

<기술노트>

무반사 조파시스템을 적용한 3차원 수치파동수조에서 다방향불규칙파의 조파방법

On Generation Methods of Multi-directional Random Waves in 3-D Numerical
Wave Basin with Non-Reflected Wave Generation System

허동수* · 이우동** · 전호성*** · 염경선****

Hur, Dong-Soo · Lee, Woo-Dong · Jeon, Ho-Sung · Yeom, Gyeong-Seon

Abstract

In this study, generation methods of 3-D multi-directional random wave are examined using the fully non-linear numerical model with non-reflected wave generation system (LES-WASS-3D). Directional distribution functions obtained by EMLM method are compared for multidirectional random waves generated by various generation methods. As a results, it is revealed that multi-directional wave field can be simulated using LES-WASS-3D.

Keywords : LES-WASS-3D, multi-directional random wave, EMLM method, directional distribution function, non-reflected wave generation system

요 지

본 연구에서는 무반사 조파시스템을 적용한 3차원 수치파동수조에서 다양한 다방향불규칙파의 조파 방법에 의한 다방향불규칙파의 방향분포함수에 대해서 검토하였다. 그 결과 무반사 조파가 가능한 3차원 수치파동수조(LES-WASS-3D)에서 다방향불규칙파의 조파가 가능한 것을 확인하였다.

핵심용어 : 3차원 수치해석기법, 다방향불규칙파, EMLM법, 방향분포함수, 무반사 조파시스템

1. 서 론

실제 바다의 파는 파봉선이 짧은 단파봉파(short-crested waves)이며 여러 방향에서 진행해 온 파가 중첩되어 생기는 다방향불규칙파이다. 이러한 파가 천해역으로 전파해 오면 저면경사의 영향으로 파향이 정선에 직각(파봉선이 정선에 평행)인 방향으로 굴절되어 일방향불규칙파의 성질을 가지게 된다. 따라서 수심이 얇은 천해역에 설치되는 해안·항만구조물(방파제, 호안 등) 주변의 수리특성을 파악하기 위해서는 일방향불규칙파의 검토만으로도 고정도의 해석이 가능하나, 대수심역에 건설되는 해양구조물의 경우에는 다방향불규칙파에 대한 검토가 필요하다.

국내외적으로 다방향불규칙조파기를 이용한 몇몇의 수리모형실험(Huang *et al.*, 2003; Hur, 2004; 손병규와 류청로, 2001)이 진행되어 오고 있으나, 다방향불규칙파의 조파는 조파기의 총길이가 제한되어 있으므로 경사파가 조파되는 범위가 한정됨에 따라 목표로 하는 방향성을 가진 불규칙파가

존재하는 영역이 수조 내에서 일부영역에 한정(Takayama, 1982; 平石, 1992)되기 때문에 그다지 많은 연구 자료가 축적되어 있지 않은 실정이다.

한편 수치모델을 이용하여 다방향불규칙파에 대한 다양한 연구들이 수행되고 있으나, 거의 대부분이 연직 적분한 평면 2차원 모델을 이용하고 있음에 따라 구조물 주변의 수면변위, 평균유속 등만을 대상으로 하고 있어 구조물 주변의 세굴과 침식, 표사 및 구조물에 작용하는 3차원 파력 등을 검토하기에는 무리가 있다. 이에 대처하기 위해서는 3차원 수치모델의 도입이 불가피하며, 이러한 3차원 수치해석기법을 이용하여 다방향불규칙파와 구조물간의 상호간섭 특성을 규명하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 이에 대한 선행연구로서 무반사 조파가 가능한 3차원 수치파동수조를 이용하여 다방향불규칙파를 조파하는 방법에 대해 검토한 후, 방향분포(다방향성)특성에 미치는 조파기법의 영향을 고찰하는 것을 목적으로 한다.

