

측면 반사를 고려한 다방향 불규칙파 생성 Directional Irregular Wave Generation with Side Wall Reflection

양찬규*, 홍기용*, 홍석원*, 최학선*

1. 서론

해양파는 해양구조물에 작용하는 주된 외력이고, 쇄파와 물질의 확산등 해양의 역학적 현상을 유발하며, 표사와 누유의 이동등 물질유동의 원인이 된다. 이러한 이유 때문에 정확한 해양파의 역학적 특성 및 재현기법에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다.

Longet-Higgins(1975)와 Barber(1963)가 파의 방향분산성을 나타내는 방향스펙트럼 해석법을 제안한 이래 Mitsuyasu(1970)는 실험역 측정을 통해 Mitsuyasu형 방향분포함수 및 주파수 스펙트럼을 얻는 등 많은 실험역 파랑의 해석기법에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

실험수조 내에서 다방향 불규칙파를 생성하는 기법에 대해서는 Huntington(1981)이 모형 설치지점을 중심으로 원호위에 10개의 조파기를 배치하고 동시에 10개의 방향으로부터의 단일 방향파를 발생시키는 방법을 제안했다. 하지만 이 방법은 성분파의 방향이 조파기의 위치에 따라 제한되므로 파의 방향집중도를 임의로 설정하는 것이 힘들다. 이런 어려움을 극복하기 위해 Biesel(1954)의 "Snake Principle"을 적용하는 서펜트형(serpent type) 조파장치를 일반적으로 사용한다. Salter(1981)는 서펜트형 조파장치에서 각 조파판의 진폭, 주기, 파향 그리고 위상이 서로 다른 규칙 사파의 조파신호를 단일합성법(single summation method) 및 이중합성법(double summation method)을 통해 중첩시킴으로써 다방향 불규칙파를 조파할 수 있는 기법을 제안하였다. Takayama(1982)는 조파판 길이의 유한성에 기인하는 생성파랑의 오차를 정확히 고려하기 위해 무한길이의 벽면상에 설치된 유한길이의 조파판들의 운동에 의해 생성되는 균일 사파를 선형 포텐셜이론을 통해 해석했다.

이들의 연구는 무한한 범위의 해역에서 무한히 긴 조파장치를 이용하는 경우로서, 실험실에 적용하기 위해서는 실제 수조와 조파장치의 특성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 Fig.1과 같이 좌측에 벽면이 있고, 우측과 뒷쪽에 소파판이 설치된 경우 서펜트형 조파장치를 이용해서 다방향 불규칙파를 생성하는 문제에 있어서 벽면의 반사파가 전체 파랑장에 주는 영향을 고찰하였다. 벽면에서의 반사파는 벽면에 대해 mirror image를 두어 표현하였고, 소파판이 설치된 면은 Sommerfeld(1964)의 방사조건을 적용하였다.

2. 문제의 정식화 및 이론해

2.1 선형조파이론

비점성, 비압축성 그리고 비회전성유체를 가정하면 유체장의 속도는 속도포텐셜의 공간상 구배로 표현되고 연속방정식을 이용하면 속도포텐셜은 라플라스방정식을 만족한다. 좌표계는 조파판이 배열된 방향을 x, 연직방향을 z로 하였다(Fig.1). 포텐셜 문제에서 파도는 진동수 σ 로 진동한다고 가정하여 포텐셜을 $\phi(x, y, z, t) = \text{Im}\{\phi(x, y, z)e^{-i\sigma t}\}$ 와 같이 시간에 대한 조화함수로 나타낼 수 있고, 라플라스 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

선형화된 자유표면 경계조건은 잘 알려진 바와 같이 다음식으로 정의된다.

$$-\sigma^2 \phi + g \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=0 \quad (2)$$

여기서 g는 중력가속도이다. 수심 h가 일정한 경우, 바닥면에 대해서 다음과 같은 비투과 조건을 적용할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z=-h \quad (3)$$

개방경계면에는 방사조건(Sommerfeld,1964)을 적용하고, 조파판 표면에서 선형화된 운동학적 경계조건은

* 선박해양공학연구원(KRISO, Taejeon, 305-600, Korea)

