

방파제 주위에서 발생하는 회절현상에 대한 해석해의 고찰

Study on analytical solution of diffraction around breakwaters

김민균*, 이창훈**, 조용준***

Min Kyun Kim, Changhoon Lee, Yong Jun Cho

요 지

본 연구에서는 Penney와 Price(1952)의 해석 해를 사용하여 반무한방파제, 양익방파제등에서 발생하는 회절현상에 대한 해석 해를 구하였다. 양익방파제가 경사지게 위치한 경우에도 중첩을 통하여 해석 해를 구할 수 있었으며, 이를 바탕으로 방파제의 위치와 입사파랑의 각도에 따른 각각의 경우에 대하여 해석 해를 구할 수 있다. 또한, 구조물에 입사된 파랑성분과 구조물의 폭만큼의 개구부를 갖는 양익방파제를 통과하는 회절파성분과 같게 표현될 수 있는 반사파성분을 서로 중첩시켜 구조물 전면부에서 발생하는 완전반사 및 부분반사현상에 대한 해석 해를 제시하였다. 국내의 실무에서 해안 및 항만 구조물 설계에 사용되는 수치프로그램들의 정확도를 간단히 판단할 수 있는 비교 대상으로 이러한 해석해가 이용될 수 있으리라 판단된다.

핵심용어: 회절, 반무한 방파제, 양익방파제, 이안제, 중첩된 해석해, 부분반사

1. 머리말

방파제는 파랑의 직접적인 내습을 차단하여 배후의 시설을 보호하는 기능이 있다. 그런데, 방파제 주위의 회절 현상은 방파제 배후뿐만 아니라 전면부에서도 발생한다. 방파제 주위의 회절 현상은 방파제 배후뿐만 아니라 전면부에서도 발생한다. 방파제의 전면에는 입사파와 반사파가 중첩되어 높은 에너지가 발생하는 반면, 방파제 측면에서는 방파제의 존재로 인한 회절현상으로 에너지의 불연속이 존재한다. 회절에서 특기할 사항은, 에너지의 불연속이 이어질 때 에너지가 상대적으로 큰 쪽에 에너지가 위 아래로 요동치는 현상이 있다. 이러한 에너지의 요동이 방파제 뒤에서는 방파제 측면에서 발생하는 반면 방파제 앞에서는 방파제의 전면, 즉 두부에서 발생한다. 악천후 시 파랑에 의한 방파제의 피해 사례로 두부의 피해가 자주 나타나는데, 이는 방파제가 마치 곳에서 파가 굴절되면서 집중되어 나타나기도 하지만 회절에 의한 에너지의 요동으로 파고가 증가하는 것으로 이해할 수 있겠다. 따라서 파랑의 회절은 항내의 정온도 유지 및 해안 구조물 설계에 있어 고려해야 할 중요한 인자로 인지된다. 방파제 주변의 회절 현상은 반무한방파제, 양익방파제, 이안제 등에서 나타난다. Penney와 Price(1952)는 반무한방파제 주위에서 발생하는 회절현상에 대한 해석 해를 제안하였고, 양익방파제와 이안제는 개구부의 폭 또는 이안제 폭이 서로 반대방향의 반무한 방파제를 선형 중첩시켜 구할 수 있음을 제시하였다.

본 연구에서는 Penney와 Price의 회절현상에 대한 해석 해를 이용하여 반무한방파제와 양익방파제의 전후에서 발생하는 회절 현상들에 대하여 규명하여 항만 실무자들이 방파제 설계 시에 활용할 수 있는 정보를 제공하고자 한다. 실제로 설계되는 양익방파제는 해안의 해저지형이나 조석 및 계절풍등과 자연환경의 특징들로 인하여, 서로 일직선상에 위치하기보다는 비스듬히 경사지

* 정회원-서울시립대학교 토목공학과 박사과정-E-mail : kimminkyun@uos.ac.kr

** 정회원-세종대학교 토목환경공학과 부교수-E-mail : cleee@sejong.ac.kr

*** 정회원-서울시립대학교 토목공학과 교수-E-mail : young@uos.ac.kr

게 설계되어야 하는 경우가 비일비재 할 것이다. 그러한 사실들을 고려하여 양익방파제가 일직선에 있지 않은 경우에도 반무한 방파제의 해석 해를 선형 중첩시켜 근사적인 해석 해를 구하였다. 그리고, 유한한 폭을 갖는 대상 구조물에 입사된 파랑성분과 그 폭만큼의 개구부를 갖는 양익방파제를 통과하는 회절파랑과 같게 표현될 수 있는 반사파성분을 서로 중첩시켜 구조물 전면부에서 발생하는 부분반사현상에 대한 해석해들을 제시하였다.

