

스펙트럴 방법에 의한 실해역파 재현 및 파 방향 해석

이진호^{†*}, 최재웅*, 강윤태*, 하문근*

삼성중공업 조선해양연구소*

Generation of Real Sea Waves based on Spectral Method and Wave Direction Analysis

Jin Ho Lee^{†*}, Jae Woong Choi*, Yun Tae Kang* and Mun Keun Ha*

Marine Research Institute Samsung Heavy Industry*

Abstract

Real sea waves in a towing wave basin have been generated using random periodic motion of the segmented wave makers and the wave reflections of sidewalls. Theoretically, the real sea waves can be described by the superposition of many random oblique waves. This paper introduces numerical real sea wave generation in a rectangular wave basin using spectral method that uses a superposition of orthogonal functions which have to satisfy the Laplace equation. Oblique regular waves, long crested irregular waves and real sea waves were simulated and met the requirement of sidewall wave reflection and wave absorption.

MLM (Maximum Likelihood Method) and Spatial Fourier Transform were used in order to obtain propagated wave direction characteristics. The estimated results proved the usefulness of the method and the performances showed reasonable directional patterns comparing with generating patterns.

※Keywords: Real sea waves (실해역파), Spectral method(스펙트럴 방법), Orthogonal function (직교함수), Oblique regular waves(규칙 경사파), Long crested irregular waves(장파정 불규칙파), MLM(Maximum Likelihood Method), Spatial Fourier Transform(공간 푸리에 변환)

1. 서론

최근 완공되는 예인 수조의 조파 설비는 실해역

파 재현이 가능하도록 만들어 지고 있다. 이를 구현하기 위해서는 수조 끝단의 폭방향으로 분할된 조파기에서 랜덤한 주기 운동과 수조 양 측벽의 반사파를 이용하여 원하는 실해역파를 재현한다(정용관 등 2001, Takezawa et al. 1988). 하지만, 재현 정도의 정량적인 검증을 실험 수조에서 수행하기에는 고려해야 될 변수 및 비용이 많이

접수일: 2004년 10월 25일, 승인일: 2005년 2월 3일

† 주저자, E-mail: jh1225.lee@samsung.com

Tel: 055-630-5354

들어 적지 않은 어려움이 예상된다. 이러한 점을 극복하기 위한 한 방법으로 수치 구조의 활용이 기대되고 있다. 수치 해법으로는 비점성, 비압축성을 가정한 BEM 등의 방법이 널리 사용되어지고 있다(성홍근과 최항순 2000). 최근에는 점성을 고려한 Navier-Stokes 방정식을 풀어 실해역파를 재현한 연구도 볼 수 있다(박종천 등 2003). 본 논문에서는 실용적이면서도 계산의 정도가 보장된 Spectral 방법의 수치파 구조를 소개한다. 이 방법을 이용해서 비선형 자유표면파 재현 및 규칙파 중에서의 흡수식 수치 조파기의 검증을 능동 제어 방법으로 수행한 바 있다 (Lee 2000, Choi et al. 2002). 스펙트럴 방법의 특징으로서는 실험 구조와 같은 사각형 모양 모델 적용에 용이하며, 이때의 측면, 밑면, 끝단의 벽면 경계 조건을 만족하는 비점성, 비압축성 포텐셜 직교 함수를 구성할 수 있다. 이러한 함수를 구성하는 스펙트럴 모드 계수는 자유표면의 운동학적, 동역학적 경계조건 식으로부터 시간, 공간 영역에서 구해지며, 이로부터 수면 변위의 시공간 영역 결과를 얻을 수 있다.

