

## 부분반사율을 갖는 도제 방파제의 안전성 검토

### The Study for Safety of Insular Breakwater with Partial Reflection

Sung Duk Kim\*

Civil Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, Korea

#### Abstract

The purpose of this study is to investigate diffracted wave height at the vicinity of insular breakwater. And it is to estimate the effect of the wave reduction under the condition of the various incident wave angle and reflection ratio. The numerical simulation is performed by using the solution of the Green function based on the boundary integral equation. When the channel is dredged on the seabed, the effect of wave reduction at the wave field is to be investigated. With the reflection and the dredge, the wave height is reduced and the wave height pattern is mild. The results of this study can give an information for the layout and design of insular breakwater, and it will be informed to understand the hydraulic factor for safety of breakwater.

**Key words:** insular breakwater, boundary integral equation, Green function, dredge, wave height reduction

#### 국문초록

연구의 목적은 소파제의 설치 유무에 따른 도제 방파제 부근에서의 회절 파고비를 조사한 것이다. 그리고, 다양한 입사각도를 갖는 파랑의 조건과 각각 다른 반사율을 갖는 소파제의 영향에 따른 파고 감소 효과의 정도를 조사한다. 본 연구의 해는 경계적분방정식을 기본으로 하여 얻어진 Green 함수를 이용하여 수치계산을 실시한다. 해저 준설을 실시하여 그 위를 통과하는 진행파가 도제 방파제에 도달할 때 파고 감소 효과 또한 조사한다. 소파제의 설치 및 해저 준설로 인해 파고 감소 효과가 나타나고, 파형이 완만해 짐이 나타났다. 본 연구의 결과는 도제 방파제의 배치 및 설계, 그리고 방파제의 안전성을 확보하기 위한 수리학적 인자를 발견하는 데 많은 정보를 제공할 것으로 기대된다.

**주제어:** 도제 방파제, 경계적분방정식, Green 함수, 해저 준설, 파고감소

---

\* Tel. +82-10-4235-9264. Fax. +82-43-275-2377. E-mail: soundoug@hanmail.net

Submission & Publication Process

Received: Sep. 30, 2014 / Revised: Oct 12, 2014 / Accepted: Oct. 16, 2014

## I. 서론

항만이나 어항 등의 해안 공사를 할 때에는 연안지역의 안전성을 확보하기 위하여 방파제를 설치한다(조민상 외, 2014). 방파제는 다양한 형태로 설계되고 설치되고 있으며, 그동안 일자형의 도제 방파제가 가장 많이 설치되어 왔다. 일자형 방파제를 설계할 때는 방파제의 안전성을 확보하기 위하여 다양한 소파제를 설치하며, 그 소파제의 영향으로 파고 감쇠 효과가 나타나고 있다. 그러나 실 해역에서는 다양한 방향의 입사파가 큰 에너지를 갖고 방파제에 입사하여 영향을 미친다. 이것은 바로 방파제에 작용하는 파력이나 파압을 증대시키는 요인이 되며, 방파제의 안전성에 영향을 준다. 따라서 방파제 전면에서의 안전성에 영향을 미치는 수리학적 요인을 파악하여 파고를 예측하는 것이 중요하다.

Sommerfeld의 해를 도입한 Penny와 Price(1944)는 일직선상의 방파제에 대한 파랑의 회절이나 반사등을 연구하였고, 일본에서는 角野, *et. al.*(1978)이 실험값과 연구하였던 결과들과 비교하여 수치모델을 검증하였다.

Lee(1971)는 장주기파가 항만으로 입사할 때 임의의 형상을 갖는 항만내에서 공진현상을 조사하기 위하여 경계적분방정식의 직접법을 사용하였고, Barrailer & Gaillard(1967)는 경계 적분방정식의 간접법을 사용하여 항만 내에서의 파고 분포 및 방파제 부근에서의 회절파고비를 연구하였다.

본 연구에서는 직접법을 이용한 경계적분방정식을 기본으로 하여, 일자형 형태의 도제 방파제를 설치하고 완전반사, 부분반사율을 갖는 소파제를 설치하여 수치모델을 개발한다. 또한, 다양한 입사 각도를 갖는 파에 대하여 방파제 전면과 방파제 해역에서의 방파제 안전성에 영향을 미치는 회절파고를 조사하며, 소파제에 의한 파고 감쇠효과를 조사한다. 한편, 최근에는 외해에서의 해양 준설이 많이 실시되고 있으며, 준설수심과 외해수심의 불연속성에 의한 연구가 활발히 진행되고 있다(Lee, *et. al.*, 2007). 이에 대한 영향성을 조사하기 위하여 도제 방파제에서 멀리 떨어진 곳에 준설을 했을 때 그 위를 통과하는 진행파가 방파제에 도달했을 때의 영향성도 조사한다.

