

Pit에 의한 부분반사율을 갖는 항내에서의 다방향 불규칙 파랑 회절에 관한 연구

The Multidirectional Random Wave Diffraction in a Partial-Reflecting Harbor due to a Submarine Pit

김성덕* · 이홍식**

Sung Duk Kim* and Hong Sik Lee**

요 지 : 본 연구는 항만입구(항구) 부근에 항로가 준설되었을 경우, 항내 및 항구 주위에서 회절되는 파랑장의 효과를 예측하기 위한 것이다. 본 연구에서 항만경계의 단면은 부분반사 혹은 완전반사로 고려한다. 본 수치모의 계산은 자동경계요소 알고리즘으로 Pit 및 항만경계의 경계요소(segment)를 이산화한 경계요소법에 의해 실시하였다. 입사파 조건은 Mitsuyasu의 주파수스펙트럼과 방향함수의 이산화된 형태를 사용하여 특정화하였다. 본 계산치의 결과는 기존에 발표된 실험치의 결과와 잘 일치하였다. Pit 설치의 효과에 의해 파고감소의 비율은 완전반사 경계의 경우에 대하여 약 20%, 그리고 부분반사 경계의 경우에 대하여 약 10% 정도인 것으로 나타나고 있다.

핵심용어 : 경계요소법, 다방향 불규칙파, Mitsuyasu 스펙트럼, 항로, 준설

Abstract : The present study is to estimate the effects of diffracted wave fields in a harbor and around harbor-entrance due to random waves, when a navigation channel is dredged in the vicinity of the a harbor entrance. The cross sections of harbor boundary are considered to be partial or full reflection in this study. The numerical simulation has been performed by the boundary element method, which is to discrete segments of pit- and harbor- boundary with the algorism of auto generated elements. The incident wave conditions are specified using discretized forms of the Mitsuyasu's frequency spectrum and directional function. The results of the present numerical simulation agreed well with those of the published experimental data. It is shown that the ratios of wave height reduction are about 20% for the case of fully reflecting boundary, and 10% for the case of partially reflecting boundary by the effect of placing a pit, respectively.

Keywords : boundary element method, random waves, Mitsuyasu spectrum, navigation channel, dredging

1. 서 론

본 연구는 항만입구(항구) 주변 혹은 항외에 해저준설을 실시하여 Pit를 설치한 경우, 항내, 항구 주위, 그리고 항외 광 방파제 수역에서의 불규칙 파랑장을 예측하기 위하여 해저 Pit 및 구조물과 다방향 불규칙파랑과의 상호작용에 관하여 연구한 것이다. 해저 Pit(혹은 트렌치)에 의한 파랑장 변화에 대한 연구는 해저 불연속 조건과 파랑의 상호작용을 대상으로 종래부터 많은 연구가 수행되어 왔다. 대표적

으로, 해저트렌치와 파랑과의 상호작용 문제를 연직 2차원 문제로 취급한 Kreisel(1949), Newman(1965), Miles(1967), Lee and Ayer(1981), Kirby and Dalrymple(1983)의 연구를 예로 들 수 있다. Lee and Ayer (1981)는 직사각형 단면에 대한 연직 2차원 파랑문제의 해석해를 Kirby and Dalrymple(1983)은 비대칭형의 Pit에 경사 입사하는 파랑의 수치해를 각각 제시하였다. 1990년 이후에 유한한 크기와 수심을 갖는 Pit에 적용하기 위하여 평면 2차원(혹은 3차원) 문제로 Pit와 파랑의 상호작용문제를 확장한 수치적인 연구가

*청주대학교 토목환경공학과(전, 중앙대학교 토목공학과 박사과정)(Dept. of Civil & Environment Engineering, Cheongju University)

**중앙대학교 토목공학과(Corresponding author: Hong Sik Lee, Department of Civil Engineering, Chung-Ang University, Anseong, Gyeonggi-do, 456-756, Korea, hongsik@cau.ac.kr)

