

## 제주대학교 학내 공동이용 불규칙 조파수조의 실험과 그 특징

김 남 형 · 김 경 태

제주대학교 해양과학대학 해양토목공학과

### The experimentation and its feature of the irregular wave generator in Cheju National University

Nam-Hyeong, Kim and Kyeong-Tae, Kim

Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Cheju-do 690-756, Korea

This paper represents a general description and its feature of the irregular wave generator, which was settled in the Coastal & Harbor Engineering Laboratory of the Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, in January 1998.

The irregular wave generator is designed to generate regular wave and irregular wave. The wave height, wave pressure, wave velocity and sand surface in the wave flume were measured with standard instrument respectively.

The results of the experimentation were almost satisfied except on sand surface measuring

**Key words** : Irregular waves, Wave generator, Spectrum

### 서 론

우리나라는 국토가 좁고, 자연자원이 빈약한 국가로서 일찍부터 해양공간의 적극적인 이용과 해양 자원개발의 필요성이 대두되어 왔다. 최근에는 임해부에서의 워터프론트 개발이 새삼스러운 관점에서 주목받고 있으며, 해양을 적극적으로 이용하고 개발하기 위해서는 해양에 구조물을 건설하거나 매립하는 것은 필수적일 것이다. 해양에 구조물을 건설하는 경우에는, 파랑의 예측, 구조물에 의한 파의 변형, 표사의 이동, 구조물의 동적응답해석 등의 예측과 제어법을 분명히 해야만 한다. 따라서, 해안이나 해양에 구조물을 건설하는데는 무엇보다도 중요한 것은 파랑의 특성을 정확히 파악하는 것이다.

종래에 해안공학상의 제문제는 대부분의 경우, 파랑이 규칙적인 성질을 가지는 규칙파를 대상으로 실험과 연구가 행하여져 왔다. 실제로 해양의 파랑은 주기, 파장, 파고가 서로 다른 불규칙적인 성질을 나타내고 있으므로, 그 실체를 파악하는 것이 곤란하다. 일반적으로 불규칙한 파를 포함하는 각 성분파의 거동이 미소진폭파이론에 의해 표현할 수 있는 경우는, 이들의 각 성분파는 단일파로서 특성을 선형중첩시키는 것이 가능하며, 이때의 처리방법은 비교적 간단하다. 그러나, 해안에 접근하여 온 파랑은 비선형성을 가지며, 이것은 위에 말한 선형중첩을 할 수 없다. 따라서 공학적인 문제로 되는 해안부근의 불규칙한 파랑이 가지는 여러 가지의 성질을 분명히 하기 위해서는, 현지 혹은 실험실에 있어서 불규칙 파랑을 이용한 연구를 행할 필요가

있겠다.

불규칙파의 성질을 취급하는 방법은 여러 가지 (대표파법, 확률분포법, 불규칙파 실험법, 스펙트럼법) 있고, 실험실에 있어서 불규칙한 파랑을 발생시키는 방법으로서는 크게 나누어, (1) 풍동수조에 의한 방법, (2) 유한개의 정현파를 합성시키는 방법, (3) 조파판을 불규칙 신호에 의해 구동시키는 방법 등이 있다. 해양토목공학과 해안 및 항만공학 실험실에 제11차 IBRD 차관사업으로 도입된 불규칙 조파수조는 (3)의 방법인 조파판을 불규칙 신호에 의해 구동시키는 방법을 이용하여 불규칙한 파랑을 일으킬 수 있으며, 또 그 성질을 직접적으로 관측할 수 있다.

본 연구는 해안 및 항만 연구실에 설치되어 있는 불규칙 조파수조를 이용하여 행한 실험으로 불규칙 조파수조의 성능을 평가하고, 앞으로 행해질 불규칙 파랑해석에 관한 기초적인 실험자료를 제공하는 데 있다.

### 불규칙 조파수조의 실험장치

### 불규칙 조파수조의 개요

2차원 파랑수조는 파랑발생방법에 따라 규칙 조파수조와 불규칙 조파수조로 구별할 수 있다. 불규칙 조파수조는 컴퓨터에서 규칙파의 목적파랑 스펙트럼을 전달함수를 이용하여 조파판의 운동에 대한 기계열 신호를 계산하는 다소 복잡한 시스템으로 구성된다. 이와같이 계산된 디지털 신호는 디지털/아날로그 컨버터(DAC)를 통하여 아날로그 신호로 전환되어 Servo-Drive을 거쳐 모터로 전달된다.