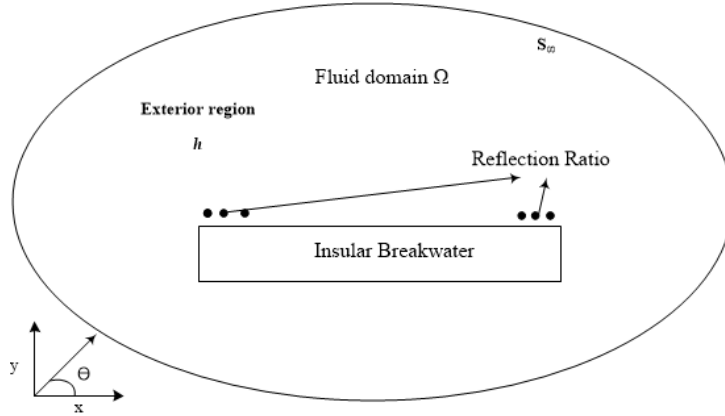
## II. 지배방정식

<그림 1>은 도제 방파제와 외해 수역의 모식도이다. 외해 전면 수심  $h$ 인 곳에 규칙파가 입사하는 것으로 가정하며, 도제 방파제 전면에서는 반사율  $Kr$ 을 갖는 것으로 한다. 유체의 성질을 비점성, 비압축성, 비회전성으로 가정하면 다음의 Laplace 방정식을 만족해야 한다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

여기서,  $\phi$ 는 속도포텐셜이다. 각 영역에서의 속도포텐셜은 선형화된 장파이론으로 다음으로 나타낼

수 있다.



<그림 1> 유체 영역에서의 방파제 모식도

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z)e^{-i\sigma t} \tag{2}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + k^2 \phi = 0 \tag{3}$$

경계선상에서의 질량수송 및 에너지수송의 연속조건과 바닥면에서의 저면조건, 자유수면 조건을 만족하는 속도포텐셜의 일반해는 식 (4)와 같으며, 식 (4)가 본 연구의 지배방정식이 된다.

$$\phi(x, y, z) = \frac{ga_i}{\sigma} \cdot f(x, y) \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)} \tag{4}$$

여기서,  $a_i$ 는 입사파의 진폭,  $k$ 는 파수( $2\pi/L$ ,  $L$ 은 파장)이고,  $f(x, y)$ 는 입사파 및 반사파의 함수와 산란파의 함수의 합을 나타낸다. 입사파의 속도포텐셜은 Radiation 조건을 만족해야 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi^I = \frac{igH}{2\sigma} e^{ik(x\cos\theta + y\sin\theta)} \tag{5}$$

여기서,  $H$ 는 입사파고,  $\theta$ 는 입사각이며,  $i$ 는 복소함수를 나타낸다. 회절영역의 임의 지점에서의 회절함수는 Green 제2정리를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_s(x,y) = \int \left[ \phi \frac{\partial G}{\partial n} + G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] \quad (6)$$

여기서,  $\phi_s(x,y)$ 는 회절파의 속도 포텐셜이다. 小丹과 大理(1976) 및 Lee와 Williams(2002)가 제안한 반사율  $Kr$ 을 고려하면 식 (6)은 다음과 같이 된다.

$$\phi_s(x,y) = \int \left[ Kr \phi \frac{\partial G}{\partial n} + G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] \quad (7)$$

방파제에서 멀리 떨어진 외해의 유체 영역을 준설을 하면 식 (6)은 다음과 같이 된다.

$$\phi_s(x,y) = \int \left[ \phi \frac{\partial G}{\partial n} + \frac{h}{d} G \frac{\partial \phi}{\partial n} \right] \quad (8)$$

여기서,  $d$ 는 준설 수심을 나타낸다. 따라서, 식(6)~(8)를 해석함으로써 지배방정식의 해가 결정되며, 수역의 임의점에서 방파제 설계시 안정성을 검토하거나 방파제의 배치를 결정하는 수리학적 인자는 다음의 회절파 계수로서 구할 수 있다.

