

방향 면에서 비대칭인 불규칙파의 회절 Diffraction of Random Waves Asymmetry in Direction

이창훈¹, 정재상², 김민균³

Changhoon Lee¹, Jae-Sang Jung², Min-Kyun Kim³

1. 서 론

방파제와 같은 해안구조물은 외해에서 입사해 오는 파랑에너지를 차단하여 배후 시설을 보호하기 위한 구조물로서 공사비, 에너지 차단 효과 등을 고려해 주로 천해에 건설된다. 방파제에 부딪치는 다방향 불규칙파는 심해에서 천해로 전파하면서 굴절이 발생하는데 주 방향을 기준으로 좌우 성분파가 굴절되는 정도가 서로 달라서 비대칭성이 생긴다. 이러한 비대칭파가 방파제 뒤로 회절되면서 배후지에 이른다.

Penney와 Price(1952)는 Sommerfeld(1896)의 빛의 회절 이론을 이용하여 반무한 방파제 및 양익 방파제를 지나는 규칙파의 회절계수를 계산하였다. 이후 Goda와 Suzuki(1975)는 반무한 방파제 및 양익 방파제를 통과하는 다방향 불규칙파의 회절계수와 침투 주기를 계산하였다. 그런데, 그들의 연구는 다방향 불규칙파가 굴절되면서 발생하는 좌우 비대칭 현상을 고려하지 않아 현실성이 떨어진다. 한편 편종근 등(1987)은 양익 방파제의 개구부 폭이 반과장보다 작은 경우 Mathieu 함수를 이용하여 회절계수를 계산하였다. 정신탉 등(1993)은 Chen(1987)에 의해 제안된 단순파 모형 결과를 선형중첩 하여 반무한 방파제를 지나는 다방향 불규칙파의 회절계수를 계산하여 Goda와 Suzuki(1975)의 결과와 유사한 결과가 나옴을 확인하였다. 이창훈 등(2005)은 Penney와 Price(1952)의 이론을 사용하여 반무한 방파제, 양익 방파제, 다양하게 배치된 방파제에 규칙파가 입사할 때 발생하는 회절 및 다중반사 현상을 예측하였다. 최근에 Lee 등(2009)은 비대칭성을 고려한 다방향불규칙파의 방

향분산함수를 제안하였고, 미 동부의 8m 수심 해역에서 굴절에 의한 파랑의 비대칭 현상이 나타나고, 비대칭현상을 고려한 방향스펙트럼이 이를 무시한 것 에 비해 실측치를 더 정확히 표현함을 보였다.

본 연구에서 굴절에 의해 비대칭성이 발생한 다방향 불규칙파가 반무한 방파제 또는 양익방파제를 지나면서 회절이 발생하는 현상을 모의한 뒤 비대칭성을 무시한 결과와 비교하였다.

2. 굴절 및 회절 계산법

본 연구에서 10m 수심의 천해에서 반무한 방파제 및 양익방파제를 지나는 다방향 불규칙파의 회절을 모의한다. Lee 등(2009)의 방법을 따라 굴절 및 천수 현상을 재현하였다. 즉, 먼저 심해파조건을 가정하고 등수심선이 평행한 해역을 따라 10m 수심까지 굴절 및 천수의 과정을 거친 해석해를 사용하여 이를 근사적으로 표현하는 방향 스펙트럼을 찾는다. 그리고, 비대칭성을 고려한 경우와 이를 무시한 경우의 스펙트럼을 사용하여 회절을 계산하여 그 결과를 비교한다.

심해파 조건은 유의파고 $H_{1/3}=5m$, 유의파주기는 $T_{1/3}=10s$, $s_{max}=10$ 이다. 방향스펙트럼을 주파수 및 방향별로 분리하여 각 성분의 굴절 및 천수 현상을 모의한 뒤 10m 수심에서 선형 중첩한다. 예를 들어, 1 지점에서 2 지점으로 전파하는 방향 스펙트럼의 굴절 및 천수 현상을 다음 식으로 계산한다.

$$S_2(f, \theta_2) df d\theta_2 = S_1(f, \theta_1) K_s^2 K_r^2 df d\theta_1 \quad (1)$$

여기서, $K_s = \sqrt{(C_g)_1 / (C_g)_2}$ 는 천수계수이고, $K_r = \sqrt{\cos\theta_1 / \cos\theta_2}$ 는 굴절계수이고, θ 는 해안선에 수직인 선을 기준으로 한 입사각이고, C_g 는 파의 군속도로써 파속 C 와 다음 관계에 있다.