수행되었다(Williams; 1990, Williams and Vazquez; 1991, McDougal et al.; 1996). Takezawa et al.(2000)과 이와 이(2001)는 Williams(1990)의 방법을 근거로 하여 다양한 형상의 Pit에 대한 회절특성을 검토한 후, 실제 적용을 위하여 수심이 변화고 굴절, 회절 및 부분반사($K_r = 0.35$) 등이 발생하는 어항을 대상으로 어항 입구에 Pit를 설치하였을 경우 시계열별로 파랑 전파를 조사하였다. 그러나, 이들의 연구결과는 단수 혹은 복수의 Pit를 대상으로 하였으나, 규칙파를 대상으로 취급하였기 때문에 현실적으로 적용 한계가 있다. 이에 따라 최근, 평면 2차원 Pit 문제에 대한 파랑변형에 관하여 천해 선형이론에 입각한 다방향 불규칙파를 응용한 Lee et al.(2003)의 연구와, 방향분산함수의 parameter 값을 변화하여 확장 보완한 연구(Lee and Williams, 2004), 그리고 심해와 천해에서의 수심차이에 따른 양측의 비교를 위한 연구가 있다(Lee, 2004).

Pit가 없는 경우에 대하여, 임의의 소파반사율을 갖는 항내에서의 파랑장의 예측에 관하여도 종래부터 많은 연구가 수행되어 왔다. Green 함수에 의해 단주기파랑을 대상으로 수행된 연구의 예는 Gaillard(1984), Isaacson and Qu(1990), Lee and Williams(2002)의 연구가 있다.

한편, 최근 선박의 대형화에 따라 대수심 항로가 요구되고 있는 실정에 따라 보다 깊은 항로수심의 확보가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 항구에 항로를 준설하여 장방형 단면의 해저 Pit가 구성된 경우, 해저 Pit에 의해 항내 입사조건과 항내파고분포가 변화하기 때문에 기존의 항내파고 계산기법을 개선하여 대수심 항로의 영향을 조사할 필요가 있다. 최근, 김과 이(2007)는 Pit 및 항만(부분반사 경계를 갖는)과 파랑과의 상호작용에 관하여 규칙파를 대상으로 연구를 수행하였다. 이들의 연구결과는 규칙파의 이론을 이용하였기 때문에 Pit가 미치는 항내파고의 변화 폭이 불규칙파의 이론을 이용할 때에 비하여 비교적 크게 나타나는 경향이 있다. 따라서, 김과 이(2007)의 연구결과를 다방향 불규칙파랑의 이론에 의해 확장하려는 것이다. 즉, 본 연구에서는 해저 Pit 및 구조물과 다방향 불규칙파랑과의 상호작용에 관하여 연구한 것이다. Pit의 크기는 긴 형태의 장방형의 모형으로 고안하고, 조사 대상 항은 항만 안벽의 반사율을 고려하여 회절계수의 변화를 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 결과에 대하여 齊藤 등(1993)에 의하여 수행된 실험결과와의 비교검토를 통하여 신뢰성을 확인하였고, Pit에 의한 파랑제어로 항내에서의 파고감소효과가 나타났다.

2. 이 론

2.1 지배방정식

본 연구에서는 Pit, 항만 및 파랑과의 상호작용에 대하여 주파수분할 10, 방향분할은 36으로 구성한다. 즉, 방향이 0° 부터 360° 까지 5° 간격으로 분할되기 때문에 총 370개 성분의 규칙파 결과(김과 이, 2007)들을 누기중첩하여 불규칙 파랑의 결과로 합성하여 불규칙파 해석 결과를 얻었다. Fig. 1은 齊藤 등(1993)이 실험에 사용한 항만모형에 대하여 추가로 Pit를 설치한 것을 나타낸다. Fig. 1에서 S_1 은 Pit의 경계선, S_2 는 항의 경계선, 그리고 S_3 는 항외에 설치된 가상 경계선으로 나타낸다. 항내의 좌측 안벽(DD' line)은 반사율을 고려할 때는 소파구조물로 나타내고, 그 이외의 안벽은 직립벽으로 나타낸다. Fig. 2는 Fig. 1의 CC' line에서의 단면도이고, Pit의 형태 및 영역 분할을 나타낸다.

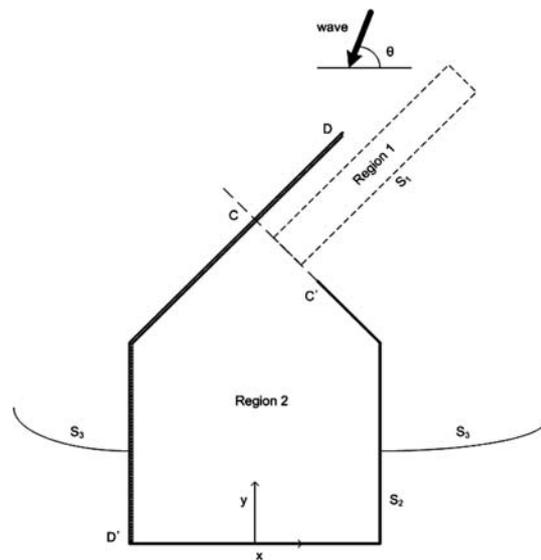


Fig. 1. Layout of pit and harbor.

