

회절을 고려한 반무한방파제 형식의 장대구조물에 작용하는 파력 예측 Prediction of Wave Force on a Long Structure of Semi-infinite Breakwater Type Considering Diffraction

정재상* · 이창훈** · 조용식***

Jae-Sang Jung*, Changhoon Lee** and Yong-Sik Cho***

요지 : 본 연구에서는 회절을 고려하여 반무한방파제 형식의 직립식 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 검토하였다. 장대구조물에 작용하는 파력은 규칙파, 일방향 불규칙파 및 다방향 불규칙파를 대상으로 하였다. 방파제 전면 및 후면에서 발생하는 회절을 모두 고려하였다. 방파제의 상대길이(l/L)가 0인 경우 방파제에 작용하는 파력은 회절에 의해 0이 된다. 방파제의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 영향이 비교적 강하였으며, 방파제의 상대길이가 0.5 이상인 경우에는 방파제의 장대화 효과에 의해 작용 파력이 크게 감소하였다. 즉, 방파제의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절효과의 고려가 필요하며, 장대 방파제의 파력 감소효과를 얻기 위해서는 방파제의 상대길이가 최소 0.5 이상이어야 함을 알 수 있다.

핵심용어 : 회절, 반무한방파제, 장대구조물, 불규칙파

Abstract : In this study, the wave force distribution acting on a semi-infinite and vertical-type long structure is investigated considering diffraction. An analytical solution of the wave force acting on long structures is also suggested in this study. The wave forces on long structures are evaluated for monochromatic, uni-directional random, and multi-directional random waves. Diffraction effects in front of the breakwater and on the lee side of the breakwater are considered. The wave force on a long structure becomes zero when the relative length of the breakwater (l/L) is zero. The diffraction effects are relatively strong when the relative length of the breakwater is less than 1.0, and the wave forces decrease greatly for long structure when the relative length of the breakwater is larger than 0.5. Therefore, it is necessary to consider diffraction effects when the relative length of the breakwater is less than 1.0, and the relative length of the breakwater must be at least 0.5 in order to obtain a reduction of wave force on long structures.

Keywords : diffraction, semi-infinite breakwater, long structure, random waves

1. 서 론

최근 기후변화 등에 의해 우리나라에 영향을 미치는 태풍은 해마다 늘어나고 있으며, 이들 태풍에 의한 고파랑으로 해안지역에서 방파제 붕괴나 월파에 의한 침수피해 등이 발생하고 있다. 일본의 경우 방파제의 피해 유형으로 활동(sliding)이 가장 많으며, 약 66%를 차지하는 것으로 보고되었다(Takayama and Higashira, 2002). 우리나라에서도 최근 동해안 및 남해안에서 고파랑에 의한 방파제 활동피해사례가 보고되었다. 일반적으로 이와 같은 직립방파제의 활동 피해는 주로 예상치 못한 고파랑 내습에 의해 발생한다. 고파랑 내습시에는 파랑의 비선형 효과와 충격 파압의 효과가 크게 작용하며, 방파제 주변에서 회절, 굴절 등의 파랑 변형이 발생

하여 이를 정확히 예측하기는 매우 어렵다.

과거 Traetteberg(1968)는 장대구조물의 경우 구조물의 길이에 따른 평균 파력이 감소한다는 사실을 최초로 발견하였다. 국내에서는 Kim et al.(2010)이 인터록킹을 이용한 케이슨 방파제 공법을 제안하여 방파제를 장대화할 수 있는 방안을 최초로 제안하였다. 유럽과 일본에서는 장대구조물에 작용하는 파력에 대한 다양한 연구들이 수행되었지만 그들은 물리적으로 길게 제작하는 방식만을 고려하였다. 일본에서는 1992년 고치 항에 100 m 길이의 장대방파제를 세계 최초로 시공하였다(Allsop et al., 1996; Takahashi, 2002). 하지만 물리적으로 구조물을 길게 제작하는데 한계가 있기 때문에, 세계적으로 장대구조물에 대한 심도 깊은 연구와 시공은 2000년대 이후 거의 이루어지지 않았다. 하지만 인터록킹을 이용

*한국농어촌공사 농어촌연구원(Corresponding author : Jae-Sang Jung, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, #870 Haean-ro Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 426-908, Korea, Tel:+82-31-400-1878, Fax:+82-31-400-1610, fingon@ekr.or.kr)

**세종대학교 건설환경공학부(Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University)

***한양대학교 건설환경공학부(Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University)

한 Kim et al.(2010)의 새로운 장대화 방법이 제안됨에 따라 최근 국내에서 장대구조물에 대한 연구가 보다 활발히 수행되고 있다(Jung et al., 2010; Park et al., 2011a, Park et al., 2011b).

일반적으로 옹벽이나 안벽과 같은 구조물들은 주로 토압을 받게 된다. 반면 방파제나 대형 부유식 구조물과 같은 해안 구조물들은 주로 파력을 받게 된다. 토압과 파력의 가장 큰 차이점은 시간에 따라 작용력이 변화하는지 여부이다. 실제로 토압은 지진과 같은 특별한 경우를 제외하고는 시간이 지남에 따라 거의 변하지 않는다. 반면 파력은 시간에 따라 계속 변화한다. 따라서, 해안구조물의 설계를 위해 파력을 산정할 때에는 시간에 따른 변화를 고려하여 통계적인 접근법이나 경험식을 이용하여 최대 파력을 산정한다.

시간에 따라 변화하는 파력특성을 고려하여 Traetteberg(1968)는 비스듬히 입사하는 파랑의 위상차이에 의해 장대구조물에 작용하는 평균파력이 감소한다는 사실을 최초로 밝혔다. 또한 그는 다방향 불규칙파랑이 입사할 경우 파봉선이 짧아지면서 장대구조물에 작용하는 평균파력이 감소한다는 사실 역시 제시하였다. 이후 Battjes(1982)는 비쇄파 조건에서 장대구조물에 작용하는 규칙파 및 다방향 불규칙파의 감소파력비(reduced force ratio)에 대한 해석해를 최초로 제시하였다. 하지만 Bajjtes는 다양한 주기가 공존하는 불규칙파랑에 대해서는 고려하지 않았다. Takahashi and Shimosako(1990)는 일련의 수리모형실험을 통해 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였다. Friggard et al.(1998)은 수리모형실험을 통해 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였다. 그들은 다방향 불규칙파의 파력이 일방향 불규칙파의 파력보다 작다는 사실을 발견하였다. Allsop and Calabrese(1998)는 직립 및 혼성 방파제에 작용하는 다방향 불규칙파의 파력에 대해 3차원 수리모형실험을 통해 연구하였다. 그들은 파랑의 충격력도 고려하였다. Burcharth and Liu(1999)는 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 이론적으로 연구하였다. 그들은 Battjes(1982)의 연구에 다양한 주기가 공존하는 불규칙파랑

도 추가하여 연구하였다. 이후 Martinelli et al.(2007)은 3차원 수리모형실험과 자기상관(auto-correlation)을 이용한 이론적 방법을 통해 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였다. 그들은 다방향 불규칙파를 대상으로 쇄파 및 비쇄파 조건에서 연구를 수행하였다.

