

방파제 주위에서 발생하는 파랑의 회절 및 다중반사 Wave Diffraction and Multi-Reflection Around Breakwaters

이창훈* · 김민균** · 조용준**

Changhoon Lee*, Min Kyun Kim** and Yong Jun Cho**

요 지 : 본 연구에서 Penney and Price(1952)의 해석 해를 사용하여 반무한방파제, 양익방파제 등에서 발생하는 파랑의 회절 및 다중반사 현상에 대한 해석 해를 구하였다. 구조물에서의 반사 현상을 양익방파제를 지나는 회절 현상으로 간주하여 방파제에서 발생하는 단일반사 및 다중반사 현상을 규명하였다. 이를 바탕으로 방파제의 위치와 입사파랑의 각도에 따라 다른 경우에도 해석해를 구할 수 있다. 이러한 해석해는 국내의 항만 실무자들에게 회절 및 다중반사 현상에 대한 이해를 도울 수 있을 것이며, 실무의 해안 및 항만 구조물 설계 시에 사용되는 수치프로그램들의 정확도를 판단할 수 있는 비교 대상으로 사용될 수 있으리라 판단된다.

핵심용어 : 회절, 반무한 방파제, 양익방파제, 중첩된 해석해, 단일반사, 다중반사

Abstract : In this study, we get an analytical solution for the diffraction and multi-reflection around a semi-infinite breakwater and breakwaters with a gap by using the solution of Penney and Price (1952). We find analytical solutions for single- and multi-reflections around the breakwaters by assuming that the reflected waves are regarded to be those diffracting through a breakwater gap. On the basis of these solutions, it is possible to understand the wave diffraction with different cases of incident wave direction and breakwater layout. These solutions may help harbor engineers to understand the phenomena of diffraction and multi-reflections around the breakwaters. These solutions may also be used to evaluate the applicability of wave transformation models which are used in designing coastal structures.

Keywords : diffraction, semi-infinite breakwater, breakwaters with a gap, superposition of analytical solutions, single-reflection, multi-reflection

1. 서 론

방파제는 파랑의 직접적인 내습을 차단하여 배후의 시설을 보호하는 기능이 있다. 그런데, 방파제 측면을 지나가는 파랑 에너지의 일부가 배후로 전달되는 회절 현상이 발생하여 방파제 배후에 위치한 항만시설이 완벽하게 보호되지 않는 경우도 있다. 방파제 주위의 회절 현상은 방파제 배후뿐만 아니라 전면부에서도 발생한다. 방파제의 전면에는 입사파와 반사파가 중첩되어 높은 에너지가 발생하여 방파제 전면과 측면의 경계에 에너지의 불연속이 존재하여 회절 현상이 발생한다. 회절 현상에서 특기할 사

항은, 에너지의 불연속이 이어질 때 에너지가 상대적으로 큰 영역에서 에너지가 위 아래로 요동치는 현상이 있다. 이러한 에너지의 요동은 파랑이 갖고 있는 위상의 성질 때문에 발생한다. 회절이 발생하는 경우 에너지가 상대적으로 큰 영역에서는 파원이 퍼져 나가지만 에너지가 작은 영역에서는 퍼져 나갈 파원이 없어서 파봉선이 연속적으로 이어지지 않고 끊어지게 된다. 이러한 이유로 에너지가 큰 영역에서 에너지가 요동치게 된다. 이러한 에너지의 요동이 방파제 뒤에서는 방파제 측면에서 발생하는 반면 방파제 앞에서는 방파제의 전면에서 발생한다. 약천후 시 파랑에 의한 방파제의 피해 사례로 두부의 피해가 자

*세종대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea. clee@sejong.ac.kr)

**서울시립대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, The University of Seoul, Seoul 130-743, Korea.)

주 나타나는데, 이는 두부 쪽으로 파랑이 굴절되면서 파랑 에너지가 집중되어 피해가 나타나기도 하지만 한편으로는 방파제 전면의 두부에서 회절에 의한 에너지의 요동으로 피해가 가중된다고 이해할 수 있겠다. 따라서 파랑의 회절은 항내의 정온도 유지 및 해안 구조물 설계에 있어 고려되어야 할 중요한 인자로 인지된다.

방파제 주변의 회절 현상은 반무한방파제(semi-infinite breakwater), 양익방파제(breakwaters with a gap), 이안제(detached breakwater) 등에서 나타난다. Penney and Price (1952)는 반무한방파제 주위에서 발생하는 회절현상에 대한 해석해를 제안하였고, 양익방파제와 이안제는 각각 개구부의 폭 또는 이안제 폭이 서로 반대 방향의 반무한 방파제를 선형 중첩시켜 구할 수 있음을 제시하였다. 그들은 파랑이 방파제에 수직하게 입사하는 경우에만 제한적으로 적용시켰으나, 파랑이 경사지게 입사하는 경우에도 반무한 방파제의 해들을 서로 중첩하여 양익방파제에서의 해석해를 구할 수 있다는 사실이 Sobey and Johnson(1986)에 의하여 밝혀졌다. 국내에서는 편종근 등(1987)이 양익방파제의 개구부나 이안제의 폭이 반 파장보다 작은 경우에 Mathieu 함수를 이용하여 회절에 대한 해석해를 구한 바 있다. 또한, 이해균 등(1998)은 포물선형 파랑변형 방정식의 회절현상에 대한 검증 자료로서 Penney and Price(1952)의 반무한 방파제에 대한 해석해를 사용하였다.

방파제 주변의 파랑 현상을 예측하는 방법으로 파랑변형 수치모형 실험을 사용할 수 있다. 대표적인 수치 모형으로 확장형 Boussinesq 방정식(Madsen and Sorensen, 1992; Nwogu, 1993)과 확장형 완경사방정식(Suh et al., 1997; Lee et al., 1998; Lee et al., 2003)이 있다. 이러한 파랑변형 수치모형은 구조물 주위의 회절 현상을 정확히 모의할 수 있다. 파랑변형 수치모형을 사용하여 구조물에서 발생하는 부분반사를 모의하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫째, 구조물의 면을 거울로 인식하여 입사파 에너지의 일부를 반대 방향으로 반사되게 하는 방법이 있고(Engquist and Majda, 1977), 둘째, 구조물 앞면의 몇 개의 격자점에 에너지 흡수층을 두어 입사파의 에너지가 일부 흡수되고 나머지는 반사되게 하는 방법이 있다(Madsen, 1983). 첫 번째 방법은 한 방향의 파가 입사하는 경우 정확하게 반사 현상을 모의할 수 있는 반면, 여러 방향의 파가 입사하는 경우 반사 현상을 정확히 모의하지 못하는 문제점이 있다. 두 번째 방법은 한 방향 성분뿐만 아니라 여러 방향의 파가 동시에 입사하여도 반사 현상을 대체적

으로 정확히 모의할 수 있는 반면 구조물에 많이 경사지게 입사하는 경우 구조물 전면에 있는 흡수층에서 과다하게 에너지가 흡수되는 문제점이 있다.

