J. Korean Fish. Soc. 34(6), 705~712 한수지, 34(6), 705~712, 2001

다방향불규칙파 조파수조의 조파특성에 관한 연구

손병규+ · 류청로*
한국건설기술연구원 수자원환경연구부, *부경대학교 해양공학과

A Study on the Wave Generating Characteristics of the Multi-directional Irregular Wave Basin

Byung-Kyu SOHN+ and Cheong-Ro RYU*
Korea Institute of Construction Technology, Water Resources and Environmental Res., Koyang 411-712, Korea
**Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

It is of great importance to represent the directional ocean waves in a laboratory basin for hydraulic model tests. The directional ocean waves can be expressed as a linear superposition of a large number of component waves with different frequencies and propagating directions. The aim of the study is to check the wave generating characteristics by serpent-type wave generating system in PKNU (Pukyong National University) which is composed of 10 piston-type wave generators. In the experiment, spatial variation of irregular wave heights and propagating angles are measured in the multi-directional wave maker basin. Target wave directional spectrum is reproduced in the area of multi-directional wave maker basin. The directional spreading of the generated waves varied spacially in the basin. They differed from target spectrum as the measurement point becomes far from the center line normal to the generator face. The effective generation area where that target can be reproduced is limited to the triangular area attached the generator face. According to the results, it is emphasized that the effective experiment area in the basin considered wave generator characteristics should be determined in consideration of experimental conditions including structural shapes, water depth, wave directionality etc.

Key words: Wave generator, Irregular ocean wave, Effective generation area, Directional spectrum

서 론

방파제의 설계 · 건설에서 발생되는 안정성의 평가시 불규칙파에 의한 단면적 · 평면적 안정성의 평가와 같은 문제해결의 필요성에 따라 3차원적인 평면실험의 중요성이 인식되어 왔고, 입사파랑의 방향성, 불규칙성 및 3차원성에 대한 고려도 대단히 중요한 사안으로 지적되고 있다. 그러나 파랑의 비선형성, 실해역에 가까운 시 · 공간적으로 불확정적인 월파, 세굴 등의 많은 문제점을 검토할 수 있는 다방향불규칙파 조파장치를 이용한 수리모형실험은 수조내의 다중반사를 제어하면서 목적하는 방향성 불규칙파를 조파할 필요가 있다. 특히 방향성 불규칙파 실험의 정도를 향상시키기 위해서 조파판의 운동과 발생파의 응답특성에 대한 정확한 파악이 요구되어지며, 굴절, 반사를 고려할 수 있는 실험영역의 최적화에 대한 요구가 수반되어질 필요가 있다 (平石, 1991).

또한, 파랑에 관계하는 현상에는 월파나 표사이동, 구조물의 진동 · 동요, 파괴 등 방향성의 영향을 현저하게 받아들이는 것이 많다. 이들은 비선형성이 강한 현상이기 때문에 수치계산에 의한 해석이 곤란하다. 그래서 합리적인 구조물의 설계, 건설이 요구되므로 수리모형실험으로 외력인자를 평가, 해석정도를 높일 필요성이 증대하고 있다. 뿐만 아니라, 연구성과의 향상에 따라 해파가 가지고 있는 방향성을 도입한 다방향불규칙파 조파장치를 이용한 실험이 표준으로 되고 있다.

+Corresponding author: bksohn@kict.re.kr

그렇지만 방향성 불규칙파의 조파는 조파기의 총길이가 한정되어 있기 때문에 소정의 경사파가 조파되는 범위가 한정되어 목표로 하는 방향성을 가진 파가 조파되는 범위는 수조내의 일부영역에 한정되어 있다 (Takayama, 1982; 平石, 1991).

그래서 본 연구는 다방향불규칙파 조파장치를 이용하여 조파특성에 대해서 검토하고, 목표로 하는 방향성 불규칙파를 실험실내에서 조파하는 수법을 확립하여 유효조파영역을 평가하고자 한다.

재료 및 방법

조파수조 및 조파장치의 개요

부경대학교 해양수리실험소에 설치된 조파수조는 길이 25 m, 폭 10 m로 최대수심을 0.8 m까지 가능하며, 수조내에 10대의 paddle이 하나의 시스템으로 작동되는 serpent형 조파기로 구성되어 있다. 조파장치 배후의 교란이나 반사파에 의해 조파기전면의 실험영역에 전파하지 않도록 수조내의 각 측벽은 사석 (반사율 0.2 이하)으로 소파공의 효과를 만족하도록 1:3의 경사로 설치하였다.

본 조파장치는 serpent형 조파기를 제어하기 위해 1대의 컴퓨터 장치와 실험 계측을 위한 컴퓨터 1대, serpent형 조파기의 본체로 이루어져 있다. Serpent형 조파장치를 제어하는 컴퓨터는 조정실에 설치되어 있다. 컴퓨터로부터의 지령신호는 조파판의 변위를 제어하도록 되어 있다. Table 1은 조파기의 주요제원, Photo. 1은 serpent형 조파기의 외관을 나타낸 것이다.

Serpent형 조파장치는 다수의 폭이 좁은 피스톤 혹은 플랩형의

Table 1. The principal factor of wave-maker system

Terms	Serpent-type wave-maker
Number of paddle	10 ea.
Width of wave-maker board	7 m (0.7 m×10 ea.)
Motor	hydraulic servo motor (1.3 kW/ea)
Max. wave height	0.3 m at water depth 0.8 m
Effective max. stroke	± 30 cm (piston type)
Mobile velocity of max. wave-maker board	60 cm/sec

Photo. 1. Serpent-type wave-maker appearance.

조파기를 가로로 일렬로 나란히 한 것이고, 기본적으로는 각 조파판의 운전위상을 달리하여 파향이 조파판열에 대해서 어느 각도를 가지는 주기, 파고가 일정한 경사파를 조파하도록 설계된 것이다 (Takayama, 1982).

조파신호의 작성법

조파신호의 작성법은 목표파의 스펙트럼으로부터 성분파의 진폭을 계산하고, 각 성분에 대한 피스톤형 조파기의 조파효율을 고려하여 성분파의 신호를 선형적으로 구하는 방법을 이용하였다.