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad \text{on } y=0 \quad (4)$$

와 같다. 조파판 표면의 변위 $\eta(x, z, t)$ 를 다음 식과 같이 시간에 대한 조화함수로 나타내면,

$$\eta(x, 0, z, t) = D(x, 0, z) e^{-i\sigma t}$$

식(4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = -i\sigma D(x, 0, z) \quad (5)$$

2.2 이론해

양찬규 등(1997)은 상기한 경계치문제의 해를 푸리에(Fourier)변환을 통해 구하여 다음과 같은 피스톤형(piston type) 조파판(Fig.2)의 운동조건을 대입함으로써

$$D(x, 0, z) = \begin{cases} D = \text{constant} & , x_i - b/2 < x < x_i + b/2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

다음 식과 같이 폭이 b 인 조파판의 운동에 대한 파랑장의 속도포텐셜을 구한 바 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_j(x, y, z, t) &= \text{Im}\{ \phi_j(x, y, z) e^{-i\sigma t} \} \\ &= \left[\frac{\sigma}{k} \frac{DF_p \cosh\{k(h+z)\}}{\sinh kh} \int_{k(x_i-b/2)}^{k(x_i+b/2)} Y_0\{\sqrt{(kx-\xi)^2 + (ky)^2}\} d\xi \right] \cos \sigma t \\ &\quad - \left[\frac{\sigma}{k} \frac{DF_p \cosh\{k(h+z)\}}{\sinh kh} \int_{k(x_i-b/2)}^{k(x_i+b/2)} J_0\{\sqrt{(kx-\xi)^2 + (ky)^2}\} d\xi \right] \sin \sigma t \\ &\quad - \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sigma}{k_n} \frac{2DF_n \cos(k_n(h+z))}{\pi \sin k_n h} \int_{k_n(x_i-b/2)}^{k_n(x_i+b/2)} K_0\{\sqrt{(k_n x - \xi)^2 + (k_n y)^2}\} d\xi \right] \cos \sigma t \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 F_p 와 F_n 은 각각 피스톤 운동의 진폭과 파 진폭의 비를 나타내는 전환함수(transfer function)로서 다음과 같고,

$$F_p = \frac{2 \sinh^2 kh}{\sinh 2kh + 2kh}, \quad F_n = \frac{2 \sin^2 k_n h}{\sin 2k_n h + 2k_n h} \quad (8)$$

k 와 k_n 은 진행파와 국부파의 파수(wave number)로서 다음 식과 같이 분산관계식으로부터 구하여 진다.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh), \quad \sigma^2 = -gk_n \tan(k_n h) \quad (9)$$

서펜트형 조파기(Fig.1)는 일정한 폭을 갖는 조파판이 횡으로 나란히 배열된 조파장치를 일컫고, 각 조파판이 일정한 위상차로 조화운동하여 규칙사파를 얻을 수 있는데 Biesel(1954)에 의하면 조파판 간의 위상차는 다음과 같다.

$$\delta = 2\pi b \cos \theta / \lambda = kb \cos \theta \quad (10)$$

일렬로 배열된 N_p 개의 피스톤형 조파판이 일정한 위상차를 가지고 움직임으로 해서 생성되는 규칙사파의 포텐셜은 식(7)의 선형결합으로 표현될 수 있고, 포텐셜을 운동학적 경계조건에 대입하면 다음과 같이 해수면 상승을 구할 수 있다. 단, 국부파는 조파판으로부터 한 파장 이내에서 소멸되어 전체 파랑장에 미치는 영향이 작으므로 제외시켰다.

$$\begin{aligned} \zeta_m(x, y, t) &= -\frac{1}{g} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right]_{z=0} = \\ &= \sum_{j=1}^{N_p} \left[DF_p \times \left\{ \int_{k(x_i-b/2)}^{k(x_i+b/2)} Y_0\{\sqrt{(kx-\xi)^2 + (ky)^2}\} d\xi \sin(\sigma t - x_j k b \cos \theta) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \int_{k(x_i-b/2)}^{k(x_i+b/2)} J_0\{\sqrt{(kx-\xi)^2 + (ky)^2}\} d\xi \cos(\sigma t - x_j k b \cos \theta) \right\} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 단일합성법에 의한 다방향 불규칙파 생성