수치모형에서 부분반사를 정확히 모의하였는지를 검증하는 방법으로 수리모형실험을 사용할 수 있다. 이는 실제 크기를 축소하였다는 한계에도 불구하고 실제로 중력의 영향 하에 파랑이 전파하는 현상이 재현되기 때문에 그 결과에 신뢰성이 있다. 그런데, 구조물에 직각이 아니라 경사지게 입사하는 경우 반사 정도를 정확히 예측할 수 없는 문제점이 있다. 또한, 현재까지 개발된 조파기로는 구조물에 입의의 방향으로 파를 보낼 수 없는 문제점이 있다.

본 연구에서는 Penney and Price(1952)의 회절현상에 대한 해석해를 이용하여 반무한방파제와 양익방파제의 전후에서 발생하는 회절 및 부분반사 현상을 규명하고 항만 실무자들이 방파제 설계 시에 활용할 수 있는 유용한 정보를 제공하고자 한다. 제2절에서 Penney and Price의 해석해를 이용하여 반무한 방파제와 양익방파제에서 발생하는 회절 현상을 규명하였다. 제3절에서 구조물에서의 반사 현상을 양익방파제를 지나는 회절 현상으로 간주하여 방파제에서 발생하는 단일반사 및 다중반사 현상을 규명하였다. 마지막으로 연구의 내용을 정리하면서 결론을 맺었다.

2. 회절파의 해석해

2.1 반무한 방파제를 지나는 파랑의 회절

Penney and Price(1952)는 반무한 차폐막을 통과하는 빛의 회절현상에 대한 Sommerfeld(1896)의 해석해를 반무한 방파제 주위에서 발생하는 파랑의 회절문제에 적용하였다. 그들이 구한 해석해는 다음과 같은 가정을 전제로 한다. 유체는 비압축성과 비회전성이 있고, 파고는 파장과 수심에 비하여 아주 작다. 또한, 자유수면에서의 운동학적 경계조건과 동역학적 경계조건을 만족하고, 바닥에서의 운동학적 경계조건을 만족하며, 수심은 일정하다.

유체의 연속방정식인 Laplace 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

Laplace 방정식과 바닥에서의 운동학적 경계조건을 만족하는 파랑의 속도 포텐셜 ϕ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi(x, y, z, t) = A \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} F(x, y) e^{-i\omega t} \quad (2)$$

여기서, ω 는 각속도이고, k 는 파수이고, A 는 속도 포텐셜의 진폭이고, h 는 평균수심이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같은 Helmholtz 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + k^2 F = 0 \quad (3)$$

파랑이 반무한 방파제에 입사하는 경우에 해석하는 앞서 언급한 유체에 대한 가정들과 반무한 방파제에 수직 방향의 속도가 0이라는 경계조건을 부여하여 구할 수 있다. 식 (3)의 미분방정식을 풀어 극좌표로 변화시키면, 식 (4)와 같이 Penney and Price(1952)가 제안한 회절과 성분에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$F_s(r, \theta) = f(\sigma) \exp\{-ikr \cos(\theta - \theta_0)\} + f(\sigma') \exp\{-ikr \cos(\theta + \theta_0)\} \quad (4)$$

식 (4)의 σ 와 σ' 는 다음과 같이 정의되며, r 은 방파제 선단으로부터 떨어진 거리이다.

$$\sigma = 2 \sqrt{\frac{kr}{\pi}} \sin\left\{\frac{1}{2}(\theta - \theta_0)\right\}, \quad \sigma' = -2 \sqrt{\frac{kr}{\pi}} \sin\left\{\frac{1}{2}(\theta + \theta_0)\right\} \quad (5)$$

$$f(\sigma) = \frac{1+i}{2} \int_{-\infty}^{\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\pi u^2\right) du \quad (6)$$

θ_0 는 입사파가 방파제에 평행한 선과 이루는 각도이며, $\theta_0 < \theta < 2\pi$ 의 영역에서 입사파 성분은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_i(r, \theta) = \exp\{-ikr \cos(\theta - \theta_0)\} \quad (7)$$

$2\pi - \theta_0 < \theta < 2\pi$ 인 영역에서 반사파 성분은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_r(r, \theta) = \exp\{-ikr \cos(\theta + \theta_0)\} \quad (8)$$

방파제 선단으로부터 모든 방향으로 퍼져나가는 회절 현상에 대한 해석하는 다음과 같이 표현된다.

$$F(r, \theta) = F_i + F_r + F_s \quad (9)$$

입사파 성분의 속도포텐셜의 파고가 1이라면, 임의의 점에서 속도포텐셜의 파고 H 와 위상각 ε 은 다음의 식과 같이 복소수의 절대값과 편각으로 표현된다.

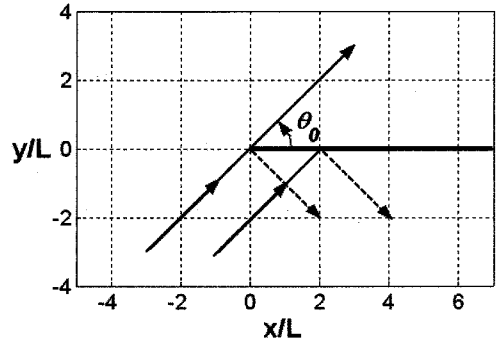


Fig. 1. Direction of waves incident to the semi-infinite breakwater.

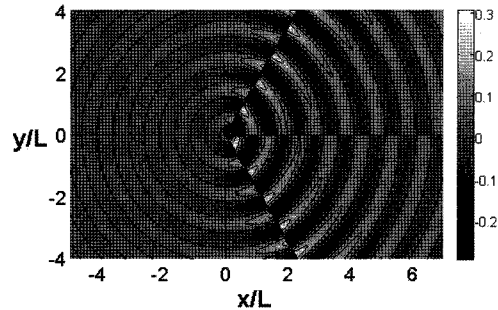


Fig. 2. Dimensionless surface elevations of waves diffracting around the semi-infinite breakwater ($\theta_0=60^\circ$).

$$H = |F(r, \theta)|, \quad \varepsilon = \arg\{F(r, \theta)\} \quad (10)$$

Fig. 1에 보인 바와 같이 반무한 방파제에 θ_0 의 각도로 진행되는 파랑에 대해 수치실험을 수행하였다. 파랑 각이 $\theta_0=60^\circ$ 인 파랑이 진행되는 경우, Fig. 2는 식 (9)와 같이 표현되는 회절과 성분의 무차원 수면변위를 보여준다. Fig. 3은 식 (7)로 표현되는 입사파 성분의 수면변위를 보여주며, Fig. 4는 식 (8)로 표현되는 반사파 성

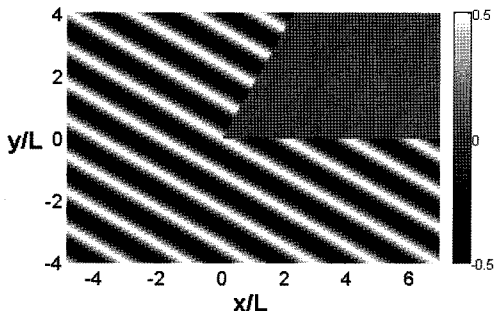


Fig. 3. Dimensionless surface elevations of waves incident to the semi-infinite breakwater ($\theta_0=60^\circ$).