계산에 사용되어진 모델은 길이 X 폭 X 깊이가 8m X 4m X 4m 인 소형 사각 수조이며, 사용 수파는 규칙 경사파, 장파정 불규칙파 및 방향 스펙트럼 파로 일컫어지는 실해역파를 발생시켜 수조내의 유동장을 검토하였다. 소형 사각 수조를 선택한 이유로서는 우선, 주어진 입력 주파수 대역에서 측벽 반사 및 수조 끝단의 소파 효율에 따라 소형 수조 내에서의 원하는 파랑 특성이 얻어질 수 있는지를 파악하기 위함이다. 또한, 초기 경계치 문제인 선형 대수 방정식을 푸는 방법으로서 LU Decomposition의 수치 기법을 이용하고 있지만, 수조 제원의 확장에 따른 Node 수의 증가는 PC 계산 능력에 한계를 가져온다. 이러한 문제점에 관해서는 적절한 대체 방법을 연구하고 있으며, 향후, 수 십 m 정도의 중대형 수조에서의 본 방법의 적용을 수행할 예정이다.

실해역파 방향 특성에 대한 해석은 MLM (Maximum Likelihood Method) 및 공간 푸리에 변환법을 적용하여 수행하였다. 실해역 파의 방향 특성에 관한 연구는 경상 수조 (Imaginary tank)

및 랜덤 주기적 변동 소오스법을 통한 방법으로 고찰된 바가 있지만(Lee and Hirayanma 2000), 본 방법과 같은 Transient 영역을 포함한 시간 해석은 불가능하다. 파를 발생시키는데 사용한 기진력은 자유표면의 동역학적 경계 조건식에서의 매 시간 압력 변동을 고려하였으며, 파 기진력 맞은 편의 수조 끝단에서는 진행파를 소파할 수 있도록 감쇄 영역을 수치적으로 재현하였다.

2. Spectral법에 의한 실해역파의 재현

유한 수심 h를 가지는 자유 표면상의 Ω 영역에서의 포텐셜은 비회전, 비압축성의 가정하에 식 (1)에서(5)까지의 선형화된 초기치 경계 문제로 접근되어질 수 있다. 기본 좌표정의는 Fig. 1에 보이고 있다.

$$\nabla^2 \phi + \phi_{zz} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\eta_t - \phi_z + v(x)\eta = 0 \quad \text{at } z=0 \quad (2)$$

$$\phi_t + g\eta + v(x)\phi = -P(x, y, t) \quad \text{at } z=0 \quad (3)$$

$$\phi_z = 0 \quad \text{at } z=-h \quad (4)$$

$$\phi(\bar{x}, 0, 0) = 0$$

$$\eta(\bar{x}, 0) = 0$$

$$P(x, y, 0) = 0 \quad (5)$$

여기서, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$, $\bar{x} = (x, y)$ 를 나타내며 포텐셜은 식(6)에 나타내져 있는데, Dirichlet 자유

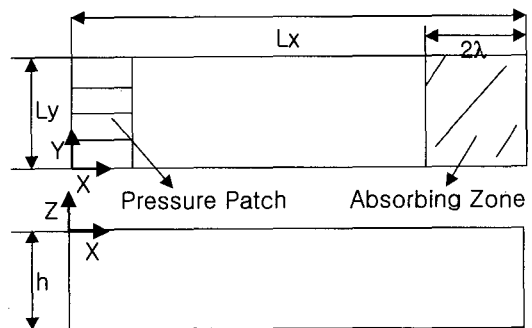


Fig. 1 Sketch of a numerical wave tank and its coordinate system

수면 조건을 제외한 각각의 경계조건을 만족시키는 자유모드의 직교함수로 전개된다.

$$\phi = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{mn} \frac{\cosh(k_{mn}(z+h))}{\cosh(k_{mn}z)} \cos(\bar{k}_{mn} \cdot \bar{x}) \tag{6}$$

a_{mn} 는 스펙트럴 모드 계수를 나타내며 식(6)을 포텐셜의 시간에 대한 미분식인 식(3)에 대입하여 초기조건식(5)에 의한 $m \times n$ 개의 선형 대수 방정식을 형성하여 식(2)와 함께 매시간 변동하는 $m \times n$ 개의 계수들을 구할 수 있다. 파수 벡터는 다음과 같이 정의되어진다.