Servo-Moter로부터 나온 출력은 Precision Screw를 통하여 조파판을 움직이고, 조파판에 의해 발생된 파랑은 수조내에 설치된 파고계로 계측되어 아날로그/디지털 Converter(ADC)를 통하여 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터에 기록된다. 이와같이하여 발생된 파랑은 조파수조내를 진행하여, 조파수조 끝에 설치되어 있는 소파시설에서 소파되어 소멸된다. 불규칙 조파수조의 제원은 Fig. 1에 나타낸다. 불규칙 조파수조의 양쪽 옆벽면은 강화투명유리며, 전 구간은 강재로 제작되었고, 수평조절대가 부착되어 있다. 본 불규칙 조파수조는 경기도 부천에 있는 새원기연에서 제작한 모델 HD-IGW80으로

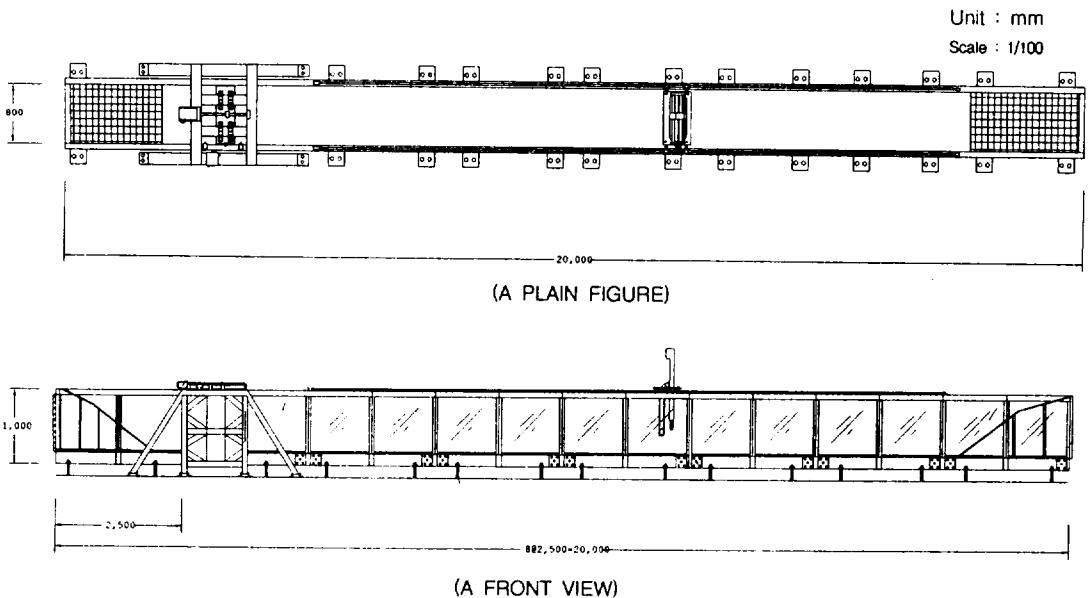


Fig. 1. The sketch of irregular wave generator.

서 그 자세한 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. The characteristics of irregular wave generator.

Wave Generator Type	Piston Type
Wave Height	0.2m~0.8m
Wave Period	0.5~2 sec
Torque	97.5 kg · cm
Dimension	0.8m( W ) × 1m( H ) × 20m( L )
Material	Girder-H beam × 2sheets
Wave Absorber	Multi hole plate and stainless steel installed at both ends of flume
AC Servo Motor	1.5Kw
Speed Control Range	1 : 3.000
Wave Length	0.2m ~ 10m
Temperature	0 ~ 40°C

### 불규칙 조파수조의 계측장비

#### 파고계

Table 2. The characteristics of wave height meter.