2. 반무한 방파제에서의 회절현상

Penney와 Price는 반무한 방파제를 지나는 파랑의 회절현상을 예측하였다. 그 해를 극좌표로 표현하면 다음과 같다.

$$F(r, \theta) = \exp\{-ikrcos(\theta - \theta_0)\}f(\sigma) + \exp\{-ikrcos(\theta + \theta_0)\}f(\sigma') \quad (1)$$

여기서 σ 와 σ' 는 다음과 같이 정의되며, r 은 방파제 선단으로부터 떨어진 거리이고, θ_0 는 방파제와 나란한 방향과 입사파향 사이에 벌어진 각도이다.

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

$$f(\sigma) = \frac{1+i}{2} \int_{-\infty}^{\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\pi i u^2\right) du \quad (3)$$

그림 1과 그림 2는 각각 반무한 방파제에 파향각이 60° 로 진행하는 경우의 무차원 수면변위와 파고를 나타낸다. 그림 2에서 무차원 파고가 최대 2.3가 된다. 이는 방파제 전면부에서의 회절현상으로 인한 파고 증폭이 방파제 설계 시에 중요하게 고려되어야 함을 시사한다.

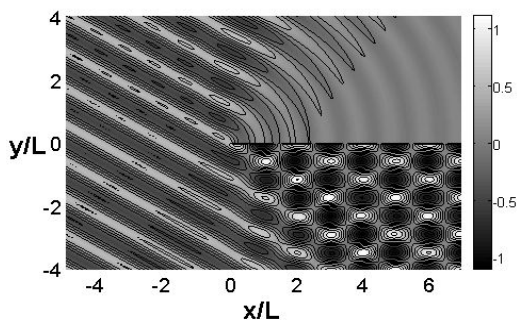


그림 1. 반무한 방파제에 $\theta_0 = 60^\circ$ 로 입사하는 파의 무차원 수면변위,

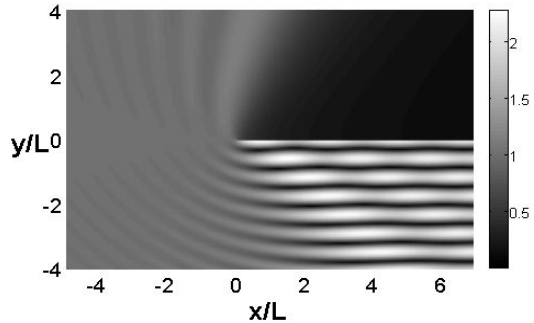


그림 2. 반무한 방파제에 $\theta_0 = 60^\circ$ 로 입사하는 파의 무차원 파고,

3. 양익방파제에서의 회절현상

Sobey 등(1986)은 개구부의 폭이 한 파장 이상인 양익방파제를 파랑이 경사지게 입사하는 경우, 서로 반대 방향에 위치하는 각각의 반무한 방파제의 해석해들을 선형 중첩시켜 해석할 수 있음을 보였다. 선형중첩에 의하여 개구부의 폭이 B 인 양익방파제에 θ_1 의 각도로 입사하는 파랑의 경우에 대한 해석 해를 그림 3과 같이 영역에 따라 입사파, 반사파, 회절파성분들의 합으로 표현된다. 식 (4)는 그림 3의 오른쪽에 위치한 반무한 방파제의 선단으로부터 방사되어 나가는 회절성분을 표현하는 식이며, 식 (5)는 왼쪽의 반무한 방파제에서 발생하는 회절성분을 나타낸다.

$$f_1 = \exp\{-ikr_1 \cos(\theta - \theta_1)\}f(\sigma), \quad g_1 = \exp\{-ikr_1 \cos(\theta + \theta_1)\}f(\sigma') \quad (4)$$

$$f_2 = \exp \{-i[kr_2 \cos(\theta - \theta_2) + \beta]\} f(\sigma), \quad g_2 = \exp \{-i[kr_2 \cos(\theta + \theta_2) + \beta]\} f(\sigma') \quad (5)$$

위 식에서 r_1 은 그림 3의 오른쪽 방과제의 두부($B/2, 0$)로부터 떨어진 거리이며, r_2 는 왼쪽 방과제의 두부($-B/2, 0$)로부터 떨어진 거리이다. β 는 $kB \cos \theta_2$ 로 표현되며, 오른쪽 방과제의 선단을 극좌표의 기준으로 함으로서 왼쪽 방과제에 발생하는 위상차를 의미한다. 그리고, 식 (6)는 입사파 성분, 식 (7), (8)은 각각 오른쪽 및 왼쪽 방과제에서의 반사파 성분을 나타낸다.