$$\bar{k}_{mn} = (m\pi/L_x, n\pi/L_y) \tag{7}$$

L_x, L_y 는 수치파수조의 길이와 폭을 나타낸다. 매 시간마다의 시간적, 공간적 파형을 생성시키기 위해 운동학적, 동역학적 경계 조건식(2), (3)을 지배방정식으로 하는 시적분을 수행한다. 식(2), (3)에 나와있는 $v(x)$ 는 감쇠계수로 조파기측 반대편에 설정해서 벽면 반사파를 최소화하는 기능으로 다음식과 같이 정의되어진다.

$$\begin{aligned} v(x) &= \alpha(x-x_0)^2 & x \geq x_0 \\ v(x) &= 0 & x < x_0 \\ \alpha &= 0.5 & x_0 = L_x - 2\lambda \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 x_0 는 감쇠 계수가 시작되는 지점, λ 는 파장을 나타낸다.

$P(x, y, t)$ 는 발생파를 생성시키는 기진력으로서 주기적인 압력변동으로 나타내어지며 규칙 경사파 생성은 다음 식으로 정의되어진다. 본 시뮬레이션 수행에 있어서의 압력 분포는 수조 길이의 제약으로 x 는 길이 방향으로 두 번째 Node까지로 한정하였으며, y 는 수조 전 폭 방향으로 분포시켰다.

$$P(x, y, t) = \cos \beta\pi x/2 \sin(-\omega t + kx \cos \theta + ky \sin \theta) \tag{9}$$

$\cos \beta\pi x/2$: Pressure patch의 형상 함수

장파정 불규칙파 및 실험역파의 재현은 조파 신호 프로그램으로부터 미리 데이터를 생성시켜 본 수치수조에 입력하여 계산하였다. 신호 생성에 관해서는 이진호 등(2001)에 의해 연구되어진 반복법에 의한 고속 신호 생성법을 사용하였다.

이상의 수식화에서 식(2), (3)의 ODE(Ordinary Differential Equation)문제를 (5)식의 초기 조건으로 시간 영역 해석을 수행하였다. 시간 적분법으로는 Runge-Kutta 4th법을 이용하였다.

3. 성능 평가법

3.1 MLM에 의한 파 방향 해석법

MLM(Maximum Likelihood Method)에 의한 해석 방법은 고다 요시미(1990)의 문헌을 참고하여 아래 식(10)과 같이 나타내었다. 분할 조파기의 개수 변화에 의한 파 방향의 특성에 관한 고찰은 이 방법을 통해서 Lee and Hirayama(2000)에 의해 연구되어졌으며, Single Summation 및 Double Summation법에 의한 파 방향의 특성을 파 주파수간의 상관함수를 도입해서 MLM을 통해 해석한 바 있다 (이진호 등 2004).

$$D(\theta, \omega) = \frac{\alpha}{S(\omega)} \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \Phi_{ij}^{-1}(\omega) \right] \tag{10}$$

$$\exp[-i(kX_{ij} \cos \theta + kY_{ij} \sin \theta)]^{-1}$$

여기서 α 는 정규화를 위한 상수이고, $S(\omega)$ 는 스펙트럼 평균이다. 또한 Φ_{ij}^{-1} 는 계측된 시계열을 이용하여 얻은 상관 행렬의 역행렬을 의미하는 것으로서 다음 식과 같이 정의되어진다.

$$\Phi(\omega)_{ij}^{-1} = \begin{bmatrix} \Phi(\omega)_{11}^{-1} & \Phi(\omega)_{12}^{-1} & \Phi(\omega)_{13}^{-1} \\ \Phi(\omega)_{21}^{-1} & \Phi(\omega)_{22}^{-1} & \Phi(\omega)_{23}^{-1} \\ \Phi(\omega)_{31}^{-1} & \Phi(\omega)_{32}^{-1} & \Phi(\omega)_{33}^{-1} \end{bmatrix} \tag{11}$$

MLM을 적용시키기 위해서 수치수조의 임의의 3지점에서 시계열을 계측하였다.