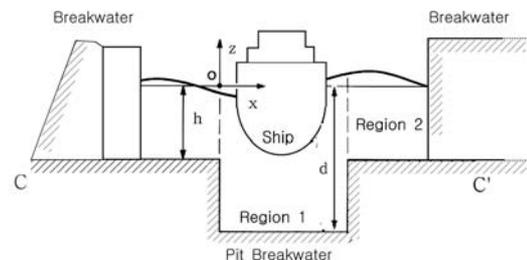


Fig. 2. Definition sketch of rectangular pit and harbor configuration.

규칙과 환경에서 항만과 Pit의 상호작용에 관한 연구를 통해 얻어진 이론식(김과 이, 2007)과 Lee and Williams (2002)가 제시한 이론에 의하여 경계적분방정식을 사용하고, 반사율 K_r (小丹와 大里; 1976, Lee and Williams; 2002)을 고려하면 수역의 임의지점에서는 Pit를 설치하지 않는 경우에는 식 (1)이 되고, Pit를 설치한 경우에는 식 (2)가 된다.

$$f_s(x, y) = -\frac{1}{2} \int_{S_2} \left[f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) \left(\frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (1)$$

$$f_s(x, y) = -\frac{1}{2} \int_{S_1} \left[f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_1 r) \right) + \frac{h}{d} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_1 r) \right) \left(\frac{\partial f_i}{\partial n} \right) \right] ds - \frac{1}{2} \int_{S_2} \left[f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) \frac{h}{d} \left(\frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (2)$$

여기서, d 는 Pit의 수심, h 는 항내의 일정수심, $k_j(j=1,2)$ 는 파수이다. 또한, $f_s(x, y)$ 는 산란파의 파동함수, f_i, f_r 은 입사파 및 반사파의 파동함수, (ξ, η) 은 경계선 S_1, S_2 상의 점의 좌표, ds 는 반시계 방향의 각 경계적분 구간의 적분변수(경계요소), $\partial/\partial n$ 은 Fig. 1에 표시한 위치의 법선 방향의 도함수, $H_o^{(1)}(k_j r)$ 은 0차 제 1종 Hankel 함수이다.

수역의 임의점(x, y)를 경계상의 임의점(ξ, η)에 접근시키면 식 (1)과 식 (2)는 각각 경계상의 f_s 에 관하여 각각 다음의 적분방정식이 얻어진다.

$$f_s(\xi, \eta) = -\int_{S_2} \left[f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) \left(\frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (3)$$

$$f_s(\xi, \eta) = -\int_{S_1} \left[f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_1 r) \right) + \frac{h}{d} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_1 r) \right) \left(\frac{\partial f_i}{\partial n} \right) \right] ds - \int_{S_2} \left[f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left(-\frac{1}{2} i H_o^{(1)}(k_2 r) \right) \frac{h}{d} \left(\frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (4)$$

2.2 다방향 불규칙파

방향스펙트럼 $S(f, \theta)$ 은 주파수스펙트럼 $S(f)$ 와 방향분산 함수 $G(f, \theta)$ 의 곱으로 다음과 같이 나타낸다.

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (5)$$

주파수 스펙트럼은 많은 공식들이 다양하게 제안되고 있으나, 본 연구에서는 식 (6)과 같이 Mitsuyasu 주파수 스펙트럼(Mitsuyasu, 1972)을 사용한다.

$$S(f) = 0.2572 \frac{H_{1/3}^2}{T_{1/3}^4} f^{-5} \exp[-1.0288(T_{1/3} f)^4] \quad (6)$$

여기서, $H_{1/3}, T_{1/3}$ 은 각각 유의파의 파고와 주기이다. 이러한 형식은 평균파고와 주기와 같은 다양한 항목들과 관련이 있기 때문에 실제적으로 공학에서 사용되는 유의파고와 주기의 항목으로서 이들 변수들을 수정하는 것이 편리하다(Lee and Kim, 2006). 방향분산함수 $G(f, \theta)$ 는 식(7)과 같이 Mitsuyasu et al.(1975)의 방향함수를 사용한다.

$$G(f, \theta) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s} \theta \quad (7)$$

여기서, $\Gamma(s)$ 는 감마함수, s 는 방향집중도를 나타내는 parameter이다.

$$s = \begin{cases} s_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & (f > f_p) \\ s_{\max} (f/f_p)^5 & (f < f_p) \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $f_p = 1/(1.05 T_{1/3})$ 는 스펙트럼의 Peak 주파수이다.

