

장대 케이슨 방파제에 작용하는 다방향 불규칙파랑의 파력감소계수 산정

Calculation of the Peak-delay Force Reduction Parameter of Multi-Directional Random Waves Acting on a Long Caisson Breakwater

정재상* / 김범형** / 김형준*** / 조용식****

Jung, Jae-Sang / Kim, Bum Hyung / Kim, Hyung-Jun / Cho, Yong-Sik

Abstract

By employing multi-directional random waves, a parameter controlling the force acting on a long caisson breakwater is investigated in detail. Both JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) and asymmetric directional spectra are adopted for frequency and directional spectra. It is found that the parameter decreases as the length of caisson and the angle of main direction of incident waves increase. Furthermore, the parameter is much similar to that of regular waves as the maximum spreading parameter s_{max} increases. The parameter, however, decreases as asymmetry parameter μ increases when the main direction of incident waves is oblique to the breakwater.

Keywords : long caisson breakwater, multi-directional random waves, peak-delay force reduction parameter, asymmetry parameter

요 지

다방향 불규칙파랑을 입사파랑으로 적용하여 장대 케이슨 방파제에 작용하는 파력감소계수에 대하여 연구하였다. 다방향 불규칙파랑의 주파수 및 방향 스펙트럼으로 JONSWAP (Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼과 비대칭 방향 스펙트럼이 각각 적용되었다. 계산결과, 케이슨 방파제의 길이와 입사파랑 주파향의 입사각이 증가할수록 파력감소계수는 감소함을 알 수 있었다. 그리고 최대방향분포계수 s_{max} 가 증가할수록 파력감소계수는 규칙파와 유사한 경향을 보였다. 다방향 불규칙파랑이 방파제에 비스듬히 입사할 경우 비대칭계수 μ 가 증가할수록 파력감소계수는 감소하였다.

핵심용어 : 장대 케이슨 방파제, 다방향 불규칙파랑, 파력감소계수, 비대칭계수

1. 서 론

최근 지구온난화의 영향으로 많은 기상이변이 발생하고 있다. 이에 따라 항만 시설을 재해로부터 보호하는 방파제가 설치되는 해역에 이상 고파랑이 빈번하게 발생하

고 있는 실정이다. 특히 2003년 발생한 태풍 매미에 의해 전국의 항만 시설에 막대한 피해가 발생하였다. 이에 항만 구조물 설계를 위한 심해 설계와 제원이 태풍 매미를 반영하여 대폭 상향되었다(해양수산부, 2005). 우리나라의 경우 방파제를 케이슨으로 시공하게 된지 약 10여년

* 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사과정 (한국농어촌공사 농어촌개발처, e-mail: beren@hanyang.ac.kr)
Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

** 현대산업개발 토목사업본부 토목설계팀장 (e-mail: 5701@hyundai-dvp.com)

*** 한양대학교 일반대학원 건설환경공학과 (한국건설기술연구원 하천-해안항만연구실 박사 후 연구원, e-mail: john0705@hanyang.ac.kr)

**** 교신저자, 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author, e-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

밖에 되지 않아서 아직은 큰 피해가 발생하지는 않았다. 하지만 일본의 경우 이상 고파랑에 의해 많은 케이슨 방파제에 피해가 발생하고 있으며, 특히 활동 피해사례가 66%로 가장 빈번한 것으로 보고되었다(Takayama and Higashira, 2002). 일본에서는 이상 고파랑에 대한 저항성이 우수한 방파제의 고안에 많은 노력을 기울였으며, Takahashi and Shimosako (1990)에 의해 장대화 케이슨이 제안되었다. 국내에서도 케이슨간 엇물림 효과를 이용하여 장대화한 인터록킹 방파제를 개발한 사례가 있다(현대산업개발, 2009).

장대화 케이슨의 기본 개념은 케이슨을 길게 제작하여, 입사파의 방파제 법선 방향 위상차로 인해 파력 감소 효과를 얻을 수 있다는 것이다. Takahashi and Shimosako (1990)는 규칙파에 대한 파력 감소계수를 산정하였으며, 일방향 불규칙파에 대해서는 Goda (2000)의 파압공식을 이용하여 파력감소계수 산정식을 제안하였다. 또한, 3차원 수리모형실험을 통해 이론을 검증하였다. 하지만 일반적으로 실제 해역에서 전파하는 파랑은 일방향의 장봉파(Long-crested waves)가 아니라, 다방향의 특성을 갖는 단봉파(Short-crested waves)이다. Takahashi and Shimosako (1990)는 파랑의 다방향성을 고려하지 않았기 때문에 방파제에 수직으로 입사하는 파랑에 대해서는 구조물의 장대화에 따른 파력의 감소 효과가 없는 것으로 보고하였다. 하지만, 다방향의 특성을 갖는 단봉파가 내습할 경우, 주파향이 방파제에 수직으로 입사할지라도 방파제 전체에 걸쳐 최대파압이 작용하는 일은 발생하지 않을 것이다.