Mesuring Range	± 25cm
Response	5Hz
Stability	±1%/24H within ±1%/10°C
Using Channel	6-channel In 1 case
Dimension	43W×762H(mm)
Calibration voltage	1, 1/2, 1/4
Output Voltage	±2.5V
Output Current	±20mA
Temperature Effect	0 - 40°C
Power Supply	Ac 100V±10V
Linearity	±0.5%

CH-401형으로 심선이 도체인 절연 피복선을 수중에 넣으면 도체와 물 사이에 콘덴서가 형성되어 정전용량(C)은 수심에 비례한다. 이 정전용량(C)을 검출부내에서 이것에 비례한 전압(V)으로 변환하고, 또 본체내부의 직류증폭기에서 전압 증폭하

는 원리로 고속형 검출부를 사용하면 앰프의 감도를 바꾸는 것에 의해 작은 파부터 큰 파까지 측정할 수 있으며 지금까지 불가능했던 빠른 파랑도 측정할 수 있는 기기이다. 본 불규칙 조파수조에서 사용한 파고계는 일본 KENEK에서 제작한 모델 CH-401로서 그 자세한 사양은 Table 2와 같다.

#### 파압계

P3 시리즈 압력계로 한계설계에 의해 제작된 초소형 · 고감도의 압력계로, 지중이나 수중에서 사용할 수 있으며 부착방법은 다음과 같다. ① 삽입법 - 흙속에서 직접 사용하기도 하고 시험체에 구멍을 뚫어서 매설, ② 접착법 - 시험체에 압력계를 고무계 접착제 또는 양면 접착 테이프로 고정, ③ 도구에 의한 방법 - 미리 압력계의 뒷면에 부착판을 접착해 놓고, 이 부착판을 테이프 접착제 또는 나사못으로 시험체에 부착 등 이다. 본 불규칙 조파수조 파압계는 일본 SANKEI ENGINEERING에서 제작한 모델 P306A-02로서 그 자세한 사양은 Table 3과 같다.

Table 3. The characteristics of pore water pressure gauge.

Type	P-306A-03
Permitted Range	0.2kgf/cm <sup>2</sup>
Sensor Output	0.001V F.S
Sensor Overload	150%
Permitted Temperature	-15°C ~ 75°C
Cable Length	3m
Operating Temperature	0.05% Ro/°C (0~40°C)

#### 유속계

ACM-200A형, 수리계측용의 2축 전자 유속계로서 패러디의 전자 유도 법칙(자계를 전도체가 횡단하여 운동할 때 그 때 전도체에는 전압이 발생하고 전류가 흐른다)을 이용 전도체인 물 혹은 해수가 자계를 횡단하여 흐를 때, 그 유체에는 유속에 비례한 기전력이 발생하고, 그 기전력과 유속은 일

차식의 관계로 된다는 원리를 이용한 것이며, 노이즈 발생에 대한 적절한 조치가 필요하다(수중의 누전방지, 용량식 파고계와 동시 사용 금지). 본 불규칙 조파수조에서 사용한 유속계는 일본 ALEX에서 제작한 모델 ACM200-A으로서 그 자세한 사양은 Table 4와 같다.

Table 4. The characteristics of electromagnetic current meter.

Size of Sensor	Diameter 20mm
Depth Capacity	3kg/cm <sup>2</sup>
Cable Length	10m
Measuring Range	0~±25cm/sec
	0~±50cm/sec
	0~±250cm/sec
Time Constant	0.5sec, 2sec, 10sec
Accuracy	0.5sec, ±2% or 1cm/sec
	2sec, ±2% or 0.5cm/sec
	10sec, ±2% or 0.5cm/sec
Output Signal	0~±5V at 0~±250cm/sec

**불규칙 조파수조의 실험방법과 고찰**

**실험방법**

먼저 구체적인 실험방법에 앞서 불규칙 조파수조의 실험 흐름도를 도시하면 Fig. 2와 같다. 본 실험에서는 길이 20m, 폭 0.8m, 높이 1m인 조파수조에 일정한 수심까지 물을 채우고, 가로 0.8m, 세로 1m 크기의 조파판 제어기를 통해 주기·파고 등을 입력하여 불규칙파를 발생시킨다. 정지상태의 조파판의 위치로부터 거리 7.96m에 있는 파고계에서 불규칙파랑의 파고를 읽어들인다. 실험 중 발생하는 중복파는 조파수조내의 양 끝에 있는 길이 2m, 높이 1m (경사각 30°)의 소파장치에 의해 소파되어 일산되며, 읽어 들인 데이터는 에너지 스펙트럼 해석 과정을 거친다. 좀더 구체적으로 실험방법을 기술하면 다음과 같다.