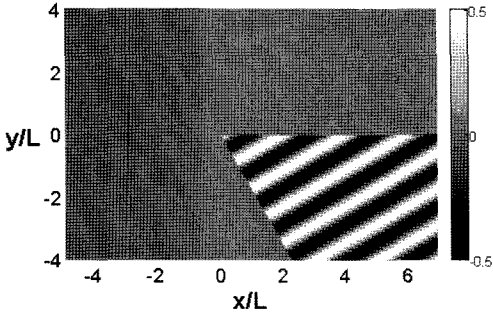


Fig. 4. Dimensionless surface elevations of waves reflected from the semi-infinite breakwater ($\theta_0=60^\circ$).

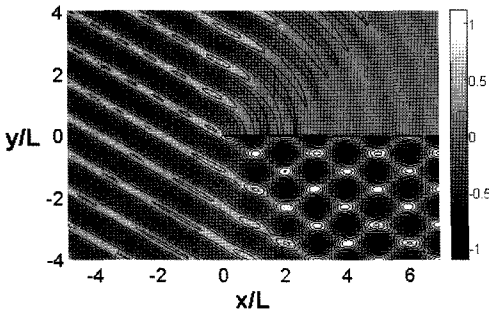


Fig. 5. Dimensionless surface elevations for wave diffraction around the semi-infinite breakwater ($\theta_0=60^\circ$).

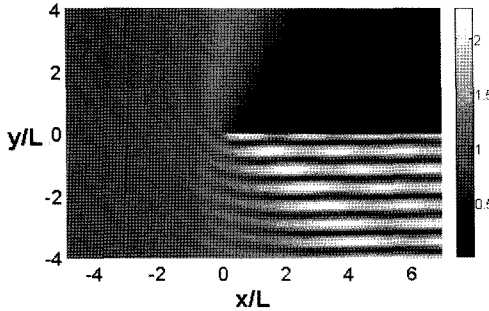


Fig. 6. Dimensionless wave heights for wave diffraction around the semi-infinite breakwater ($\theta_0=60^\circ$).

분의 수면변위를 보여준다. Fig. 2, 3, 4에서 제시되어 있는 회절파, 입사파 및 반사파 성분들을 중첩하게 되면 Fig. 5에 본 바와 같이 반무한 방파제를 지나는 파랑의 무차원 수면변위의 해석해를 구할 수 있다. Fig. 6에 보인 무차원 파고는 그 크기가 최대 2.3까지 나타났다. 따라서 방파제 전면부에서의 회절현상으로 인한 파고증폭이 방파제 설계 시에 무시할 수 없는 인자로 고려되어야 할 것이다.

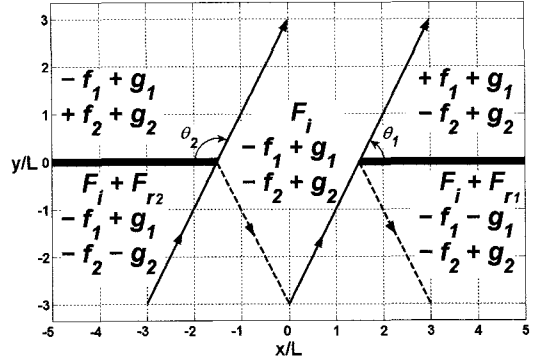


Fig. 7. Solutions of wave diffractions around the breakwater gap.

2.2 양익방파제를 지나는 파랑의 회절

Sobey and Johnson(1986)은 개구부의 폭이 $1L$ (L 은 파장임) 이상인 양익방파제를 파랑이 정사지게 입사하는 경우, 서로 반대쪽에 있는 각각의 반무한 방파제의 해석해를 선형 중첩시켜 해석이 가능하다는 것을 밝혔다. 선형 중첩에 의하여 개구부의 폭이 B 인 양익방파제를 파랑 각이 θ 인 파랑이 진행하는 경우에 해석해를 Fig. 7과 같이 영역에 따라 입사파, 반사파 및 회절파 성분들의 합으로 표현할 수 있다.

Fig. 7에 표현된 중첩에 의한 해석해의 성분들은 다음의 식들과 같다. 식 (11)은 Fig. 7의 오른쪽에 위치한 반무한 방파제의 선단으로부터 방사되어 나가는 회절성분을 표현하는 식이며, 식 (12)는 왼쪽의 반무한 방파제에서 발생하는 회절성분을 나타낸다.

$$\begin{aligned} f_1 &= f(\sigma) \exp\{-ikr_1 \cos(\theta - \theta_1)\} \\ g_1 &= f(\sigma') \exp\{-ikr_1 \cos(\theta + \theta_1)\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f_2 &= f(\sigma) \exp\{-ikr_2 \cos(\theta - \theta_2) - \beta\} \\ g_2 &= f(\sigma') \exp\{-ikr_2 \cos(\theta + \theta_2) - \beta\} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (13)은 입사파 성분을 나타낸다.

$$F_i(r, \theta) = \exp\{-ikr_1 \cos(\theta - \theta_1)\} \quad (13)$$

식 (14)는 Fig. 7의 오른쪽에 위치한 반무한 방파제에서 발생하는 반사파 성분을 나타내며, 식 (15)는 왼쪽에 위치한 반무한 방파제에서 반사되는 성분을 나타낸다.

$$F_{r1}(r, \theta) = \exp\{-ikr_1 \cos(\theta + \theta_1)\} \quad (14)$$

$$F_{r2}(r, \theta) = \exp\{-ikr_2 \cos(\theta + \theta_2) - \beta\} \quad (15)$$

위의 식들에서 r_1 은 Fig. 7의 오른쪽 방파제의 두부($B/2, 0$)

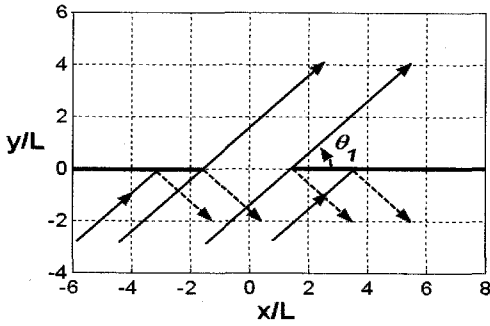


Fig. 8. Direction of waves incident to the breakwater gap.