단봉파(Short-crested waves)의 특성을 갖는 파랑이 내습할 경우 연직구조물 및 해저관로 등의 장대 구조물(Long structure)에 작용하는 파력에 대해서는 Battjes (1982)에 의해 최초로 연구되었다. Battjes는 규칙파가 경사지게 입사할 경우 장대 구조물에 작용하는 파력의 감소 효과에 대해 계산하였으며, 다방향 불규칙파에 대해서도 파력감소계수(peak-delay force reduction parameter)를 제시하였다. 그리고 방파제에 수직으로 입사하는 단봉파의 경우 장봉파에 비해 파력감소 효과가 크다는 점을 밝혔다. 하지만, 주기 스펙트럼은 고려하지 않았다. Burcharth and Liu (1998) 역시 주기 스펙트럼은 무시하고 방향 스펙트럼만을 고려하여 장대 케이슨 방파제에 작용하는 파력의 감소효과를 계산하였다. Isaacson and Nwogu (1987)는 부유식 구조물에 작용하는 다방향 불규칙파랑의 파력에 대해 계산하였으며, 주기효과를 추가로 고려하였다. Sannasiraj et al. (1995)은 Isaacson and Nwogu (1987)의 연구를 확장하여, 주기에 따라 방향분포정도가 다른 Mitsuyasu 타입의 방향분포계수를 적용 부유식 구

조물에 작용하는 파력을 계산하였다. 하지만 Isaacson and Nwogu (1987) 및 Sannasiraj et al. (1995)은 부유식 구조물에 대해서만 구조물의 장대화에 따른 파력 감소효과를 검토하였다. 국내에서의 유사한 연구사례로 허동수 등(2006)이 3차원 VOF (Volume of Fluid)법을 적용하여 케이슨 방파제에 작용하는 파압에 대해 검토하였다. 허동수 등은 케이슨 방파제에 입사하는 파랑의 회절로 인해 방파제 전, 후에 위상차가 발생하여 일반적으로 방파제 안정계산에 적용하는 파압식의 계산결과보다 더욱 큰 파압이 작용할 수 있다는 결과를 보였다. 하지만, 장대케이슨에 작용하는 다방향불규칙파랑의 파력감소효과에 대해서는 검토하지 않았다.

본 연구에서는 Sannasiraj et al. (1995)과 마찬가지로 주기에 따라 방향분포정도가 다른 방향 스펙트럼뿐만 아니라 주파수 스펙트럼까지 고려하여 장대케이슨에 작용하는 파력의 평활화 계수를 계산하였다. 또한 Lee et al. (2010)에 의해 제안된 비대칭 방향분포함수에 대해서도 파력감소계수를 추가로 계산하였다. 주파수 스펙트럼으로는 Hasselmann et al. (1973)에 의해 제안된 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였으며, 방향스펙트럼으로는 Mitsuyasu et al. (1975)에 의해 제안된 주기에 의존적인 방향 스펙트럼에 비대칭 효과를 추가한 Lee et al. (2010)의 식을 적용하였다.

2. 규칙파의 파력감소계수

장대 케이슨에 작용하는 파력의 감소효과는 케이슨 각 지점에서 파력이 최대가 되는 시간에 위상차가 생김으로 인해 발생한다. 따라서 장대 케이슨 전체에 작용하는 파력에 대해 평균을 취한 값이 작용함으로써 파력이 상당히 저감되는 효과가 발생하게 된다. 장대 케이슨에 작용하는 파랑에 대한 각종 변수 설명 및 개념도는 Fig. 1과 같으며, 케이슨 길이는 L_B , 파의 입사각은 θ , 입사 파랑의 파장은 L 로 정의한다.

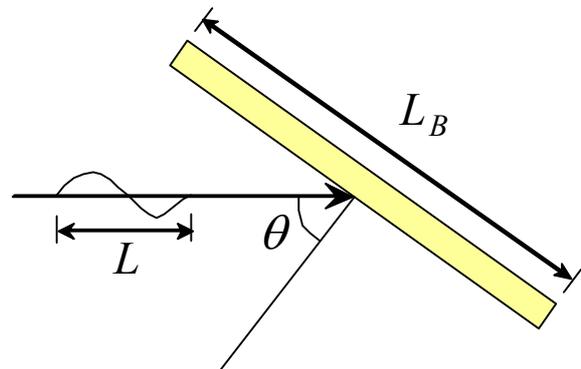


Fig. 1. A Schematic Sketch of Obliquely Incident Wave to the Long Caisson Breakwater

Battjes (1982)에 의해 제안된 규칙파의 파력감소계수 δ 는 다음과 같다.

$$\delta = \left| \frac{\sin(\pi L_B \sin\theta/L)}{\pi L_B \sin\theta/L} \right| \quad (1)$$

3. 입사파랑 스펙트럼식

입사파랑은 다방향 불규칙파랑을 적용하였다. 다방향 불규칙파랑을 구성하는 주파수 스펙트럼으로는 JONSWAP 스펙트럼이 적용되었으며, 이는 Eq. (2)와 같다 (Hasselmann et al., 1973; Goda, 2000).