1단계 :

① Irregular Wave Generator와 본체부에 계측기를 고정하고,

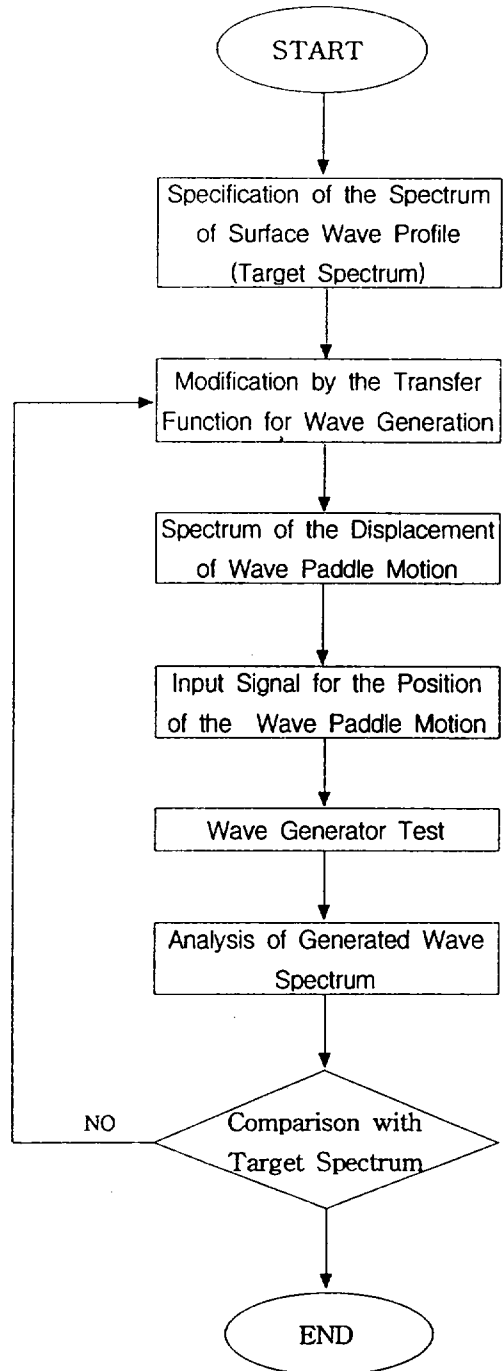


Fig. 2. The flowchart of practice in irregular wave generator.

② 실험의 정확성을 기하기 위하여 P.C에서 나오는 전압과 제어장치의 변환부(GAIN)를 1.00으로 일치시키며,

③ 조파수조의 수심을 조정한 후 정확한 수심을 갖기 위해 70cm부터 시작하여 점차 물을 배출시켜 10cm단위로 50cm까지 측정하였다.

2단계 :

① Irregular Wave Hydraulic Model Test Program의 조정하고,

② 본 실험의 스펙트럼 type은 불규칙파 해석에 가장 많이 사용되고 있는 Bretschneider-Mitsuyasu를 이용하였고, 그 스펙트럼의 식은 다음과 같다<sup>1)</sup>.

$$E(f) = 0.257H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3}f)^{-5} \exp \{ -1.03(T_{1/3}f)^4 \} (m^2 \cdot s) \quad (1)$$

③ 이외에 Pierson-Moskowitz스펙트럼, Mitsuyatsu스펙트럼, JONSWAP스펙트럼도 이용하여 실험을 할 수 있다.

④ Time Interval은 50으로 통일하였고, 비교적 평이한 간격을 유지시켰으며, 반사파의 영향을 가급적 적게 하기 위하여 매 실험시 수면이 완전히 정지 될때까지 기다린 후 실험하였고, 수조바닥은 연근해나 외해와는 달리 요철이나 경사가 존재하지

않고 Uniform Depth를 유지시켰다.

실험은 Table 5에서 주어진 조건들을 이용하여 12 case를 행하였다.

### 고 찰

해양의 파랑의 경우는, 무수한 주파수 성분이 존재하기 때문에, 실험의 결과를 연속한 변화곡선(Fig. 3~Fig. 14)으로 나타냈다. 이 연속한 변화곡선, 즉 연속스펙트럼의 경우, 주파수스펙트럼의 밀도함수(에너지 스펙트럼) E(f)로 표시되며, cm<sup>2</sup>·sec의 단위를 갖는다.