*정회원 · 국립경성대학교 해양토목공학과(해양산업연구소) 부교수 (E-mail : dshur@gsnu.ac.kr)

**교신저자 · (일)나고야대학 사회기반공학전공 박사과정 (E-mail : lwd@civil.nagoya-u.ac.jp)

***국립경성대학교 해양토목공학과 박사과정 (E-mail : blackhorse18@naver.com)

****정회원 · 일본항공기술연구소 아시아·태평양연안방재연구센터 연구관 (E-mail : yon-n@pari.go.jp)

2. 수치해석기법

2.1 파동장의 해석기법(LES-WASS-3D)

본 연구에서 이용하는 수치모델 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)는 조파소스(조파원천)항이 포함된 연속방정식과 투수성구조물 내의 유체저항을 도입한 수정된 Navier-Stokes 운동방정식 및 자유표면 모의를 위한 VOF함수의 이류방정식으로 구성된 3차원 수치해석수법이다. 이 모델은 파·구조물·해빈의 상호작용의 영향을 직접 해석할 수 있을 뿐만 아니라, 난류모델로서 LES기법을 도입하고 격자크기보다 작은 난류를 고려할 수 있도록 SGS모델(Smagorinsky, 1963)을 적용하였으며, 투수성구조물 내의 유체저항으로서 관성저항, 난류저항 및 층류저항을 고려할 수 있도록 개발된 강비선형의 3차원 수치해석기법이다. 나머지 수치해석기법에 대한 세부적인 내용에 대해서는 허동수와 이우동(2007)을 참조하기 바란다.

2.2 다방향불규칙파의 조파방법

본 연구에서 불규칙파의 조파는 Brorsen and Larsen (1987)이 제안한 조파소스강도식 (1)을 적용한다(Hur, 2004). 여기서 t 는 조파를 시작한 시각으로부터의 경과시간, $T_{1/3}$ 은 입사파의 유의주기, h 와 η_s 는 수심과 수면변위, U 와 η_i 는 각 성분파에 대한 수평유속성분과 수면변위로서 미소진폭파 이론에 의한 값을 사용하였고, 갑작스러운 조파로 계산이 불안정해지는 것을 방지하기 위해 $t/T_{1/3}=3$ 이 될 때까지는 서서히 조파소스의 강도를 증가하였다.

$$q = \begin{cases} \left(1 - \exp\left(-\frac{2t}{T_{1/3}}\right)\right) 2 \sum_{i=1}^N U_i \left(\sum_{i=1}^N \eta_i + h\right) / (\eta_s + h) & : t/T_{1/3} \leq 3 \\ 2 \sum_{i=1}^N U_i \left(\sum_{i=1}^N \eta_i + h\right) / (\eta_s + h) & : t/T_{1/3} > 3 \end{cases} \quad (1)$$

불규칙파를 재현하기 위한 스펙트럼은 식 (2)의 Bretschneider-Mitsuyasu(Mitsuyasu, 1970)의 스펙트럼을 적용하였다. 여기서, $S(f)$ 는 파랑에너지 밀도, f 는 주파수, $H_{1/3}$ 은 유의파고를 나타낸다. 주파수 f 의 선택방법에는 주파수 스펙트럼을 등구간으로 분할하는 방법과 각각의 성분파의 진폭이 거의 같도록 하는 등에너지로 분할하는 방법 등이 이용된다. 본 연구에서는 Bretschneider-Mitsuyasu의 스펙트럼에 대해 등에너지로 스펙트럼을 분할할 수 있는 Goda(1977)의 식 (3)을 이용하여 주파수를 선택하였다. 여기서 N 은 성분파의 수, 위상각은 $[0, 2\pi]$ 의 범위의 일양난수(Uniform random numbers)를 이용하였다.

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

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

이때 일양난수의 적용에 따라 생성되는 불규칙파의 시계열이 변화하므로 100개의 성분파($N=100$)를 이용하여 3가지 Mode의 일양난수에 의한 불규칙파의 파형을 생성하였다. Fig. 1은 3가지 Mode의 일양난수에 의해 조파된 불규칙파의 수면형을 Fig. 2의 수치파동수조에서 조파하여 측정된 수면형의 시간분포를 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯

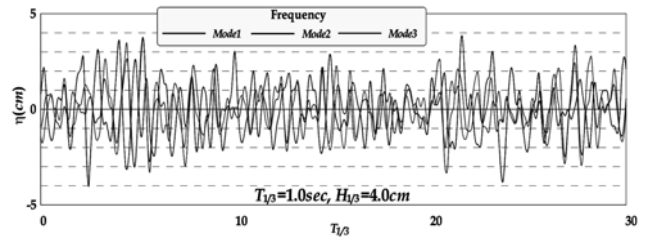


Fig. 1 Time history of irregular waves generated by variable uniform random numbers