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

$$\beta_j \cong \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (3)$$

$$T_p \cong T_{1/3} [1 - 0.132(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (4)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07: & f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09: & f \geq f_p \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma = 1 \sim 7 \text{ (mean value of 3.3 is used here)} \quad (6)$$

여기서, $H_{1/3}$ 은 유의파고, $T_{1/3}$ 은 유의주기, T_p 는 첨두 주기, 그리고 f 는 주파수를 뜻한다.

Mitsuyasu et al. (1975)에 의해 제안된 방향스펙트럼식에 방향에 대한 비대칭을 고려하여 Lee et al. (2010)에 의해 수정된 식은 다음과 같다.

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \xi \right) \quad (7)$$

$$\xi = \begin{cases} \exp(-\mu), & \theta \geq \theta_p \\ \exp(+\mu), & \theta \leq \theta_p \end{cases} \quad (8)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \right) \xi d\theta \right]^{-1} \quad (9)$$

$$s = \begin{cases} s_{\max} (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ s_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & : f \geq f_p \end{cases} \quad (10)$$

여기서, f_p 는 첨두주파수, θ_p 는 주파향의 입사각, s_{\max} 는 최대 방향분포계수 (maximum spreading parameter)를 뜻한다. 입사하는 다방향 불규칙파랑의 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S(f, \theta) = S(f) G(f, \theta) \quad (11)$$

유의파 주기와 첨두 주파수와의 관계는 Goda (2000)에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$f_p = 1/(1.05 T_{1/3}) \quad (12)$$

구조물의 장대화에 따른 파력 감소계수 계산을 위해 수심은 10 m, 입사파랑의 유의주기는 10초, 유의파고는 5.0 m를 적용하였다. 파랑의 주기와 파장의 관계는 다음과 같은 선형의 분산관계식을 만족한다.

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (13)$$

여기서, ω 는 각진동수 (angular frequency), k 는 파수 (wave number)를 뜻한다.

4. 파력감소계수의 산정

방파제 구조물의 장대화에 따른 다방향 불규칙파랑의 파력감소계수 산정식은 Eq. (14)와 같이 정의된다.

$$\delta_r = \frac{(H_{1/3})_r}{H_{1/3}} \quad (14)$$

여기서, $H_{1/3} = \sqrt{8 \sum_{i=1}^{i_{\max}} \sum_{j=1}^{j_{\max}} a(f_i, \theta_j)^2}$ 이며, $a(f_i, \theta_j)$ 는 각 주기 및 파향에 해당하는 성분파의 진폭을 뜻한다. 다방향 불규칙파랑에서 각 방향 및 주파수에서의 진폭은 Eq. (15)와 같이 표현되며, 파력 감소효과를 고려한 진폭 $a_r(f_i, \theta_j)$ 은 Eq. (16)과 같다.

$$a(f_i, \theta_j) = \sqrt{2S(f_i) G(f_i, \theta_j) \Delta f \Delta \theta} \quad (15)$$

$$a_r(f_i, \theta_j) = \sqrt{2\delta(f_i, \theta_j) S(f_i) G(f_i, \theta_j) \Delta f \Delta \theta} \quad (16)$$

여기서, $\delta(f_i, \theta_j)$ 는 각 주파수 및 방향에서 규칙파의 파력 감소계수를 뜻하며, Eq. (1)을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는, $\Delta f = 0.005\text{Hz}$, $\Delta \theta = 1^\circ$ 를 적용하였다. Eqs. (15) and (16)을 Eq. (14)에 대입하여 연속적인 형태로 표현한 파력의 감소계수 산정식은 Eq. (17)과 같다.

$$\delta_r = \sqrt{\frac{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \delta^2(f, \theta) S(f) G(f, \theta) df d\theta}{\int_{-\pi}^{\pi} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(f) G(f, \theta) df d\theta}} \quad (17)$$