$$K_d = |\phi_s(x,y) + \phi^I(x,y)| \quad (9)$$

### III. 수치 결과 분석

#### 1. 수치계산 조건

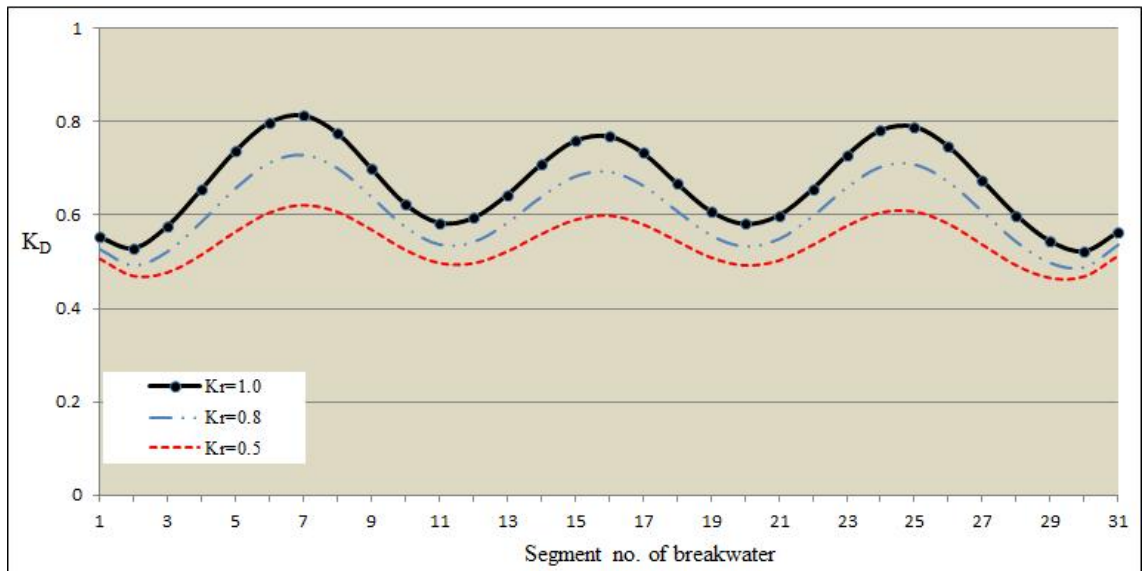
본 연구의 수치결과를 도출해 내기 위하여 상기의 이론식을 토대로 수치해석 방법 중인 하나인 경계 요소법(Boundary Element Method)에 적용하여 컴퓨터 프로그램을 개발하였다(Lee, *et al.*, 2007). 수치계산은 Line segment의 요소로서 분할하여 절점간의 경계치 분석으로 수치프로그램이 계산되었다. 수치계산 조건으로서 입사주기는 10sec, 외해의 수심은 10m, 입사각은 90°와 60° 방향으로 설정하였고, 도제 방파제의 길이는 3.5L, 폭은 0.5L로 하였다. 방파제에서의 파고 감쇠 효과를 증대시키기 위하여 설치되는 소파제는 그 설치 여부에 따라 반사율이 달라지므로 소파제에서의 반사율은 완전반사 ( $Kr=1.0$ )와 부분반사( $Kr=0.8$ 과  $0.5$ )로 구분하여 설정하였다. 위의 조건 하에서 방파제 안전성에 영향을 미치는 회절파고비를 조사하였으며, 계산 지점은 방파제 전면부로 설정하였다. 반사율 변화에 따른 회절파고비 감쇠 효과를 비교하기 위하여 Root Mean Square(RMS)비를 사용하였다.

$$(K_d) = \sqrt{\sum_{i=1}^M [(K_{d,Perfect}) - (K_{d,Partial})]^2 / M} \quad (10)$$