로부터 떨어진 거리이며, r_2 는 왼쪽 방파제의 두부 $(-B/2, 0)$ 로부터 떨어진 거리이다. β 는 $kB\cos\theta_2$ 로 표현되며, 서로 반대쪽에 위치한 반무한 방파제에서 발생하는 파랑 성분을 중첩시키면서 야기되는 위상차를 고려한 값이다.

Fig. 8에 보인 바와 같이 파향각이 $\theta_1=60^\circ$ 인 파랑이 개구부의 폭이 $3L$ 인 양익방파제를 진행하는 경우를 수치실험 하였다. Fig. 9는 식 (11)과 식 (12)로 표현된 반무한 방파제에서의 회절파 성분들의 중첩으로 구해진 무차원 수면변위를 보여준다. Fig. 10과 Fig. 11은 각각 입사파와

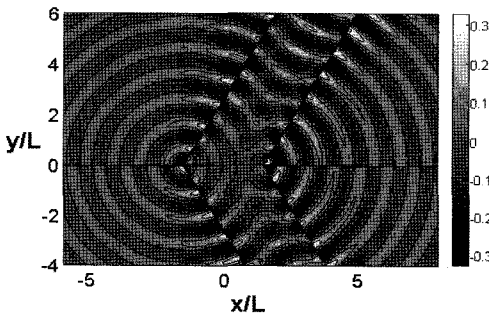


Fig. 9. Dimensionless surface elevations of waves diffracting around the breakwaters gap ($\theta_1=60^\circ, B=3L$).

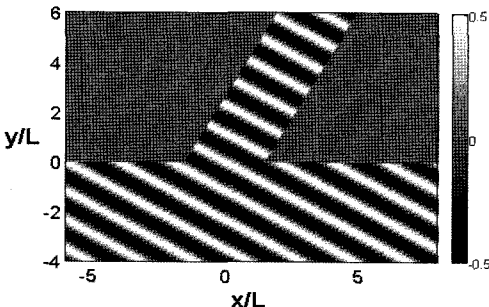


Fig. 10. Dimensionless surface elevations of waves incident to the breakwater gap ($\theta_1=60^\circ, B=3L$).

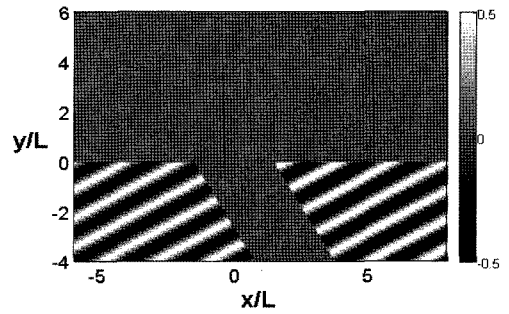


Fig. 11. Dimensionless surface elevations of waves reflected from the breakwaters with a gap ($\theta_1=60^\circ, B=3L$).

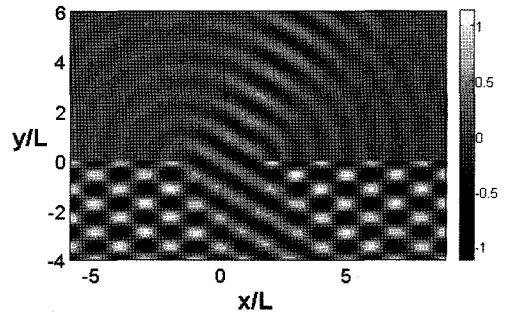


Fig. 12. Dimensionless surface elevations for wave diffraction around the breakwater gap ($\theta_1=60^\circ, B=3L$).

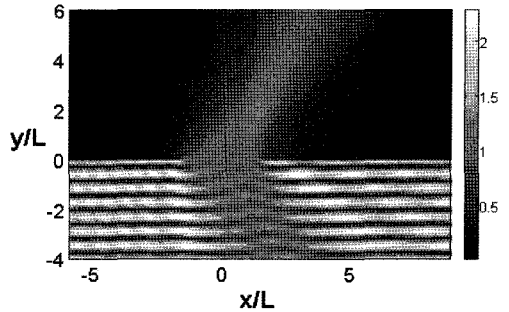


Fig. 13. Dimensionless wave heights for wave diffraction around the breakwater gap ($\theta_1=60^\circ, B=3L$).

반사파 성분을 나타내며, 이 모든 성분을 중첩시키면, Fig. 12에 보인 바와 같이 양익방파제를 통과하는 파랑의 무차원 수면변위의 해석해를 구할 수 있다. Fig. 13는 무차원 파고의 해석해를 나타낸다. 반무한 방파제의 경우와 같이 방파제 전면에서 최대파고가 대략 2.3이 되었다.

Fig. 12의 양익방파제는 각각의 방파제가 일직선상에 있다. Fig. 14, 15와 같이 서로 일직선상에 위치하지 않은 양익방파제에서의 회절현상에 대한 해석해도 구할 수 있다. 파향이 같음에도 불구하고 방파제의 위치에 따라 파

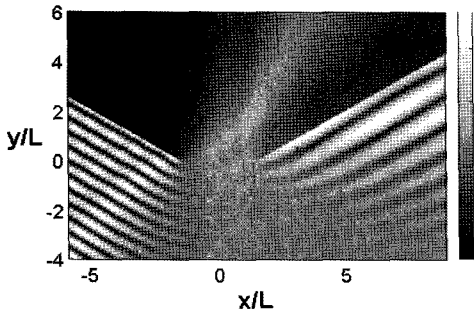


Fig. 14. Dimensionless wave heights for wave diffraction around non-aligned breakwaters with a gap (case I, $\theta_1=60^\circ$, $B=3L$).

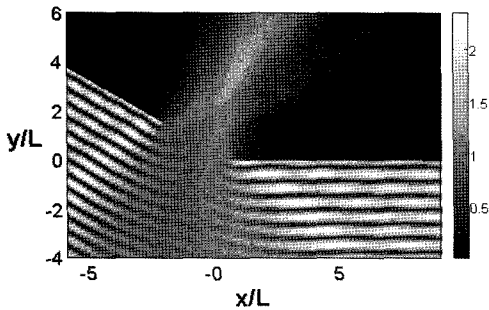


Fig. 15. Dimensionless wave heights for wave diffraction around non-aligned breakwaters with a gap (case II, $\theta_1=60^\circ$, $B=3L$).

고의 분포가 다름을 볼 수 있다. 중첩의 방법을 이용하면, 양익방파제가 어떠한 위치에 있더라도 해석해를 구할 수 있다.