3.2 2차원 공간 푸리에 변환법에 의한 파 방향 해석법

2차원 모델의 경우는 (x, y) 평면에서 측정된 데이터를 이용하는 것으로, 임의의 순간에 얻은 2차원 공간에서의 자유표면파의 성분을 2차원 공간 적분을 수행하는 경우, (12) 식과 같이 정리된다.

$$H(k_x, k_y) = \frac{1}{MNK} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^K A_i(x_m, y_m, \omega_i) e^{i(k_x x_m + k_y y_m)} \tag{12}$$

여기서 $A_i(x_m, y_m, \omega_i)$ 는 (x_m, y_m) 지점에서의 시계열을 주파수 변환한 결과이며, 파수의 범위는 식 (13) 및 (14)와 같다.

$$-(M/2) \Delta k_x \leq k_x \leq (M/2 - 1) \Delta k_x \tag{13}$$

$$-(N/2) \Delta k_y \leq k_y \leq (N/2 - 1) \Delta k_y \tag{14}$$

또한 2차원 공간 스펙트럼의 최대값에 해당하는 파의 방향 성분은 식 (15)과 같이 계산된다.

$$\theta_i = \text{atan}\left(\frac{k_y}{k_x}\right) \tag{15}$$

한편, 일반적으로 공간 주파수 변환에 의한 값을 모든 주파수 성분에 대해 적분하면, 1/4 분면 및 4/4분면의 값과 2/4분면 및 3/4값이 동일하게 되는 방향 모호성(ambiguity) 현상이 발생하며, 이를 배제하기 위하여, 양의 주파수 성분을 적분하게 된다. 따라서 위의 식 (15)를 이용해서 원하는 파의 방향을 알 수 있게 된다. 이렇게 추정된 1/4 분면 및 4/4분면의 방향 성분은 wave maker로부터 파가 발생하는 성분을 의미하고, 2/4분면 및 3/4분면의 값은 absorbing zone으로부터의 성분을 의미하게 된다. 즉 2/4분면 및 3/4분면의 값이 존재하면, 흡수되지 않은 성분 즉 반사성분이 있음을 의미하는 것이다.

4. 수치수조의 성능 평가

4.1 수조의 제원 및 평가 항목

길이X폭X깊이가 8mX4mX4m인 사각형 수조에서 스펙트럴 방법에 의해 규칙 경사파, 장파정 불규칙파 및 실패역파를 재현하였으며, Absorbing zone의 해석, MLM 해석법 및 공간 푸리에 변환법에 의해 그 방향성을 해석하였다. 수치 수조에 사용한 Node 간격은 0.2m이며, 시간 분할은 0.05 초로 하였으며 계측 데이터 수는 1024개로 정하였다.

4.2 Absorbing zone의 해석

일정한 방향으로 입사한 파에 대해 180도의 위상차를 갖는 반사파면이 존재하는 조건에서는 이론적으로 2지점 계측을 이용하여 입사파 및 반사파의 구분이 가능하다. 이러한 방법은 두 개의 마이크로폰을 이용한 음파 분리법의 방법을 직접 적용하여 얻을 수 있다. 여기서는 Seybert (1988)의 개념을 적용하여 결과만을 고찰한다. Absorbing zone해석을 위해 사용한 조파 스펙트럼은 Fig. 2(a)와 같다. Fig. 2(b)는 이 스펙트럼을 적용하여 0도의 파 방향을 갖는 공간 파형을 나타낸 것이며, Fig. 2(c)는 수치파 수조의 Absorbing zone의 특성 파악을 위해 이 Zone 근처의 2지점에서 얻어진 시간영역 파변위 데이터를 활용하여 반사파/입사파를 구한 결과이다. Fig. 2(a)의 주요 주파수 영역에 대한 흡수가 잘 되어지는 현상을 볼 수 있다. 그러나 파 발생을 위해 선택한 주파수 성분에 해당하지 않는 성분과 주파수 성분의 크기가 매우 작은 부분에서는 잡음의 영향이 불규칙한 흡수비를 갖게 되는 현상을 볼 수 있다.