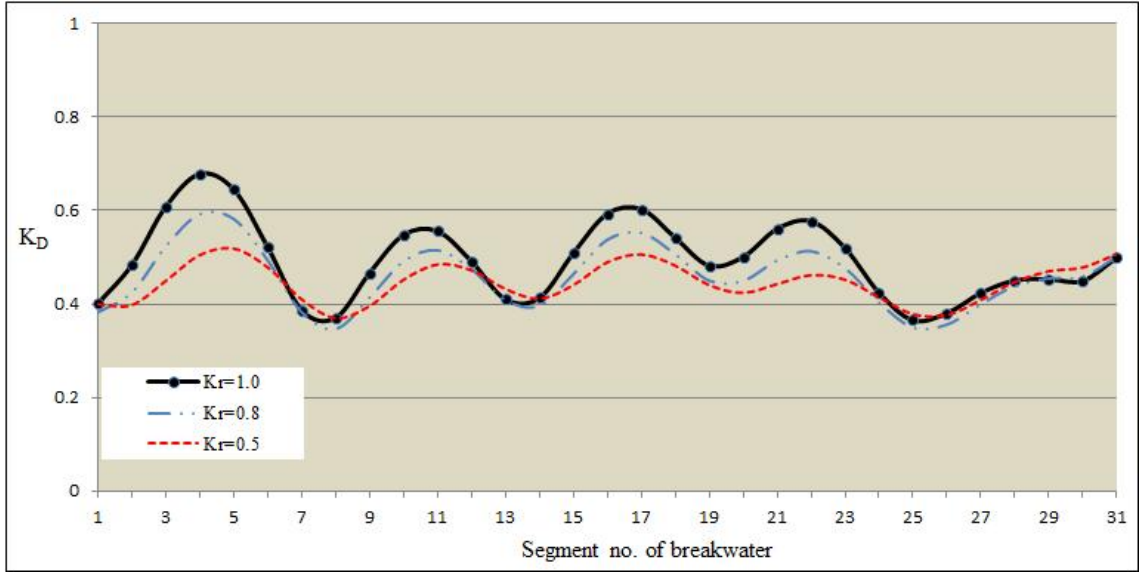
여기서, Perfect는 완전반사, Partial은 부분반사, 그리고 M은 계산지점 수를 나타낸다.

## 2. 결과분석

<그림 2>는 입사파의 각도가 90°이고, 반사율로  $K_r=1.0, 0.8, 0.5$ 인 경우 도제 방파제 전면부에서의 파고분포도를 나타낸다. 그림의 가로축은 도제 방파제에서의 계산 지점이고, 세로축은 회절계수를 나타낸다. 세 가지 경우 모두에서 파형이 거의 일치하는 형태로 나타내고 있다. 이는 입사파가 방파제 전면부에 대하여 법선(연직)방향으로 입사하기 때문이다. 완전반사( $K_r=1.0$ )인 경우 최고점의 회절파고비는 0.8을 나타냈고, 부분반사  $K_r=0.8$ 인 경우는 0.7, 부분반사  $K_r=0.5$ 인 경우는 0.6을 나타냈다. 최고점의 회절파고비가 0.1씩 줄어드는 것처럼 보이지만, 파의 진폭으로 비교했을 경우 완전반사에서 파의 진폭이 상당히 컸고, fluctuation도 크게 나타났다. 이는 완전반사의 경우 입사파의 소파 효과가 없어서 입사파와 반사파가 중첩되기 때문이다. 반사율이 작아질수록 파의 진폭과 회절파고비가 낮아졌으며, 이는 소파제의 효과로 인함이고, 이 소파제가 파고감쇠 및 에너지 감쇠에 효과적이라는 것을 의미한다. 세 가지 경우에 대한 RMS비를 비교해 보면,  $K_r=0.8$ 인 경우는 완전반사인 경우에 비해 6.3%  $K_r=0.5$ 인 경우는 13.2%의 파고감쇠 효과를 나타냈다.