불규칙 회절파를 계산하기 위해서는 입사파의 스펙트럼을 분할하여 많은 수의 성분파로 이산화한다. 여기서, 주파수 스펙트럼을 M 개, 파향을 N 개로 각각 이산화하여 $M \times (N+1)$ 개의 성분파를 구성시킨다. 이산화된 각 성분주파수 및 방향성분에 대한 선형회절파의 계산을 실시한다. 각각 분할되어 이산화된 대표주파수는 Nagai (1972)에 의해 제시된 식을 사용하였다. 각각의 주파수 분할이 동일한 에너지를 갖도록 주파수 범위를 이산화 하면 N 번째 주파수와 관련된 분할폭 df_N 은 다음 식으로 정의된다.

$$S(f_N) df_N = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} S(f) df \quad (9)$$

N 번째 분할구간의 대표주파수 f_N 은 다음 식으로 주어진다(Nagai, 1972).

$$f_N = \frac{1}{0.9T_{1/3}} \times \sqrt{2.9124 \left[\text{Erf} \left(\sqrt{2 \ln \left(\frac{N}{N-1} \right)} \right) - \text{Erf} \left(\sqrt{2 \ln \left(\frac{N}{N-1} \right)} \right) \right]} \quad (10)$$

여기서 $\text{Erf}(x)$ 는 오차함수(Error function)이다.

한편, 방향분할 $d\theta$ 은 균등하게 분할함으로서 다음 식으로 구한다.

$$d\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{M} \quad (11)$$

여기서 θ_{\max} , θ_{\min} 은 주파수에서의 편각이다. 임의의 계산점 (x_0, y_0) 에 있어서 입사파의 수위변동량 $\zeta(x_0, y_0, t)$ 은 무한한 성분파의 중첩으로서 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\zeta(x, y, t) = \sum_{N, M} \sqrt{S(f_N, \theta_M) df_N \sigma \theta_M} \psi(x, y, f_N, \theta_M) \times \exp \{ i(k_N x_0 \cos \theta_M + k_N y_0 \sin \theta_M + 2\pi f_N t + \varepsilon_{NM}) \} \quad (12)$$

여기서 $\psi(x, y, f_N, \theta_M)$ 은 주파수 f_N , 파향 θ_M 을 갖는 성분파의 회절파를 나타내는 함수이고, $S(f_N, \theta_M)$ 은 입사파의 방향스펙트럼, f_N 과 θ_M 은 각각 N, M 번째의 성분파의 주파수와 방향각, df_N 과 $d\theta_M$ 은 각각 주파수와 방향각의 분할폭이고, ε_{NM} 은 임의의 위상각이다.

$\zeta(x, y)$ 의 주파수 스펙트럼 $S^1(x, f)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S^1(x, y) = \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} S(f, \theta) K_{dR}^2(x, f, \theta) d\theta \quad (13)$$

여기서 $K_{dR}(x, f, \theta)$ 는 방향 θ 로 전파해 오는 주파수 f 의 규칙파 성분에 대한 회절계수이다. 유의 입사파고와 회절된 파고는 다음과 같이 정의된다(Goda et al., 1978).

$$(H_{1/3})_I = 4.0 \sqrt{(m_o)_I} \quad (14)$$

$$(H_{1/3})_D = 4.0 \sqrt{(m_o)_D} \quad (15)$$

여기서,

$$(m_o)_I = \int_0^{\infty} \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} S(f, \theta) d\theta df \quad (16)$$

$$(m_o)_D = \int_0^{\infty} S^1(f) df \quad (17)$$

다방향 불규칙파에 의한 회절계수 K_{dR} 는 다음과 같이 정의된다.