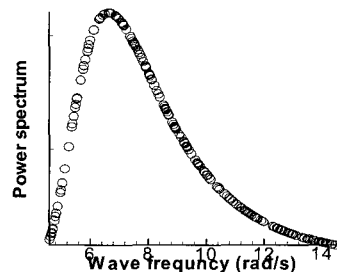


Fig. 2(a) (JONSWAP Spectrum, $T_p=0.9s$)

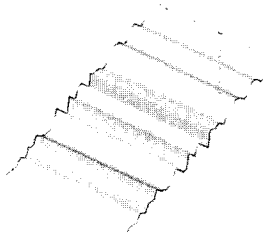


Fig. 2(b) Long crested irregular waves (JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave direction: 0 deg)

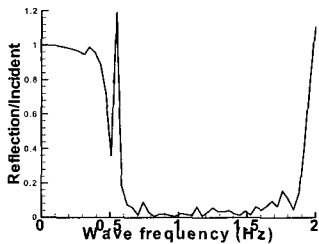


Fig. 2(c) Reflection ratio at absorbing zone for Fig. 2(a)

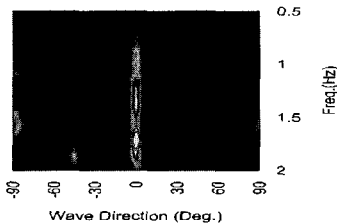


Fig. 2(d) MLM result (JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave direction: 0 deg)

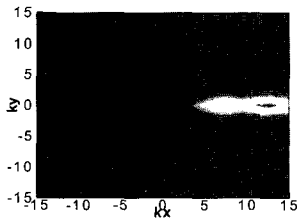


Fig. 2(e) Spatial Fourier Transform (JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave direction: 0 deg)

Fig. 2(d) 와 Fig. 2(e)는 MLM 방법 및 공간 푸리에 변환에 의한 파수 영역의 해석이다. 수치 조파기로 부터의 파 변위 진행 방향을 0도로 정

한 결과로서, 두 방법 모두 방향 추정이 잘 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 2(e)의 공간 푸리에 변환에 의한 결과에서는 2/4분면 및 3/4분면의 성분이 존재하지 않음을 볼 수 있어 absorbing zone의 흡수 능력이 우수함을 알 수 있다.

4.3 규칙 경사파(Oblique regular waves)

Fig.3(a)-(b)는 ± 10 도 및 ± 30 도에서의 규칙 경사파의 수조 끝단까지 진행한 어느 시점에서의 공간 파형을 나타낸다. Fig. 3(a)에서는 측벽에 의한 반사 현상이 미비하나, Fig. 3(b)에서는 양 측벽에 의한 파의 반사 현상을 명확히 볼 수 있다.

Fig 4(a)-(b)는 MLM방법에 의한 파 방향 추정의 결과를 나타낸다. MLM의 경우는 180도 상의 방향각을 추정하도록 구성되어 있는 결과로서 Absorbing zone의 반사 효과를 파악할 수 없다. Fig. 4(a)의 ± 10 도의 경우는 파 방향성을 잘 추정하고 있으나, ± 30 도의 경우는 주된 파 방향이 ± 15 정도로 나타난다. 이는 MLM방법이 국부적인 3 지점의 파 변위 계측을 이용하여 주된 방향 성분을 추정하는데 따른 한계로 볼 수 있다.

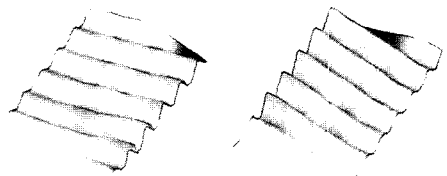


Fig. 3(a) Oblique regular waves (Wave direction, left:10deg, right:-10deg)

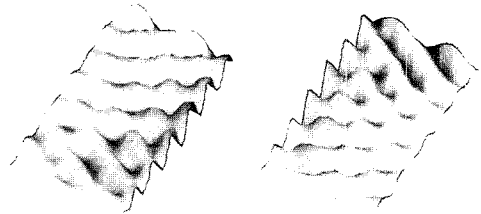


Fig. 3(b) Oblique regular waves (Wave direction, left:30deg, right:-30deg)