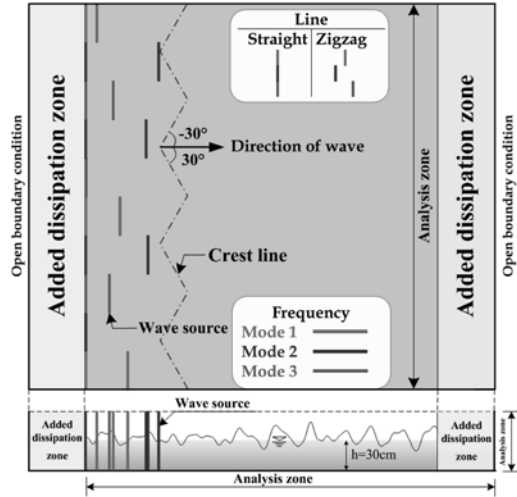


Fig. 2 Definition sketch of 3-D numerical wave basin

이 동일한 주기와 파고를 가지는 성분파들에 의해 생성된 불규칙파일지라도 일양난수의 차이로 인해 생성된 불규칙파의 조합이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

한편 본 연구의 주요 검토 대상이 되는 무반사 조파시스템을 이용한 다방향불규칙파의 조파방법으로서 Fig. 2에 나타내고 있는 것과 같이 인접하는 조파소스를 엇갈리게 위치시키는 지그재그 조파와 구간별 불규칙파 시계열의 변화 (Mode1-3) 및 Table 1의 θ 에 의한 격자간의 위상차를 적용하여 식 (1)의 U 와 η_i 를 산정하여 경사입사를 조합하는 등 다양한 방법으로 다방향불규칙파의 조파를 검토하였다.

2.3 방향스펙트럼의 추정법

다방향불규칙파를 조파하여 그 특성을 검토하기 위해서는 방향스펙트럼을 추정해야 하며, 방향스펙트럼 해석법으

Table 1. Test conditions used in this study

CASE	Wave source		
	Line	Frequency (Mode)	Oblique angle (θ)
1	Straight	1	0°
2			15°
3			30°
4	Zigzag	1	0°
5	Straight	1, 2, 3	0°
6			30, -30°
7	Zigzag	1, 2, 3	0°
8			30, -30°
9	Straight	1, 2, 3	30, -30°
10	Zigzag		

로서 여러 대의 파고계군(wave gauge array)을 이용해 동시 측정된 파형을 이용하는 MLM법과 파고계와 2방향유속계를 병용하여 동시 측정된 수위와 유속을 이용하는 EMLM법(Isobe *et al.*, 1984)이 주로 이용되고 있으나, 본 연구에서는 후자인 EMLM법을 이용하여 방향스펙트럼을 추정하였다.

3. 다방향불규칙파의 특성

3.1 수치수조의 개요 및 입사조건

본 연구에서는 장시간 불규칙파 조파에 문제가 되는 파의 재반사를 방지하기 위해 Fig. 2와 같이 조파소스 및 부가감쇠영역을 고려한 계산영역 400 cm × 400 cm 수심 30 cm의 3차원 수치파동수조를 이용하였으며, 계산영역은 2 cm × 2 cm × 1 cm의 크기로 구성하였다. 입사조건으로는 $H_{1/3}=4$ cm, $T_{1/3}=1.0$ sec의 불규칙파를 Table 1에 나타낸 것과 같이 다양한 방법으로 조파하였다. 또한 1/500 sec의 계산간격으로 150 sec까지 계산을 수행하였다.

Table 1에서 CASE1, 2, 3은 일방향불규칙파를 파의 진행 방향에 대해 0, 15, 30°로 조파한 경우이고, CASE4, 7, 8, 10은 조파소스를 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 지그재그로 배치하여 다방향불규칙파를 조파한 경우로서 CASE4, 8은 전 구간 Mode1의 파형만 적용한 반면 CASE7, 10은 구간별로 Mode1-3을 달리 적용한 경우이다. 또한 조파소스를 직선으로 배치한 CASE5, 6, 9의 경우에서도 CASE 6은 전 구간 Mode1, CASE 5, 9는 Mode1-3을 구간별로 적용한 경우이다. 게다가 CASE4, 5, 7은 입사파를 0°로 조파한 경우이고, CASE6, 8, 9, 10은 Fig. 2에 일점쇄선으로 나타낸 파봉선과 같이 입사파를 -30, 30°로 조파한 경우이다.