조파신호 작성법으로는 single summation과 double summation법이 있으나, 平石 (1992)에 의하면 하나의 대표주파수에 관해서 수렴치를 얻기 위해서 필요한 성분파수는 double summation법에서는 single summation법에서 필요로 하는 수의 30배가 필요하고 조파신호 작성법으로서는 single summation법이 우세하였다. 또한 single summation법에서 최소 소요 성분파수는 450파라고 제안되었다. 본 연구에서는 SS법을 이용하여 수리실험을 수행하였으며, SS법은 아래와 같다.

SS법 (single summation법)은 다른 주파수를 가지는 성분파는 각각 어느 일정한 방향으로 진행하는 것으로 한다. 따라서 각 성분파는 각각 별개의 주파수와 파향을 가진다. Serpent형 조파장치 i번째의 조파판의 변위 $\eta_i(t)$는 다음 식으로 주어진다.

$$\eta_i(t)=\sum_{n=1}^{N_s}\frac{a_n}{F_n}\sin(2\pi f_n t-ik_n b\cos\theta_n+\varepsilon_n)\sin\theta_n \tag{1}$$

여기서 첨자 n은 n번째의 성분파의 값을 나타낸다. N_s는 SS법에서의 성분파의 총수이다. t, f_n, k_n 및 θ_n은 각각 시간, n번째의 성분파의 주파수, 파수 및 파향을 나타낸다. 식 (1)중의 $\sin\theta$는 경사파의 진폭을 목표치와 일치시키기 위해 조파판의 진폭을 조정하는 계수이다.

파수 k_n($k_n=2\pi/L_n$: L_n은 n번째의 성분파의 파장)은 다음 식으로 주어지는 분산관계식을 만족하는 실수해로서 구해진다.

$$(2\pi f_n)^2=k_n g\tanh k_n h \tag{2}$$

여기서 h와 g는 정수심 및 중력가속도이다. n번째의 성분파의 진폭 a_n은 다음 식으로 계산된다.

$$a_n=\sqrt{2S(f_n)\delta f_n} \tag{3}$$

여기서 $S(f_n)$ 및 δf_n은 각각 주파수스펙트럼과 스펙트럼폭을 나타낸다. n번째의 성분파의 대표주파수 f_n은 밴드폭 θf_n에 포함되는 주파수스펙트럼의 2차모멘트와 같도록 결정하면 좋다. 주파수스펙트럼은 항만의 설계에 많이 이용되는 Bretschneider－光易형으로 하면 다음 식으로 주어진다.

$$S(f)=0.257H_{1/3}^2T_{1/3}(T_{1/3}f)^{-5}\exp[-1.03(T_{1/3}f)^{-4}] \tag{4}$$

여기서 $T_{1/3}$ 및 $H_{1/3}$은 유의파의 주기 및 파고를 나타낸다. 이 경우에는 대표주파수 f_n은 근사적으로 다음 식으로 표현된다.

$$f_n=(1.007/T_{1/3})[\ln(2N_s/(2n-1))]^{-1/4}$$
$$(n=1,2,3,\cdots N_s) \tag{5}$$

SS법에서는 n번째의 성분파의 파향 θ_n은 목표 다방향파의 방향분포특성을 나타내는 방향함수 $G(\theta;f)$의 누가곡선과 난수에 대해서 결정된다 (平石, 1992). F_n은 n번째의 성분파에 상당하는 조파효율을 나타내고 피스톤형 조파기의 경우 다음 식으로 나타낸다.

$$F_n=\frac{2\sinh^2 k_n h}{k_n h(1+\sinh^2 k_n h)} \tag{6}$$

Fig. 1은 불규칙파 신호발생으로부터 다방향불규칙파 조파수조의 유효조파영역을 평가하기 위한 흐름도를 나타낸 것이다.

다방향불규칙파를 수조내에서 조파하면 목표로 하는 파가 조파되는 범위 (유효조파영역)는 수조의 일부에 한정된다. Fig. 2의 이등변삼각형은 平石 (1992)에 의한 경사파의 파고분포의 측정결과와 수조내의 다방향불규칙파의 방향함수의 분포형으로부터 판단되는 전연장 B의 조파장치를 배치한 경우의 유효조파영역의 범위를 나타낸 것이다. 유효조파영역은 조파판을 밑변으로 하여 $B/\sqrt{2}$를 이등변삼각형의 측변으로 나타낸 내부영역을 의미한다. 단, 정상감쇠파 (Takayama, 1982)의 영향을 피하기 위해 조파판 전면으로부터 1/2 파장 정도 떨어져 모형 및 계측장치를 설치할 필요가 있다.

뿐만 아니라, 실험에 앞서 조파기의 전면에 조파기면에 평행하게 5대의 파고계를 설치하여 조파신호의 레벨을 변화시켜 파고를 측정하였다. 그래서, 목표로 하는 파고가 재현되도록 조파신호의 진폭을 조정하였다.

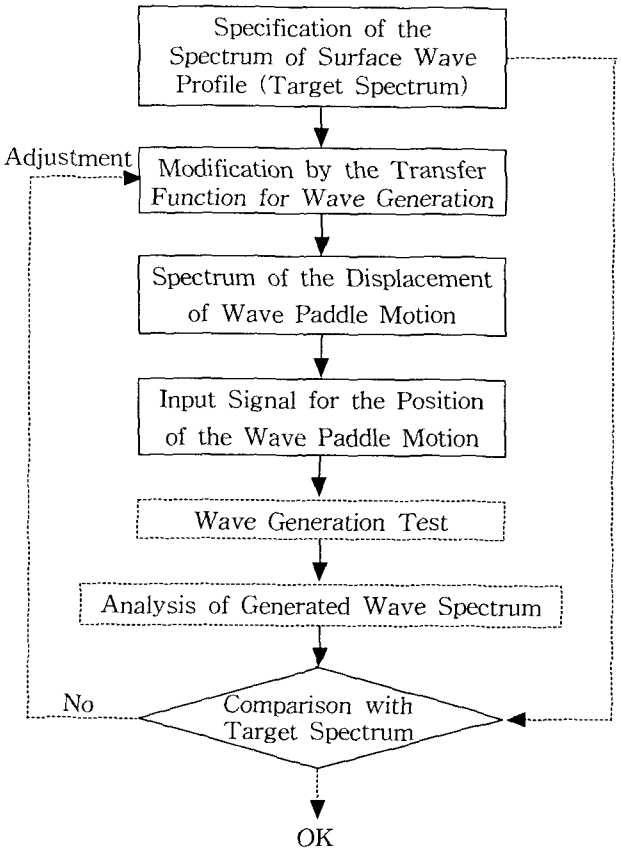


Fig. 1. Flowchart of the examination on the wave generation characteristics in multi-directional irregular wave basin.

