

## 불규칙파에 대한 성분파 계산법의 현지 적용성 검토 Applicability Study of Component Wave Analysis for Irregular Waves

곽문수<sup>1</sup>·채지덕<sup>2</sup>·편중근<sup>2</sup>·백승화<sup>3</sup>

Moon Su Kwak<sup>1</sup>·Ji Dock Chai<sup>2</sup>·Chong Kun Pyun<sup>2</sup>·and Seung Hwa Baek<sup>3</sup>

### 1. 서 론

해안 및 항만 구조물의 단면설계 및 평면 배치 계획에 있어서 가장 중요한 것은 설계파를 정확히 산정하고 항내 파랑장을 정도 높게 해석하는 것이다. 지금까지의 파랑장 해석은 주로 단일주파수와 방향에 대한 규칙파 해석으로 이루어졌으며 이것에 의한 계산결과는 수 많은 주파수와 방향, 파고들이 합성되어 이루어진 실제 해역의 불규칙 파랑장을 잘 재현한다고는 말할 수 없다.

구조물 주위에서의 불규칙 파랑 해석은 주로 구조물에 의한 회절 계산에서부터 시작되었다. Moberk and Wiegel(1966)은 반무한체에 의한 회절파에 대해서 모형실험을 실시하고 불규칙파를 다수의 성분파로 분리하여 각각에 대하여 규칙파의 회절계산을 수행한 후 에너지를 합성하는 방법으로 구한 파고가 실용적으로 충분한 정도로 실험치와 일치함을 보였다. 高山(1968)는 실측 파랑 자료의 해석으로부터 제시된 Bretschneider(1968)의 주파수스펙트럼을 이용하여 구조물에 의한 불규칙 파랑의 회절과 반사를 해석하였다. 그리고 Gaillard(1984)는 Green함수법을 항내의 불규칙 파랑장에 적용한바 있으나 입사파의 파향과 항내파의 파향사이에 1대1 대응관계를 전제로 하였기 때문에 다중반사가 발생하여 다방향으로부터 파가 전달되는 파랑장의 방향스펙트럼 추정에 문제점이 있다. 磯部등(1991)은 불규칙파의 굴절·회절·쇄파변형을 해석할 수 있는 시간의존 완전

사 불규칙 파동방정식을 제안하고 실험 결과와 계산결과를 비교하여 방정식의 유용성을 검증하였다.

임의형상 해안의 항내 파랑장해석 방법에 대해서는 여러 가지의 수치계산법 제안되었다. 그 중 주로 사용되고 있는 규칙파 해석 방법을 살펴 보면 Sommerfeld의 회절해를 이용한 高山의 방법(高山, 1981), Helmboltz방정식에 대하여 Green함수를 도입하여 푸는 방법(Barailler and Gaillard, 1967; Lee, 1971), 수치파동해석법(伊藤등, 1971), 시간의존완경사 방정식에 의한 방법(西村, 1983; 渡辺, 1984), 완경사방정식에 의한 방법(Berkhoff, 1972)등이 있다. 이들 방법들은 각각 제한된 조건 하에서 효과적으로 사용되어 왔다.

한편 국내에서는 최근 에너지 평형방정식에 의한 불규칙 파랑장해석을 실시하고 있으나 구조물 배후에서의 회절파 해석에 문제가 있어 항내 파랑장에는 적용할 수 없다. 항내의 불규칙 파랑장 해석은 입사파의 유의파 주기와 파고를 가지고 다수의 성분파로 분리하여 각각 규칙파에 대하여 계산한 후 에너지 합성하여 근사적으로 해석하는 방법들이 시도되고 있다. 이와 같은 해석방법은 편리성 때문에 실무에 사용되고 있지만 아직까지 수리모형실험이나 현지관측에 의해서 현지에 대한 적용성 검토가 이루어져 있지 않은 상태이다.

본 논문에서는 항내파랑장 해석에 널리 사용되고 있는 시간의존완경사방정식을 현지 항만에 적용하여 성분파 계산법으로 항내의 불규칙 파랑장을 해

<sup>1</sup>명지전문대학 토목과 (Department of Civil Engineering, Myongji College, Seoul 120-728, Korea)

<sup>2</sup>명지대학교 SOC 공학부 (School of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yong-in 449-728, Korea)

<sup>3</sup>시립인천전문대학 토목과 (Department of Civil Engineering, Incheon College, Incheon 402-750, Korea)

석하고 그 결과와 수리모형실험 결과를 비교하여 이 방법에 대한 현지 적용성을 검토해 보았다.