Martinelli et al.은 3차원 수리모형실험을 수행할 때 방파제 배후로 회절이 발생하지 않도록 하기 위해 다양한 노력을 기울였다. 하지만 이는 역설적으로 방파제에서 발생하는 회절이 장대구조물에 작용하는 파력에 영향을 미침을 보여준다. 이에 Jung et al.(2011)은 회절을 고려한 장대구조물에 작용하는 파력에 대해 연구하였으나, 그들은 방파제 배후에서 발생하는 회절만을 고려하였다. 하지만 실제 해역에서는 방파제 전면에서도 회절에 의한 영향이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 방파제 전면의 회절까지 추가하여 연구를 수행하였다. 입사파랑은 규칙파, 일방향 불규칙파, 다방향 불규칙파를 대상으로 한다. 장대구조물에 작용하는 파력의 해석에는 선형파 이론과 Penney and Price(1952)가 제시한 회절의 해석해를 이용하여 유도하였다. 일반적으로 파고가 비교적 큰 고파랑이 내습할 경우에는 비선형 효과와 충격과압 효과의 영향이 회절 효과보다 더욱 클 것이다. 따라서, 본 연구에서는 파고가 비교적 작은 경우에 대해 회절효과를 고려하여 연구하였으며, 이 경우 비선형성이 약하기 때문에 선형파 이론을 채택하였다.

회절을 고려한 규칙파의 감소파력비는 2절에서 해석적으로 유도되며, 3절에서는 규칙파 및 불규칙파를 대상으로 한 수치 해석 결과를 제시한다. 그리고, 4절에서는 연구결과를 기술한다.

2. 감소파력비의 해석해 유도

회절을 고려한 파력분포 해석을 위해 선형파 이론과 Penney and Price(1952)의 해석해를 이용하여 파력식을 유도하였다. 수치해석을 위한 변수 및 구조물에 대한 설명은 Fig. 1을 참고할 수 있다. 본 그림에서 L 은 파장, l 은 장대구조물의 길이, β 는 구조물 법선에 수직인 선과 입사 파향선과의 교각을 뜻하며, h

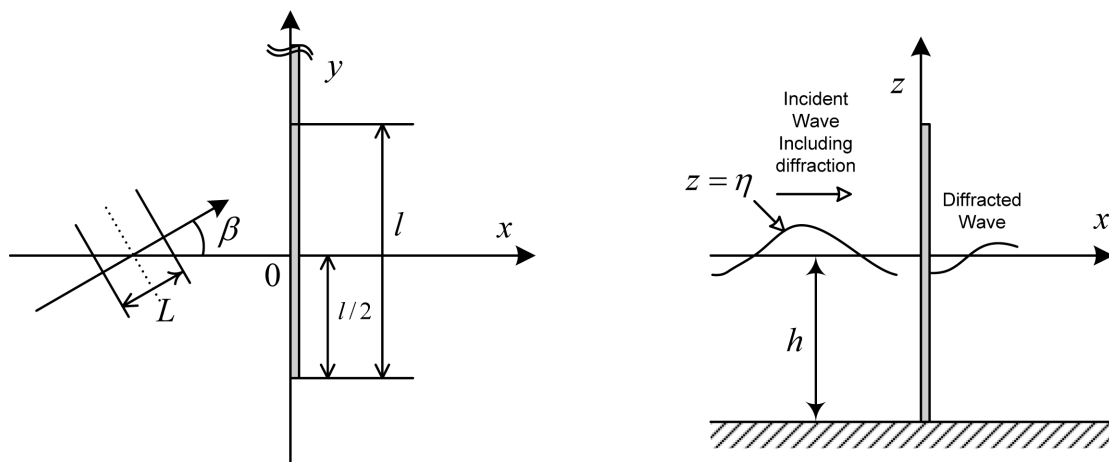


Fig. 1. Definition sketch for the analysis of the wave forces on a long structure (semi-infinite breakwater).

는 평균수심, η 는 자유수면변위를 나타낸다. 본 연구에서 고려한 장대 방파제는 물리적으로 길게 제작되거나 방파제 길이방향으로 구축이 확실한 경우를 대상으로 하며, 장대 방파제의 상대길이(l/L)는 길이방향으로 구축된 구간의 길이를 의미한다.

본 연구에서는 입사파, 반사파, 입사파의 회절성분, 반사파의 회절성분을 모두 반영하여 직립방파제에 작용하는 파력의 해석해를 제시한다.

선형파 이론에서 방파제 전면에서 입사파 및 반사파의 속도포텐셜은 다음 식들과 같다.

$$\phi_i = \frac{iga_i(x,y)\cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} e^{i(\omega t - kx \cos \beta - kysin \beta)} \quad (1)$$

$$\phi_r = \frac{iga_r(x,y)\cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} e^{i(\omega t + kx \cos \beta - kysin \beta)} \quad (2)$$

$$a_r(x,y) = K_r a_i(x,y) \quad (3)$$

여기서, ϕ_i 는 입사파의 속도포텐셜, ϕ_r 은 반사파의 속도포텐셜을 나타낸다. $a_i(x,y)$ 와 $a_r(x,y)$ 는 각각 입사파 및 반사파의 진폭을 뜻하며 ω 는 각진동수, g 는 중력가속도, K_r 은 반사계수를 뜻한다.

방파제 전면에서 입사파 및 반사파의 회절성분에 대한 속도포텐셜은 다음 식 (4)와 같으며, 방파제 후면에서 입사파 및 반사파의 회절성분에 대한 속도포텐셜은 아래 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_{d,f} = \frac{ig \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} [-b_{i,f}(y) e^{i(\omega t - kysin \beta)} - b_{r,f}(y) e^{i(\omega t - kysin \beta)}] \quad (4)$$

$$\phi_{d,l} = \frac{ig \cosh k(z+h)}{\omega \cosh kh} [-b_{i,l}(y) e^{i(\omega t - kysin \beta)} - b_{r,l}(y) e^{i(\omega t - kysin \beta)}] \quad (5)$$

여기서, $b_{i,f}(y)$ 와 $b_{r,f}(y)$ 는 각각 방파제 전면에서 입사파 및 반사파의 회절성분의 진폭이며, $b_{i,l}(y)$ 와 $b_{r,l}(y)$ 는 각각 방파제 후면에서 입사파 및 반사파의 회절성분의 진폭이다. 과거 Jung et al.(2011)은 그들의 연구에서 방파제 후면의 회절 성분인 $b_{i,l}(y)$ 와 $b_{r,l}(y)$ 만을 반영하였다. 각 회절성분들은 Penney and Price의 해석해를 이용하여 계산할 수 있으며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$b_{i,f}(y) = a_i f(-\psi_f), \quad b_{r,f}(y) = K_r a_i f(-\psi_f') \quad (6)$$

$$b_{i,l}(y) = a_i f(\psi_l), \quad b_{r,l}(y) = K_r a_i f(\psi_l') \quad (7)$$

여기서,

$$f(\psi) = \frac{1}{2}(1+i) \int_{-\infty}^{\psi} e^{\frac{1}{2}i\pi u^2} du \quad (8)$$

$$\psi_f = \psi_f' = 2 \sqrt{\frac{k(y+l/2)}{\pi}} \sin\left(\frac{1}{2}\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (9)$$

$$\psi_l = \psi_l' = 2 \sqrt{\frac{k(y+l/2)}{\pi}} \sin\left(\frac{1}{2}\left(\beta + \frac{3\pi}{2}\right)\right) \quad (10)$$