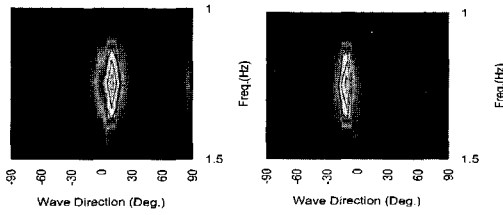


Fig. 4(a) MLM for Fig. 3(a)
(Wave direction, left: 10deg, right: -10deg)

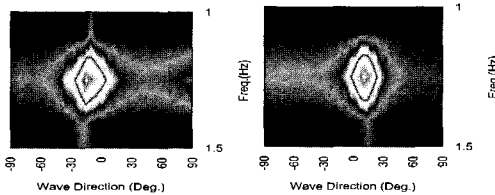


Fig. 4(b) MLM for Fig. 3(b)
(Wave direction, left: 30deg, right: -30deg)

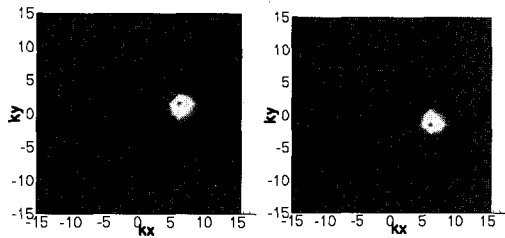


Fig. 5(a) Spatial Fourier Transform for Fig. 3(a)
(Wave direction, left:10deg, right:-10deg)

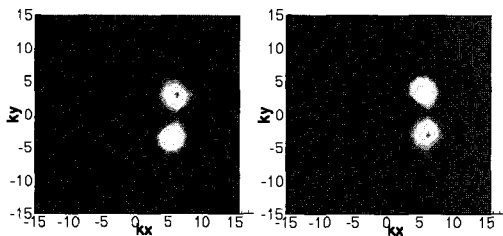


Fig. 5(b) Spatial Fourier Transform for Fig. 3(b)
(Wave direction, left:30deg, right:-30deg)

Fig. 5(a)-(b)의 결과는 2차원 공간 푸리에 변환에 의한 파 방향 해석 결과이다. Fig. 5(a)의 경우는 ±10도의 파 진행 방향의 해석 결과로서 파

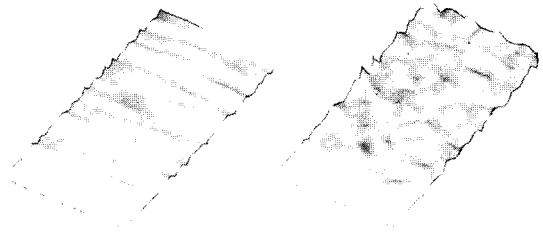


Fig. 6 Directional spectrum waves(JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave spreading function, left: $\cos 70\theta$, right: $\cos 2\theta$)

방향성을 잘 추정하고 있으며, Absorbing zone에서 반사되어 오는 파의 성분도 존재하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)의 경우는 벽면에 의해 반사되는 파의 성분이 현저하여 입사각의 주 방향과, 벽면 반사로 인한 성분이 발생함을 확실히 볼 수 있다. 그러나 2/4분면 및 3/4분면의 성분이 없는 것을 관찰할 수 있어 Absorbing zone의 기능은 효과적임을 알 수 있다.

4.4 실해역파 (Directional spectrum waves)

장파정 불규칙파를 통한 수치 수조의 Absorbing zone 검토 및 규칙 경사파를 통한 수조의 벽면 반사 결과를 토대로 실해역파 재현을 수행하였다. 수행 방법은 미리 생성시킨 실해역파 조파 신호를 본 수치 수조에 입력하며, 이로부터 생성된 파는 수조의 양 측벽 반사를 적극적으로 이용하여 원하는 실해역파를 형성토록 하였다.