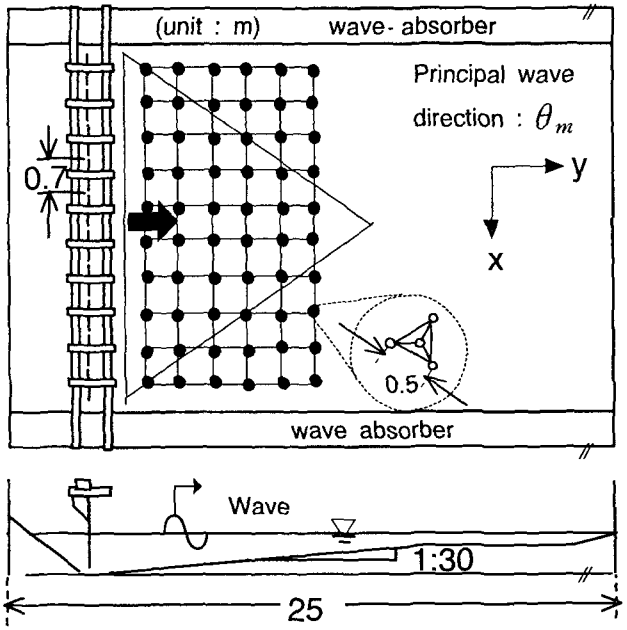


Fig. 2. General description of experimental conditions.

발생파의 계측법

다방향불규칙파 조파장치로 조파된 불규칙파를 측정하고, 그 특성을 검토하기 위해서는 주파수스펙트럼, 파고, 주기 등의 해석 외에 방향스펙트럼을 구하는 것이 불가결하게 된다. 방향스펙트럼을 구하기 위한 파고 측정법으로서는 몇 대의 파고계군 (wave gage array)에 의한 파형의 동시관측이 필요하다. 실험장에서 비교적 간단히 이용되어지는 것으로는 파고계군을 이용하는 방법과 파고계와 유속계를 이용하는 방법이 있으나, 본 연구에서는 파고계군을 이용하였다. 파고계군에 대한 파고계 최적배치법에 관해서는 Goda (1985)가 그 일반적인 지침을 제시하고 있다.

조파된 불규칙파의 파고 및 주기는 쇄파가 일어나지 않는 파형이 극히 앞서 기울어지지는 것이 없기 때문에 영점상향교차법 (zero-up cross법)으로 구하였다. 주파수 스펙트럼은 FFT법을 이용하여 구하였으며, 수조내에서 소파공의 반사율을 구할때는 파의 진행방향에 나란한 2대의 파고계의 기록으로부터 입사파와 반사파를 분리하여 입사파가 가지는 에너지에 대한 반사파의 에너지의 비의 평방근으로 구할 수 있다 (Goda, 1985).

방향스펙트럼의 해석방법

방향스펙트럼의 해석방법에 관해서는 지금까지 많은 연구자가 여러 방법으로 제안하고 있다. 그 중에서도 MLM (Capon, 1969) 등의 수법이 표준적인 수법으로 넓게 이용되고 있다. MLM (Maximum Likelihood Method)은 분해능이 높고 우세한 것이 확인되었다. 磯部 (1984)는 파고계배열 이외에도 MLM이 사용되도록 확장하고, 수면경사나 수립자속도 등의 기록이 섞여있는 경우에도 높은 정도로 방향스펙트럼이 추정되도록 하였다.

본 연구에서는 적용예가 많은 MLM을 이용하여 실험실내에서 조파된 불규칙파의 방향스펙트럼을 해석하여 입사파의 방향성효과를 검토하였다.

결과 및 고찰

상술한 조파수조에 Fig. 2와 같이 파고계를 설치하여, 발생파의 특성 및 각 측점에서 파고분포를 검토하였다. Fig. 3은 상대수심 (=kh)에 의한 파고/stroke비 (=H/S)를 나타낸 것으로 주기가 길면 파향은 크게 해도 재현성이 높은 것을 알 수 있다.

각 실험케이스에 있어서 심해측 조파장치 전면으로부터 2.5 m 떨어진 지점으로부터 0.5 m 간격으로 3측선 (y=1.5 m, 3.0 m, 4.5 m) 상의 연안방향 (x축방향)의 파고비 분포를 조사하였다. Fig. 4는 Biesel limit에 의해 양측면은 소파장치를 구성한 경우의 연안방향의 파고비분포를 조파파향 70°, 90°, 110°의 불규칙파의 대표적인 케이스에 대하여 나타낸 것이다. 여기서 파고비는 다음 식과 같이 각 계측점에서 얻어진 파고를 각 계측선의 평균파고 (10측점의 평균파고)로 나눈 값이다.

$$RH = H_i / (1/10 \times \sum_{i=1}^{10} H_i) \quad (7)$$

여기서, 첨자 i는 각 계측선상의 측점의 번호이다. 따라서 각 계

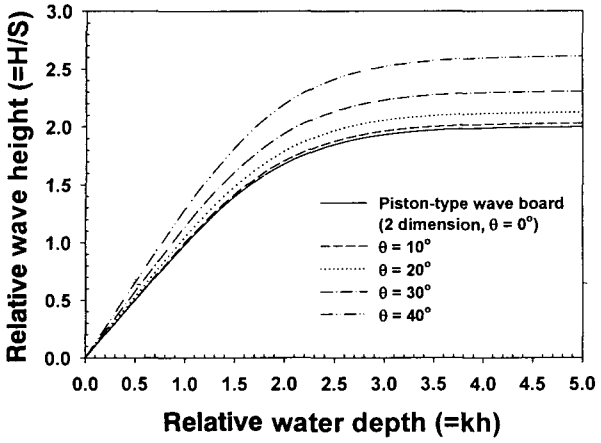


Fig. 3. Wave height to stroke ratios versus relative water depths.