방파제 전면에서의 총 속도포텐셜은 입사파, 반사파 및 회절성분의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_f &= \phi_i + \phi_r + \phi_{d,f} \\ &= \frac{ig \cosh k(h+z)}{\omega \cosh kh} [\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-ikysin \beta}] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (11)$$

방파제 전면 및 후면에서의 파압은 아래 식들과 같다.

$$\begin{aligned} p_f &= -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_f}{\partial t} \\ &= -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} [\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-ikysin \beta}] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} p_l &= -\rho g z - \rho \frac{\partial \phi_{d,l}}{\partial t} \\ &= -\rho g z + \rho g \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} [(b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-ikysin \beta}] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (13)$$

방파제 단위 폭당 작용하는 파력은 파압을 수심방향으로 적분함으로써 구할 수 있다. 방파제 전면 및 후면에서의 단위 폭당 파력은 다음과 같다.

$$P_f = \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} [\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f})\} e^{-ikysin \beta}] e^{i\omega t} \quad (14)$$

$$P_l = \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} [(b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-ikysin \beta}] e^{i\omega t} \quad (15)$$

방파제에 단위 폭당 작용하는 총파력은 방파제 전면 및 후면에서 작용하는 파력의 합으로 표현할 수 있으며, 이는 아래 식과 같다.

$$\begin{aligned} P_t &= P_f - P_l \\ &= \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} [\{(1+K_r)a_i - (b_{i,f} + b_{r,f}) - (b_{i,l} + b_{r,l})\} e^{-ikysin \beta}] e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (16)$$

장대구조물의 전체 길이에 작용하는 총파력은 위 식을 방파제 길이 방향으로 적분함으로써 구할 수 있으며, 이는 다음 식과 같다.

$$F = \int_{-l/2}^{l/2} P_t dy = \rho g h l (1+K_r) a_i \frac{\tanh kh}{kh} R e^{i\omega t} \quad (17)$$

여기서,

$$R = A + B + C \quad (18)$$

$$A = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} e^{-ikysin \beta} dy = \frac{\sin(kl/2 \sin \beta)}{kl/2 \sin \beta} \quad (19)$$

$$B = \frac{1}{l(1+K_r)a_i^{-1/2}} \int (b_{i,f} + b_{r,f}) e^{-iky \sin \beta} dy \quad (20)$$

$$C = \frac{1}{l(1+K_r)a_i^{-1/2}} \int (b_{i,l} + b_{r,l}) e^{-iky \sin \beta} dy \quad (21)$$

위 식에서, A 는 방파제 전면에서 작용하는 입사파 및 반사파 성분의 파력이며, B 는 방파제 전면에서의 회절파 파력이다. 그리고, C 는 방파제 후면에서의 회절파 파력을 뜻한다. 따라서, A 는 Battjes(1982)가 제안한 회절을 고려하지 않은 경우의 감소파력비와 동일하다. 위에서 R 은 입사파, 반사파, 방파제 전후면의 회절파 파력을 모두 고려한 규칙파의 감소파력비(reduced force ratio)로 정의된다. 회절파의 파력 성분인 B 와 C 의 적분식은 사다리꼴 방법이나 4차 Runge-Kutta 방법 등을 이용하여 수치적으로 계산할 수 있다. 장대구조물의 상대길이(l/L)가 0에 접근할 때 A 는 1이 되고, B 와 C 는 -0.5가 된다. 따라서, 구조물의 길이가 0일 때 반무한방파제 형식의 장대구조물의 감소파력비는 0이 된다.

3. 감소파력비의 해석해와 수치해 비교

3.1 원경사방정식에 의한 수치해석 기법

본 연구에서 개발한 감소파력비의 해석해를 검증하기 위하여 파랑의 회절이 고려된 파랑식인 원경사방정식을 사용하여 수치해석을 수행하여 감소파력비의 해석해와 수치해를 비교하였다. 본 연구에서 사용한 원경사방정식은 Radder and

Dingemans(1985)가 개발한 쌍곡선형 원경사방정식이다. 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\frac{C_p C_g}{g} \nabla \tilde{\phi} \right) + \frac{\omega^2 - k^2 C_p C_g}{g} \tilde{\phi} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} = -g\eta \quad (23)$$

위 식에서 η 는 자유수면변위이고, $\tilde{\phi}$ 는 평균해수면에서의 속도포텐셜이고, C_p 와 C_g 는 각각 위상속도와 군속도이고, $\nabla (= \partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 는 수평미분연산자이다. 식 (22), (23)의 시간미분항을 차분할 때 4차의 Adams-Bashforth predictor and corrector 기법을 사용하였다. 또한 공간미분항을 차분할 때 2차의 중앙차분법을 사용하였다. 구조물에서의 반사파를 흡수하기 위하여 계산영역의 사방 경계에서 스폰지층을 두었고, 구조물의 상류경계에 곡선조파기법을 사용하였다. 수치해석기법과 곡선조파기법에 대한 자세한 설명이 Lee and Yoon(2007)에 있다.

3.2 규칙파의 감소파력비

먼저 장대구조물의 상대길이에 따른 규칙파의 감소파력비를 계산하였다. 아래 그림에서 실선은 방파제 전, 후면의 회절을 모두 고려한 경우이며, 일점쇄선은 전면에서의 회절만을 고려한 경우이다. 그리고, 파선은 회절을 무시한 경우를 뜻하며, Battjes(1982)가 제시한 해석해와 동일하다. 원경사방정식에 의한 결과는 그림에서 심볼로 나타내었다. 해석해에 의