실험 결과로 얻은 12 case의 에너지 스펙트럼을 비교해 보면, Fig. 3, 5, 7, 9, 11, 13과 Fig. 4, 6, 8, 10, 12, 14는 수심과 주기는 일정하게 하였고 파고를 변화시켜 실험한 결과이다. 이들 그래프에서 수심과 주기가 일정하고 파고만이 변할 때의 최대에너지가 일어나는 주파수 f는 같고, 그때의 최대에너지는 파고가 큰 경우가 작은 경우보다도 약 2배 큰 값을 갖는 것을 알 수 있었다. 따라서 파고가 크면 에너지가 크다는 것을 알 수 있었다.

또, Fig. 3, 4, 7, 8, 11, 12 와 Fig. 5, 6, 9, 10, 13, 14는 수심과 파고는 일정하게 하고 주기를 변화시켰을 때의 그래프이며, Fig. 3, 4, 7, 8, 11, 12 와 Fig. 5, 6, 9, 10, 13, 14 를 비교해 보면, 주기가 짧은 쪽이 에너지가 커지는 것을 확인할 수가 있었다.

마지막으로 Fig. 3, 4, 7, 8, 11, 12와 Fig. 5, 6, 9, 10, 13, 14에서는, 주기와 유의파고는 일정하게 하고 수심을 변화시킨 경우에는, 수심이 깊을수록 에너지가 커진다는 것을 관찰할 수 있었다. Fig. 3, 7, 11과 Fig. 4, 8, 12의 경우를 비교하면, 수심이 작아지면 최대에너지 값도 작아지지만, Fig. 5, 9, 13과 Fig. 6, 10, 14인 경우를 비교하면, 수심이 60cm일 때 최대에너지가 발생하며, 수심이 작아진다고 최대에너지가 꼭 작아지지 않는다는 것을 알 수 있었다.

이들의 실험결과와 고찰로부터 다음과 같은 사항을 알 수 있었다. 주기가 짧을수록, 수심이 깊을수록, 파고가 클수록 에너지는 커진다는 사실을 확인할 수가 있었다. 또한 그래프의 선형성은 일반적으로 최대에너지를 중심으로 좌측은 선형, 우측은 비

Table 5. The experimental conditions.

Conditions Case	Depth(cm)	Period(sec)	Significant Height(cm)
case 1	70	1.5	10
case 2	70	1.5	7
case 3	70	2.0	10
case 4	70	2.0	7
case 5	60	1.5	10
case 6	60	1.5	7
case 7	60	2.0	10
case 8	60	2.0	7
case 9	50	1.5	10
case10	50	1.5	7
case11	50	2.0	10
case12	50	2.0	7

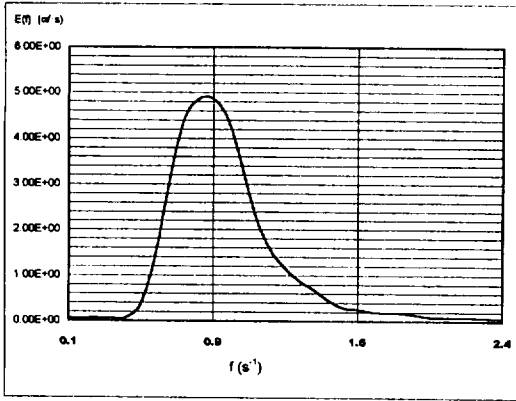


Fig. 3. Energy-spectrum in case 1.  
( $h=70\text{cm}$ ,  $T=1.5\text{sec}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

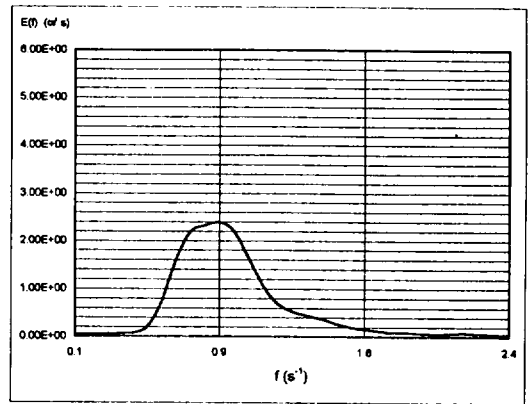


Fig. 4. Energy-spectrum in case 2.  
( $h=70\text{cm}$ ,  $T=1.5\text{sec}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