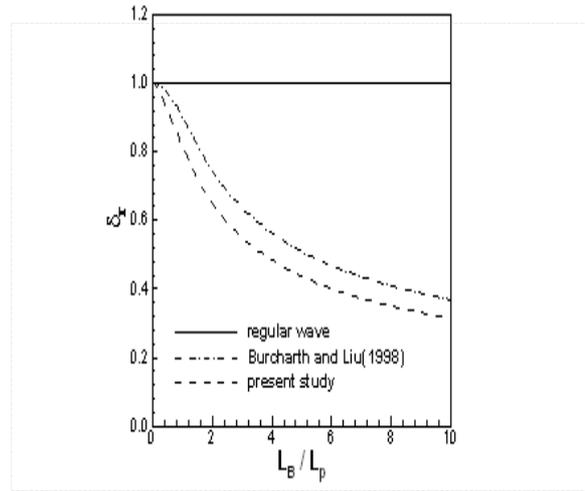
5. 수치해석 결과

5.1 기존 연구결과와의 비교

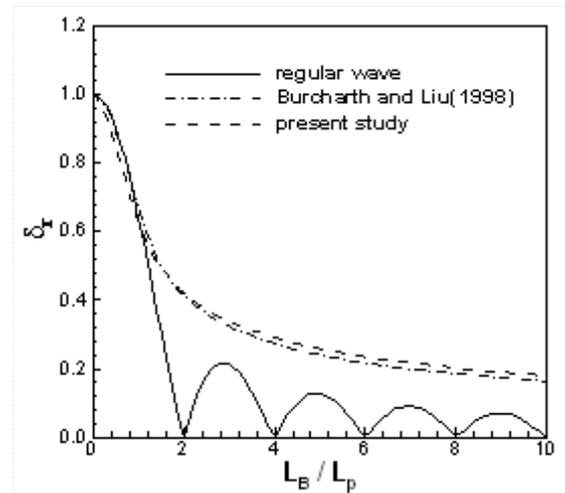
장대 케이슨 방파제에 작용하는 파력감소계수는 Eq. (17)을 이용하여 계산하였다. Eq. (17)의 적분식은 사다리꼴 방법을 사용하여 수치적으로 계산하였다. 스펙트럼의 주파수 성분은 0.05 Hz에서 0.5 Hz까지 $\Delta f = 0.005$ Hz를 적용하여 총 46개 성분으로 분해하였으며, 방향 성분은 -90° 에서 90° 까지 $\Delta\theta = 1^\circ$ 를 적용하여 총 181개 성분으로 분해하였다. 즉, 총 8,326개의 파랑 성분을 합성하여 파력감소계수를 계산하였다.

다방향 불규칙파를 대상으로 장대케이슨 방파제에 작용하는 파력감소계수의 계산 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 θ_p 는 다방향 불규칙파랑의 주파향을 뜻하며, 규칙파 및 다방향 불규칙파의 파력감소계수에 대해서 비교하였다. 다방향 불규칙파의 경우는 Burcharth and Liu (1998)에 의해 제시된 주파향에서 방향스펙트럼만 고려한 결과와 주기 성분에 따른 영향을 고려한 본 연구에 의한 결과를 모두 도시하였다. 입사각이 0도인 경우 규칙파는 파력감소효과가 없었으며, 따라서 다방향 불규칙파에 비해 장대화에 따른 파력감소계수는 크게 계산되었다. 그리고 주기 성분을 고려한 본 연구에 의한 결과가 주기 성분을 무시한 Burcharth and Liu (1998)의 결과보다 입사각이 0도일 때 작게 계산되었다. 이와 같은 결과는 일반적인 주파수 스펙트럼에서 침두 주파수보다 큰 단파 성분의 에너지가 장파 성분의 에너지보다 크기 때문에 발생한다. 주파향의 입사각이 30도 및 60도인 경우 규칙파의 파력감소계수는 다방향 불규칙파에 비해 작게 계산되었다. 입사각이 30도 및 60도로 큰 경우에도 L_B/L_p 가 1.0 이하에서는 주파수 성분을 모두 고려한 본 연구에 의한 결과가 Burcharth and Liu의 결과보다 작게 계산되었다. 하지만 입사각이 30도 및 60도로 큰 경우에 L_B/L_p 가 1.0 이상일 때는 주파수 성분을 고려한 경우가 무시한 경우에 비해 파력감소계수는 다소 크게 계산되었다.

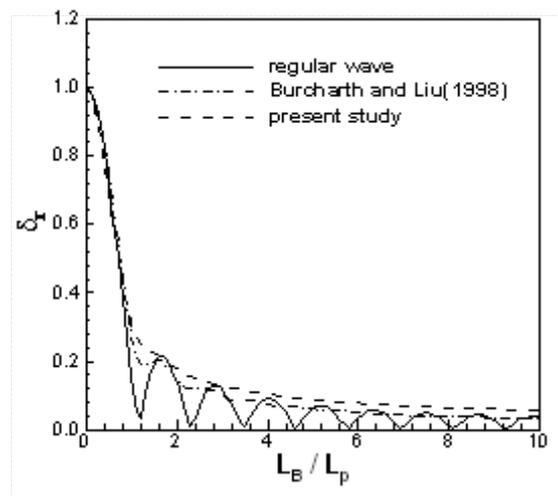
입사파가 다방향 불규칙파인 경우 주파향의 입사각에 따른 파력감소계수를 계산하였으며, Fig. 3에 그 결과를 도시하였다. Fig. 3을 통해 입사파랑의 입사 각도가 클수록 구조물의 장대화에 따른 파력감소계수는 작게 계산됨을 알 수 있다. Figs. 2 and 3을 종합해 보면, 주 입사파랑의 입사 각도가 크고 케이슨의 길이가 길수록 파력 감소효과는 더욱 커진다. 그리고 수직으로 입사하는 경우는 규칙파에 비해 다방향 불규칙파의 파력감소효과가 크며, 경사지게 입사하는 경우는 반대로 다방향 불규칙파의 파력감소효과가 규칙파에 비해 작게 나타난다. 참고로 Figs. 2 and 3에서 $\gamma = 3.3$, $s_{\max} = 25$ 가 적용되었다.