## 2. 불규칙파랑장 계산 방법

### 2.1 시간의존 환경사방정식의 개요

평면 2차원 파랑장 계산 방법은 기존에 여러종류가 제안되어 있으며 환경사 방정식에 의한 방법이 폭넓게 사용되고 있다. 이 방정식은 다원형 미분 방정식이므로 경계치 문제를 풀어야 하는 어려움이 있으며, 이 때문에 수치계산이 편리하도록 연립1차 미분방정식의 형태로 변형한 것이 시간의존 환경사 방정식이다. 본 논문에서는 西村(1983)가 유도한 방정식에 丸山등(1985)이 쇄파감쇠항을 추가한 다음 식을 사용하였다.

$$\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} + C^2 \nabla \eta + f_D \vec{Q} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (n \vec{Q}) = 0 \quad (2)$$

여기서  $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 이고,  $\eta$ 는 수면변위,  $C$ 는 파속,  $t$ 는 시간,  $\vec{Q} = (Q_x, Q_y)$ 는 선유량 벡터로 유속을 해저로부터 정수면 까지 적분한 값이다. 또한  $n$ 은  $C_g/C$ 이고,  $f_D$ 는 쇄파감쇠계수이다.

수치계산은 위의 기본 방정식을 사용하고, 엇물림격자(staggered grid system)를 채용하여 각 계산점에서 수위와 유량값을 구한다. 계산영역내의 경계조건은 외해측 입사경계조건, 구조물에 대한 임의 반사율 경계조건을 설정하였으며 계산영역 주변의 개방경계에 대해서는 3격자 정도의 가상영역을 접속시켜 경계조건의 취급을 용이 하게 하였다. 임의 반사율경계에 필요한 구조물에 대한 파랑의 입사각은 선유량 타원과 수면변위의 관계로부터 결정 하였다. 계산영역의 초기조건은 수위와 유량이 0인 정수면 상태를 가정하였고 심해로부터 천해역으로 파랑을 전파시켜 정상상태의 해를 계산 결과로 하였다.

### 2.2 성분파 계산법

실제 해역의 불규칙 파랑장은 무수히 많은 주파수와 파향을 가진 성분파가 중첩되어 있다고 볼 수 있으며, 이러한 성분파의 중첩을 표시하기 위하여 방향스펙트럼의 개념이 사용된다. 이것은 파

의 에너지가 주파수 만이 아니고 방향에 대해서 어떻게 분포하고 있는 가를 표시하는 것으로 다음과 같이 표시된다.

$$S(f, \theta) = S(f) G(f, \theta) \quad (3)$$

여기서  $S(f, \theta)$ 는 방향스펙트럼 밀도함수로서 단순히 방향스펙트럼이라 부르고,  $G(f, \theta)$ 는 방향분포함수라고 부른다. 방향별 에너지의 분포상태를 나타내는 함수  $G(f, \theta)$ 는 주파수 마다 다른 것이 보통이므로 주파수 변수  $f$ 를 포함한다. 주파수스펙트럼  $S(f, \theta)$ 는 파 에너지 밀도의 절대치를 의미하며,  $G(f, \theta)$ 는 방향별 상대적 크기를 나타낸다. 파의 주파수스펙트럼  $S(f)$ 는 관심대상 해역의 현지관측 및 분석을 통하여 주파수스펙트럼 밀도함수로 표시하며 주파수별 에너지 분포를 나타내고 있다. 이 주파수스펙트럼에 대해서는 여러 가지의 표준형이 제안되어 있는데 본 논문에서는 Bretschneider(1968)가 제안한 식을 Mitsuyasu (1970)가 계수를 수정하여 제안한 다음 식을 사용하였다.

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

여기서,  $H_{1/3}$ 은 유의파고,  $T_{1/3}$ 은 유의파주기,  $f$ 는 주파수이다.