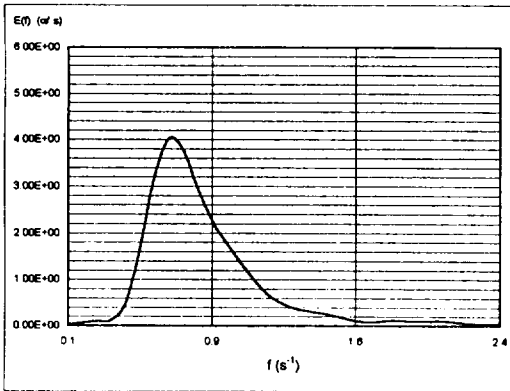


Fig. 5. Energy-spectrum in case 3.  
( $h=70\text{cm}$ ,  $T=2.0\text{sec}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

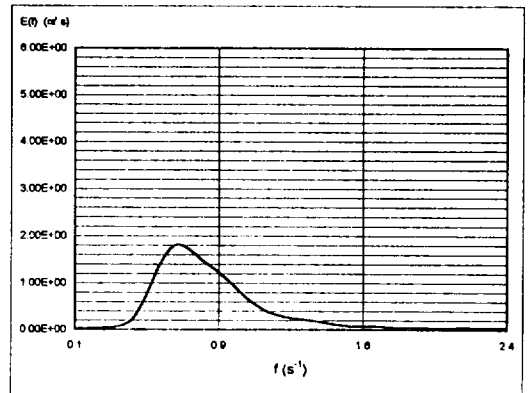


Fig. 6. Energy-spectrum in case 4.  
( $h=70\text{cm}$ ,  $T=2.0\text{sec}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

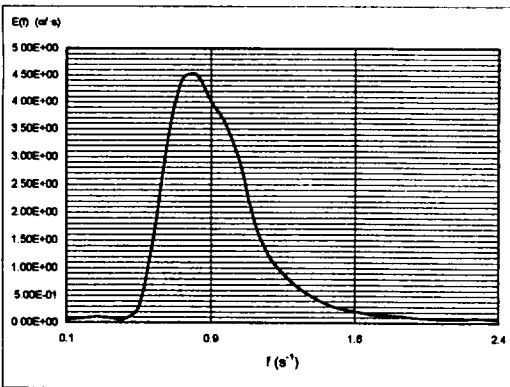


Fig. 7. Energy-spectrum in case 5.  
( $h=60\text{cm}$ ,  $T=1.5\text{sec}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

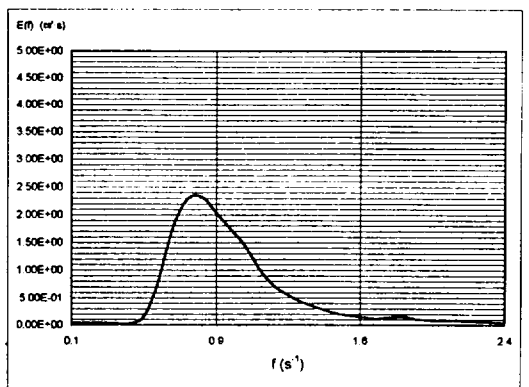


Fig. 8. Energy-spectrum in case 6.  
( $h=60\text{cm}$ ,  $T=1.5\text{sec}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

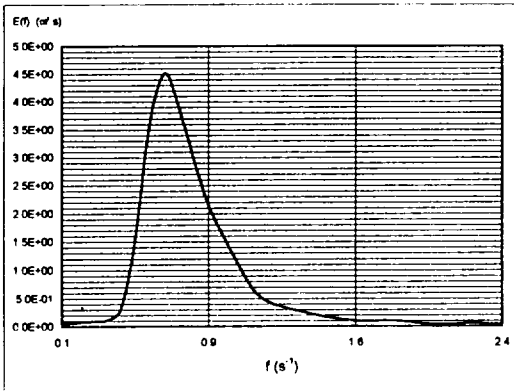


Fig. 9. Energy-spectrum in case 7.  
( $h=60\text{cm}$ ,  $T=2.0\text{sec}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