(a) $\gamma = 3.3$, $\theta_p = 0^\circ$, $s_{\max} = 25$



(b) $\gamma = 3.3$, $\theta_p = 30^\circ$, $s_{\max} = 25$



(c) $\gamma = 3.3$, $\theta_p = 60^\circ$, $s_{\max} = 25$

Fig. 2. Comparison of the Force Reduction Parameters of Regular and Multi Directional Random Waves

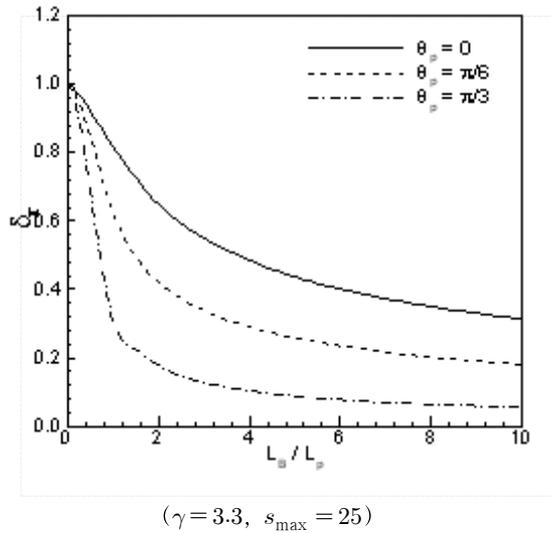


Fig. 3. Variations of the Force Reduction Parameters Due to Incident Peak Wave Direction

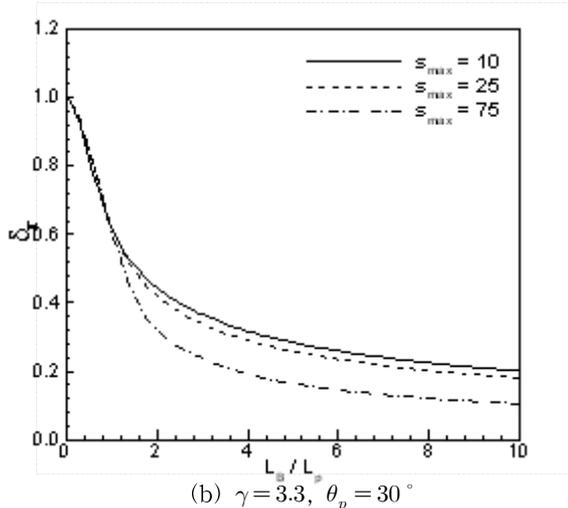
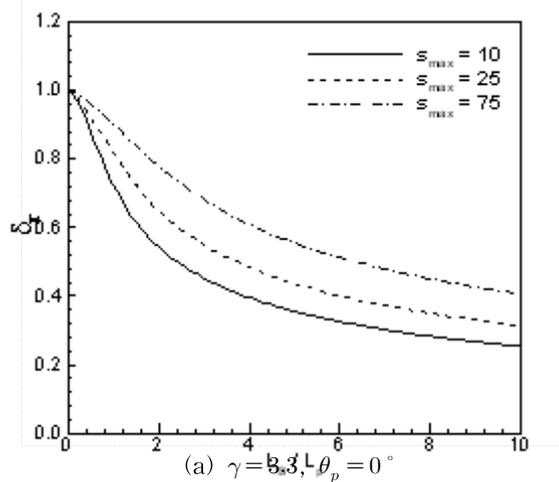


Fig. 4. Variations of the Force Reduction Parameters Due to s_{max}

5.2 최대방향분포계수에 따른 파력감소계수

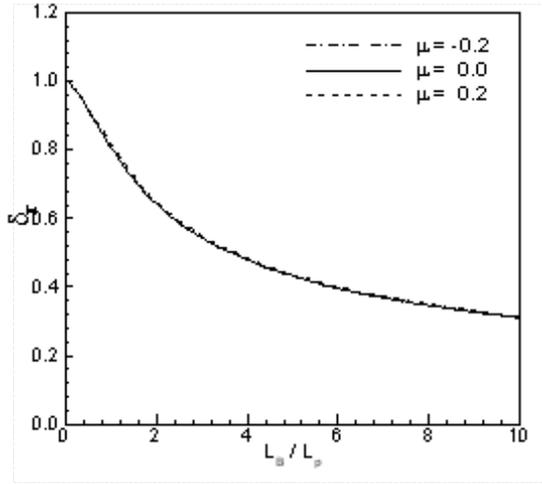
최대방향분포계수 (maximum spreading parameter) s_{max} 의 변화에 따른 파력감소계수의 변화에 대해 계산하였으며, Fig. 4에 그 결과를 도시하였다. 최대방향분포계수 s_{max} 가 10인 경우 (방향 분포가 넓은 경우)와 s_{max} 가 25 및 75인 경우 (방향 분포가 좁은 경우)에 대해서 파력감소계수를 계산하였다. 방향집중도가 비교적 큰 s_{max} 가 75인 경우는 일방향 불규칙파의 파력감소계수와 유사한 결과를 보였다. 따라서 Fig. 2의 결과와 마찬가지로 주파향의 입사각이 0도인 경우 s_{max} 가 클수록 파력 감소계수는 크게 계산되었으며, 입사각이 30도인 경우는 s_{max} 가 클수록 파력 감소계수는 오히려 작게 계산되었다.