3. 방파제에 부분반사가 발생하는 파랑의 해석해

3.1 일직선상에 위치한 방파제에 발생하는 부분반사

Fig. 16과 같이 해안구조물에서 반사되는 파랑의 현상은 구조물의 길이가 유한하므로 반사파의 파봉선의 폭도 유한하다. 이러한 이유 때문에 반사된 파랑은 구조물에서 멀리 전파 되어가는 동안에 회절현상과 유사하게 주위로 퍼져 나간다(Goda, 1985). 이러한 사실은 입사파랑과 구조물에서의 폭 만큼의 개구부를 갖는 가상의 양익방파제를 통과하는 회절파의 선형 중첩으로 방파제나 다른 구조물에서 발생하는 파랑의 반사현상을 재현할 수 있음을 의미한다. 해안에 설치되어 있는 방파제들의 표층에서는 피복제로 인한 소파작용 때문에 완전반사가 아닌 부분반

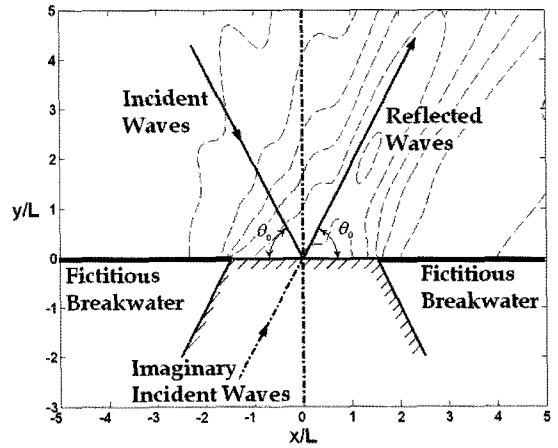


Fig. 16. Estimation of reflected waves by means of fictitious breakwaters.

사가 발생하며, 피복제의 종류나 쌓는 방법에 따라 방파제의 반사계수는 경우마다 다르다. 파랑이 방파제에서 소파되는 경우, 개개의 방파제에서 유발되는 고유 특성에 따른 반사계수를 계속하여 알고 있다면, 가상방파제를 통과하는 파랑의 파고를 조절함으로써 방파제 및 구조물의 전면 부근에서의 나타나는 파랑의 파고분포를 보다 정확히 예측하여 설계에 반영할 수 있으리라 판단된다.

이러한 부분반사현상을 검증하기 위하여 구간에 따라서 다른 반사계수를 갖는 대상 구조물을 구성하여, 파랑이 임의의 각도로 입사할 때 구조물 전면부에서의 반사현상에 대하여 해석해 보았다. 또한, 구조물의 형상이 일직선인 경우와 구조물의 형상이 일직선상에 있지 않은 경우에 대하여 각각 부분반사 되는 현상을 수치실험 하였다.

Fig. 16에서 보는 바와 같이 대상구조물에 임의의 방향으로 입사하는 파랑의 파향선이 x 축과 이루는 각이 θ_0 라던 입사파랑의 수면변위는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_i = a_i \exp\{i(kx \cos(-\theta_0) + ky \sin(-\theta_0) + \varepsilon)\} \quad (16)$$

위 식에서 a_i 는 입사파 수면변위의 진폭이고, k 는 파수이고, ε 은 위상차이다.

이번에는 해안구조물을 따라 구간별로 파랑의 반사율이 다른 경우에 수치실험을 수행하였다. 구조물을 따라 이은 선이 입사파와 이루는 각이 $\theta_0=60^\circ$ 이고, $3L$ 길이의 구간별로 반사율이 각각 $K_r=0.3, 0.6, 1.0$ 인 경우에 수치실험 하였다. 입사파와 반사파가 합성된 파고의 무차원 값을 Fig. 17에 도시하였다. 이 해석해는 다음의 방법으로

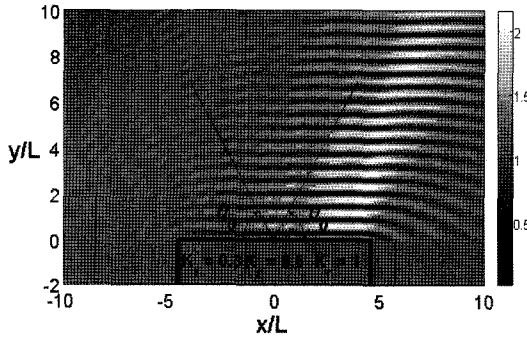


Fig. 17. Dimensionless heights of waves reflected from coastal structures ($B/L=9$, $\theta_0=60^\circ$, $K_r=0.3, 0.6, 1$).

계산되었다. $(x/L, y/L)=(-4.5, 0)$ 지점에 $K_r=0.3$ 의 반사파가 발생하여 $K_r=0.3$ 만큼의 에너지 불연속이 발생한다. 또한, $(x/L, y/L)=(-1.5, 0)$ 지점에 $K_r=0.3$ 의 반사파와 $K_r=0.6$ 의 반사파 사이에 $K_r=0.3$ 만큼의 에너지 불연속이 발생한다. 또한, $(x/L, y/L)=(1.5, 0)$ 지점에 $K_r=0.6$ 의 반사파와 $K_r=1.0$ 의 반사파 사이에 $K_r=0.4$ 만큼의 에너지 불연속이 발생한다. 마지막으로 $(x/L, y/L)=(4.5, 0)$ 지점에 $K_r=1.0$ 의 반사파가 발생하여 $K_r=1.0$ 만큼의 에너지 불연속이 발생한다. 에너지 불연속이 있는 경계에는 회절이 발생하므로 이를 다음과 같은 방법으로 예측할 수 있다. 먼저, $-4.5 < x/L < 4.5$ 구간에 $K_r=0.3$ 의 반사파에 의한 회절파를 모의한다(Fig. 18참조). 그리고 $-1.5 < x/L < 4.5$ 구간에 $K_r=0.3$ 의 반사파에 의한 회절파를 모의한다(Fig. 19 참조). 또한, $1.5 < x/L < 4.5$ 구간에 $K_r=0.4$ 의 반사파에 의한 회절파를 모의한다(Fig. 20참조). 그리고 이 세 개의 회절파 성분을 중첩한다(Fig. 21참조). 구간별 회절파 성분에 의한 합성파와 입사파 성분을 중첩하면 그 값

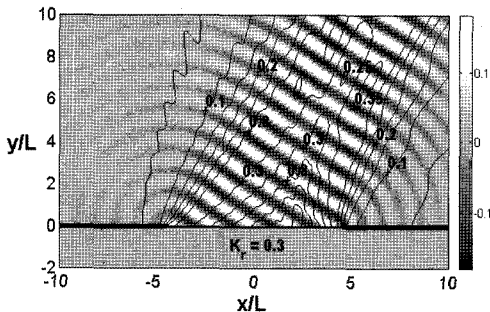


Fig. 18. Dimensionless surface elevations (image) and wave heights (solid line) for wave diffraction around the breakwater gap ($B/L=9$, $\theta_0=60^\circ$, $K_r=0.3$).