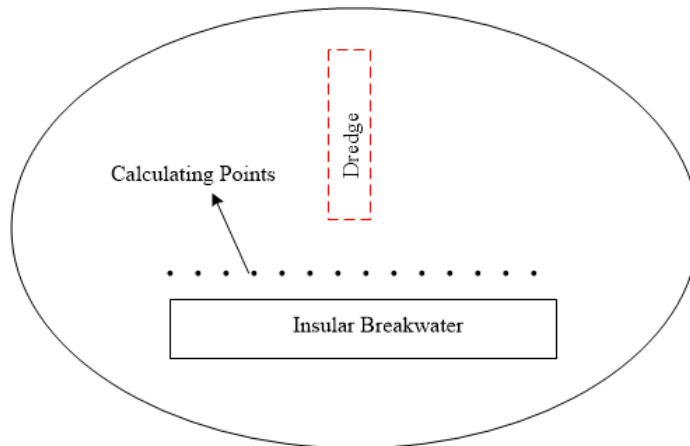


<그림 2> 입사각이 90°인 경우 도제 방파제 전면부에서 파고분포



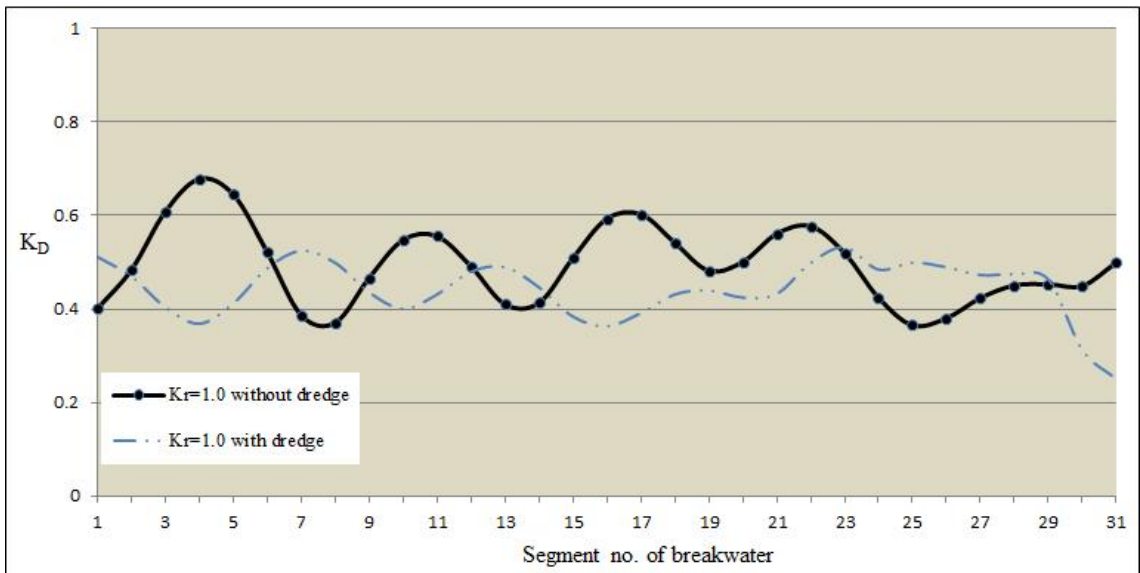
<그림 3> 입사각이 60°인 경우 도제 방파제 전면부에서 파고분포

수심의 불연속성에 의한 파랑의 감쇠를 조사하기 위하여 도제 방파제가 설치된 곳에서부터 멀리 떨어진 외해에 준설을 실시하였다. 수치계산 조건으로서 입사주기는 10sec, 외해의 수심은 10m, 준설 깊이는 외해 수심의 2배인 20m로 설정하였고, 입사각은 60°로서 한 방향만 설정하였다(Lee, *et. al.*, 2009). 도제 방파제의 제원의 앞의 조건과 같다. 준설제원으로는 직사각형 수로 형태로서 길이는 1.5L, 폭은 0.35L로 하였다. 위의 조건 하에서 준설에 의한 파랑감쇠 효과를 조사하였고, 감쇠 효과를 비교하기 위하여 Root Mean Square(RMS)비를 사용하였다. <그림 4>는 도제 방파제에서부터 떨어진 외해에 준설된 영역과 도제 방파제 전면에서의 계산 지점을 나타낸다.