$$F_i(r, \theta) = \exp \{-ikr_1 \cos(\theta - \theta_1)\} \quad (6)$$

$$F_{r1}(r, \theta) = \exp \{-ikr_1 \cos(\theta + \theta_1)\} \quad (7)$$

$$F_{r2}(r, \theta) = \exp \{-i[kr_2 \cos(\theta + \theta_2) + \beta]\} \quad (8)$$

반무한 방과제에서 발생하는 회절현상에 대한 해석해의 중첩을 응용하면, 그림 4와 같이 서로 일직선상에 위치하지 않은 양익방과제의 경우에도 해석 해를 유도할 수 있다.

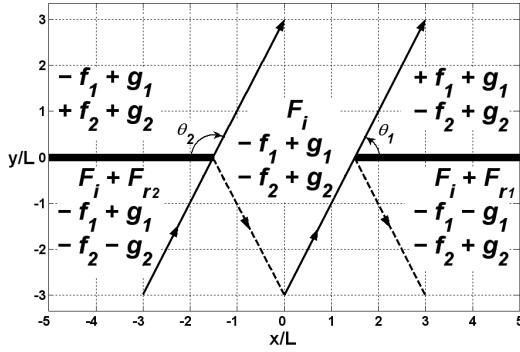


그림 3. 양익방과제에서의 해법

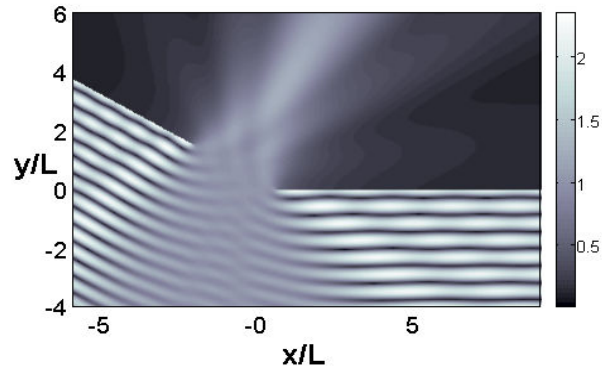


그림 4. 경사진 양익방과제에서의 무차원 파고

4. 부분반사에 대한 중첩해의 응용

그림 5와 같은 형상을 지닌 해안 구조물에서 반사되는 파랑은 구조물에서 멀리 전파되어가는 동안에 회절현상과 유사하게 주위로 퍼져 나간다. 즉, 해안구조물에서의 입사와 반사 현상은 입사파와 구조물의 폭 만큼의 개구부를 갖는 가상의 양익방과제를 통과하는 회절파의 선형 중첩으로 재현할 수 있다. 식 (9)는 구조물 전면부에 입사된 파랑과 양익방과제를 통과하는 회절파와 같게 표현될 수 있는 반사파 성분을 중첩시켜 표현한 것으로 구조물 전면부에서 발생하는 파고를 나타낸다.

$$H_T = H_i \text{ mod } \left[\exp \left\{ i \left(kx \cos \left(\frac{3\pi}{2} + \theta_i \right) + kys \sin \left(\frac{3\pi}{2} + \theta_i \right) + \epsilon \right) \right\} + \sum_{k=1}^n K_{rk} F_k \right] \quad (9)$$

위 식에서 θ_i 는 대상구조물에 임의의 방향으로 입사되는 파랑의 파향선이 y 축과 이루는 각이며, H_i 는 입사파고이고, ϵ 은 위상차이다. 또한, K_{rk} 는 반사파 성분의 반사계수이며, F_k 는 반사파 성분으로서 양익방과제를 통과하는 회절파의 해석해이다.

첫 번째로, 그림 6과 같이 입사파향이 $\theta_i=30^\circ$ 인 파랑이 길이가 $9L$ 인 일직선상의 방과제에 $3L$ 구간마다 $K_r = 0.3, 0.6, 1$ 로 서로 다르게 반사되는 경우를 해석하였다. 각 구간의 경계에 에

너지의 불연속이 발생하기 때문에 반사파 성분의 해는 세 가지의 회절파 성분을 합성해서 구할 수 있다. 먼저, 9L 구간에 반사계수($K_{r,1}$)가 0.3인 회절파 성분을 구한다. 그리고, 오른쪽 6L 구간에 0.6과 0.3의 차이인 반사계수($K_{r,2}$)가 0.3인 회절파 성분을 구한다. 마지막으로 1과 0.6의 차이인 반사계수($K_{r,3}$)가 0.4인 회절파 성분을 구한다. 이 세 가지 성분을 선형 중첩하면 그림 6과 같이 반사파성분의 수면변위와 파고를 구할 수 있다. 그런 후, 식 (9)를 이용하여 그림 7과 같이 구간에 따라 반사계수가 서로 다른 구조물의 전면부에서 발생하는 부분반사현상을 재현할 수 있다. 그림 8은 구조물의 모든 구간에서 반사계수가 1로서 구조물의 전면부에서 완전반사가 발생하는 현상을 보여주고 있다. 그림 7과 8을 비교해보면, 상대적으로 반사계수가 작은 구조물의 전면부에서 발생한 부분반사로 인하여 파고의 감소가 확연하게 나타남을 확인할 수 있다.