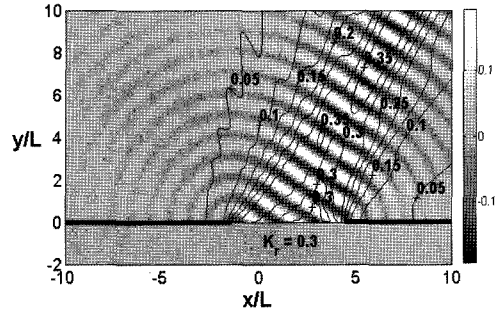


Fig. 19. Dimensionless surface elevations (image) and wave heights (solid line) for wave diffraction around the breakwater gap ($B/L=6$, $\theta_0=60^\circ$, $K_r=0.3$).

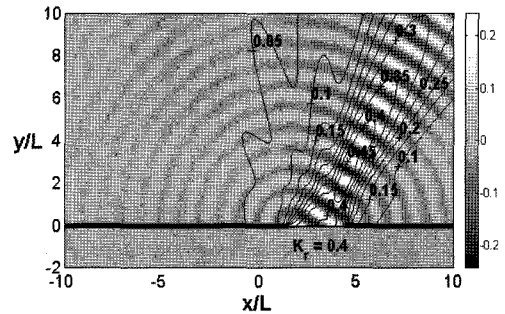


Fig. 20. Dimensionless surface elevations (image) and wave heights (solid line) for wave diffraction around the breakwater gap ($B/L=3$, $\theta_0=60^\circ$, $K_r=0.4$).

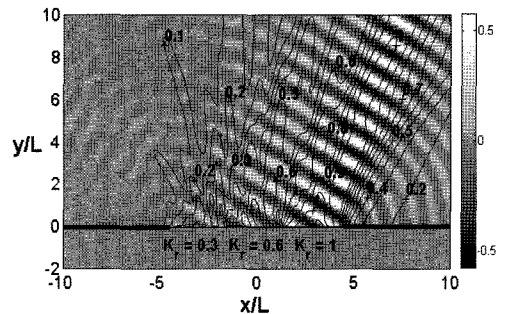


Fig. 21. Dimensionless surface elevations (image) and wave heights (solid line) for wave diffraction around the breakwater gap ($B/L=9$, $\theta_0=60^\circ$, $K_r=0.3, 0.6, 1$).

이 우리가 얻고자 하는 입사파와 구간별 부분반사파의 합성파이다.

3.2 경사지게 배치된 방파제에 발생하는 부분반사

이번에는 Fig. 22와 같이 구조물 전체가 일직선상에 있지 않고, θ' 만큼 경사지게 배치된 방파제에서 부분반사가 발생하는 경우에 수치실험을 수행하였다. 왼쪽의 ①번

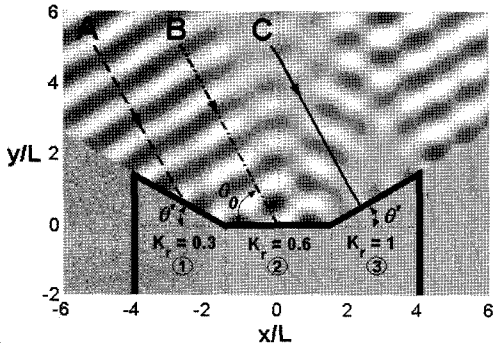


Fig. 22. Wave rays A, B, and C incident and reflected from each section of non-aligned coastal structures.

벽은 가운데의 ②번 벽과 $\theta=30^\circ$ 각을 이루고 있고, 오른쪽의 ③번 벽은 가운데의 ②번 벽과 $\theta=30^\circ$ 각을 이루고 있다. 3개의 벽면의 폭은 모두 $3L$ 이지만, 반사율은 구간 별로 ①, ②, ③번 벽에 각각 $K_r=0.3, 0.6, 1$ 로 다르다. 본 연구에서는 입사파와 ②번 벽면이 이루는 각이 $\theta_0=60^\circ$ 인 경우에 수치실험을 수행하였다.

각 구간에 입사하는 파향선은 각각 다른 궤적을 그리면서 전파하게 된다. A 파향선은 ①번 벽에 $K_r=0.3$ 으로 첫 번째로 반사되고, 더 나아가 ③번 벽에서 $K_r=1$ 로 두 번째로 반사되고, 다시 ①번 벽에서 $K_r=0.3$ 으로 세 번째로 반사되면서 이러한 과정이 반복된다. B 파향선은 ②번 벽에 $K_r=0.6$ 로 첫 번째로 반사되고, ①번 벽과 ③번 벽에 더 이상의 반사가 발생하지 않는다. C 파향선은 ③번 벽에서 $K_r=1$ 로 첫 번째로 반사되고, 더 나아가 ①번 벽에 $K_r=0.3$ 으로 두 번째로 되고, 다시 ③번 벽에서 $K_r=1$ 로 세 번째로 반사되면서 이러한 과정이 반복된다.

Fig. 23에 A 파향선이 $K_r=0.3$ 인 ①번 벽에 첫 번째로 반사된 후의 무차원 수면변위와 파고를 도시하였다. 무차

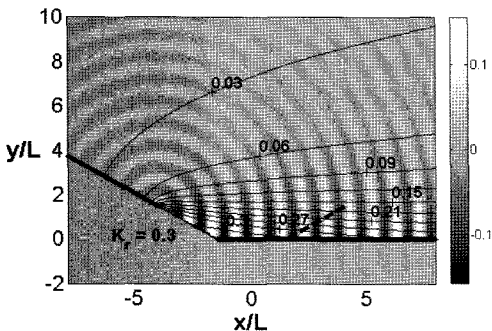


Fig. 23. Dimensionless surface elevation (image) and height (solid line) of wave ray A reflected firstly from coastal structures ($B/L=3, K_r=0.3$).

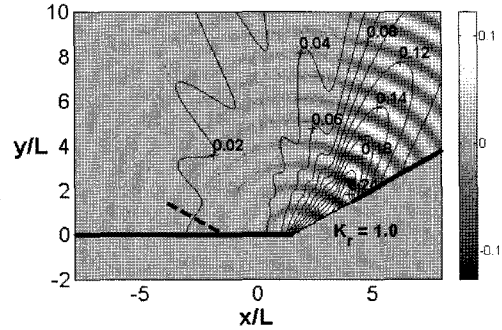


Fig. 24. Dimensionless surface elevation (image) and height (solid line) of wave ray A reflected secondly from coastal structures ($B/L=3, K_r=1.0$).