3.2 불규칙파의 파동장 검증

Fig. 3은 일방향 불규칙파인 CASE1의 파랑 스펙트럼을 나타낸 것으로 실선(—)은 조파의 입력조건으로서 Bretschneider-Mitsuyasu의 스펙트럼이고, 각 실선에 ●, ▲, ■, ◆은 조파소스로부터 50, 150, 250, 350 cm 떨어진 지점에서의 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 3으로부터 전파거리에 따른 일방향 불규칙파(CASE1)의 스펙트럼이 B-M의 피크치보다 조금 작게 나타나고 있으나, 스펙트럼의 분포가 이에 상응하게 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 이로서 본 연구에서 조파한 불규칙파의 에너지가 매우 잘 보존되면서 전파되는 것을 확인할 수 있다.

3.3 조파방법에 따른 파고분포특성

Fig. 4는 조파방법에 따른 불규칙파의 계산결과로서 (a)는

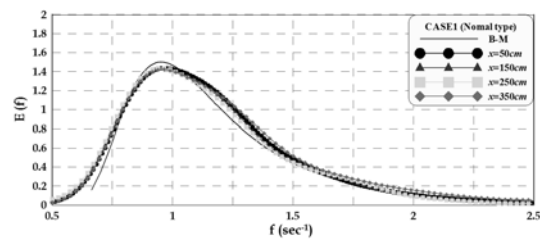


Fig. 3 Variation of directional distribution of wave spectrum due to propagation of unidirectional irregular wave

CASE1의 일방향불규칙파, (b)는 CASE2의 경사입사 일방향 불규칙파, (c)는 CASE4의 조파소스를 지그재그로 배치하여 조파한 다방향불규칙파, (d)는 CASE5의 경우로서 Fig. 1에서 설명한 3가지 Mode의 불규칙파의 시계열을 조파소스의 구간별로 조파한 다방향불규칙파, (e)는 CASE7의 조파소스를 지그재그로 배치하고 각 구간별로 불규칙파의 시계열 Mode를 달리 적용하여 조파한 다방향불규칙파, (f)는 CASE10의 경우로서 (e)의 CASE7의 경우에 구간별로 경사입사를 적용한 다방향불규칙파의 수면형을 나타낸다.

Fig. 4로부터 조파소스를 엇갈리게 위치시켜 지그재그 조파한 CASE4의 경우뿐만 아니라 2가지 이상의 조파방법을 조합하는 경우에는 모두 방향집중도가 낮은 다방향불규칙파에 가깝게 수면형이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.4 조파방법에 따른 방향분포특성

본 연구에서 방향스펙트럼의 해석은 동시 측정된 수위와 유속을 적용하는 EMLM법을 이용하였으며, 계산시간 50 sec 이후의 0.02 sec 간격의 8192개의 값을 고려하였다.

Fig. 5는 일방향불규칙파(CASE1; $\theta=0^\circ$)의 피크주파수(f_p)에 대한 방향함수의 분포형을 나타내고 있으며, EMLM법의 적용가능성을 확인하기 위하여 조파위치로부터의 거리에 따른 방향분포를 비교하였다. 일방향의 경우 위치에 관계없이 방향분포가 일정하게 유지되는 것을 쉽게 예상할 수 있으며, EMLM법을 적용한 Fig. 5로부터도 이것을 확인할 수 있다. 이로서 방향스펙트럼 해석을 위한 EMLM법의 적용가능성이 일부분 확인되었다고 판단된다. Fig. 6은 경사입사에 대한 일방향불규칙파의 방향분포를 나타내고 있으며, 피크주파수(f_p)에 대한 값을 나타내고 있다. 실선에 ●는 일방향불규칙파의 경우(CASE1; $\theta=0^\circ$), 실선에 ▲과 ◆는 각각 경사입사 일방향불규칙파의 경우인 CASE2($\theta=15^\circ$)와 CASE3($\theta=30^\circ$)을 나타낸다. Fig. 6으로부터 일방향불규칙파의 경사입사각이 커질수록 방향집중도가 낮아지는 경향을 나타낼 수 있다.