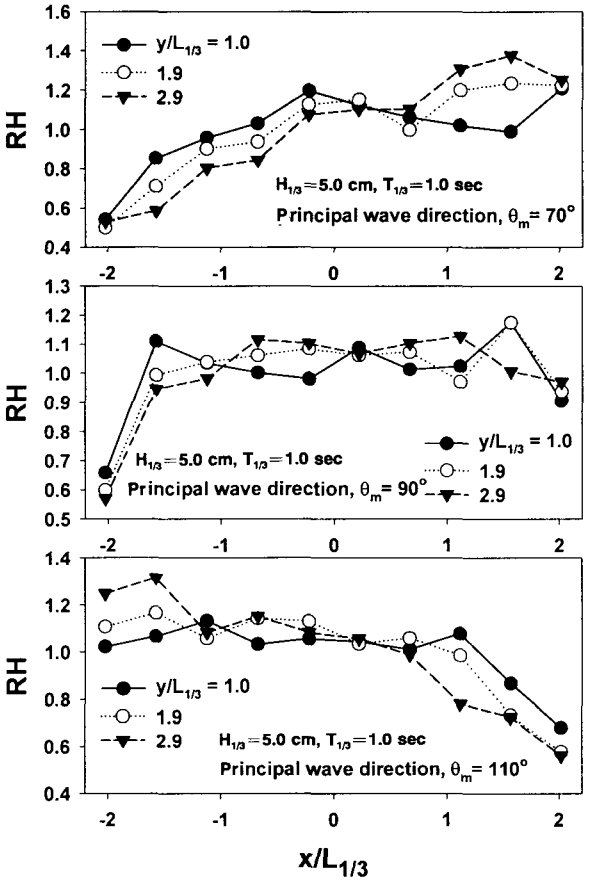


Fig. 4. Wave height ratio distribution in the wave-maker basin.

측선의 분모의 값이 다르다. 각 그림에서 나타난 바와 같이 파향에 따라 서로 다른 형태를 나타내고 있으며, 조파가능영역 및 발생 파랑의 특성으로부터 구조물을 설치할 지점을 선택할 수 있다고 판단된다.

Fig. 5는 연안방향 (x축)의 파향분포를 파고비 분포와 동일한 방법으로 입사파향을 측정한 것이다. 이 그림에서 세부분으로 나

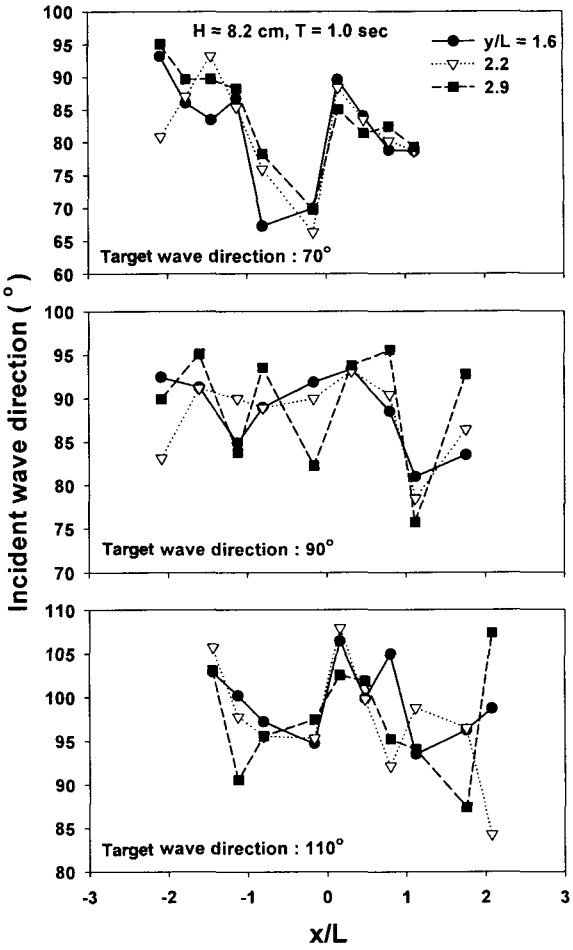


Fig. 5. Wave direction distribution in the wave-maker basin.

누어 각 목표파향별로 나타내었다. 파향은 우선 각 계측점의 시계열 수면 변동량으로부터 zero-up cross점의 시각을 구하고 인접하는 2계측점에서 동일한 파의 위상차 τ를 산정한다. 이들에 의해 개개의 파향을 다음 식으로 산정하고, 측정시간중에 계측한 파의 수로 평균한 값을 2계측점의 중간점에서의 조파파향 θ_m으로서 산정하였다.

$$\theta_m = \cos^{-1}\left(-\frac{\tau}{T}\cdot\frac{L}{D}\right) \tag{8}$$

여기서 T는 진행파의 주기, L은 T와 수심 h로부터 구해지는 파장, D는 x축방향의 계측점간의 간격이다. 즉, 그림에 나타낸 파향의 위치는 파향의 정의로부터 2계측점의 가운데점이다. 이들 그림에서 조파판 중앙영역에서는 양호한 결과가 재현되었다고 판단되어지며, 직방향 규칙파에 비해 경사파의 파향의 분산이 다소 발생하고 있으나, 이는 위상차 τ의 실험오차와 수조측벽의 교란에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 6은 본 실험중 각 case의 입력신호를 이용한 주파수스펙트럼의 일례를 나타낸 것으로 그림 중의 점선은 실험결과이며, 실선은 본 연구에서 사용된 목표스펙트럼인 Bretschneider-Mitsuyasu 형을 나타낸 것이다. 조파 파향은 직각 입사와 경사 입사하는 두