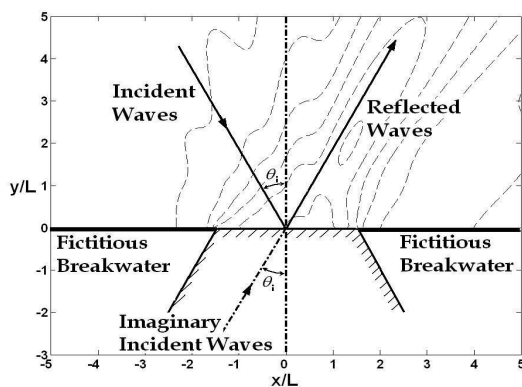


그림 5. 가상방파제를 이용한 구조물의 반사파

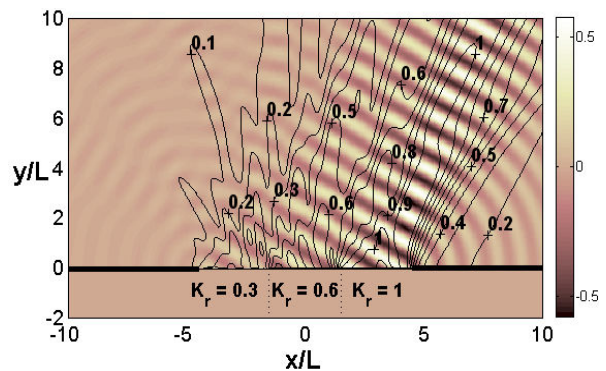


그림 6. $B/L = 9$ 이고, K_r 이 다른 방파제에서 파랑의 무차원 수면변위(image)와 파고(실선)

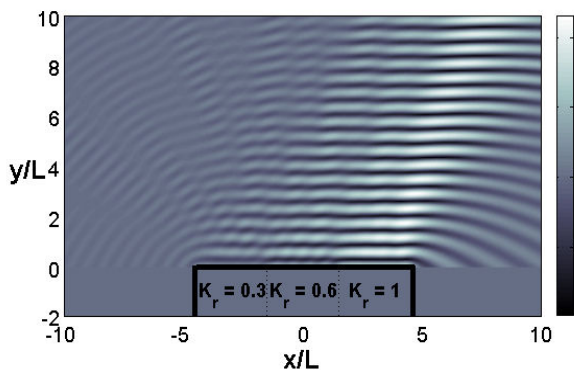


그림 7. 구간별로 반사계수가 서로 다른 구조물에서의 의 파고

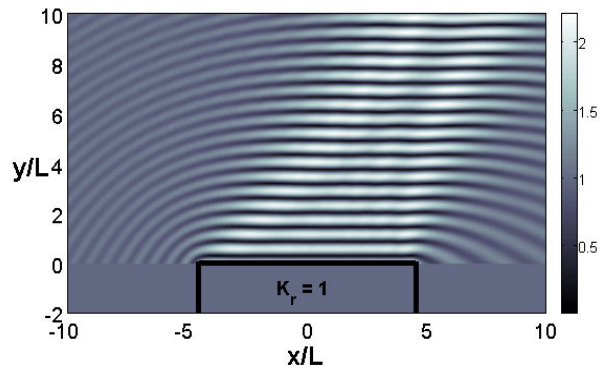


그림 8. 전구간에 반사계수가 똑같은 구조물에서의 파고

두 번째로, 그림 9와 같이 구조물이 일직선상에 위치하지 않고, 임의의 경사(θ')를 갖는 경우에 해석해 보았다. 구조물의 각 벽면의 폭은 모두 3L이며, 반사계수는 서로 다르고, 입사되는 입사파향은 $\theta_i = 30^\circ$ 이며, 구조물 경사각은 $\theta' = 30^\circ$ 이다. 그림 9의 실선과 파선 및 일점쇄선은 각 벽면에 입사된 파랑이 반사되어 전파되어 나가는 방향을 보여준다. 왼쪽 벽에 반사된 파는 오른쪽 벽면에서 다시 반사된다. 마찬가지로 오른쪽 벽면에서 반사된 파는 왼쪽 벽면에서 다시 반사된다. 이 모든 현상을 고려하여 예측된 파랑의 수면변위와 파고가 그림 10에 도시되어 있다. 이 반사파 성분들과 입사파의 해를 선형 중첩 하면 그림 16에 보인 것과 같이 파고를 얻을 수 있다. 그림