통계적 관점에서 관찰하면 해양파는 물리량들이 시간에 따라 임의로 변화하는 stochastic process이며 여러 방향으로 진행하는 다방향성을 가지고 있으므로, 그 값을 예측할 수 없으나 확률적 분포는 예측할 수 있다. 실제 측정된 파

랑기락을 통계적으로 처리하여 대상해역에서 파에너지의 파 주파수와 파향에 대한 확률밀도를 의미하는 방향 스펙트럼(directional spectrum; $S_w(f, \theta)$)으로 대상해역의 파랑특성을 나타낼 수 있고, 방향 스펙트럼은 다음 식과 같이 방향 분포함수(directional spreading function; $G(\theta; f)$)와 주파수 스펙트럼(frequency spectrum; $S_w(f)$)의 곱으로 표시된다.

$$S_w(f, \theta) = G(\theta; f) S_w(f) \quad (12)$$

본 연구에서는 주파수 스펙트럼과 방향분포함수로 각각 유의파고($H_{1/3}$)와 유의파주기($T_{1/3}$) 및 주파수(f)의 함수로 주어지는 Bretschneider-Mitsuyasu형 스펙트럼과 Mitsuyasu형(1970) 분포함수를 이용했다(Fig.3).

다방향 불규칙파는 일방향 규칙파의 합성에 의해 얻어지며, 규칙파를 합성시키는 방법으로 흔히 쓰이는 방법 중에 각 주파수의 파가 일방향 성분만을 갖는 모델인 단일 합성법(single summation method)은

$$\eta_j(t) = \sum_{m=1}^{M_j} \frac{a_m}{F_m(k_m, h)} \sin(\sigma_m t - x_j k_m b \cos \theta_m + \epsilon_m) \sin \theta_m \quad (13)$$

와 같이 각 조파판의 운동으로 대별된다. 여기서, m 번째 성분파에 대한 전환함수(transfer function) $F_m(k_m, h)$ 는 일반적으로 식(8)의 F_p 의 2배를 그대로 사용하고 a_m , σ_m , ϵ_m 그리고 θ_m 은 각각 성분파의 진폭, 각진동수, 위상 그리고 방향을 나타낸다. 이들의 계산방법은 양찬규 등(1997)의 연구결과에서 보인 바 있다.

2.4 벽면 반사파

벽면 반사파는 Fig.1과 같이 벽면에 대칭으로 운동하는 가상적인 조파판을 배열함으로써 모사할 수 있다. Fig.4-5에 벽면반사를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 생성된 규칙파의 파고분포를 비교하고 있다. 실선은 양의 값을 점선은 음의 값을 나타내며 파고선 간격은 0.05로 일정히 하였다. 파향이 60도일 때(Fig.4)는 벽면으로부터 반사되는 파도와 입사파가 중첩되어 조파기 끝단 영향으로 수조 중심쪽 보다 낮았던 벽면 부근의 파고를 상승시킴으로서 균일 사파를 얻을 수 있는 영역을 넓혀준다. 반면에 파향이 120도로서 벽면쪽으로 진행하는 파의 경우(Fig.5)는 반사파로 인해 벽면부근 사파의 균일성과 방향성을 좋지 않게 하는 특성이 있으므로, 다방향 불규칙파를 생성할 때 파향이 90도 보다 큰 성분파의 벽면 부근에서 방향성 및 파 에너지 특성이 의도한 바와 달라질 수 있음을 알 수 있다.

Fig.6에는 생성된 다방향 불규칙파의 임의 시간에서 파고분포를 보이고 있다. 각 지점에서의 파랑자료를 계측하여 방향 분포함수 및 주파수 스펙트럼을 구해 목적 스펙트럼과의 비교·해석을 통해 실험가능 범위를 산정하는 내용은 지면관계상 생략키로 하겠다.