원 수면변위란 측정된 수면변위를 입사파의 진폭으로 나눈 값을 의미한다. 무차원 파고란 측정된 파고를 입사파고로 나눈 값을 의미한다. ③번 벽으로 향하는 파봉선은 대부분 y 축과 나란하였다. ③번 벽에 이르러 무차원 파고의 평균값은 0.231이고 전 구간에 걸쳐서는 0.16부터 0.31까지 그 값의 변동 폭이 제법 크다. ③번 벽에 도달한 파의 경우 무차원 파고의 변동계수는 0.190으로 나왔다. 변동계수란 표준편차/평균으로서 자료의 단위에 의존하지 않고 자료의 산포를 비교하는데 유용하게 쓰인다. Fig. 23에 보인 바와 같이 ③번 벽에서 구해진 파고 및 파향각의 평균값을 사용하여 $K_r=1$ 의 두 번째 반사파를 구하였다. 이렇게 구한 무차원 수면변위와 파고를 Fig. 24에 도시하였다. ①번 벽으로 향하는 파봉선은 대부분 ①번 벽에 직각을 이루었다. 따라서 세 번째 반사파는 구조물에서 멀어져가는 방향으로 전파되어 반사파의 파고는 구조물 전면에는 미미할 정도로 작게 나올 것이다.

Fig. 25에 C 파향선이 $K_r=1$ 인 ③번 벽에 첫 번째로 반

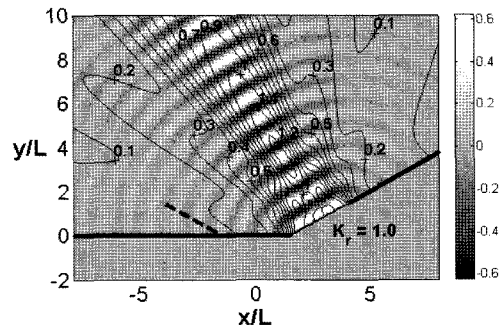


Fig. 25. Dimensionless surface elevation (image) and height (solid line) of wave ray C reflected firstly from coastal structures ($B/L=3, K_r=1.0$).

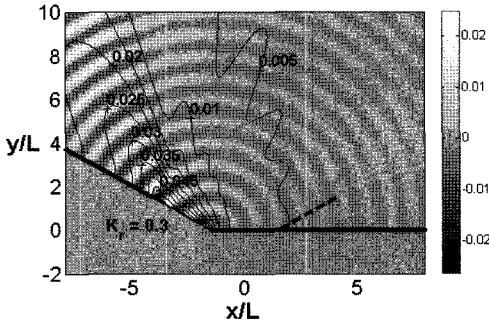


Fig. 26. Dimensionless surface elevation (image) and height (solid line) of wave ray C reflected secondly from coastal structures ($B/L=3, K_r=0.3$).

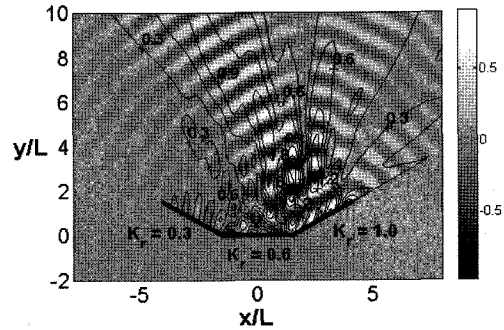


Fig. 28. Dimensionless surface elevation (image) and height (solid line) of all the wave rays reflected from coastal structures.

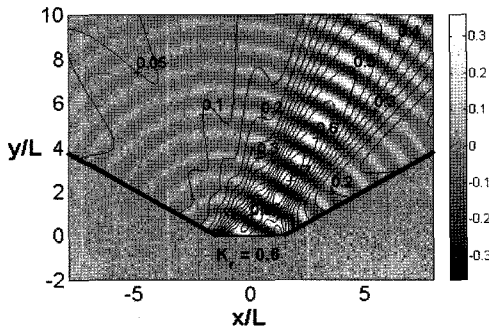


Fig. 27. Dimensionless surface elevation (image) and height (solid line) of wave ray B reflected firstly from coastal structures ($B/L=3, K_r=0.6$).

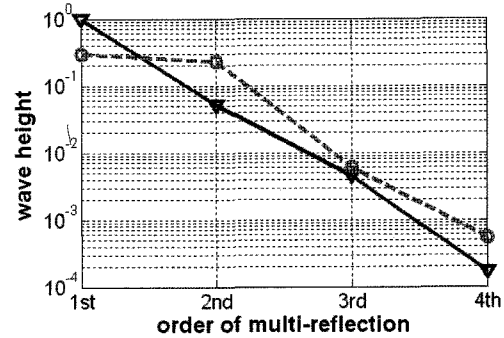


Fig. 29. Variation of wave heights with the order of multi-reflection (circle: ray A, triangle: ray C).

사된 후의 무차원 수면변위와 파고를 도시하였다. ①번 벽으로 향하는 파봉선은 대부분 ①번 벽에 직각을 이루었다. 그 결과 Fig. 26에 볼 수 있는 바와 같이 두 번째 반사파는 구조물에서 멀어져가는 방향으로 전파되어 반사파의 파고는 구조물의 전면에는 미미할 정도로 작게 나왔다.

Fig. 27에 B 파향선이 $K_r=0.6$ 인 ②번 벽에 첫 번째로 반사된 후의 무차원 수면변위와 파고를 도시하였다. 반사파는 ①번 및 ③번 벽에 평행하게 전파하기 때문에 구조물에서의 반사는 더 이상 발생하지 않을 것이다.

Fig. 28에 A,B,C 파향선이 벽에서 반사될 수 있는 모든 경우의 반사파 성분의 수면변위와 파고를 도시하였다. ②번 벽과 ③번 벽 사이의 앞에서 반사파고 크게 나왔고 최대값은 1.97 이었다. Fig. 29에 A,C 파향선이 다중반사가 발생한 뒤 계산된 파고를 도시하였다. 세 번째 반사 후에는 파고가 입사파고에 비해서 1% 이하로 작아졌다. Fig. 30에 입사파와 벽에서의 반사파 성분을 합한 성분의 파고를 도시하였다. Fig. 28에서 반사파 성분으로 나온 것

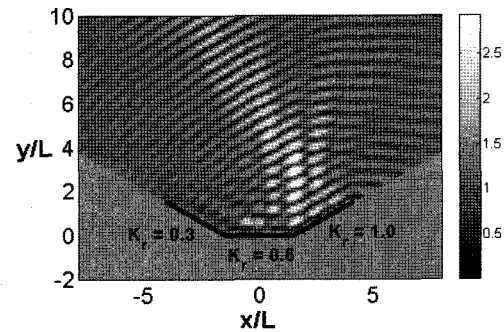


Fig. 30. Dimensionless height of waves incident and reflected from non-aligned coastal structures ($\theta_0=60^\circ$).