16을 자세히 살펴보면, 대상구조물이 경사지게 위치해 있음으로 인한 반사파들의 중첩효과와 다중반사의 영향들로 최대파고가 3 정도 된다. 이는 그림 7에 나타난 일직선상으로 위치한 구조물에 반사된 파랑의 최대파고가 2.3 정도의 값을 갖는 사실과 비교해 보았을 때, 해양구조물의 설계에 있어서 구조물의 위치와 입사파의 파향으로 인하여 발생하는 부분반사 및 다중반사현상들의 중요성을 입증한다.

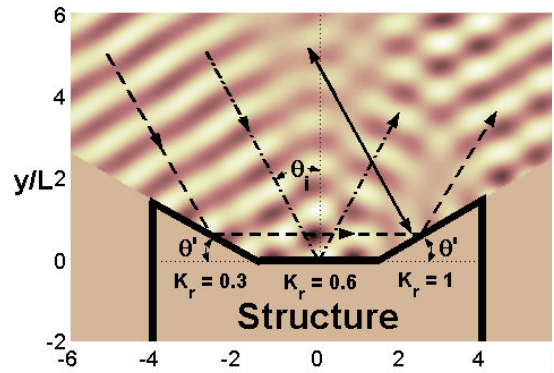


그림 9. 경사진 구조물에서의 다중반사

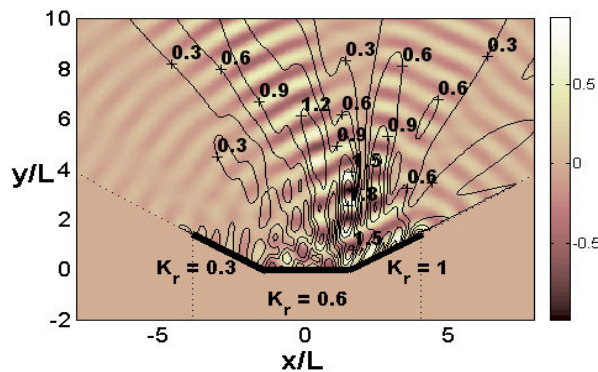


그림 10. 경사진 구조물에서 다중반사 된 파의 수면변위(image)와 파고(실선)

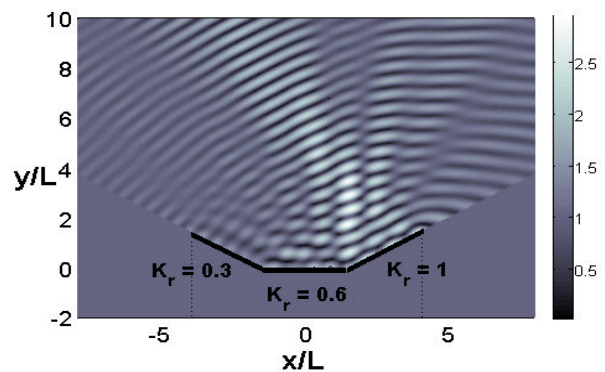


그림 11. 경사진 구조물 전면에서 입사파와 반사파가 중첩된 파고

5. 결론

본 연구에서는 Penney와 Price의 해석 해를 사용하여 반무한방파제, 양익방파제등에서 발생하는 회절현상에 대한 해석 해를 구하였다. 양익방파제가 경사지게 위치한 경우에도 중첩을 통하여 해석 해를 구할 수 있었으며, 이를 바탕으로 방파제의 위치와 입사파랑의 각도에 따른 각각의 경우에 대하여 해석 해를 구할 수 있다. 또한, 구조물에 입사된 파랑성분과 구조물의 폭만큼의 개구부를 갖는 양익방파제를 통과하는 회절파성분과 같게 표현될 수 있는 반사파성분을 서로 중첩시켜 구조물 전면부에서 발생하는 완전반사 및 부분반사현상에 대한 해석 해를 제시해 보았다. 국내의 실무에서 해안 및 항만 구조물 설계에 사용되는 수치프로그램들의 정확도를 간단히 판단할 수 있는 비교 대상으로 이러한 해석해가 이용될 수 있으리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구(과제번호: R01-2003-000-10635-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 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.