5.3 방향 비대칭성에 따른 파력감소계수

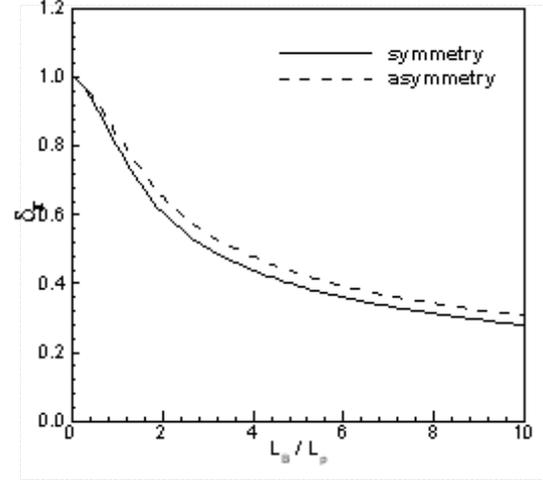
비대칭계수 μ 에 따른 파력감소계수를 계산하여 Fig. 5에 그 결과를 도시하였다. Fig. 5(a)는 주파향의 입사각이 0도인 경우이며, Fig. 5(b)는 주파향의 입사각이 30도인 경우이다. Fig. 5에서도 Fig. 2 및 Fig. 3과 마찬가지로 $\gamma = 3.3$, $s_{max} = 25$ 가 적용되었다. 주파향의 입사각이 0도인 경우는 비대칭계수 μ 에 따른 파력 감소계수의 차이는 크지 않았다. 이는 방향분포함수의 비대칭성 때문에 주파향을 기준으로 했을 때 한쪽 경사성분은 감소하며, 반대쪽 경사성분은 증가하여 비대칭계수 μ 의 차이로 인한 파력 감소계수는 거의 변하지 않게 된다. 즉, 방파체에 수직으로 입사할 경우, 입사파랑의 방향에 대한 비대칭성은 파력의 크기에 거의 영향을 미치지 않는다.

Fig. 5(b)의 경우 비대칭계수 μ 가 클수록 파력감소계수는 작게 계산되었다. Fig. 5(b)에서 주파향의 입사각은 30도이다. 따라서 비대칭계수가 0보다 큰 경우 주파향의 입사각 30도를 중심으로 입사각이 더 큰 성분은 증가하며, 입사각이 30도 이하인 성분은 감소하게 된다. 하지만 방파체에 수직인 0도를 기준으로 보았을 때 결국 경사지게 입사하는 성분은 전체적으로 증가하게 된다. 반면 비대칭계수가 0보다 작은 경우는 그 반대가 되어 0도를 기준으로 경사지게 입사하는 성분은 감소하게 된다. 따라서 입사하는 다방향 불규칙파랑의 주파향의 입사각은 방향분포함수가 대칭인 경우 ($\mu = 0$)를 기준으로 μ 가 0보다 큰 경우는 파력 감소계수가 작으며, μ 가 0보다 작은 경우는 장대화에 의한 파력감소계수가 크다. 이상의 결과를 통해 경사지게 입사하는 다방향 불규칙파랑의 경우, 방향분포함수의 비대칭성을 고려하여 장대화 케이스에 작용하는 파력을 계산하는 것이 바람직할 것으로 판단할 수 있다.

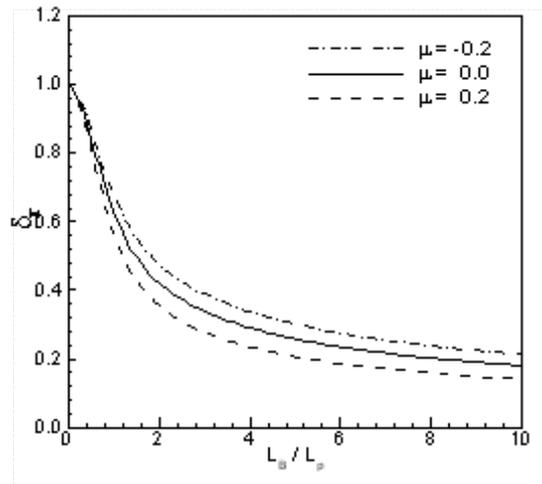
실제 해역에서 심해에서 생성된 대칭인 방향분포함수의 형태를 갖는 다방향 불규칙파랑이 천해로 전파함에 따