1 세종대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

2 발표자: 현대산업개발(주) 토목사업본부 토목설계팀 대리

3 (주)대영엔지니어링 기술연구소 과장

$C_g = C[1 + 2kh/\sinh(2kh)]/2$, $C = w/k$ (2)
 식 (2)에서 ω 는 각진동수, k 는 파수를 뜻하며, 각각은 선형의 분산관계를 만족하는 것으로 가정하였다.

심해에서의 입사파 및 10m 수심에서 방향 스펙트럼을 표현하기 위하여 JONSWAP 주파수 스펙트럼 (Hasselmann 등, 1973)을 사용하였고, 비대칭성을 고려한 방향분산함수(Lee 등, 2009)를 사용하였다. 방향 스펙트럼을 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

위 식에서 $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼으로 본 연구에서 사용한 JONSWAP 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^{-4}] \times \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2/2\sigma^2]} \quad (4)$$

여기서

$$\beta_J = \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} \times [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (5)$$

$$T_p \approx T_{1/3} / [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (6)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 : f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09 : f \geq f_p \end{cases} \quad (7)$$

$$\gamma = 1 \sim 7 \text{ (mean value of 3.3 is used here)} \quad (8)$$

그리고 γ 는 첨두신장인자이다. 식 (3)에서 $G(f, \theta)$ 방향분산함수로 Lee 등(2009)이 제안한 방향분산함수는 다음과 같다.

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \xi \right) \quad (9)$$

여기서

$$\xi = \begin{cases} \exp(-\mu) : \theta \geq \theta_p \\ \exp(\mu) : \theta \leq \theta_p \end{cases} \quad (10)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \xi \right) d\theta \right]^{-1} \quad (11)$$

그리고 μ 는 비대칭계수로서 $\mu = 0$ 이면 방향분산함수가 대칭이고, $\mu \neq 0$ 이면 비대칭이다. $\theta_p(f)$ 는 주기의 함수인 주 파향각으로 심해파 조건에서 굴절 효과를 고려하여 다음 식으로 구한다.

$$\theta_p(f) = \sin^{-1} \left(\frac{C(f)}{C_0(f)} \sin \theta_{p0} \right) \quad (12)$$

여기서 아래첨자 0은 심해를 의미한다. 각 성분파를 선형 중첩한 엄밀해와 이를 식 (4), (9)로 표현한 근사해의 백분율 오차 E_p 를 다음과 같이 구하였다.

$$E_p = \frac{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} |E_{n_{i,j}} - E_{e_{i,j}}|}{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} E_{e_{i,j}}} \times 100 (\%) \quad (13)$$

여기서, E_e 는 엄밀해의 에너지를 뜻하며, E_n 은 근사화해의 에너지를 나타낸다. 아래첨자 i 와 j 는 각각 i 번째 주파수 성분과 j 번째 방향 성분을 나타낸다. 엄밀해의 계산 및 다방향 스펙트럼과의 근사화 하기 위해서 방향 스펙트럼을 51개 주파수 성분과 181개의 방향 성분으로 분리하였다. 주파수는 0.05Hz에서 0.25Hz까지 적용하여 $\Delta f = 0.004Hz$ 가 적용되었으며, 방향은 -90° 에서 90° 까지 $\Delta\theta = 1.0^\circ$ 가 적용되었다. 각 수심 단계별로 무수히 많은 spreading parameter s_{\max} 와 비대칭계수 μ 를 적용시켜 퍼센트 오차가 최소화 되는 s_{\max} 및 μ 를 찾았으며, 이를 통해 스펙트럼 식을 근사화 하였다. 비대칭을 무시하는 경우(Goda와 Suzuki, 1975) s_{\max} 만을 근사화 하였다.