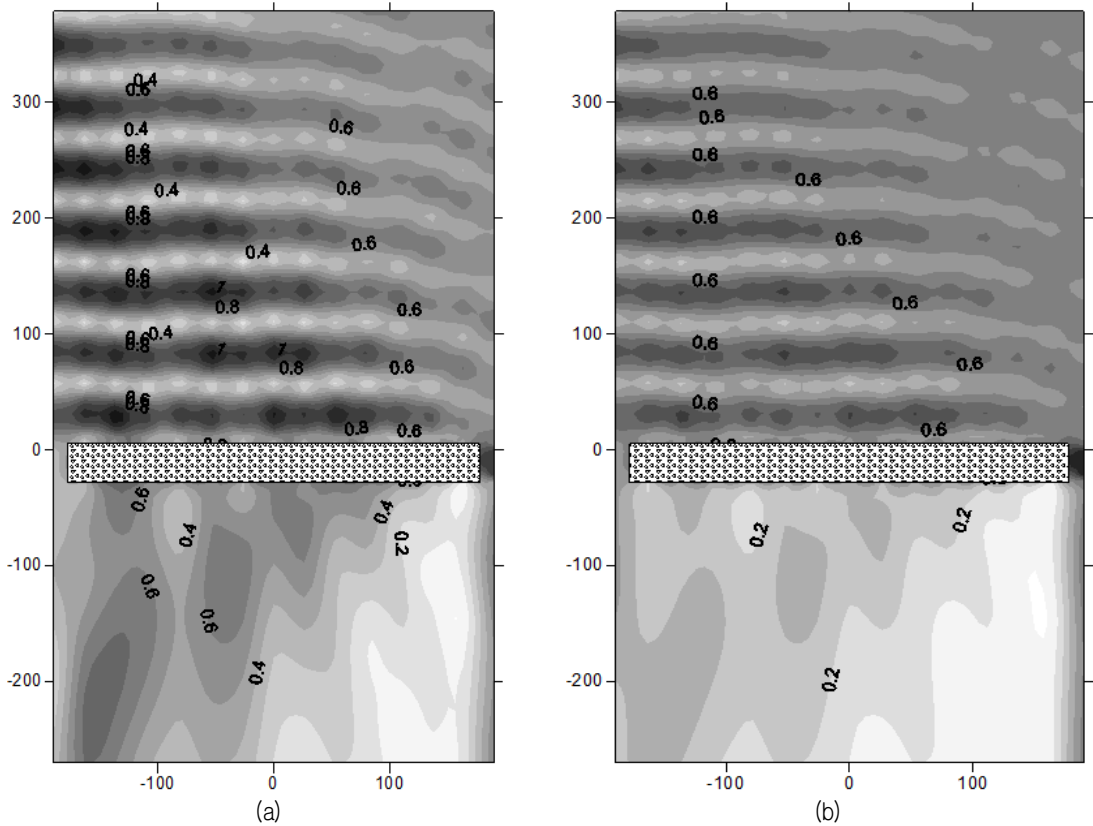
<그림 4> 준설 영역과 방파제 모식도

<그림 5>는 입사파의 각도가 60°이고, 준설 수심이 의해 수심의 두배로 설정한 경우 도제 방파제 전면부에서의 파고분포도를 나타낸다. 파형을 비교해 보면, 준설영역을 통과하여 도제 방파제에 도달한 회절파고는 준설영역의 불연속성에 의해서 에너지의 소산이 일어나기 때문에 파형이 완만한 형태로 나타났다. Peak 회절파고비도 준설을 하지 않은 완전반사인 경우 0.7로 나타났지만, 준설을 한 경우에는 0.5로 나타났다. 준설영역을 설치한 도제 방파제에 대한 RMS비를 비교해 보면, 준설하지 않은 완전반사의 도제방파제에 비해 11%의 파고감쇠 효과를 나타냈다. 이는 소파제를 설치한 경우보다 오히려 준설을 한 경우 감쇠효과가 더 크게 나타났다.



<그림 5> 입사각이 60°인 경우 준설의 유무에 따른 도제 방파제 전면부에서 파고분포

<그림 6>은 완전반사와 부분반사인 경우 도제 방파제 영역에서의 파고분포도를 나타낸다. 입사파의 입사각은 60°이다. 완전반사와 부분반사인 경우 도제 방파제 배후에서의 회절파고분포도를 보면 소파제가 설치된 부분반사인 경우가 회절파고비가 낮게 분포하고 있으며, 소파제의 설치로 인해 반사파가 약화되기 때문에 회절파고가 약화되고 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 소파제 설치하는 방파제 배후에서의 파고감쇠 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 또한, 파고비의 밴드폭도 부분반사인 경우가 넓은 것을 확인할 수 있으며, 이것을 통해 peak 성인 파형이 완만한 형태로 되고 있음을 알 수 있다.



〈그림 6〉입사각이 60°인 경우 반사율에 따른 도제 방파제 영역에서의 파고분포도 (a)  $K_r=1.0$ , (b) (a)  $K_r=0.05$

#### IV. 결론

본 연구는 외해에서 다양한 방향의 파랑이 입사할 때 도제 방파제에 영향을 미치는 회절 파고비를 조사하였다. 또한, 소파제를 설치한 경우의 부분 반사율을 갖는 방파제와 소파제가 설치되어 있지 않은 완전 반사율을 갖는 경우에서의 회절파고비를 조사하였다. 본 연구의 수치모형은 경계 적분방정식을 적용하여 개발되었다.