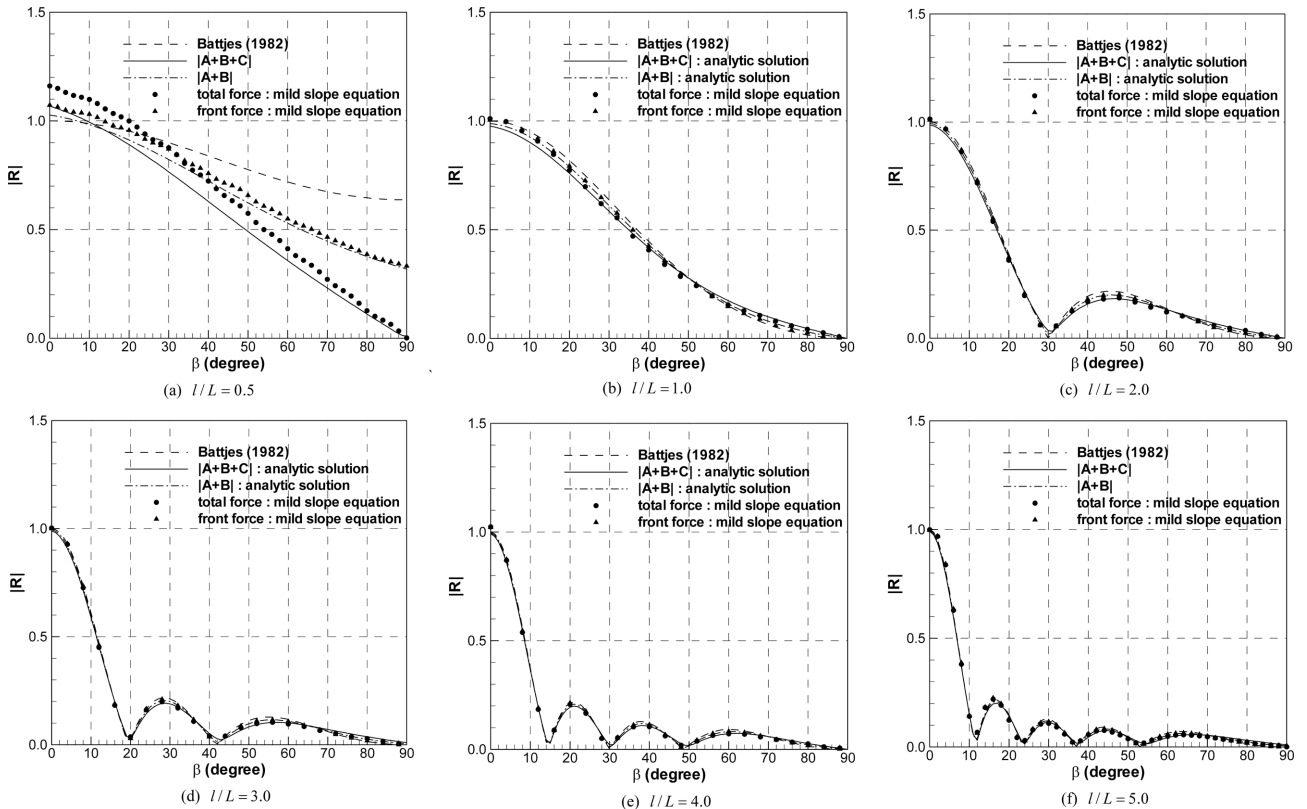


Fig. 2. Reduced force ratios of monochromatic waves as functions of incident wave angle β .

한 결과들은 환경사방정식에 의한 수치해석 결과와 대부분 매우 일치하는 경향을 보였다. 방파제의 길이가 0.5 L 인 경우에는 방파제의 길이가 짧고 환경사방정식의 격자 구성 한계에 따라 폭 0인 방파제의 구현이 불가능하여 해석해의 결과가 수치해에 비해 약 10% 작게 계산되었다.

장대구조물의 상대길이가 1.0보다 클 때 회절을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우는 거의 차이 나지 않았다. 하지만 장대구조물의 상대길이가 0.5인 경우에는 회절 고려 유무에 따라 비교적 큰 파력의 차이를 보였다. 따라서 방파제의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 영향을 반드시 고려하여야 할 것이다.

위의 그림을 보면 특정 입사각에서 감소파력비가 0이 됨을 알 수 있다. 이는 해당 입사각에서 장대구조물의 길이가 방파제 전면의 자유수면 파장의 정수배이기 때문이며, 해당 조건에서는 파봉에 의한 정(+)의 파력과 파곡에 해당하는 부(-)의 파력이 서로 정확히 상쇄되어 감소파력비는 0이 된다. 이와 같이 감소파력비가 0이 되는 조건은 아래 식과 같다.

$$\beta = \cos^{-1}\left(n \times \frac{L}{\lambda}\right), n = 1, 2, 3 \dots \quad (24)$$

3.3 불규칙파의 감소파력비

본 절에서는 회절을 고려한 불규칙파의 감소파력비를 계산하였다. 일방향 및 다방향 불규칙파의 감소파력비는 각각 다음 식과 같이 정의한다.

$$R_u = \frac{\int_0^{\infty} R^2(f, \beta) S(f) (\tanh kh/kh)^2 df}{\int_0^{\infty} S(f) (\tanh kh/kh)^2 df} \quad (25)$$

$$R_m = \frac{\int_{0-\pi}^{\pi} \int_{0-\pi}^{\pi} R(f, \beta) S(f, \beta) (\tanh kh/kh)^2 d\beta df}{\int_{0-\pi}^{\pi} \int_{0-\pi}^{\pi} S(f, \beta) (\tanh kh/kh)^2 d\beta df} \quad (26)$$

여기서, $R(f, \beta)$ 는 불규칙파의 각 주기 및 방향에 해당하는 규칙파의 감소파력비이며, 이는 식 (18)을 이용할 수 있다. 식 (25), (26)에서 정의한 감소파력비는 구조물의 길이를 고려하지 않는 파력과 구조물의 길이 효과에 의해 감소된 파력의 비로 정의된다. 따라서, 본 연구에서 제시한 감소파력비는 과거 다양한 연구자들에 의해 제안된 구조물의 길이를 고려하지 않은 파력식에 의해 산출된 결과에 곱하여 적용할 수 있다. 위 식에서, $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼이며, $S(f, \beta)$ 는 방향 스펙트럼을 나타낸다. 방향 스펙트럼은 방향 분포함수 $G(f, \beta)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(f, \beta) = S(f)G(f, \beta) \quad (27)$$

파랑의 주파수 스펙트럼으로는 다음과 같이 표현된

JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼을 적용하였다(Hasselmann et al., 1973; Goda, 2000).

$$S(f) = \varepsilon_j H_{1/3}^2 T_p^4 f^{-5} \exp[-1.25(T_p f)^4] \gamma^{\exp[-(T_p f - 1)^2 / (2\sigma^2)]} \quad (28)$$

$$\varepsilon_j \approx \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (29)$$

$$T_p \approx T_{1/3} [1 - 1.032(\gamma + 0.2)^{-0.559}] \quad (30)$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07: f \leq f_p \\ \sigma_b = 0.09: f \geq f_p \end{cases} \quad (31)$$

여기서, γ 는 첨두증진계수(peak enhancement factor), $H_{1/3}$ 은 유의파고, T_p 는 첨두주파수에서의 주기를 나타낸다. Lee et al.(2010)에 의해 제시된 비대칭 방향분포함수는 다음과 같다.

$$G(f, \beta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\beta - \beta_p}{2} \xi \right) \quad (32)$$

$$G_0 = \left[\int_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} \cos^{2s} \left(\frac{\beta - \beta_p}{2} \xi \right) d\beta \right]^{-1} \quad (33)$$

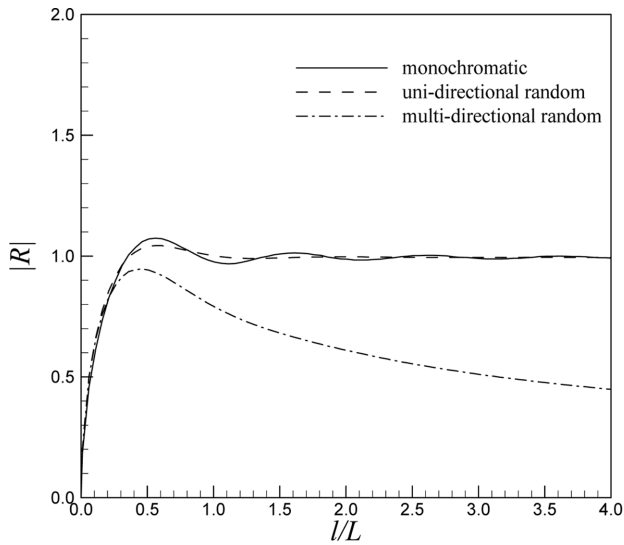
$$s = \begin{cases} s_{max} f^{-5}, & f \leq f_p \\ s_{min} f^{-2.5}, & f \geq f_p \end{cases} \quad (34)$$

$$\xi = \begin{cases} \exp(-\mu), & \beta \geq \beta_p \\ \exp(+\mu), & \beta \leq \beta_p \end{cases} \quad (35)$$