주파수의 분할방법은 주파수스펙트럼상에서 각 성분파의 파에너지가 동일하도록 등면적 분할하고 각 등분할 면적을 2등분 하도록 하는 방법을 사용하였다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_i = \frac{1.007}{T_{1/3}} [\ln\{2M/(2i-1)\}]^{-1/4} \quad (5)$$

여기서,  $f_i$ 는 성분파의 주파수,  $M$ 은 주파수 분할 총수,  $i$ 는 주파수분할 순번이다. 파고와 Rayleigh분포에 따른다면 대표파고와 파형의 자승평균 평방근  $\eta_{rms}$  사이에는 다음과 같은 일정한 통계적 관계가 성립한다.

$$H_s = 4.0 \eta_{rms} = 4.0 \sqrt{m_0} = 4.0 \sqrt{E} \quad (6)$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(f, \theta) d\theta df$$

각 성분파의 입사파고  $H_{ij}$ 는 식 (6)의 관계에서

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \sqrt{8S(f)D(\theta) df d\theta} \\ &= \sqrt{\frac{H_s^2}{2} \cdot D(\theta) d\theta} \end{aligned} \quad (7)$$

임을 알 수 있다. 여기서  $j$ 는 방향분할 순번이다. 그러므로 주파수 및 방향별 에너지 비율을 고려하면 입사파고는

$$H_{ij} = \sqrt{\frac{H_s^2}{2} \times (\Delta E)_{ij}} \quad (8)$$

로 주어진다. 여기서  $\Delta E$ 는 각 성분파의 에너지 비로서 파 에너지의 방향분포가 주파수에 따라 다르지 않다고 가정하여 다음과 같이 표시한다.

$$(\Delta E)_{ij} = \frac{1}{M} D_j \quad (9)$$

여기서,  $D_j$ 는 방향별 에너지 비율이다.

### 3. 현지 항만에의 적용

#### 3.1 수치계산 개요

수치계산은 불규칙조파 조건하에 실시된 수리모형실험 결과가 있는 울산항(Fig.1)을 대상지역으로 하였으며 입력조건으로서 규칙파, 단일방향 불규칙파, 다방향 불규칙파의 3경우에 대해서 실시하였다. 규칙파의 유의파주기는 8.0초이고, 유의파고는 4.8m이다. 주파향은 E 방향이고, 계산격자간격  $\Delta s$  는 10.0m, 계산시간 간격  $\Delta t$ 는 CFL 조건을 만족하도록 0.2초로 하였다. 구조물의 반사율은 벽면의 경우 0.8, 소파블럭은 0.4, 자연해안 은 0.2로 하였다. 불규칙파의 주파수 스펙트럼은 Fig.2로 나타난 Bretschneider-Mitsuyasu형 스펙트럼을 사용 하였으며 주파수 분할은 5개, 방향분할은 3개로 하였다.

#### 3.2 결과의 비교

##### (1) 수치계산의 결과

수치계산은 파랑이 항내로 전파하여 반사파가 입사구역으로 되돌아 올 때 까지 충분한 계산 시간을 설정하였다. 계산결과는 각 계산점의 파고를 입사파고로 나누어 파고비의 형태로 표시하였다. Fig. 3은 규칙파의 계산결과 이며, Fig. 4는 주파수 분할만 실시한 단일방향 불규칙파의 계산결과, Fig. 5는 주파수와 방향분할을 실시한 다방향 불규칙파에 대한 계산결과이다. 이들 계산 결과를 비교해 보면 규칙파와 단일방향 불규칙파의 결과는 입사파향이 동일한 관계로 파고분포의 형태는 거의 비슷하다. 다만 단일방향 불규칙파의 결과는 항 입구부에서 주파수 분산의 영향으로 규칙파의 결과보다 미세하지만 평활화된 형태를 보여주고 있다. 다방향 불규칙파의 계산결과는 앞의 두 경우에 비하여 방향 분할에 의한 파고분포의 평활화가 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