3. 결론

벽면효과를 고려한 다방향 불규칙파 생성기법을 선형포텐셜 이론을 이용하여 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 규칙사파의 경우, 벽면쪽으로 진행하는 경우 벽면의 반사파가 입사파와 중첩하여 방향성 및 균일성에 나쁜 영향을 주지만, 벽면의 반대쪽으로 진행하는 경우는 중첩의 효과로 인해 수조내에서 균일사파를 얻을 수 있는 영역을 넓혀 줄 수 있다.

2. 생성된 다방향 불규칙파를 수조 각 지점에서 계측함으로써 목적스펙트럼과 비교·해석이 이루어지면 실험가능 범위를 산정할 수 있고, 이러한 내용은 차후에 발표될 예정이다.

차후의 연구과제는 방사조건으로 처리되었던 소파판을 반사율과 투과율을 고려한 경계조건을 이용해 보다 정확히 발생파를 예측하는 것을 들 수 있다.

참고문헌

Biesel, F., 1954, Wave Machines, Proc. 1st Conf. on Ships and Waves Edited by Hoboken, N.J., pp.288-304.

Huntington S.W. and G. Gilbert, 1979, Extreme Forces in Short Crested Seas, Proc. Offshore Technology Conf., pp.2075-2084.

Longuet-Higgins, M.S., 1957, The Statistical Analysis of a Random Moving Surface, Phil. Trans. Rot. Soc. London, A249, pp.321-387.

Mitsuyasu, H., 1970, "On the Growth of the Spectrum of Wind-Generated Waves-Spectral Shape of Wind Waves at Finite Fetch," Proc. of the 17th Japanese Conference on Coastal Engineering, JSCE, Tokyo, pp.1-7

Salter, S.H., 1981, "Absorbing Wavemakers and Wide Tanks," Proc. Conf. on Directional Wave Spectra Application, Univ. of California, Berkeley, pp.185-202.

Sommerfeld, A., 1964, "Mechanics of Deformable Bodies," Lectures on Theoretical Physics, Academic Press, Vol.2.

Takayama, T., 1982, "Theoretical Properties of Oblique Waves Generated by Serpent-Type Wavemaker," J. Coastal Engineering in Japan, Vol.27, pp.1-19.

양찬규, 홍기용, 홍석원, 최학선, 1997, "다방향 불규칙파 생성기법에 관한 이론적 연구," 제 39차 해양공학연구회 workshop 논문집, pp.60-74.