3. 굴절 및 회절 계산결과

Fig. 1은 심해에서 입사파의 방향스펙트럼을 도시한 것이고, Fig. 2는 심해에서 해안선에 수직인 선을 기준으로 $\theta_p = 30^\circ$ 로 입사한 파가 $h=10m$ 수심에서 계산된 방향스펙트럼을 도시한 것이다. Fig. 2(a)는 방향의 비대칭성을 고려한 것과 엄밀해를 비교한 것이고, Fig. 2(b)는 비대칭성을 무시한 것(Goda와 Suzuki, 1975)과 엄밀해를 비교한 것이다. 그림에서 보다시피 $h=10m$ 수심에서 굴절에 의한 비대칭성이 확연히 나타났다고, 이를 무시하면 오차가 크게 발생함을 알 수 있었다. 비대칭성을 고려한 본 연구 방법을 따르면 $h=10m$ 수심에서 주 방향이 $\theta_p = 17^\circ$ 가 되었고, 방향분산계수가 $s_{\max} = 51.5$, 비대칭 계수가 $\mu = -0.24$ 로 나왔다. 이는 비대칭성이 확연하다는 것을 의미한다. 반면 비대칭성을 무시한 Goda와 Suzuki 방법을 따르면 $s_{\max} = 50.3$ 이 나와 방향분산의 정도를 실제보다 과다하게 추정하는 경향이 발생한다. 반무한 방파제가 해안선에 나란하게 오른쪽으로 배치되는 경우 방파제 뒤쪽(즉, 주 방향을 기준으로 -방향)으로 더 많은 에너지가 전파할 것이다(Fig. 2(b) 참조).

수심 $h=10m$ 에서 반무한 방파제와 양의 방파제를 지나는 다방향 불규칙파의 회절을 해석하기 위해 Penney와 Price(1952)의 회절이론을 사용하였다. 10m 수심에서 주파수 및 방향별 성분파의 회절을 계산한 후, 모든 성분을 선형 중첩한 뒤 회절계수를 다음과 같이 계산하였다.

$$K_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} S(f_i, \theta_j) K_d^2(f_i, \theta_j) df_i d\theta_j}{\sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} S(f_i, \theta_j) df_i d\theta_j}} \quad (14)$$

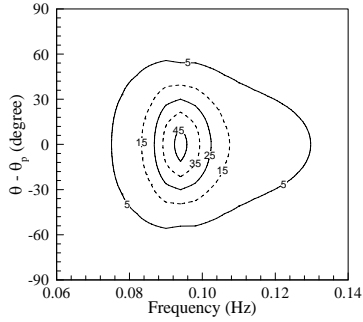


Fig. 1. Input JONSWAP spectrum (unit: m^2/Hz , $H_{1/3}=5m$, $T_{1/3}=10s$, $s_{max}=10$)

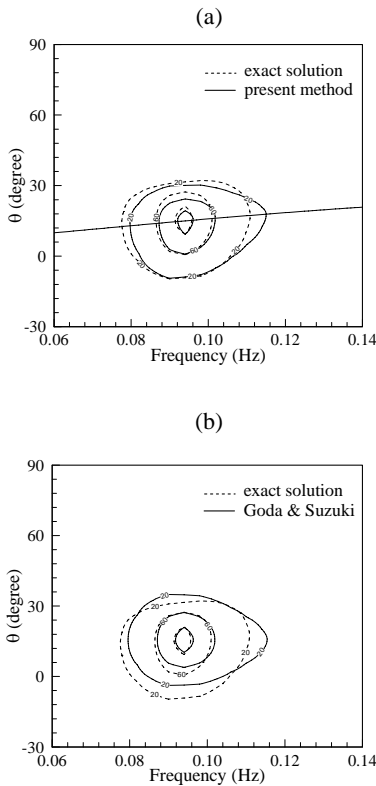


Fig. 2. Comparison of best-fit directional wave spectrum to exact solution at $h=10m$ ($\theta_p = 30^\circ$ and $s_{max}=10$ in deep water): (a) present method, (b) Goda and Suzuki's method.