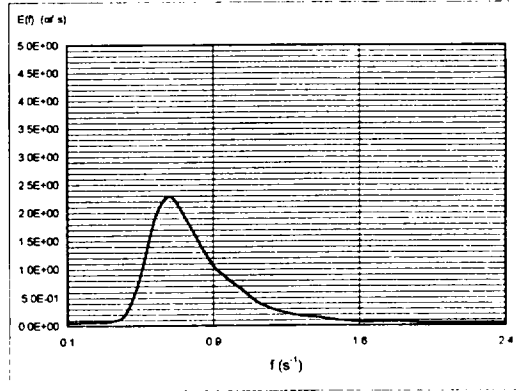


Fig. 10. Energy-spectrum in case 8.  
( $h=60\text{cm}$ ,  $T=2.0\text{sec}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

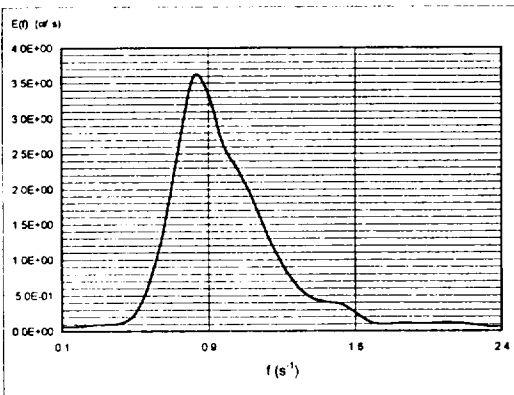


Fig. 11. Energy-spectrum in case 9.  
( $h=50\text{cm}$ ,  $T=1.5\text{sec}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

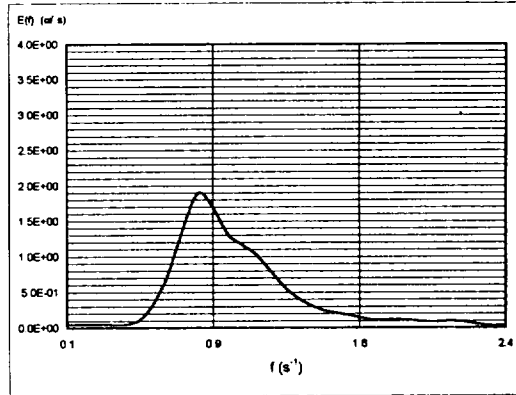


Fig. 12. Energy-spectrum in case 10.  
( $h=50\text{cm}$ ,  $T=1.5\text{sec}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

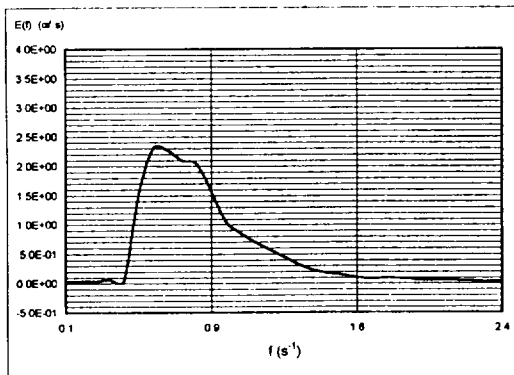


Fig. 13. Energy-spectrum in case 11.  
( $h=50\text{cm}$ ,  $T=2.0\text{sec}$ ,  $H=10\text{cm}$ )

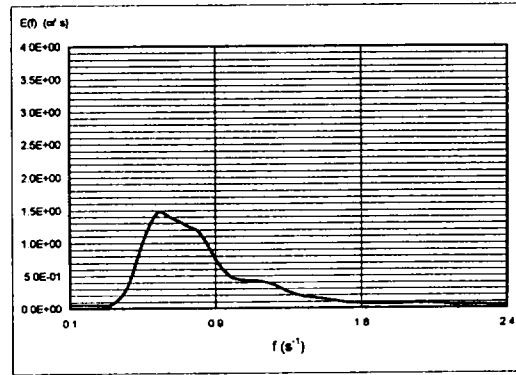


Fig. 14. Energy-spectrum in case 12.  
( $h=50\text{cm}$ ,  $T=2.0\text{sec}$ ,  $H=7\text{cm}$ )

선형성을 띠는데, E, f값이 클수록 선형, E, f값이 작을수록 비선형을 나타내며, 수심이 작을 때 주기가 크면 쇄파의 영향 때문에 비선형성을 띠게 되는 것으로 사료된다.