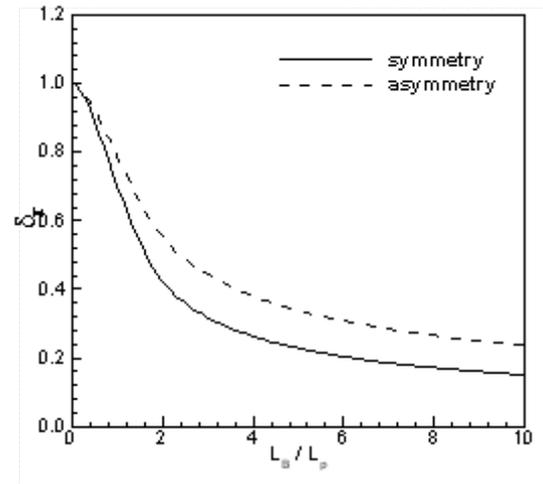
(a) $\gamma = 3.3, \theta_p = 0^\circ, s_{\max} = 25$



(a) $(\theta_p)_0 = 30^\circ$



(b) $\gamma = 3.3, \theta_p = 30^\circ, s_{\max} = 25$



(b) $(\theta_p)_0 = 60^\circ$

Fig. 5. Variations of the Force Reduction Parameters Due to Asymmetry Parameter μ

Fig. 6. Variations of the Force Reduction Parameters at $h=10$ m for the Numerical Condition of Lee et al. (2010) as Varying Relative Length of Long Caisson Breakwater

라 굴절에 의해 비대칭 형태의 방향분포함수로 변형된다는 것은 Lee et al. (2010)에 의해 밝혀졌다. 본 연구에서는 Lee et al. (2010)의 수치실험을 재현하여 일정경사면을 비스듬히 전파하는 다방향 불규칙파에 대해 수심 10m 지점에서의 다방향 불규칙파 스펙트럼을 구하였으며, 이를 이용하여 장대화 케이슨에 작용하는 파력 감소계수를 계산하였다. 다방향 불규칙파랑의 굴절은 Lee et al. (2010)의 식을 적용하여 계산하였으며, 이는 Eqs. (18) and (19)와 같다.

$$S_2(f, \theta_2) df d\theta_2 = S_1(f, \theta_1) K_s^2 K_r^2 df d\theta_1 \quad (18)$$

$$K_s = \sqrt{(C_g)_1 / (C_g)_2}, K_r = \sqrt{\cos\theta_1 / \cos\theta_2} \quad (19)$$

$$C_g = C [1 + 2kh / \sinh(2kh)] / 2, C = w/k \quad (20)$$

여기서, 아래첨자 1과 2는 각각 상대적인 심해역과 천해역을 의미한다. 그리고 K_s 는 천수계수, K_r 은 굴절계수를 뜻하며, C_g 는 파의 군속도, C 는 파속, w 는 각진동수 그리고 k 는 파수를 나타낸다.

파력감소계수의 계산 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)는 심해에서의 주파향 입사각이 30도인 경우이며, Fig. 6(b)는 60도인 경우이다. 심해에서 주파향의 입사각이 0도인 경우는 굴절에 의한 비대칭이 발생하지 않으므로 본 연구에서는 제외하였다. 심해에서 다방향 불규칙파 스펙트럼의 제원으로 $s_{\max} = 10, H_{1/3} = 5.0m$ 및 $T_{1/3} = 10sec$ 를 적용하였다. 심해에서 입사각이 30도인 경우 비대칭을 고려하면 수심 10m 지점에서 파랑의 천수 및 굴절에 의해 $s_{\max} = 51.5, \mu = -0.24$ 로 변화하며, 비대칭을 무시할

경우에는 $s_{\max} = 50.3$, $\mu = 0$ 이다. 입사각이 60도인 경우 비대칭을 고려하면 $s_{\max} = 98.1$, $\mu = -0.44$ 이며, 비대칭을 무시하면 $s_{\max} = 80.5$, $\mu = 0$ 이 된다. 계산 결과, 다방향 불규칙파의 방향에 대한 비대칭을 고려한 경우가 대칭으로 가정한 경우에 비해 파력감소계수는 크게 계산되었다. 굴절에 의해 비대칭이 발생할 경우 Lee et al. (2010)의 연구에 따르면, 해안선에 수직인 방향으로 파랑 성분이 넓게 분포하는 경향이 있다. 즉, 비대칭을 고려한 경우, 방파제에 수직 방향인 성분의 에너지가 대칭만 고려한 경우에 비해 크게 되어 파력 감소계수는 크게 계산된다. 따라서 만약 장대 케이슨 방파제를 설계할 때 방향 성분의 비대칭을 고려하지 않는다면, 실제 작용하는 파압보다 과소평가하여 구조물의 안정에 문제가 발생할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

최근 빈번히 발생하는 기상이변에 대비해 재해에 강한 방파제로 구상된 장대 케이슨 방파제에 작용하는 파력의 감소효과를 계산하였다. 입사파랑은 다방향 불규칙파랑을 적용하였으며, 기존 연구에 더하여, 방향에 대한 비대칭효과를 추가하여 계산하였다.