Fig. 3은 심해에서 $\theta_p = 30^\circ$ 각도로 출발하여 $h=10m$ 에 배치된 반무한 방파제에 부딪치는 다방향 불규칙파의 유의파고를 도시한 것이다. 유의파고는 입사파로 무차원화 시켰다. 방파제는

$x > 0, y = 0$ 인 선상에 배치되어 있다. 실선은 방향의 비대칭성을 고려한 경우이고, 파선을 이를 무시한 경우이다. 방파제 뒤쪽 (즉, $y > 0$)은 비대칭성을 고려한 파의 에너지가 이를 무시한 경우에 비해 더 크게 나왔다. 이는 비대칭성을 무시하여 설계하면 실제 파랑에너지를 과소평가하여 배후지 구조물에 피해가 클 수 있음을 의미한다. 방파제 전면에서는 비대칭성을 고려한 경우의 파랑에너지가 이를 무시한 경우에 비해 약간 작게 나왔다.

Fig. 4는 심해에서 $\theta_p = -30^\circ$ 각도로 출발하여 $h=10m$ 에 배치된 반무한 방파제에 부딪치는 다방향 불규칙파의 유의파고를 도시한 것이다. 주 방향을 기준으로 왼쪽의 파랑에너지가 오른쪽에 비해 더 크므로 방파제 뒤쪽 (즉, $y > 0$)은 비대칭성을 고려한 파의 에너지가 이를 무시한 경우에 비해 더 작게 나타났다. 이는 Fig. 3과 반대로 나타난 현상이다.

Fig. 5는 심해에서 $\theta_p = 30^\circ$ 각도로 출발하여 $h=10m$ 에 배치된 양의 방파제(개구부 폭이 한파장임)에 부딪치는 다방향 불규칙파의 유의파고를 도시한 것이다. 방파제는 $x/L > 2, x/L < 2, y = 0$ 선상에 배치되어 있다. 방파제 뒤 오른쪽 (즉, $x > 0, y > 0$)은 비대칭성을 고려한 파의 에너지가 이를 무시한 경우에 비해 더 크게 나왔고, 반면 왼쪽 (즉, $x < 0, y > 0$)은 더 작게 나왔다. 이는 다방향 불규칙파의 오른쪽 성분이 왼쪽 성분에 비해서 에너지가 더 크기 때문이다. 방파제 전면에서도 유사하게 오른쪽에서는 비대칭성을 고려한 파의 에너지가 이를 무시한 경우에 비해 더 크게 나왔고, 왼쪽에서는 그 반대의 경향이 나왔다.

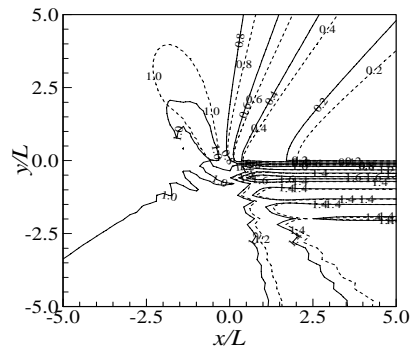


Fig. 3. Normalized significant wave height around a semi-infinite breakwater at $h=10m$ ($\theta_p = 30^\circ$ and $s_{max}=10$ in deep water): solid line = present method, dashed line = Goda and Suzuki's method.

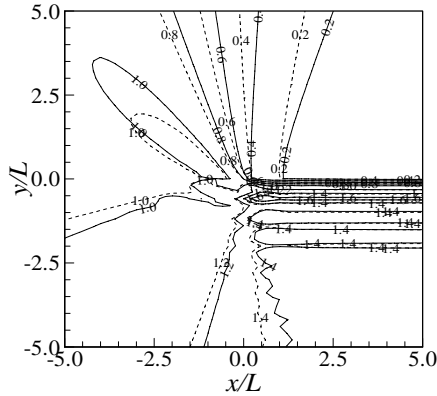


Fig. 4. Normalized significant wave height around a semi-infinite breakwater at $h=10\text{m}$ ($\theta_p = -30^\circ$ and $s_{\text{max}} = 10$ in deep water): solid line = present method, dashed line = Goda and Suzuki's method.