법선(연직) 방향의 입사에 대해서 소파제 없는 방파제에서는 파의 진폭이 상당히 컸고, fluctuation도 크게 나타났다. 반면에 반사율이 작아질수록 파의 진폭과 회절파고비가 낮아졌으며, 이는 소파제의 효과로 인함이고, 이 소파제가 파고감쇠 및 에너지 감쇠에 효과적이라는 것을 의미한다. 경사입사인 경우에는 진행파의 파형의 차이가 나타났으며, Crest의 위치가 반사율이 낮아질수록 우측으로 이동하고 있는 것을 알 수가 있었다. 소파의 효과는 법선(연직) 입사 보다 효율이 떨어졌다.

해저에 준설한 경우 준설 수심과 외해 수심의 불연속성에 의한 소파 효과를 조사하기 위하여 도제

방파제에서부터 떨어진 외해에 준설을 실시하여 그 영향성을 분석하였다. 준설 영역을 통과하는 진행파의 파형은 준설영역에서 에너지 소산이 일어나서 완만한 형태로 나타났다. 파고 감쇠 효과는 소파제를 설치한 경우보다 오히려 준설을 한 경우 감쇠효과가 더 크게 나타났다.

본 연구는 향후 도제 방파제 및 해저 준설을 실시할 경우 그리고 소파제를 설치할 경우 입사각, 반사율 및 준설 수심에 따른 회절과고비를 예측하는 데 유용하게 사용될 것이다. 또한, 도제 방파제의 안전성을 확보하기 위하여 외해에서의 파 에너지를 약화시키는 방법에 대한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 조민상, 조현빈. 2014. 해양안전 확보를 위한 전문 연구기관 활용방안. 한국위기관리논집. 10(7): 183-204.
- 小丹浩治, 大里滄男. 1976. 防波堤隅角部附近の波高分布に關する研究. 港灣技術究報告書. 15(2): 55-88. 36: 1287-1294.
- 角野昇八, 櫛田操, 久保直, 小田一紀, 永井莊七郎. 1978. 隅角部を有する防波堤前面および沖合の波高分布. 第25回 海岸工學講演會論文集. 日本土木學會. 108-112.
- Barailler, L. and P. Gaillard. 1967. Evolution Recente des Modeles Mathematiques d' Agitation due a la Hou-Le: Calcul de la Diffraction en Propondeur Non Uniforme. *La Houille Blanche*. 22(8): 861-869.
- Lee, H. S., S. D. Kim, K. H. Wang, and S. E. Eum. 2009. Boundary Element Modeling of Multidirectional Random Waves in a Harbor with a Rectangular Navigation Channel. *Ocean Engineering*. 36(17-18): 1287-1294.
- Lee, H. S., K. H. Wang, and A. N. Williams. 2007. A Three-dimensional Numerical Modeling of Multidirectional Random Wave Diffraction by Rectangular Submarine Pits. *Ocean Engineering*. 34(5-6): 665-675.
- Lee, H. S. and A. N. Williams. 2002. Boundary Element Modeling of Multidirectional Random Waves in a Harbor with Partially Reflecting Boundaries. *Ocean Engineering*. 29(1): 39-58.
- Lee, J. J. 1971. Wave-induced Oscillations in Harbours of Arbitrary Geometry. *Journal of Fluid Mechanics*. 45: 375-394.
- Penny, W. G. and A. T. Price. 1944. *Diffraction of Water Waves by Breakwaters*. Misc. Weapons Development Technical History 26. Artificial Harbors. Sec. 3D.

---

**김성덕:** 중앙대학교에서 공학박사(하천 및 해안공학 전공) 학위를 취득하고, 현재 충북대학교 토목공학부에서 시간강사로 재직 중이다. 주요 논문으로는 “Simulation of Seawater Intrusion Range in Coastal Aquifer using FEMWATER model for Disaster Information”, “사면에서 토석류와 소단폭의 관계성에 관한 연구(2013)” 등이 있으며, 관심 분야는 토석류, 하천 및 해안 방재 등이다(soungdoug@hamail.net).