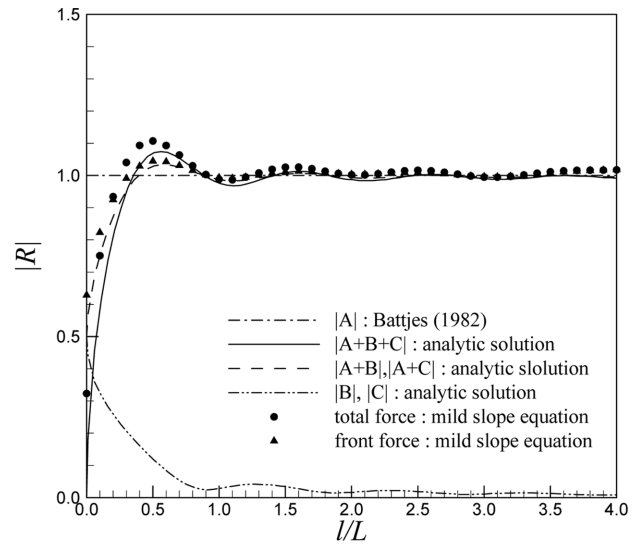
여기서, μ 는 비대칭계수, s_{max} 는 최대분포계수를 나타낸다.

다방향 불규칙파의 감소파력비 계산을 위해 $\Delta f = 0.005$, $\Delta \beta = 1.0^\circ$ 를 적용하여 45개 주기성분 및 181개의 방향성분으로 나누어 계산하였다. 수치해석 조건으로 $H_{1/3}$ 은 1m, $T_{1/3}$ 은 10초이다. 수심은 10m이며, s_{max} 는 10, γ 는 1.0을 적용하였다.

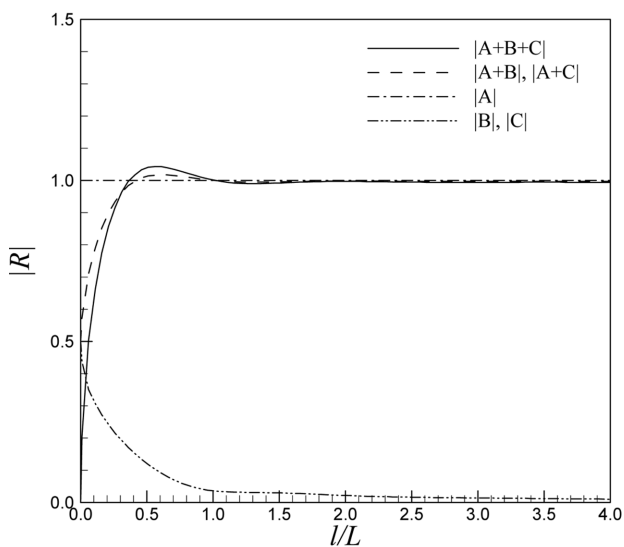
장대구조물에서 규칙파, 일방향 및 다방향 불규칙파의 감소파력비는 아래 Fig. 3~5에 나타내었다. Fig. 3은 입사각(β)이 0° 인 조건이며, Fig. 4는 30° , Fig. 5는 60° 인 조건이다. Fig. 3(a)는 회절효과를 모두 고려한 경우 장대구조물의 길이에 따른 감소파력비를 나타낸다. 본 그림에서 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비는 0이 됨을 알 수 있다. 규칙파 및 일방향 불규칙파의 감소파력비는 입사각이 0인 경우 구조물 전면에서 위상차이가 존재하지 않으므로 구조물의 상대길이가 증가할수록 1.0에 수렴한다. 규칙파 및 일방향 불규칙파의 경우 파랑의 파봉장이 무한한 장봉파(long crested waves)이기 때문에 구조물의 상대길이에 관계 없이 파력 감소효과는 발생하지 않는다. 반면, 다방향 불규칙파의 감소파력비는 주파수의 입사각이 0° 임에도 불구하고 비스듬히 입사하는 파랑성분이 다수 존재하기 때문에 파봉장의 길이가 비



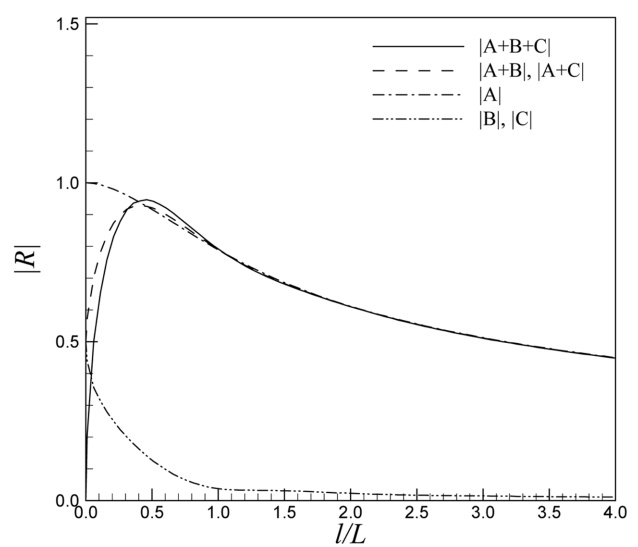
(a) Reduced force ratios for different wave types



(b) Comparison of reduced force ratios of monochromatic waves



(c) Comparison of reduced force ratios of uni-directional random waves



(d) Comparison of reduced force ratios of multi-directional random waves

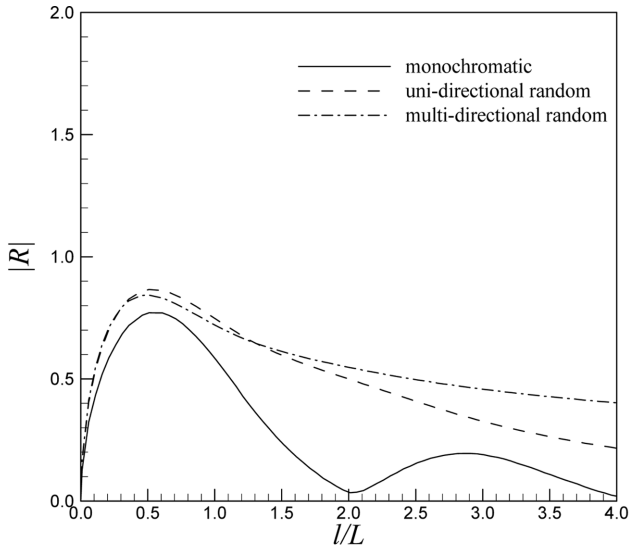
Fig. 3. Reduced force ratios with consideration of diffraction effects ($\gamma = 1.0$, $s_{\max} = 10$, $\beta_p = 0^\circ$).