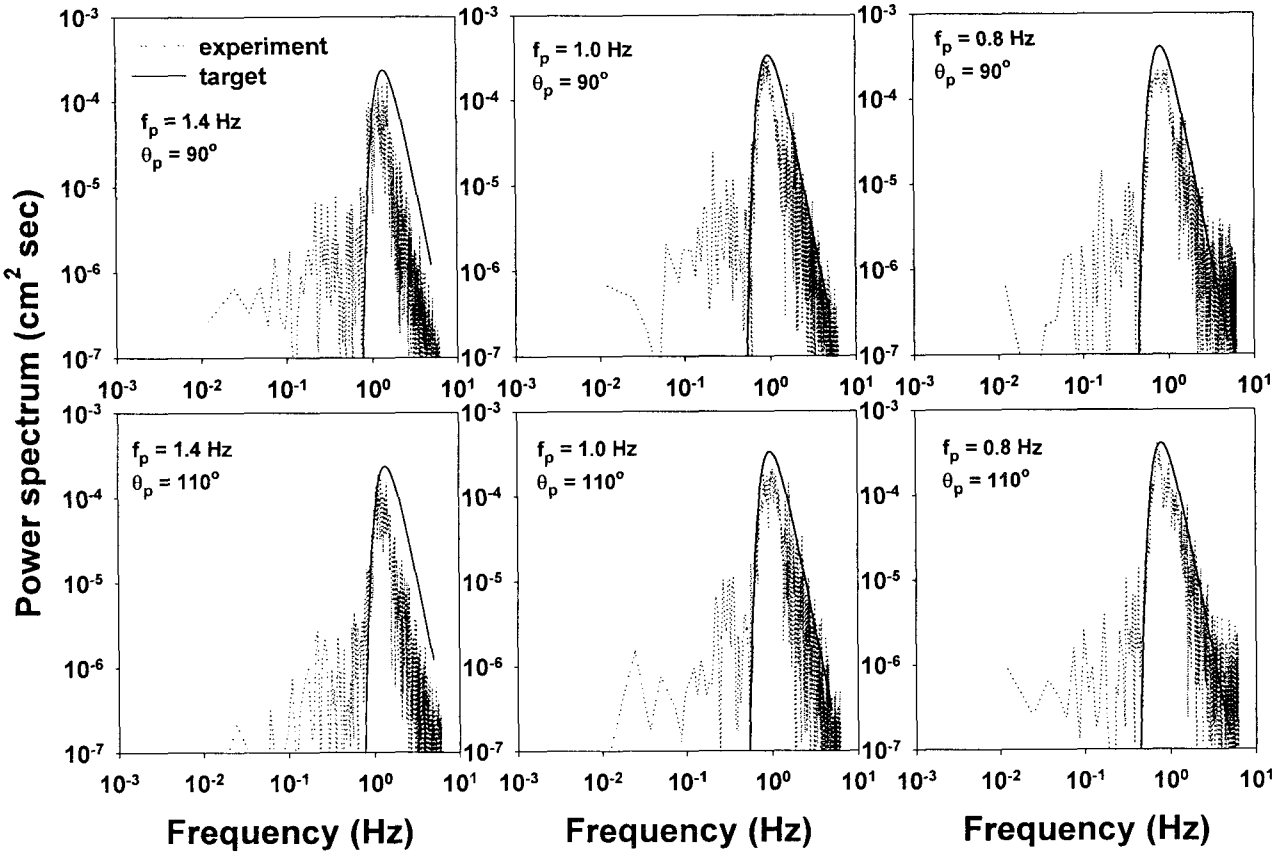


Fig. 6. An examples of spectrum analysis for simulated directional irregular waves.

가지 경우에 대하여 각각 나타낸 것이다. 상단의 그림에서는 피크주파수가 1.4 Hz에 대하여 피크치는 거의 유사하나, 고주파수측의 경사가 다소 차이가 나타났다. 그렇지만 피크주파수 1.0, 0.8 Hz에서는 피크치와 고주파수측의 경사가 매우 유사하게 나타났다.

Fig. 7은 모든 실험 case의 유의파고와 최대파고와의 통계치를 나타낸 것으로 구조물의 중요성 및 파괴의 거동특성 등 실제 설계에 적용되는 일반적인 관계식으로 볼 수 있다. 그림 중의 선은 각각 Rayleigh 분포로부터 얻어지는 이론치를 나타낸 것이며, 이 점쇄선은 실험 case에 사용된 유의파고와 최대파고와의 관계식이다. 이들 통계치를 감안할 때 모든 실험에서 이용된 파고는 통계적으로 안정함을 알 수 있다.

해양파랑의 통계적특성은 주로 협대역스펙트럼 (narrow band spectrum)을 가정하고 추정되었으나, 해양파랑의 스펙트럼은 광대역 (wide band)을 가지는 다양한 형상으로 나타나고 있다. 이러한 형상효과를 해양파랑의 통계치계산에 고려하기 위하여 주로 사용하여 온 spectrum peakedness parameter Q_p (Goda, 1985)와 평균파군길이에 따른 통계적 대표파간의 관계는 Fig. 8과 같이 나타났다. 상대수심과 파형경사의 조건에 따라 선형적인 관계를 파군의 표현에 유용함을 보여주고 있다.

또한 비선형성과 분산성을 동시에 고려한 비선형 파라메타라고 할 수 있는 U_r수 ($=HL^2/h^3$)에 따른 Q_p의 변동은 Fig. 9와 같이

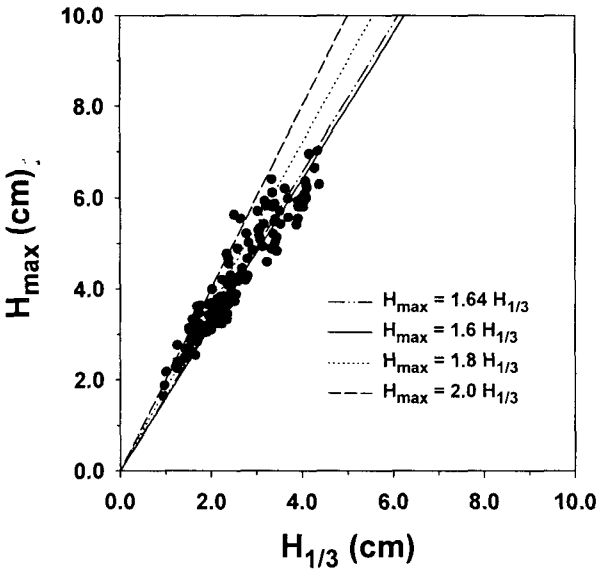


Fig. 7. Relationships of wave height parameters in the experiment field.

