO 10
50      X=XNEW
        WK=X/H
        RETURN
        END
C
C----- End of Program -----

```

PADDLE HEIGHT (M) = 0.80

NUMBER OF EVANESCENT MODES = 20

WATER DEPTH (M) = 0.50

WAVE HEIGHT (M) = 0.40

PERIOD (S)	WAVE LENGTH (M)	STROKE (M)	MAX ELEV (M)	MAX VELOCITY (M/S)	MAX POWER (HP)	MAX MOMENT (N-M)
2.000	4.055	0.520	0.200	0.817	1.801	788.371

FRONT			BACK		
ARM (M)	FORCE (N)	MOMENT (N-M)	ARM (M)	FORCE (N)	MOMENT (N-M)
0.793	1491.175	1182.501	0.797	-1491.031	-1188.352
0.779	1491.876	1162.172	0.791	-1491.160	-1179.508
0.765	1493.280	1142.359	0.785	-1491.418	-1170.763
0.751	1495.386	1123.035	0.779	-1491.805	-1162.116
0.737	1498.196	1104.170	0.773	-1492.320	-1153.563
0.723	1501.710	1085.737	0.767	-1492.965	-1145.104
0.709	1505.931	1067.705	0.761	-1493.738	-1136.735
0.695	1510.861	1050.048	0.755	-1494.641	-1128.454
0.681	1516.501	1032.738	0.749	-1495.672	-1120.259
0.667	1522.855	1015.745	0.743	-1496.833	-1112.147
0.653	1529.926	999.042	0.737	-1498.124	-1104.117
0.639	1537.716	982.601	0.731	-1499.543	-1096.166
0.625	1546.230	966.394	0.725	-1501.093	-1088.292
0.611	1555.472	950.393	0.719	-1502.772	-1080.493
0.597	1565.445	934.571	0.713	-1504.581	-1072.766
0.583	1576.155	918.898	0.707	-1506.520	-1065.109
0.569	1587.606	903.348	0.701	-1508.589	-1057.521
0.555	1599.804	887.891	0.695	-1510.788	-1049.998
0.541	1612.755	872.501	0.689	-1513.118	-1042.539
0.527	1626.465	857.147	0.683	-1515.579	-1035.141
0.513	1640.940	841.802	0.677	-1518.171	-1027.802
0.499	1656.187	826.437	0.671	-1520.894	-1020.520

FRONT			BACK		
ARM	FORCE	MOMENT	ARM	FORCE	MOMENT
(M)	(N)	(N-M)	(M)	(N)	(N-M)
0.485	1672.214	811.024	0.665	-1523.749	-1013.293
0.471	1689.027	795.532	0.659	-1526.735	-1006.118
0.457	1706.635	779.932	0.653	-1529.853	-998.994
0.443	1725.045	764.195	0.647	-1533.103	-991.918
0.429	1744.268	748.291	0.641	-1536.486	-984.887
0.415	1764.311	732.189	0.635	-1540.001	-977.901
0.401	1785.184	715.859	0.629	-1543.650	-970.956
0.387	1806.897	699.269	0.623	-1547.432	-964.050
0.373	1829.460	682.389	0.617	-1551.347	-957.181
0.359	1852.884	665.185	0.611	-1555.397	-950.348
0.345	1877.180	647.627	0.605	-1559.581	-943.547
0.331	1902.359	629.681	0.599	-1563.900	-936.776
0.317	1928.433	611.313	0.593	-1568.354	-930.034
0.303	1931.836	585.346	0.587	-1572.944	-923.318
0.289	1853.334	535.614	0.581	-1577.669	-916.626
0.275	1716.050	471.914	0.575	-1582.531	-909.955
0.261	1578.766	412.058	0.569	-1587.530	-903.304
0.247	1441.482	356.046	0.563	-1592.666	-896.671
0.233	1304.198	303.878	0.557	-1597.939	-890.052
0.219	1166.914	255.554	0.551	-1603.350	-883.446
0.205	1029.630	211.074	0.545	-1608.901	-876.851
0.191	892.346	170.438	0.539	-1614.590	-870.264
0.177	755.062	133.646	0.533	-1620.418	-863.683
0.163	617.778	100.698	0.527	-1626.387	-857.106
0.149	480.494	71.594	0.521	-1632.496	-850.531
0.135	343.210	46.333	0.515	-1638.746	-843.954
0.121	205.926	24.917	0.509	-1645.138	-837.375
0.107	68.642	7.345	0.503	-1651.672	-830.791