교적 짧은 단봉파(short crested waves)를 형성하며, 이에 따라 구조물의 상대길이가 증가할수록 감소파력비는 감소한다. Fig. 3(b), Fig. 3(c)는 회절 효과에 따른 규칙파 및 일방향 불규칙파의 감소파력비를 나타낸다. 구조물 전면에서의 회절만을 고려할 경우 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비는 0.5가 된다. Fig. 3(b) ~ Fig. 3(d)에서 $|B|$ 와 $|C|$ 는 같은 값을 가진다. 이는 구조물 배후로 이동한 회절파의 에너지와 구조물 전면에서 감소한 회절파의 에너지가 같기 때문이다. 따라서 $|A+B|$ 와 $|A+C|$ 역시 같은 값을 가진다. 즉, 구조물 전면에서 중복파 및 회절을 고려한 파력은 구조물 전면에서 중복파와 후면에서의 회절을 고려한 파력과 같다. Fig. 3을 통해서 구조물의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 효과가 비교적 큼을 다시 한번 확인할 수 있다.

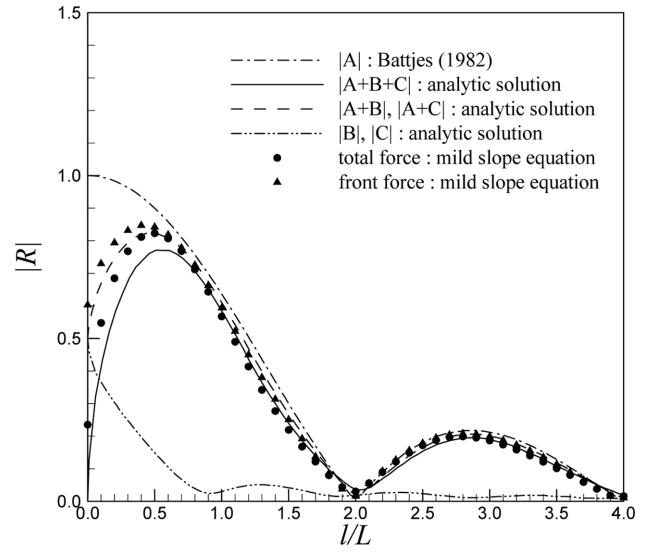
Fig. 4는 입사각 30° 인 경우의 결과이다. Fig. 4(a)에서 다

방향 불규칙파의 감소파력비가 규칙파 및 일방향 불규칙파에 비해 크게 계산됨을 볼 수 있다. 특히 규칙파의 경우 장대구조물의 상대길이가 2.0인 경우에는 감소파력비가 거의 0이 된다. Fig. 4(b)는 회절 고려 유무에 따른 규칙파의 감소파력비를 나타낸다. 본 그림을 통해 방파제 전면 및 후면의 회절성분을 모두 고려한 경우 감소파력비가 가장 작게 산정됨을 볼 수 있다. Fig. 5는 입사각이 60° 인 경우의 결과이며, 전반적으로 입사각 30° 인 경우와 유사한 경향을 보였다. 해석해의 결과 중 규칙파의 감소파력비는 환경사방정식의 결과와 비교하였는데, 거의 유사한 결과를 보였다. 즉, 본 연구에서 제시한 해석해가 이론적으로 타당함을 알 수 있다.

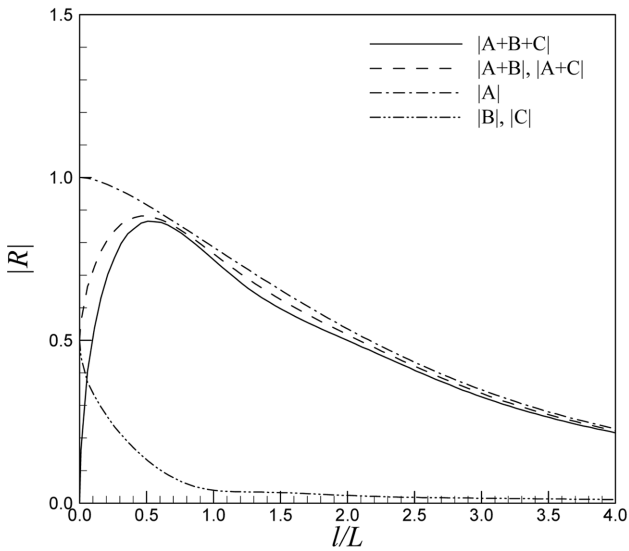
이상의 분석을 통해 장대구조물의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 영향을 반드시 고려하여야 하며, 장대구조물의 상대길이가 최소 0.5 이상이 되어야 감소파력비가 감소



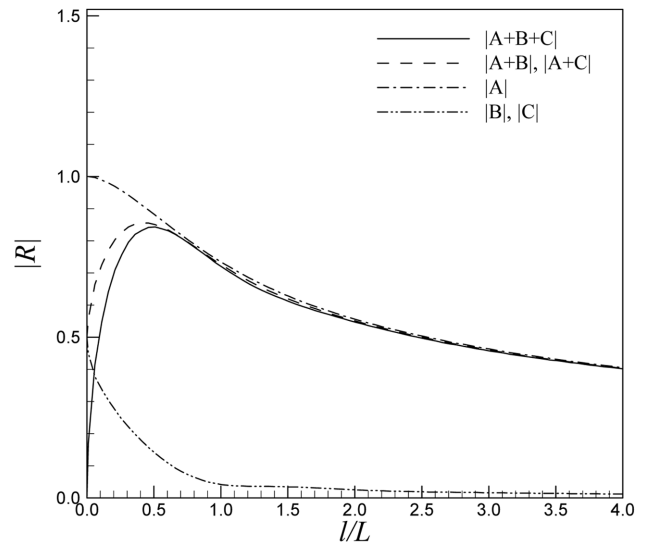
(a) Reduced force ratios for different wave types



(b) Comparison of reduced force ratios of monochromatic waves



(c) Comparison of reduced force ratios of uni-directional random waves



(d) Comparison of reduced force ratios of multi-directional random waves

Fig. 4. Reduced force ratios with consideration of diffraction effects ($\gamma = 1.0, s_{max} = 10, \beta_p = 30^\circ$).

하기 시작하여 구조물의 장대화 효과를 이용할 수 있음을 알 수 있다.

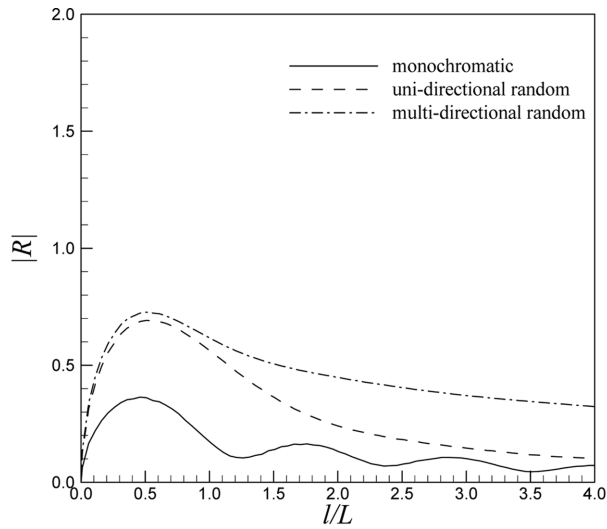
3.4 다방향 불규칙파의 방향 비대칭 효과

본 연구에서는 다방향 불규칙파의 비대칭 효과에 대해서도 추가로 검토하였다. 다방향 불규칙파의 방향 비대칭성은 Lee et al.(2010)이 제안한 비대칭 방향분포함수를 적용하여 재현하였다. 비대칭계수에 따른 방향스펙트럼의 에너지 분포는 Fig. 6을 참고할 수 있으며, 파랑의 방향 비대칭에 따른 감소파력비는 아래 Fig. 7에 나타내었다. 각 해석 결과를 보면 비대칭계수(μ)가 -0.3인 경우 감소파력비가 가장 크게 계산되었다. 과거 Jung et al.(2010)에 의해 수행된 회절을 고려하