계산 결과 장대케이슨의 상대길이 (L_B/L_p , L_p : 침두 주파수에서의 파장)가 길수록, 입사파랑의 주파각이 클수록 파력감소계수는 작게 계산되었다. 최대 방향 분포계수 (s_{\max})에 따른 파력감소계수 역시 계산하였다. s_{\max} 가 큰 경우는 일방향 불규칙파의 파력 감소계수와 유사한 결과를 보였다. 따라서 주파각의 입사각이 0도인 경우 (방파제에 수직으로 입사하는 경우) s_{\max} 가 클수록 파력감소계수는 크게 계산되었으며, 입사각이 30도인 경우 (방파제에 비스듬히 입사하는 경우)는 s_{\max} 가 클수록 파력감소계수는 작게 계산되었다.

방향분포함수의 비대칭효과를 고려하여 장대케이슨 방파제에 작용하는 파력 감소효과를 검토하였다. 계산결과, 방파제에 수직으로 입사할 경우 비대칭계수 μ 에 따른 파력감소계수의 차이는 크지 않았다. 하지만, 방파제에 비스듬히 입사할 경우에는 비대칭계수 μ 가 클수록 파력감소계수는 감소하였다.

마지막으로, Lee et al. (2010)의 수치실험 결과를 바탕으로 10m 수심에서 방파제에 작용하는 파력감소계수를 계산하였다. 수심 10m 지점에서의 다방향 스펙트럼으로는 굴절에 의해 비대칭이 고려된 경우와 대칭인 경우를 고려하였다. 다방향 불규칙파랑의 방향 비대칭을 고려하였을 경우 대칭인 경우에 비해 파력감소계수는 크게 계산되었다. 따라서 장대케이슨 방파제를 설계함에 있어 굴절

에 의한 비대칭을 고려하는 것이 보다 타당하며 안전한 설계가 될 것으로 생각된다.

본 연구에서는 이론적 계산에 의해 장대 케이슨에 작용하는 파력감소계수를 산정하였으며, 기존 연구사례에서도 이론적인 연구만 수행되었다. 따라서 향후 3차원 수리 모형실험을 통해 이론적 계산결과를 검증할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 미래해양기술개발사업 (해양재난예보시스템 구축방안 연구)의 연구비 지원으로 수행 되었습니다

참고문헌

- 해양수산부 (2005). **전해역 심해 설계파 추정 보고서**. 허동수, 염경선, 배기성 (2006). "혼성 방파제에 작용하는 3차원 파압구조에 미치는 위상차의 영향." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 563-572.
- 현대산업개발 (2009). **포항영일만항 외곽시설 (2-1단계) 축조공사 대안설계보고서**.
- Battjes, J.A. (1982). "Effects of short-crestedness on wave loads on long structures." *Applied Ocean Res.*, Vol. 4, No. 3, pp. 165-172.
- Burcharth, H.F., and Liu, Z. (1998). "Force reduction of short-crested non-breaking waves on caissons." Report of MAST II Project, Section 4.3, Part 4, Class II, Technical University of Braunschweig, Germany.
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific, Singapore.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Miller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., and Walden, H. (1973). "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (JONSWAP)." *Deutsches Hydrographisches Zeitschrift*, Vol. 8, No. 12, pp. 1-95.
- Isaacson, M., and Nwogu, O.U. (1987). "Wave loads and motions of long structures in directional seas." *J. Offshore Mech., and Arctic Eng.*, ASME, Vol. 109, May, pp. 126-132.
- Lee, C., Jung, J.-S., and Haller, M.C. (2010). "Asymmetry in directional spreading function of random waves due to refraction." *J. Waterway Port Coastal*

and *Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 136, Issue 1, pp. 1-9.

Mitsuyasu, H., Tasai, F., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., and Rikiishi, K. (1975). "Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy." *J. Physical Oceanography*, Vol. 5, No. 4, pp. 750-760.

Sannasiraj, S.A., Sundar, V., and Sundaravadivelu, R. (1995). "The hydrodynamic behaviour of long floating structures in directional seas." *Applied Ocean Res.*, Vol. 17, Issue 4, pp. 233-243.

Takahashi, S., and Shimosako, K. (1990). "Reduction of wave force on a long caisson of vertical breakwater and its stability." Report No. 685, The Port and Harbour Research Institute, Japan, (in Japanese).

Takayama, T., and Higashira, K. (2002). "Statistical analysis on damage characteristics of breakwaters." **海洋開發論文集**, Vol. 18, pp. 263-268. (in Japanese).

논문번호: 10-041	접수: 2010.05.24
수정일자: 2010.07.23/08.30	심사완료: 2010.08.30