##### (2) 수리모형실험과의 비교

수리모형실험 결과는 농업기반공사 수리시험장에서 실시된 것을 참고하였으며(해양수산부 1997), 불규칙파는 JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 단일방향에 대하여 재현되었다. Fig. 6은 수치계산결과와의 비교를 위하여 항내의 관심대상 위치를 A~G로 표시한 것이다. 계산결과는 가능한 수리실험 결과의 위치와 일치하도록 하여 9개의 계산점의 결과를 평균하였으며 구조물 근방에서는 벽면으로부터 50m정도 떨어진 위치에서 구하였다. Fig. 7은 수리실험 조건과 일치하는 단일방향 불규칙파의 주파수 분할에 대한 계산결과를 비교한 것이다. 항내측 벽면 전면 수역인 D지점에서는 계산결과값이 실험치보다 약 56%정도 크게 나타나고 있기는 하지만 그 외의 전 지역에서 좋은 근사치를 보여주고 있다. 이 계산조건인 경우 입사파는 항 입구부에 곧바로 진입되어 중앙방파호안과 항 입구부 안벽 구조물에 대부분의 진입파가 반사되고 이러한 반사파는 방파제의 회절파와 중첩되어 항내의 우측 안벽인 D지점 부근으로 전파되는 양상을 보이고 있으나 수리실험 결과는 D지점의 파고가 B, C 지점의 파고와 거의 동일하게 나타나고 있다. Fig. 8은 수리실험의 결과와 수치계산의 규칙파, 단일방향 불규칙파, 다방향 불규칙파 계산결과를 비교하여 나타내었다. 규칙파의 경우는 차폐영역에 해당하는 A, F, G에서는 실험치와 거의 일치하고 있으나, 회절파와 반사파가 진입하는 C, D구역에서는 단일 방향 불규칙파 계산결과와 마찬가지로 실험치보다 높게 나타나고

있다. 다방향 불규칙파 계산결과는 차폐영역에 해당하는  $A, F, G$ 에서는 실험치와 비슷하지만 다방향 입사파의 영향으로 항 중앙부근인  $E$ 에서는 파고가 실험치보다 낮아지고,  $ESE$ 방향에서 입사된 파의 영향으로  $C, D$ 에서는 실험치 보다 매우 커지는 파고 결과를 나타내고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Bretschneider(1968)의 주파수 스펙트럼을 이용하여 성분파 분할 계산법을 현지 항만에 적용하고 수리모형실험 결과와 비교하여 그 적용성을 검증하였다. 규칙파의 계산결과와 단일방향 불규칙파의 계산결과는 큰 차이를 보이지 않았지만, 단일방향 불규칙파의 계산결과는 성분파 분할에 의한 주파수의 분산효과가 나타났고 실험결과와 잘 일치 하였다. 다방향 성분파 분할의 계산결과는 입사파의 전파방향에 따라 항결과이어서 다방향에 대한 수치계산결과와는 비교할 수 없어 계산 결과만으로 판단한 것이다. 이상과 같은 결과로부터 주파수스펙트럼을 이용하여 다수의 성분파를 분할하고 각각 규칙파 계산한 후 에너지 합성하는 방법은 실용적으로 충분한 현지 적용성이 있는 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- 伊藤喜行·谷本勝利, 1971. 數値波動解析法とその應用. 海岸工學論文集, 第18卷, 87-91.
- 高山知司, 1981. 波の回折と港内波高分布に關する研究. 港灣技研資料 No.367.
- 西村仁嗣·丸山康樹·平口博丸, 1983. 直接數値積分による波の場の解析. 海岸工學講演會論文集, 第30卷, 123-127.
- 渡辺 晃·丸山康樹, 1984. 屈折·回折·碎波減衰を含む波浪場の數値解析法. 海岸工學講演會論文集, 第31卷, 103-107.
- 丸山康樹·鹿島遼一, 1985. 碎波減衰を考慮した碎波帶内外の波浪場計算法の提案とその應用. 電力中央研究所研究報告, No. 384041
- 小竹泰夫·磯部雅彦·渡辺 晃, 1991. 非定常緩勾配不規則波動方程式について. 海岸工學講演會論文集, 第38卷, 46-50.
- 울산신항만 방파제 기본설계보고서, 1997. 해양수산부.
- Barailler, L. and Gaillard, D., 1967.