$$K_{dR} = \left| \frac{(H_{1/3})_D}{(H_{1/3})_I} \right| \quad (18)$$

3. 결과 및 분석

본 연구의 수치모델을 검증하기 위하여 齊藤 등(1993)의 불규칙파 수리모형 실험에 의한 결과와 비교하였다. 齊藤 등(1993)은 폭 24 m, 길이 33 m, 깊이 1.5 m의 평면수조에서 수리모형 실험을 하였다. 수조의 한 변에는 폭 50 cm × 48개의 피스톤 타입 비연속형 Serpent형 조파장치가 설치되어 있고, 다른 3변은 소파제로 덮여져 있다. 실험에 사용한 항만모형은 1/50 축척의 모형이고, 항만모형의 항외벽에는 충분한 소파제를 설치하여 모형으로부터의 반사를 억제하고 모형의 주방파제 선단은 수조 연안방향 중앙에서 5 m 지점에 설정하였다. 항만수리모형에는 모든 항내벽을 직립의 내수 베니어판으로 만든 것(직립벽형)과 소파공을 설치한 소파벽형의 2종류이다. 齊藤 등(1993)이 사용한 불규칙파의 주파수스펙트럼 및 방향함수는 Mitsuyatsu형을 채택

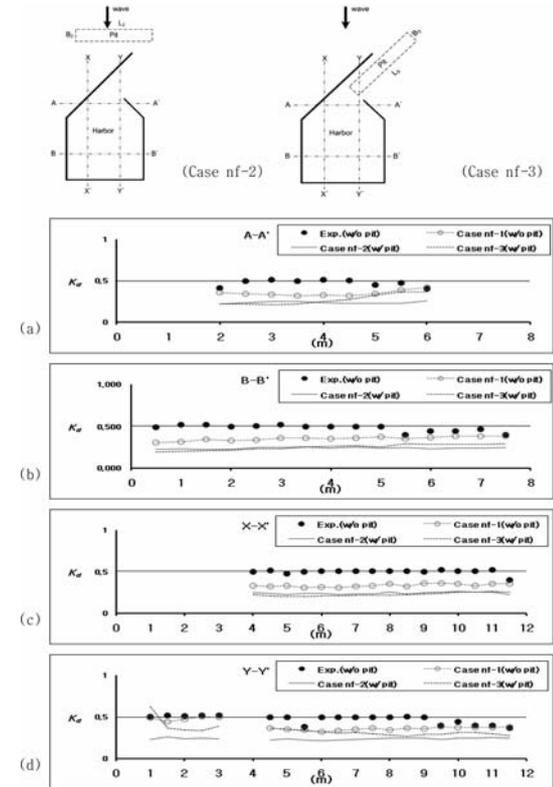


Fig. 3. Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary for random waves ($h=7$ m, $d=14$ m, $\theta_R=90^\circ$, $B_2=50$ m, $B_3=35$ m, $L_2=400$ m, $L_3=250$ m, $S_{\max}=25$).

하였고, 방향집중도의 parameter는 $S_{\max} = 25$ 로 취하였다. 수치모형실험은 입사파 주기 $T_{1/3}$ 및 일정수심 h 의 계산조건($T_{1/3} = 9.97s, h = 7m$)을 근거로 실시하였고, 불규칙파의 입사 주 방향을 90° 로 하였다. 항내의 수면변동은 항내벽에서 50 cm 내측의 영역을 50 cm 혹은 25 cm간격의 격자점에서 측정하였고, 소파공은 잠제형(潛堤型) 소파블록과 소파제로 제작하였다. 항만모형의 조사선 A-A', B-B', X-X', Y-Y'상에서의 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다.

3.1 완전반사를 갖는 항내에서의 Pit에 의한 파고변화 효과(불규칙파)

본 연구에서의 모든 수치계산은 $L/10$ (L : 입사파장)의 선 요소(Line segment)로 분할하여 실시하였다. 입사파 주기 $T_{1/3} = 9.97s$, 항내 수심 7 m, Pit 수심 14 m, 그리고 주 입사 각 90° 의 다방향 불규칙파 환경에서 완전반사를 갖는 항내에서의 Pit의 유무상태에 따른 항내파고분포를 조사하기로 한다. 항 입구 부근에 각각 2종류의 Pit, 즉 수평방향(Case nf-2) 및 경사방향(Case nf-3)을 평면적으로 배치한 것이다. 여기서, 수평방향 Pit(Case nf-2)는 폭 50 m, 길이 400 m이고, 경사방향 Pit(Case nf-3)는 폭 35 m, 길이 250 m로 각각 설정하였다. 조사 단면은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 A-A', B-B', X-X', Y-Y'으로 하였다. Pit 유무 상태에 따른 파고변화에 대한 비교를 위하여 $RMS((K_d)_s) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [(K_{d,w/o})_i - (K_{d,w/p})_i]^2}$ 비를 사용하였다. 여기서, 아래첨자 w/p 및 w/o는 Pit가 있고 없는 상태의 회절계수 값이다.