Fig. 7은 CASE4의 경우 즉, 인접하는 조파소스를 지그재

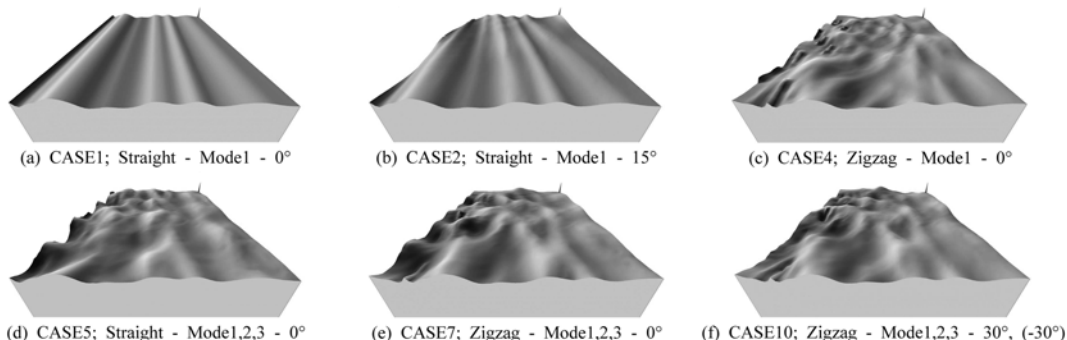


Fig. 4 Spatial distributions of water surface of multi-directional random waves occurred by variable generation method

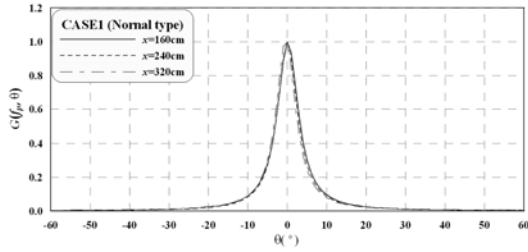


Fig. 5 Variation of directional distribution function due to propagation of unidirectional irregular wave

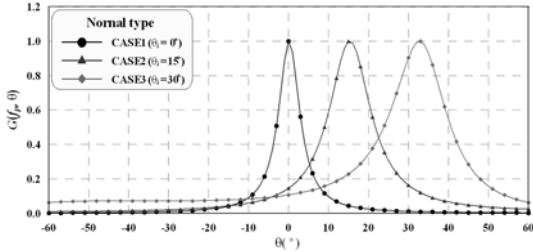


Fig. 6 Comparison between directional distribution functions for obliquely incident irregular waves

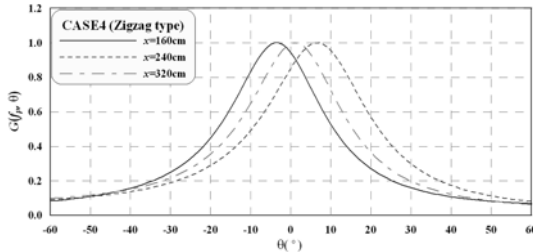


Fig. 7 Variation of directional distribution function due to propagation of multidirectional irregular wave

그로 배치하여 조파한 다방향불규칙파의 피크주파수(f_p)에 대한 위치적 방향분포 특성을 나타내고 있다. 실선(—)은 조파소스로부터 160 cm의 위치, 점선(---)과 일점쇄선(-·-·-)은 각각 240 cm와 320 cm의 위치에서의 방향분포를 나타내고 있으며, 다방향불규칙파가 진행하면서 주파방향($\theta=0^\circ$)과 에너지의 방향분포가 조금 달라지는 것을 알 수 있다. 이는 조파소스로부터 멀어질수록 측벽을 통한 반사파의 영향이 커지기 때문으로 판단된다.