나타났다. 이 그림에서 U_r수가 증가할수록 Q_p가 다소 감소하는 선형적인 관계를 보여주고 있다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 실

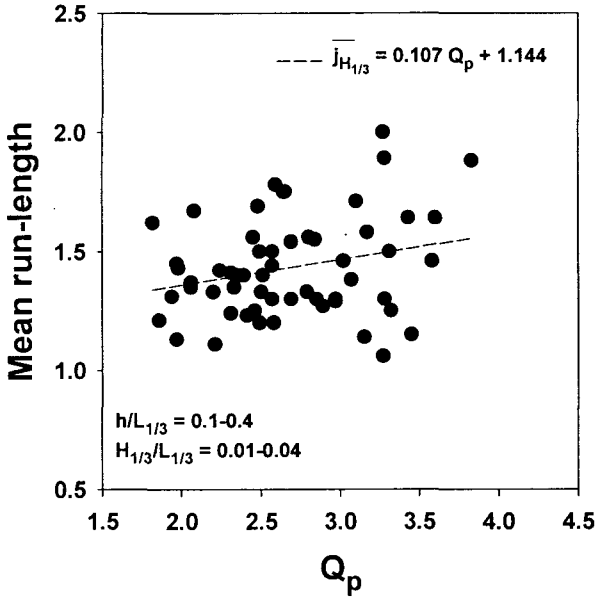


Fig. 8. Relationship between Q_p and $\overline{j_{H_{1/3}}}$ in the experiment field.

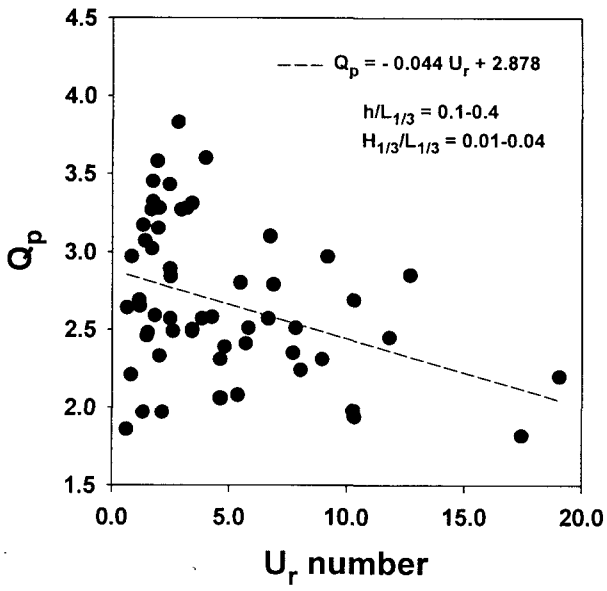


Fig. 9. Relationship between U_r number and Q_p in the experiment field.

험에서 이용된 파랑에 대해서는 선형적인 관계를 보여주고 있다고 할 수 있다.

Fig. 10은 목표치 S_{max}=75, θ_m=90° 및 피크주파수 1.0 Hz로서 다방향불규칙파를 조파하여 방향함수 분포형의 일례를 나타낸 것이다. 각 계측점 (y축으로 2.5 m, 4.0 m)의 방향함수는 유사한 분포형을 나타내고 있지만, 그 방향집중도는 대부분의 경우에 목표치보다 작게 나타났다. 단, 피크 각도는 모든 측점에서 90°를 나타내고 있으며, 방향함수형의 분산은 심하지 않다. 재현되는 방향

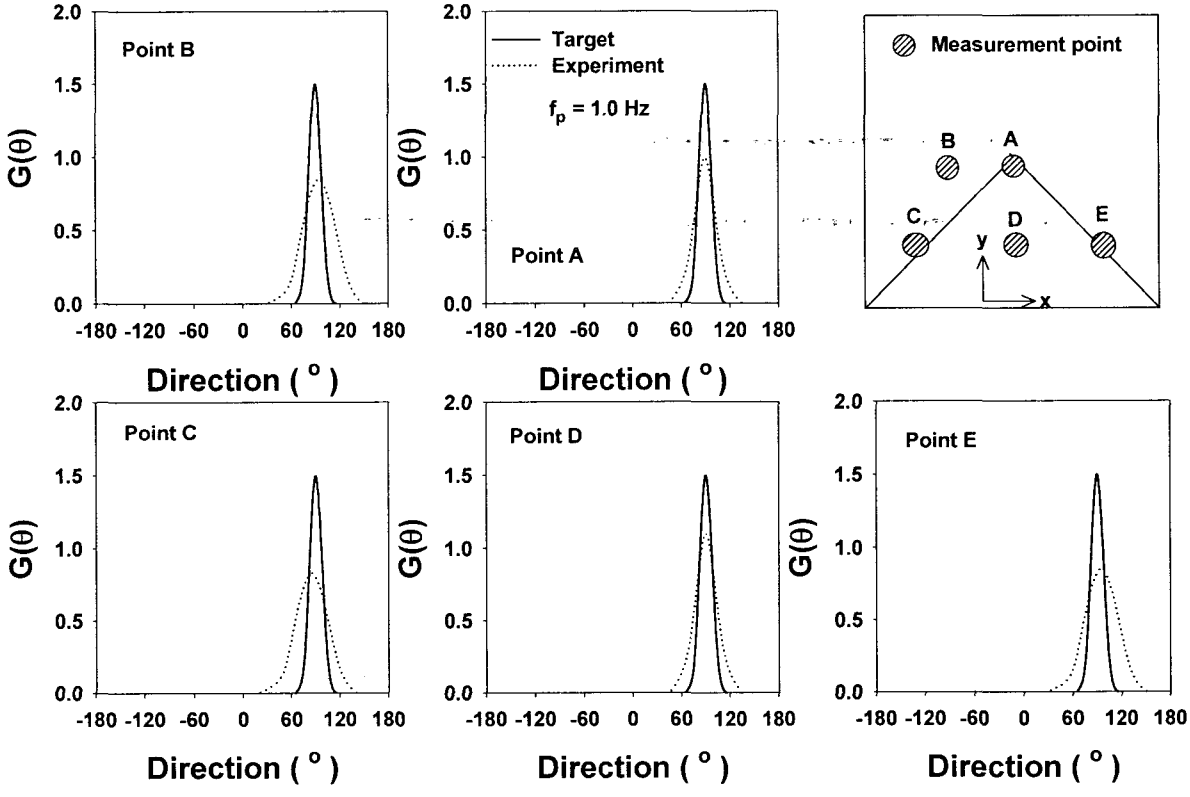


Fig. 10. Comparison of spreading function between target and experiment (θ_m=90°, S_{max}=75).