- Evalution recente des modeles mathematiques d'agitation due a la houle; Calcul de la diffraction en profondeur non uni-form. La Houille Branche, No. 8, 861-869.
- Berkoff, J. C. W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 471-490.
- Bretschneider, C.L., 1968. Significant waves and wave spectrum, Ocean Industry, 40-46.
- Gaillard, P, 1984. Combined refraction-diffraction calculations with directional wave spectra. Proc. 19th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 1040-1056.
- Lee, J. J., 1971. Wave-induced oscillations in harbour of arbitrary geometry. J. Fluid Mechanics, Vol. 45, Part 2, 375-394.
- Mitsuyasu, H., 1970. On the growth of spectrum of wind-generated waves(2)-spectral shape of wind waves at finite fetch-. Proc. 17th Japanese Conf. Coast. Engrg., JSCE, 1-7.
- Mobarek, I. E. and Wiegand, R. I., 1966. Diffraction of wind generated water waves. Proc. 10th Coast. Engrg. Conf., ASCE, 185-206

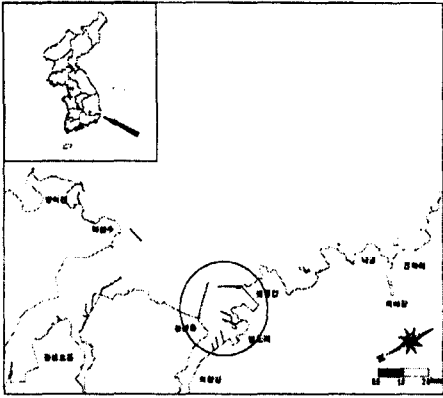


Fig. 1. Location of ULSAN harbor.

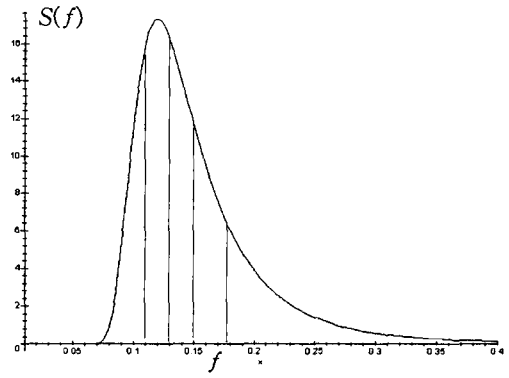


Fig. 2. Frequency spectrum (Bretschneider, 1968).

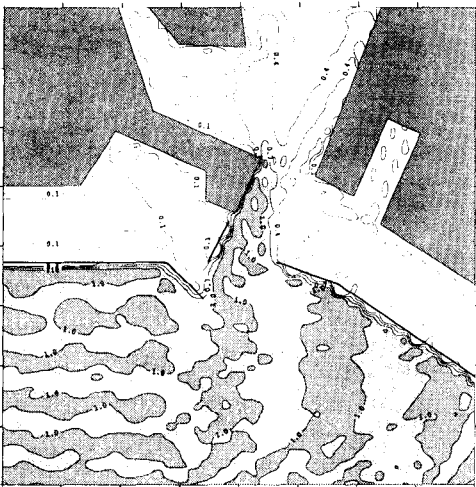


Fig. 3. Distribution of relative wave height (uniform waves).

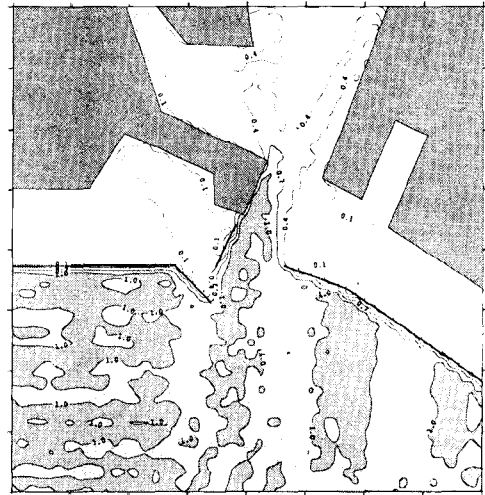


Fig. 4. Distribution of relative wave height (irregular waves with uniform direction).

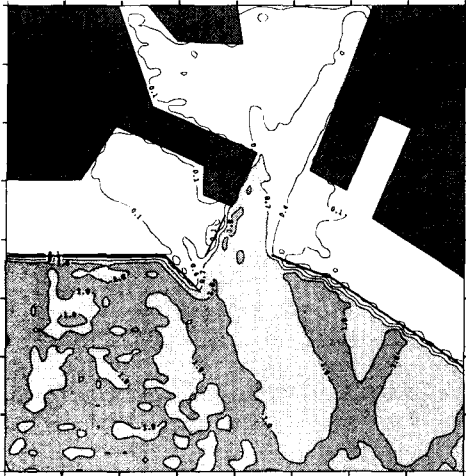


Fig. 5. Distribution of relative wave height (irregular waves with multi direction).