Fig. 8은 다양한 조파방법에 의해 만들어진 다방향불규칙파이고 조파소스로부터 160 cm 떨어진 지점의 방향분포이다. 그래프에서 실선에 ●, ▲, ◆, ■는 각각 CASE4, CASE7, CASE8 및 CASE10의 경우에 해당한다(Table 1. 참조). 그림으로부터 조파소스를 지그재그 배치하고 경사로 조파한 CASE8, 10의 경우가 나머지 경사조파를 하지 않은 경우 비해 주파방향이 $\theta=0^\circ$ 에 가깝고 방향집중도가 높게 방향분포가 형성되며, 대체적으로 방향집중도가 낮은 다방향불규칙파에 가깝게 조파되고 있는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 3차원 수치파동수조에서 다양한 방법으로 발생시킨 다방향불규칙파의 방향분포 특성을 고찰하기 위하여 장시간의 조파에 따른 재반사의 문제에 대해서도 자유로운 무반사 조파시스템을 도입한 LES-WASS-3D(허동수와 이우동, 2007)를 이용하였다. 다양한 방법으로 조파된 다방향

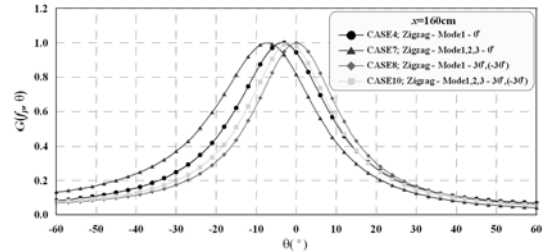


Fig. 8 Comparison between directional distribution functions for multidirectional random waves generated by various generation methods

불규칙파의 방향스펙트럼을 해석하기 위하여 파고계와 2방향유속계를 병용하여 해석하는 EMLM법(Isobe *et al.*, 1984)을 이용하였다.

수치모델 및 EMLM법을 이용하여 얻어진 방향스펙트럼의 분석을 통하여 조파방법의 차이에 따른 방향분포 특성을 논의하였으며, 무반사 조파시스템을 도입하고 있는 3차원 수치 해석기법(LES-WASS-3D)을 이용하여 다방향불규칙파동장 해석의 적용 가능성을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(No. 2010-0027566).

참고문헌

손병규, 류청로(2001) 다방향불규칙파 조파수조의 조파특성에 관한 연구. 한국수산학회지, 한국수산학회, 제34권, 제6호, pp. 705-712.

허동수, 이우동(2007) 잠재 주변의 파고분포 및 흐름의 3차원 특성; PARTI-해빈이 없을 경우. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제27권 제6B호, pp. 689-701.

Brorsen, M. and Larsen, J. (1987) Source generation of nonlinear gravity waves with the boundary integral equation method. *Coastal Eng.*, Vol. 11, pp. 93-113.

Goda, Y. (1977) Numerical experiments on statistical variability of ocean waves. *Rept. Port and Harbour Res. Int.* Vol. 16, No. 2, pp. 3-26.

Huang, W.P., Chou, C.R., and Yim, J.Z. (2003) Experiments on the reflection coefficients of a detached breakwater in directional wave field. *Coastal Eng.*, Vol. 47, pp. 367-379.

Hur, D.S. (2004) Deformation of multi-directional random waves passing over an impermeable submerged breakwater installed on a sloping bed. *Ocean Eng.*, Vol. 31, pp. 1295-1311.

Isobe, M., Kondo, K., and Horikawa, K. (1984) Extension of MLM for estimating directional wave spectrum. *Proc. Symp. on Description and Modelling of Directional Seas*, Technical University, Denmark, No. A6, pp. 15.

Mitsuyasu, H. (1970) On the growth of spectrum of wind-generated waves(2)-spectral shape of wind waves at finite fetch. *Proc. Japanese Conf. Coastal Eng., JSCE*, pp. 1-7.

Smagorinsky, J. (1963) General circulation experiments with the primitive equation. *Mon. Weath. Rev.* Vol. 91, No. 3, pp. 99-164.

Takayama, T. (1982) Theoretical properties oblique waves generated by serpent-type wave makers. *Rep. the Port and Harbor Research Institute*, Vol. 21. No. 2, pp. 3-48.

平石哲地 (1992) 多方向不規則波の發生とその應用に関する研究. 港灣技研資料, No. 0723.

(접수일: 2010.10.11/심사일: 2010.11.8/심사완료일: 2011.3.16)