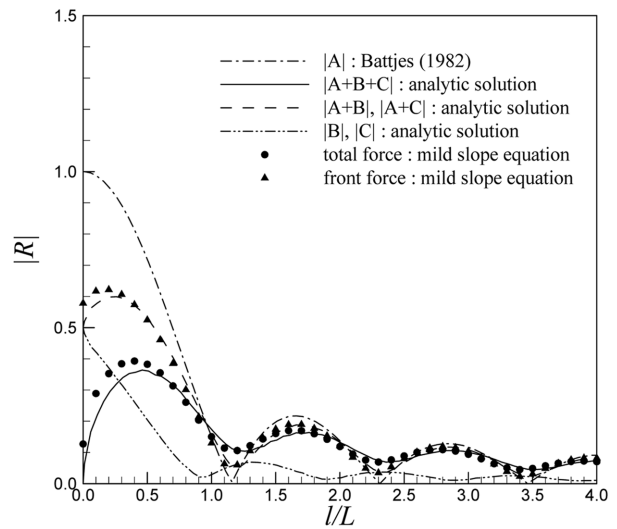
지 않은 경우에는 주파향의 입사각이 0° 일 때 비대칭계수의 변화에 따른 감소파력비의 변화가 거의 없었다. 하지만 회절을 고려한 본 연구에서는 주파향의 입사각이 0° 일 때 비대칭계수가 음수인 경우 감소파력비가 크게 계산되었다. 이는 비대칭계수가 음수인 경우 -방향의 입사파랑 성분이 우세하며, 따라서 회절의 영향을 적게 받으므로 감소파력비가 크게 계산되었다. 반면 입사각이 30° 및 60° 일 때에는 비대칭계수가 음수인 경우 주파향을 중심으로 입사각이 0° 에 가까운 파랑 성분이 우세하기 때문에 감소파력비가 크게 계산된다.

4. 결 론

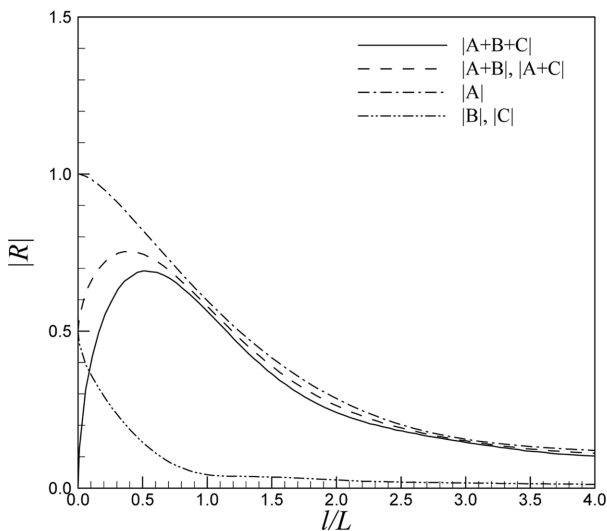
본 연구에서는 회절을 고려한 반무한방파제 형식의 직립식



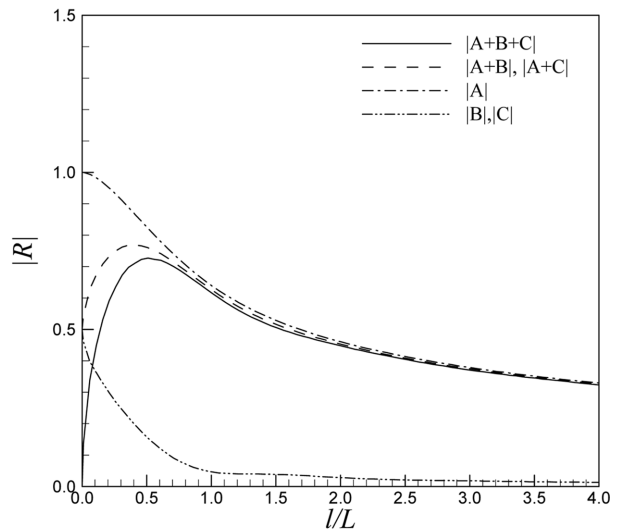
(a) Reduced force ratios for different wave types



(b) Comparison of reduced force ratios of monochromatic waves



(c) Comparison of reduced force ratios of uni-directional random waves



(d) Comparison of reduced force ratios of multi-directional random waves

Fig. 5. Reduced force ratios with consideration of diffraction effects ($\gamma = 1.0$, $s_{max} = 10$, $\beta_p = 60^\circ$).

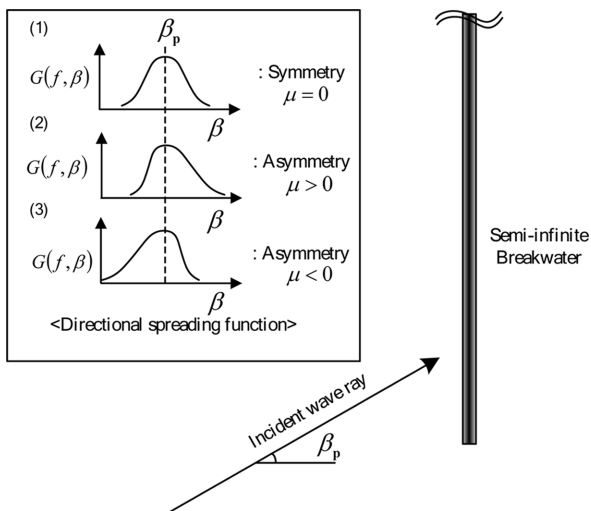


Fig. 6. Wave-energy distributions as the asymmetry parameter.

장대구조물에 작용하는 파력에 대해 해석해를 이용하여 검토하였다. 파력의 해석해는 선형파 이론과 Penney and Price(1952)의 해석해를 적용하였다. 입사파랑은 규칙파, 일방향 불규칙파 및 다방향 불규칙파를 대상으로 하였으며, 파랑 조건은 비쇄파 조건이다. 본 연구에서 제시한 장대구조물 파력의 해석해는 규칙파 조건에서 환경사방정식의 결과와 비교하였으며, 매우 일치하는 결과를 보였다.