Fig. 3~Fig. 14의 스펙트럼으로부터 파랑 에너지가 주파수 0.5~1.6sec범위에 분포하고 있는 것을 알 수 있고, 파랑 에너지가 가장 집중하고 있는 주파수가 유의파 주기  $f(=1/T)$ 보다 작다는 사실은 Table 6에 나타낸 바와 같다.

Table 6. The maximum energy density and peak of frequency.

	Maximum Energy E	Peak Frequency f	Peak Period T(1/f)	Significant Period $T_{1/3}$
Fig. 3	4.87	0.859	1.16	1.09
Fig. 4	2.39	0.859	1.16	0.89
Fig. 5	4.03	0.625	1.60	1.09
Fig. 6	1.81	0.625	1.60	0.94
Fig. 7	4.51	0.781	1.28	1.10
Fig. 8	2.32	0.781	1.28	0.92
Fig. 9	4.52	0.625	1.60	1.17
Fig. 10	2.29	0.625	1.60	0.96
Fig. 11	3.60	0.781	1.28	0.92
Fig. 12	1.90	0.781	1.28	0.92
Fig. 13	2.30	0.547	1.83	1.09
Fig. 14	1.46	0.547	1.83	1.01

### 요약 및 결론

이상으로 해안 및 항만공학 실험실내의 불규칙 조파수조에 대한 개요 및 그에 따른 계측장비들을 소개하였고, 그중 파고계를 이용한 실험을 통하여 파의 일반적인 특성을 고찰해 보았다.

그 결과 기존의 스펙트럼 이론과 일치되는 경향을 나타내는 것을 알았으며, 불규칙 파랑 해석에 관련된 기초자료를 취득할 수 있었다. 본 연구는 파고계를 이용한 불규칙 파랑의 에너지 스펙트럼에 관해서만 실험과 해석을 행하였지만, 앞으로는 불규칙 파랑과 유속 또는 사면체를 이용한 표사의 이동 등 많은 실험을 행하여 불규칙 파랑에 관한 좀

더 자세한 자료를 취득할 수 있어야 하겠다.

불규칙 조파수조가 해안 및 항만공학 실험실에 설치된지 얼마되지 않아 아직 관측장비가 미비하기 때문에, 정말로 심도있는 연구를 하기에 부족한 점이 많았다. 하지만 앞으로 모든 관측기들이 준비 되면, 불규칙파에 의한 구조물의 거동, 표사이동, 쇄파현상 등의 제측이 가능하고, 그에 관한 연구가 활발히 진행되리라 기대된다.

### 사 사

제11차 IBRD 차관 사업으로 해안 및 항만공학 연구실에 도입된 불규칙 조파수조는 해양과학대학의 전임학장이셨던 노홍길 교수님, 정상철 교수님, 고유봉 교수님과 해양토목공학과와 양성기 교수님의 이해와 협조로 이루어진 것이다. 여기에, 네분의 교수님에게 진심으로 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- Kiyoshi Horikawa(김남형역), 1993. 해안공학, 청문각, 415 pp.
- Yoshimi Goda(김남형역), 1994. 항만구조물의 내파 설계, 구미서관, 404 pp.
- 이흥재·전인식·함창호, 1997. 국립건설시험소의 신항만공학실험실의 소개, 1997년도 학술발표회논문집(II), 대한토목학회, p. 469~472.
- 김윤석·황규석·설재광·전성모, 1998. 현대건설기술연구소 풍동실험실 소개, 토목, 제46권 제1호, 72~80.
- 米盛亨·奈良追嘉一·前川博·今井健彦·中山博·豊廣利信, 1987. 鹿兒島大學學内共同 利用回流水槽의設計思想と特徴およびその性能, 鹿兒島大學水産學部紀要, 第36卷 第1號, 67~87.
- 合田良實·鈴木康正·岸良安治, 1974. 不規則波浪實驗とその特性について, 第21回海岸工學講演會論文集, 237~242.
- 富永正照·橋本安, 1970. 造波機による不規則波의發生, 第17回海岸工學講演會論文集, 415~419.