Fig. 6은 협대역 및 광대역 방향 분포 함수를 가지는 실해역파 신호 생성을 통해 얻은 수치수조의 공간 파형을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 협대역 방향 분포 실해역파의 경우 파정선(Crest line)이 광대역 방향 분포 실해역파 보다 길게 나타나서 장파정 불규칙파 특성에 가까움을 알 수 있지만, 수조 폭방향으로 독립된 긴 파정선이 수 개 보이는 특성을 가져 Fig. 2(b)의 장파정 불규칙파와는 다름을 알 수 있다. 반면 광대역 방향 분포 실해역파는 아주 짧은 파정선을 형성하고 있어 대양에서 흔히 보는 실해역파를 나타낸다.

공간 파형만으로는 방향 분포 특성을 파악하는데 어려움이 있어 MLM법 및 공간 푸리에 변환법

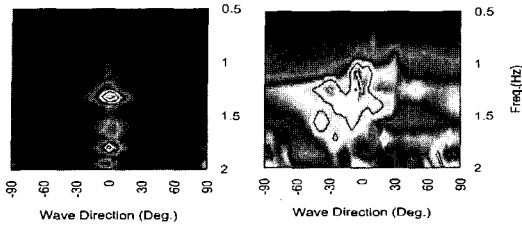


Fig. 7 MLM results(JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave spreading function, left: $\cos 70\theta$, right: $\cos 2\theta$)

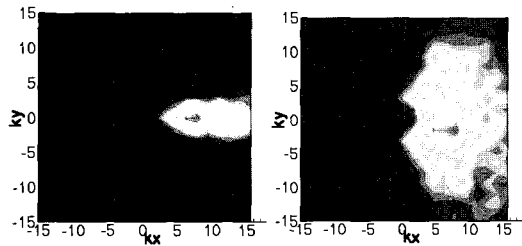


Fig. 8 Spatial Fourier spectrum(JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave spreading function, left: $\cos 70\theta$, right: $\cos 2\theta$)

에 의한 파 방향 해석을 통해 그 특성을 파악하였다. Fig. 7에서는 MLM법에 의한 실험역파의 방향 스펙트럼 해석 결과를 보여준다. 협대역 방향 분포를 나타내는 왼쪽 그림은 0도를 중심으로 협소한 대칭적 분포를 나타내고 있으며, 오른쪽 그림에서는 광대역 방향 분포의 해석 결과를 보여준다. Fig 8에서는 공간 푸리에 변환법을 이용한 해석 결과이다. MLM법을 이용한 해석 결과와 마찬가지로 0도를 중심으로 협대역 및 광대역 방향 분포가 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10에서는 목적 방향 분포 함수인 $\cos 70\theta$ 및 $\cos 2\theta$ 를 MLM 및 공간 푸리에 변환법을 이용해 해석한 결과와 비교했다. Fig. 9의 협대역 방향 분포의 경우, MLM의 Peak가 목적 방향 분포 함수에 비해 약간 높게 나오고 있으나, 두 방법에 의한 해석 결과는 목적 방향 분포 함수에 잘 따라가고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10의 광대역 방향 분포의 경우, 0도 중심 부근의 두 해석 방법에 의한 결과가 목적 방향 분

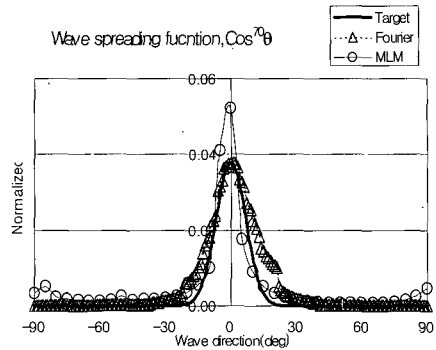


Fig. 9 Wave spreading function(JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave spreading function, $\cos 70\theta$)

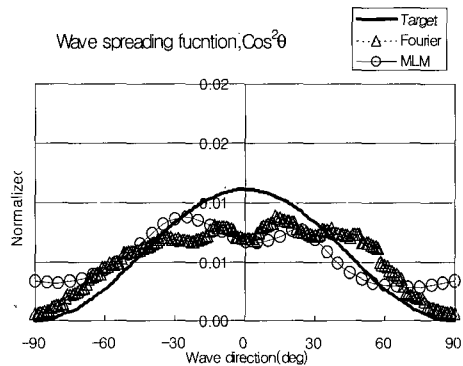


Fig. 10 Wave spreading function(JONSWAP, $T_p=0.9s$, Wave spreading function, $\cos 2\theta$)