규칙파 및 일방향 불규칙파의 감소파력비는 입사각이 0인 경우 구조물 전면에서 위상차이가 존재하지 않으므로 구조물의 상대길이가 증가할수록 1.0에 수렴한다. 반면, 다방향 불규칙파의 감소파력비는 비스듬히 입사하는 파랑성분이 다수 존재하기 때문에 구조물의 상대길이가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 구조물 전면에서의 회절만을 고려할 경우 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비는 0.5가 되며, 구조

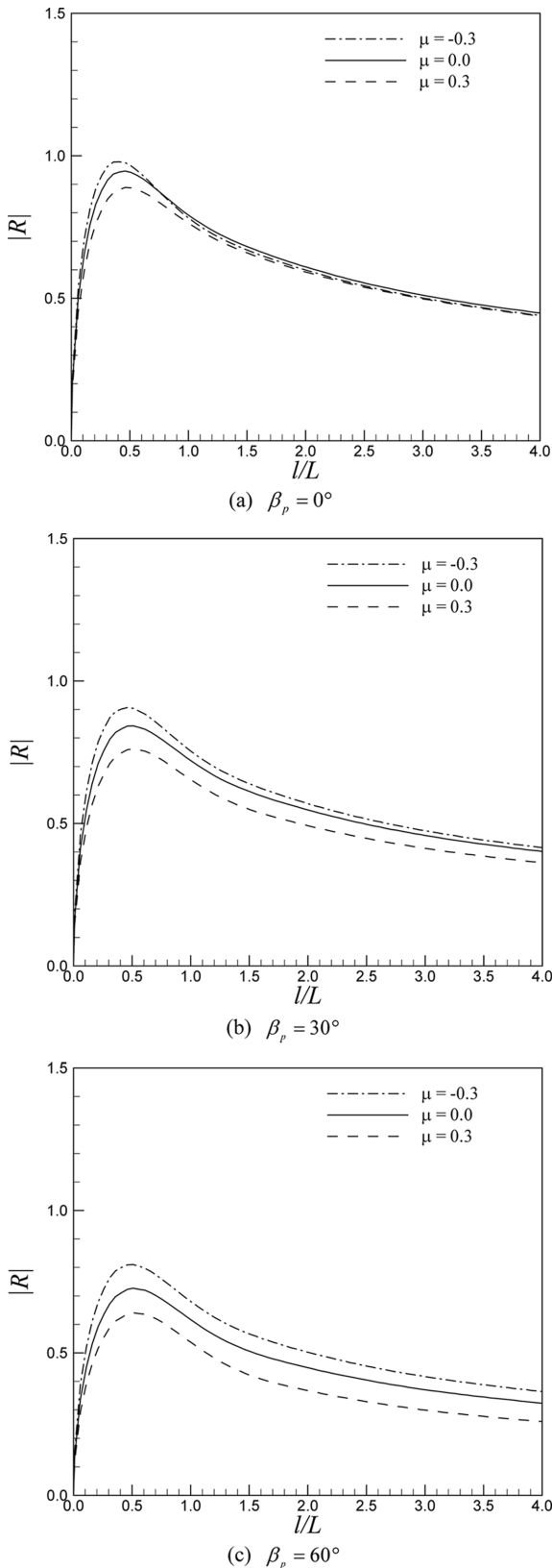


Fig. 7. Reduced force ratios of multi-directional random waves for various asymmetry parameters ($\gamma = 1.0$, $s_{\max} = 10$).

물 전, 후면의 회절을 모두 고려한 경우 구조물의 상대길이가 0인 경우 감소파력비는 0이 된다. 파랑의 방향 비대칭성에 따른 감소파력비는 비대칭계수가 음수일 때 가장 크게 계산되

었다.

본 연구를 통해 장대구조물의 상대길이가 1.0 이하인 경우에는 회절의 영향을 고려하여야 하며, 장대구조물의 상대길이가 최소 0.5 이상이 되어야 구조물의 장대화 효과를 이용할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 장대구조물의 상대길이가 어느 정도이어야 파력의 감소효과가 충분하며, 적정한지에 대해서는 파력 감소효과에 의한 장대구조물의 공사비 절감효과와 결부한 경제성 분석을 통해 추가로 연구하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(15CTAP-C077573-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- Allsop, N.W.H. and Calabrese, M. (1998). Impact loadings on vertical walls in directional seas, Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, Denmark, 2056-2068.
- Allsop, N.W.H., Vicinanza, D. and McKenna, J.E. (1996). Wave forces on vertical composite breakwaters, Report SR 443, HR Wallingford.
- Battjes, J.A. (1982). Effects of short-crestedness on wave loads on long structures. Applied Ocean Res., 4(3), 165-172.
- Burcharth, H.F. and Liu, Z. (1999). Force reduction of short crested non-breaking waves on caissons, MASTIII PROVERBS, Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, MAS3-CT95-0041, IIa, Chapter 4.3, 1-26.
- Frigaard, P., Burcharth, H.F. and Kofoed, J.P. (1998). Wave impacts on caisson breakwaters situated in multidirectionally breaking seas, Proc. 26th Int. Conf. Coastal Eng., Copenhagen, Denmark, 1959-1970.
- Goda, Y. (2000). Random Seas and Design of Maritime Structures, World Scientific.
- 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). 1-95. (in German).
- Jung, J.-S., Kim, B.-H., Kim, H.-J. and Cho, Y.-S. (2010). Calculation of the peak-delay force reduction parameter of multi-directional random waves acting on a long caisson breakwater, J. Korean Society of Water Resources Association, 43(10), 843-850 (in Korean).
- Jung, J.-S., Lee, C. and Cho, Y.-S. (2011). Effects of directional asymmetry of random wave loads on long structures, The 6th Int. Conf. on Asian and Pacific Coasts, Hong Kong, 1695-1702.
- Kim, B.-H., Park, W.-S., Lee, J.-W. and Jung, J.-S. (2010). Making long caisson breakwater using interlocking system, the Magazine of the Korean Society of Civil Engineers, 58(12), 65-72 (in

- Korean).
- Lee, C., Jung J.-S. and Haller, M.C. (2010). Asymmetry in directional spreading function of random waves due to refraction, *ASCE J. Waterway, Port, Coast. Ocean Eng.*, 136(1), 1-9.
- Lee, C. and Yoon, S.B. (2007). Internal generation of waves on an arc in a rectangular grid system, *Coastal Eng.*, 54, 357-368.
- Martinelli, L., Lamberti, A. and Fgiraard, P. (2007). Effect of short-crestedness and obliquity on non-breaking and breaking wave forces applied to vertical casson breakwaters, *Coastal Eng. J.*, JSCE, 49(2), 173-203.
- Park, S.-H., Park, W.-S. and Kim, H.S. (2011a). Evaluation of structural behavior for interlocking breakwater, 2011 Joint Conference of KAOSTS, 1915-1918 (in Korean).
- Park, W.-S., Park S.-H. and Jang S.-C. (2011b). Dynamic analysis model of interlocking breakwater systems for wave loadings, 2011 Joint Conference of KAOSTS, 2247-2249 (in Korean).
- Penney, W.G and Price, A.T. (1952). The diffraction theory of sea waves by breakwaters and the shelter afforded by breakwaters, *Philos. Trans. R. Soc. London*, A(244), 236-253.
- Radder, A.C. and Dingemans, M.W. (1985). Canonical equations for almost periodic, weakly nonlinear gravity waves, *Wave Motion*, 7, 473-485.
- Takahashi, S. (2002). Design of vertical breakwaters. Port and Airport Res. Inst.
- Takahashi, S. and Shimisako, K. (1990). Reduction of wave force on a long caisson of vertical breakwater and its stability. Report No. 685, The Port and Harbour Res. Inst. (in Japanese).
- Takayama, T. and Higashira, K. (2002). Statistical analysis on damage characteristics of breakwaters, *J. Ocean Development*. 18, 263-268. (in Japanese).
- Traetteberg, A. (1968). The effects of wave crests on wave forces. *Proc. of the Int. Conf. on Coastal Eng.*, 11, 934-939.
-
- Received 3 September, 2015
1st Revised 19 October, 2015
2nd Revised 25 November, 2015
Accepted 2 December, 2015