과 같은 양상으로 ②번 벽과 ③번 벽 사이의 앞에서 합성된 파의 파고가 크게 나왔고 최대값은 2.93 이었다.

Table 1에 A 파향선과 C 파향선이 다중 반사가 발생하면서 파고와 파향각이 어떻게 달라지는지 반사 전후 각각의 값을 나타내었다. 파향각은 모든 경우에 ②번 벽과 나란한 x축을 기준으로 반시계 방향으로 정하였다. 모든

Table 1. Dimensionless wave heights and directions of waves reflected from each section of non-aligned breakwaters

Order of multi-reflection		Dimensionless wave height			Direction of wave ray (degree)		
		Before reflection		After reflection	Before reflection		After reflection
		Mean	Coefficient of variation		Mean	Coefficient of variation	
Ray A	1st (wall ①)	1.00000	0.000	0.30000	-60	0.000	0
	2nd (wall ③)	0.23100	0.190	0.23100	4	0.018	56
	3rd (wall ①)	0.02030	0.112	0.00609	171	0.035	129
	4th (wall ③)	0.00053	0.100	0.00053	9	0.085	51
Ray C	1st (wall ③)	1.00000	0.000	1.00000	-60	0.000	120
	2nd (wall ①)	0.17200	0.029	0.05160	172	0.025	128
	3rd (wall ③)	0.00449	0.102	0.00449	9	0.085	51
	4th (wall ①)	0.00039	0.100	0.00017	171	0.033	129

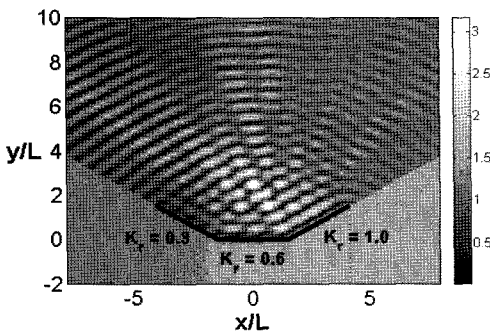


Fig. 31. Dimensionless height of waves incident and reflected from non-aligned coastal structures ($\theta_0=90^\circ$).

파향선의 경우에 세 번째 반사 후의 파고는 초기 입사파고에 비해 1% 이하로 감소하였다. 또한 Table 1에 각 벽면에서의 반사파의 파고와 파향각의 변동계수를 나타내었다. 파고의 변동계수는 A 파향선의 두 번째 반사의 경우에 0.190으로 가장 크게 나왔고, 파향각의 변동계수로는 A 파향선의 네 번째 반사의 경우와 C 파향선의 세 번째 반사의 경우에 모두 0.085로 가장 크게 나왔다. 본 연구에서는 파고와 파향각의 평균값이 벽면을 통한 회절파의 경계 값이 되기 때문에 변동계수가 크다는 것은 회절파의 추정치의 오차가 크다는 것을 의미한다. 대체적으로 변동계수가 작아서 본 연구의 추정 방법에 문제가 없는 것으로 판단된다.

Fig. 31은 입사파의 파향각이 가운데 구조물에 직각으로 입사하는 경우의 입사파와 반사파의 합성된 파의 파고를 도시하였다. ②번 벽의 앞에서 합성된 파의 파고 크게 나왔고 최대값은 3.17 이었다. 해안구조물의 전면에 발생하는 파고는 구조물의 배치뿐만 아니라 입사파의 방향에도 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 Penney and Price(1952)의 해석해를 사용하여 반무한방파제, 양익방파제 등에서 발생하는 파랑의 회절 및 다중 반사 현상에 대한 해석해를 구하였다. 양익 방파제가 경사지게 위치한 경우에도 중첩을 통하여 해석해를 구할 수 있었으며, 이를 바탕으로 방파제의 위치와 입사파랑의 각도에 따라 다른 경우에도 해석해를 구할 수 있었다. 또한, 구조물에 반사되는 성분을 구조물의 폭 만큼의 개구부를 갖는 양익방파제를 통과하는 회절파 성분으로 간주 입사파와 반사파 성분을 중첩시켜 구조물 전면부에서 발생하는 완전반사 및 부분반사현상에 대한 해석해를 제시하였다. 이러한 해석해는 국내의 항만 실무자들에게 회절 및 다중반사 현상에 대한 이해를 도울 수 있을 것이며, 실무의 해안 및 항만 구조물 설계 시에 사용되는 수치프로그램들의 정확도를 판단할 수 있는 비교 대상으로 사용될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)대영엔지니어링과 같이 수행한 산학연 공동기술개발 컨소시엄 과제인 “항만구조물의 설계과 제원 및 항내 정온도 산정기술 개발” 과 (주)제인E&C와 같이 수행한 민간기업 연구용역 과제인 “항만정온도 평가를 위한 비선형 불규칙파랑 수치모형 개발 연구용역” 의 지원을 받아 수행하였습니다. 두 업체의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

이해균, 이길성, 이창훈 (1998). 회절현상의 관점에서 본 포물선형 완경사방정식의 비교. 한국해양해양공학회지, 10(1),

- 1-9.
- 편종근, 이용규, 김철 (1987). Mathieu함수를 이용한 파랑의 회절에 관한 연구. 공학기술연구소논문집, 명지대학교, 2, 1-22.
- Engquist, B. and Majda, A. (1977). Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves. *Mathematics of Computation*, 31(139), 629-651.
- Goda, Y. (1985). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. University of Tokyo Press.
- Lee, C., Kim, G. and Suh, K.D. (2003). Extended mild-slope equation for random waves. *Coastal Engineering*, 48, 277-287.
- Lee, C., Park, W.S., Cho, Y.S. and Suh, K.D. (1998). Hyperbolic mild-slope equations extended to account for rapidly varying topography. *Coastal Engineering*, 34, 243-257.
- Madsen, P.A. (1983). Wave reflection from a vertical permeable wave absorber. *Coastal Engineering*, 7, 381-396.
- Madsen, P.A. and Sorensen, O.R. (1992). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly varying bathymetry. *Coastal Engineering*, 18, 183-204.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equation for nearshore wave propagation. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119, 618-638.
- 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, Series A*, 244, 236-253.
- Sobey, R.J. and Johnson, T.L. (1986). Diffraction patterns near narrow breakwater gaps. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 112(4), 512-528.
- Sommerfeld, A. (1896). *Mathematische Theorie der Diffraction*. *Mathematische Annalen*, 47, 317-374.
- Suh, K.D., Lee, C. and Park, W.S. (1997). Time-dependent wave equations for wave propagation on rapidly varying topography. *Coastal Engineering*, 32, 91-117.

Received August 3, 2005

Accepted November 7, 2005