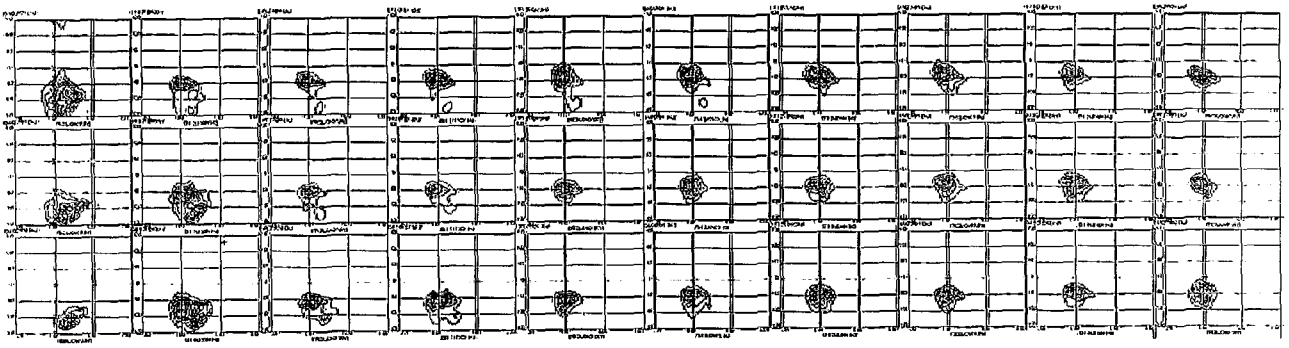
분포특성은 집중도가 낮을 뿐, 피크치에는 거의 근사하고 있다. 이러한 원인으로서는 수조내의 측벽에 소파가 완전히 되지 않고, 약간의 에너지가 반사된다는 것, 조파판의 반사파 흡수성능이 완전하지는 않고 약간의 재반사파가 형성된다는 점, 성분파인 경사파의 수립자운동이 수평면상에서 직선분포가 타원궤도를 가지는 점 (Takayama, 1982), 일정수심이 아닌 1/30의 해저경사에 의한 굴절의 영향 등으로 생각된다.

Fig. 11은 Fig. 2의 3측선 (y=1.5 m, 3.0 m, 4.5 m) 상의 연안방향 (x축방향)에서 얻어진 방향스펙트럼의 일례로서 주파향은 70°, 90°, 110°에 대한 방향성 불규칙파의 대표적인 결과이다. 이 그림에서 각 그림의 x축은 주파수, y축은 입사파향의 각도를 각각 나타낸다. 전술한 주 파향에 벗어난 관측점에서는 회절파와 측면 반사파에 의해 파랑장이 교란되는 현상이 다소 나타나고 있다. 또한, 조파판으로부터 멀어질수록 방향집중도가 감소하며, 에너지의 분포도 여러 주파수 대역으로 넓어지는 것을 알 수 있다. 이는 해저경사의 영향으로 인해 천수변형 및 굴절에 의한 파랑의 변형인 것으로 판단된다.

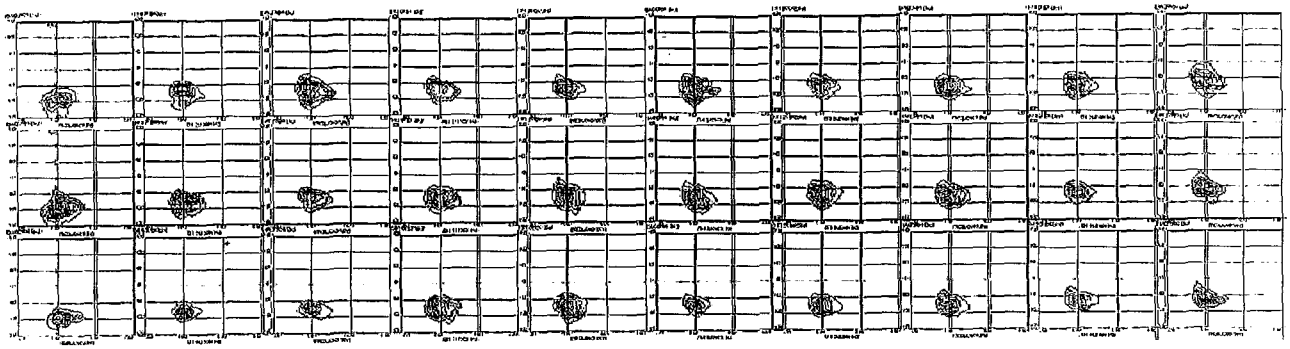
Fig. 12는 상술한 결과로서 유효조파영역이라고 판단되는 대표적인 지점 (조파판 전면 6 m 지점)에서 얻어진 방향스펙트럼의 일례로서 a)는 목표스펙트럼, b)는 실험치를 각각 나타낸 것이다. 이들 그림에서 파향과 피크주파수의 재현성이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 발생파의 통계적인 특성 및 목표스펙트럼의 재현성으로부터 유효조파영역을 판단할 수 있다.