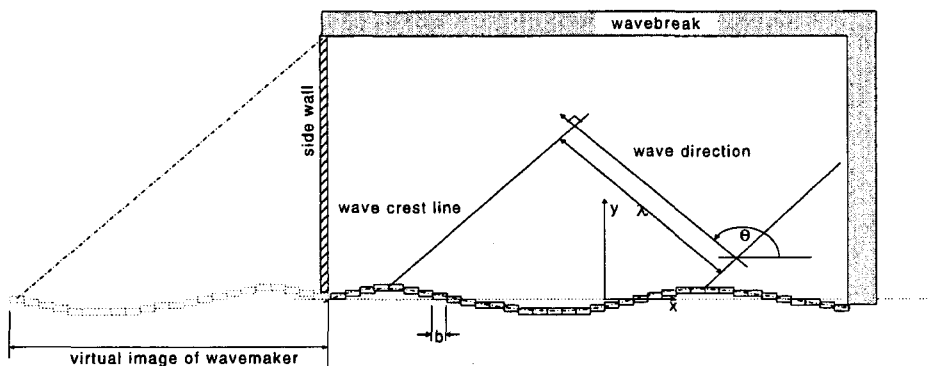


Fig.1 A Serpent-Type Wavemaker

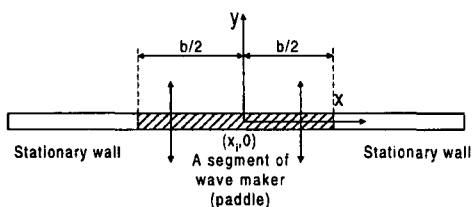


Fig.2 A Motion of a Piston Type Wavemaker Segment

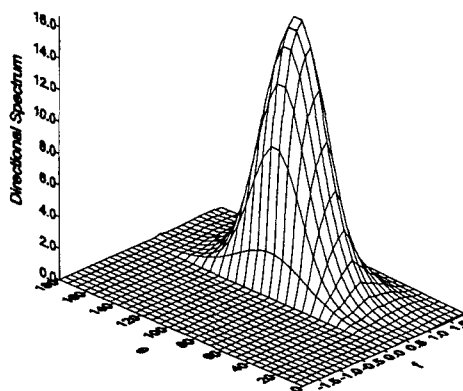
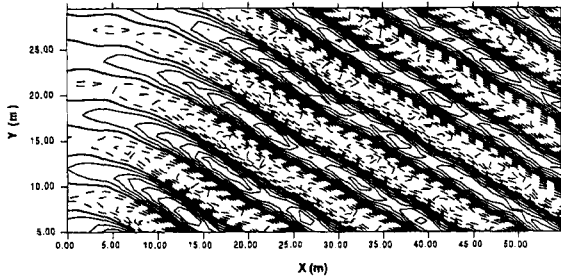
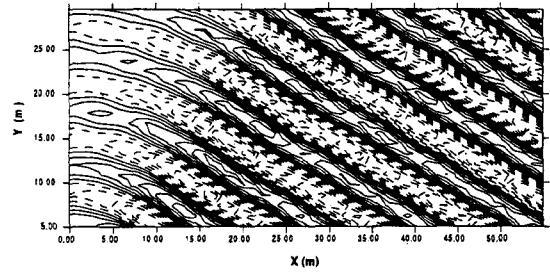


Fig.3 Distribution of Mitsuyasu Type Directional Spectrum

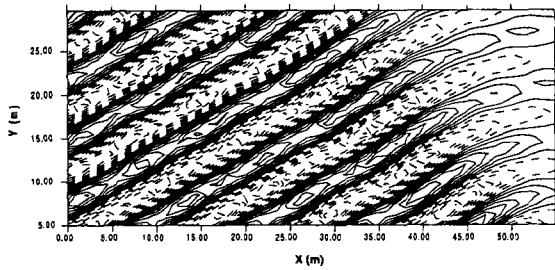


(a) Without Wall Reflection

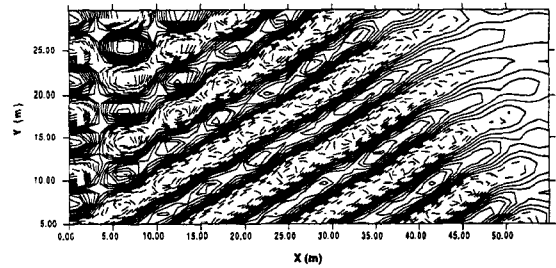


(b) With Wall Reflection

Fig.4 Regular Wave Generation ($T = 2$ sec, $H = 0.6$ m, direction = 60°)

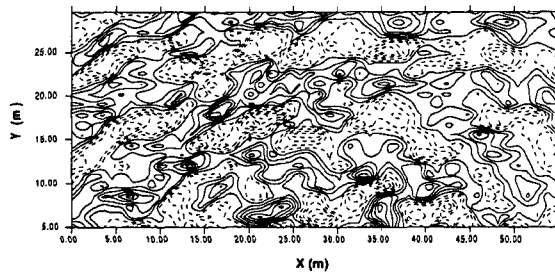


(a) Without Wall Reflection

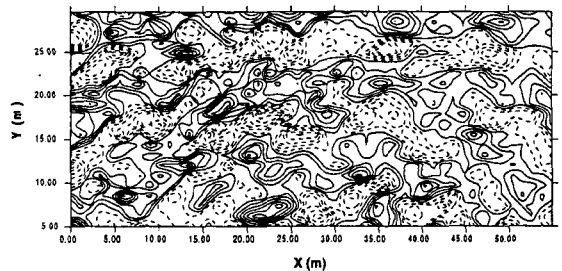


(b) With Wall Reflection

Fig.5 Regular Wave Generation ($T = 2$ sec, $H = 0.6$ m, direction = 120°)



(a) Without Wall Reflection



(b) With Wall Reflection

Fig.6 Directional Irregular Wave Generation ($T_{1/3} = 2$ sec, $H_{1/3} = 0.6$ m)