포 함수에 비해 낮게 추정되고 있음을 알 수 있다. 이는 좁은 수조 폭에 비해 발생시키는 파의 파장이 길어서 수조 폭방향으로의 파가 발생함에 기인한다고 사료된다. 또한, MLM방법에 의한 해석 결과의 경우, ± 90 도 주변의 파가 존재함을 나타내고 있으나, 공간 푸리에 변환법에 의한 결과는 이러한 현상을 볼 수 없다. 이는 세 개의 수치 계측만에 의한 해석 오차일 가능성이 높으며, 계측 지점을 증가하여 이러한 오차를 줄일 수 있다고 판단된다.

5. 결론

이상의 연구 결과를 토대로 다음과 같은 결론을

얻을 수 있다.

1. 스펙트럴 방법을 통해 소형 수조에서의 실패역파를 재현하였으며 진행파의 흡수를 위한 Absorbing zone을 포함한 이론을 유도하였다.

2. MLM법 및 2차원 푸리에 공간 변환법을 이용하여 발생 파의 방향 해석을 수행한 결과 Wave maker로부터 발생한 모든 방향 성분의 Absorbing zone에 의한 흡수 능력이 우수함을 볼 수 있었다.

3. 규칙 경사파의 경우, 임의의 각으로 입사되는 성분에 대해서는 입사각의 증가에 따라 벽면 반사로 인한 영향이 증대되어, 대칭인 방향 성분이 발생함을 볼 수 있었다.

4. 소형 수조에서의 현대역 및 광대역 방향 분포를 갖는 실패역파의 재현 가능성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 고다 요시미, 1990, 항만 구조물의 내파 설계 - 파랑 공학에의 서설-, 녹도출판사, 동경.
- 박종천, 전호환, 송기종, 2003, "중첩 격자계를 이용한 물체운동의 수치 시뮬레이션," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 5호, pp. 36-42.
- 성홍근, 최항순, 2000, "고차경계요소법을 이용한 2차원 비선형 방사문제의 수치해석," 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 1호, pp. 67-81.
- 이진호, 최재웅, 강윤태, 하문근, 2004, "방향 스펙트럼 파 해석을 위한 GUI 프로그램 개발," 대한조선학회 논문집, 제 41권, 제 1호, pp. 1-7.
- 정용관, 이진호, 전호환, 하동대, 2001, "예인 수조에서 방향 스펙트럼파의 수치적 및 실험적 재현," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 2호, pp. 1-9.
- Choi, J.W., Lee, J.H., Park, G.I. and Kim, K.J., 2002, "Adaptive Re-reflecting Wave Control in Plunger Type Wave Maker System : Theory," J. of SOTEC by SNAK, Vol. 6, No.

4, pp.13-18.

- Gade, S., Thrane, N., Konstantin, H., and Wismer, J., 1987, Application Note: Time Windows, Bruel and Kjaer, Denmark
- Lee, J.H., 2000, "Numerical Simulation of Unsteady Inviscid Waves by Spectral Method," Postdoctoral Research Subject, Ecole Centrale de Nantes
- Lee, J.H. and Hirayama, T., 2000, "Directional Spreading Characteristics in a Snake and Side-Wall-Reflection Type Wave Generator based on Numerical Simulation," J. of SOTEC by SNAK, Vol. 4, No. 4 pp. 28-36.
- Seybert, A.F., 1988 "Two-Sensor Method for the Measurement of Sound Intensity and Acoustic Properties in Ducts," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 83, No. 6, pp. 22-33.
- Takezawa, S., Kobayashi, K. and Kasahara, A., 1988, "Directional Irregular Waves Generated in a Towing Tank," J. of the SNAJ, Vol. 163, pp. 222-232(in Japanese).



< 이진호 >



< 최재웅 >



< 강윤태 >



< 하문근 >