Fig. 13은 상술한 조파수조내의 파고분포 (Fig. 4), 파향분포 (Fig. 5), 방향함수의 분포형 (Fig. 10) 및 방향스펙트럼 (Fig. 11, Fig. 12)의 결과로부터 판단되는 본 대학의 다방향불규칙파 조파

a) Principal wave direction 70°



b) Principal wave direction 90°



c) Principal wave direction 110°

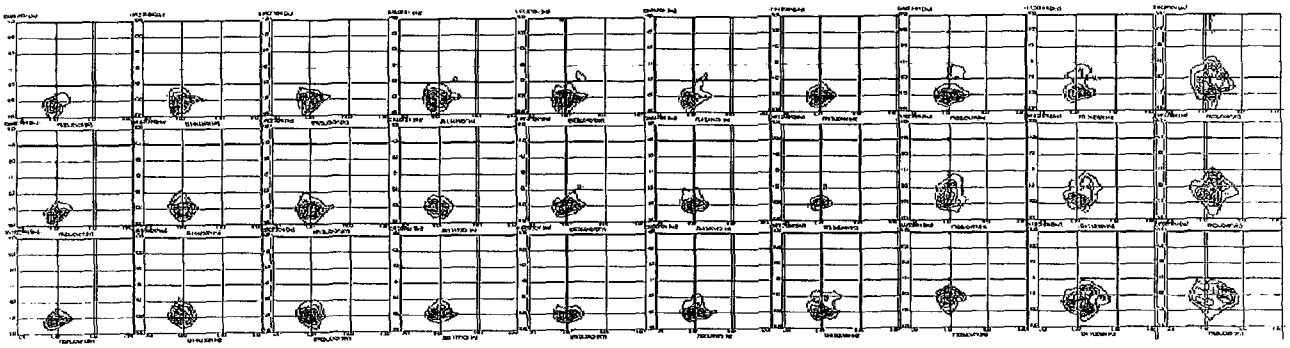
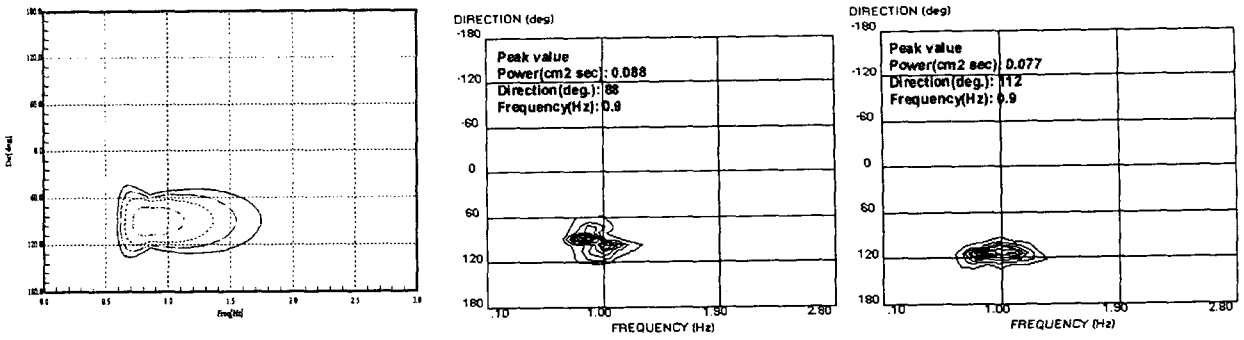


Fig. 11. The spatial distribution of directional spectrum under the directional irregular waves.



a) Target (θ_m=90°) b) Experiment (θ_m=90°, 110°)

Fig. 12. The distribution of directional spectrum under the directional waves.

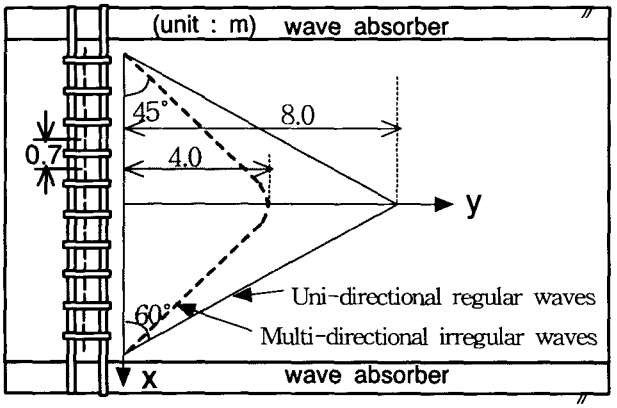


Fig. 13. Effective generation area of multi-directional irregular wave basin.

장치의 유효조파영역을 나타낸 것이다. 이 그림은 상술한 平石(1992)의 유효조파영역 (Fig. 2의 이등변삼각형)에 근거하여, 본 연구에서 얻어진 결과를 이용하여 근사적으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 이등변삼각형은 일방향규칙파, 점선은 다방향불규칙파의 유효실험영역을 나타낸 것으로 일방향규칙파의 실험영역에 비해 다방향불규칙파의 실험영역이 조파기로부터의 1/2 정도의 거리에 한정되는 것으로 나타났다.

요 약

다방향불규칙파 조파장치를 이용하여 평면수조내의 발생파의 특성과 목표스펙트럼의 재현성 및 대표파의 통계적인 안정과 선형적인 관계를 검토하여 유효조파영역 및 모형구조물의 설치대상 영역을 검정하였다. 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

다방향불규칙파에 의한 발생파의 특성과 목표스펙트럼의 재현성은 양호한 결과를 얻었으며, 이들 결과로부터 유효조파영역 및 대표적인 파랑의 재현성이 높은 영역을 설정할 수 있었다.

유효조파영역에서 얻어진 관측자료인 대표파는 통계적으로 안정하였으며, spectrum peakedness parameter Q_p와 평균 run-length, Q_p와 U_r로서 대표파의 선형적인 관계를 나타낼 수 있었다.

감사의 글

수리실험에 협조해주신 부경대학교 해양공학과 해안 · 항만공학 연구실의 대학원생 및 학부생들에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

Capon, J. 1969. High resolution frequency - wavenumber spectrum analysis. Proc. IEEE, 57, 1408~1418.

Goda, Y. 1985. Random sea and design of marine structures. University of Tokyo Press, 1~323.

Takayama, T. 1982. Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wave-makers. Rep. the Port and Harbor Research Institute, 21(2) 3~48.

平石哲也. 1991. サーペント型造波裝置の有效造波領域の擴張法に關する實驗的研究. 海岸工學論文集, 38, 126~130.

平石哲也. 1992. 多方向不規則波の發生とその應用に關する研究. 港灣技研資料, No. 723, 176pp.

磯部雅彦 · 近藤浩右 · 堀川清司. 1984. 方向スペクトルの推定におけるMLMの擴張. 第31回海岸工學講演會論文集, 173~177.

2001년 9월 8일 접수
2001년 11월 30일 수리