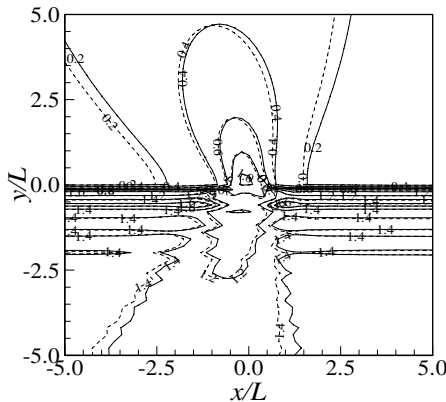


Fig. 5. Normalized significant wave height around a breakwater gap with L at $h=10\text{m}$ ($\theta_p = 30^\circ$ and $s_{\text{max}} = 10$ in deep water): solid line = present method, dashed line = Goda and Suzuki's method.

4. 결 론

본 연구에서 굴절에 의해 발생한 방향성분의 비대칭성을 고려하여 반무한 방파제 및 양익 방파제 주위에서 다방향 불규칙파의 회절을 해석하였으며, 이를 비대칭성을 무시한 경우와 비교하여 다른 결과를 얻었다. 입사파의 주 방향이 해안선에 수직인 선을 기준으로 왼쪽이고 방파제가 해안선과 나란하게 오른쪽으로 배치된 경우(통상적인 경우임) 방파제 뒤로 (즉,

오른쪽으로) 더 많은 에너지가 전파하였다. Goda와 Suzuki(1975)는 이러한 파랑의 비대칭성을 무시하여 방파제 뒤로 에너지의 전파를 과소평가하였다. 그들의 방법을 따라 설계하면 방파제 배후지의 피해가 크게 날 수 있다. 양익방파제에서도 굴절에 의한 파랑의 비대칭성으로 방파제 뒤로 회절된 파에서도 좌우 비대칭성이 나타남을 확인하였다.

방파제는 대부분 천해역에 건설되므로, 굴절에 의한 스펙트럼의 비대칭을 고려한 경우의 결과가 보다 타당할 것이다. 따라서, 향후 방파제나 섬 배후지역에서의 설계파랑 산정 시 굴절에 의한 파랑의 비대칭성을 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(No.2009-0080576)의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- 이창훈, 김민균, 조용준 (2005). 방파제 주위에서 발생하는 파랑의 회절 및 다중반사. 한국해양해양공학회지, 17(4), 232-242.
- 정신태, 채장원, 강관수, 전인식 (1993). 반무한 방파제 주위에서의 불규칙파 회절에 대한 수치모형. 한국해양해양공학회지, 5(1), 45-50.
- 편종근, 이용규, 김철 (1987). Mathieu 함수를 이용한 파랑의 회절에 관한 연구. 공학기술연구소논문집, 명지대학교, 2, 1-22.
- Chen, H.S. (1987). Combined reflection and diffraction by a vertical wedge. Technical report CERC-87-16.
- Goda, Y., and Suzuki, Y. (1975). Computation of Refraction and Diffraction of Sea Waves with Mitsuyasu's Directional Spectrum, Tech. Note Port and Harbour Res. Inst., 230. (in Japanese).
- Hasselmann, K. et al. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). Deutsches Hydrographisches Zeitschrift, 8(12), pp. 1-95.
- Lee, C., Jung, J.-S., and Merrick, C. H. (2009). Asymmetry in directional spreading function of random waves due to refraction. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. (in press).
- Penney, W. G., and Price, A. T. (1952). The diffraction theory of sea waves by breakwaters and the shelter afforded by breakwaters. Philos. Tran. R. Soc. London, A(244), 236-253.
- Sommerfeld, A. (1896). Mathematische Theorie der Diffraction. Mathematische Annalen, 47, 317-374.