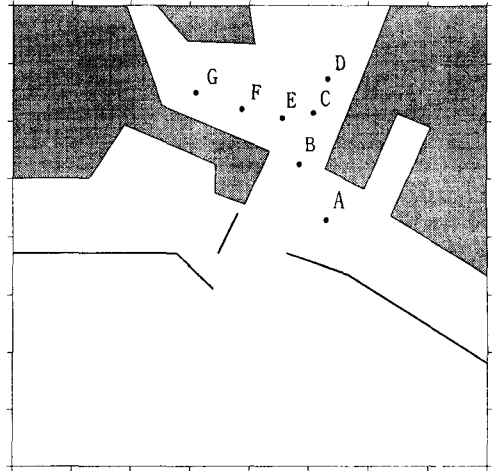


Fig. 6. Region for comparison of experiment with numerical analysis.

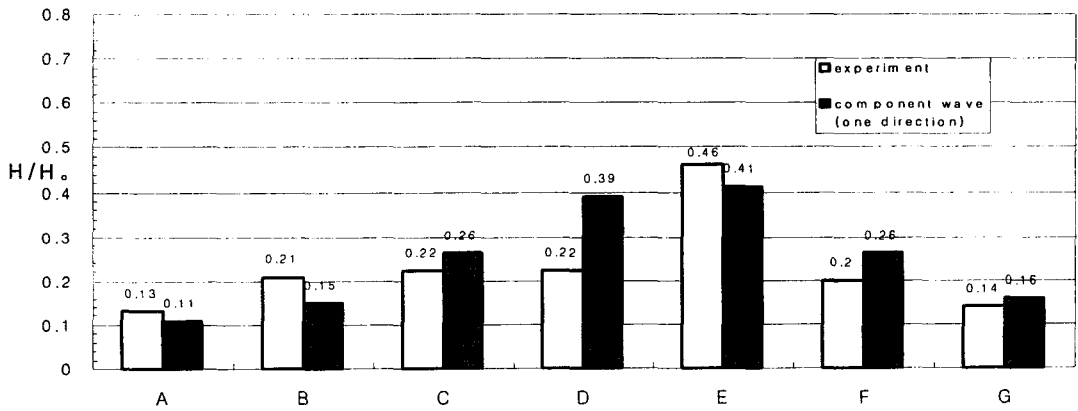


Fig. 7. Comparison of relative wave height.

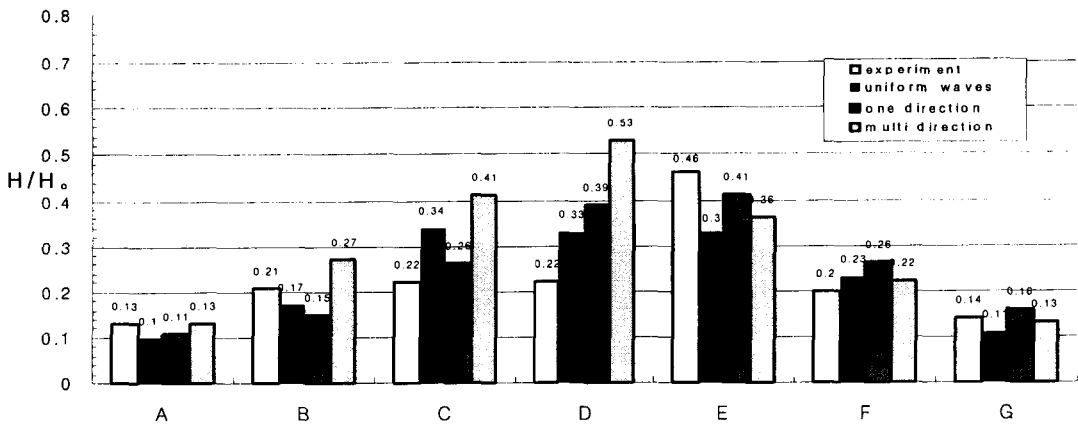


Fig. 8. Comparison of relative wave height.