Fig. 3은 다방향 불규칙파 환경에서 안벽이 직립벽인 경우의 파고 비교를 나타낸다. Fig. 3(a)에 나타낸 조사선 A-A'상에서는 좌·우 방파제 부근을 제외하고는 실험치가 계산치(Case nf-1)보다 다소 높게 나타나고 있다. 이것은 불규칙파랑 실험의 경우, 완전반사경계면을 갖는 항내에서는 반사파의 영향, 특히 저주파수 성분파에 의한 다중반사를 피하기는 어렵게 된다. 즉, 규칙파의 경우는 주기가 길거나 짧은 간에 비교적 일정하게 반사가 나타나지만(일반적으로, 짧은 주기는 반사영향이 적고, 긴 주기는 반사영향이 많음) 불규칙파의 경우는 주기가 긴 것과 짧은 것이 다함께 포함되어 있으므로 저주파수 성분파에 의한 반사가 다중반사의 요인이 될 수 있으며, 특히 입구 부분이 주방파제에 가로 막혀서 항내에서의 실험 파고값이 증폭되는 원인으로 보인다. 수평방향 Pit (Case nf-2)를 설치한 경우 항내에서 전반적으로 파고가 감소하고, Pit가 없는 경우보다 파고가 약 24.1%(이하, RMS비) 감소하였다. 경사방향 Pit(Case nf-3)의

경우, 좌측 방파제 부근과 중앙에서는 비교적 낮은 파고 분포를 나타내었지만, 우측 방파제 부근에서는 Pit가 없는 경우와 비슷한 분포를 나타냈다. 이것은 길이가 짧은 우측 방파제의 끝과 Pit의 경계부분이 만나게 되어 교란을 일으킴으로서 Pit와 파랑과의 상호작용에 의한 것이다. 이 경우 Pit가 없는 경우와 비교하여 파고가 약 21.8% 감소하였다.

Fig. 3(b)에 나타낸 조사선 B-B'상에서, 5.5 m~8 m 부근에서는 계산치(Case nf-1)와 실험치 파고가 부분적으로 일치하지만, 항의 좌측과 중앙에서는 실험치가 계산치(Case nf-1)보다 높게 나타났다. 수평방향(Case nf-2)과 경사방향(Case nf-3) 모두 항내에서 전체적으로 파고의 감소가 나타났다.

Fig. 3(c)에 나타낸 조사선 X-X' 상에서도 실험값이 계산값(Case nf-1)보다 더 높게 나타났으며, Pit 설치로 25%이상의 항내파고가 감소하였다. Fig. 3(d)에 나타낸 조사선 Y-Y' 상에서 항입구(1~3 m)에서는 항내반사가 발생하지 않기 때문에 실험값과 계산값(Case nf-1)이 잘 일치하였다. 항내에서는 실험값이 계산치보다 다소 높게 나타났고, 수평방향(Case nf-2)의 Pit가 설치된 경우 항입구와 항내에서 전체적으로 파고 감소가 좋게 나타났으며, 경사방향(Case nf-3)의 경우 항입구 부근에서는 우측 방파제와 Pit의 산란으로 인해 파고가 크게 감소하지는 않았지만, 항내로 들어가면서 파고가 좋게 감소하는 것으로 나타났다.

4가지 조사선에서의 비교결과, 다방향 불규칙파의 경우 파고분포가 규칙파(김과 이, 2007)인 경우에 비해 단순한 형태를 나타냈으며, Pit에 의해 항내의 파고감소 효과가 잘 나타났다. Table 1은 완전반사 벽면을 갖는 항내에서 다방향 불규칙파 환경에서의 각 Case별 파고 감소 효과를 나타낸다.

Fig. 4는 다방향 불규칙파 환경에서 각각 Case nf-1, Case nf-2와 Case nf-3의 등파고비 분포도를 나타낸다. Case nf-1보다 Pit를 설치한 Case nf-2와 Case nf-3의 항내 파고분포가 상대적으로 낮게 나타나며, 수평방향 Pit(Case nf-2)의 경우는 외해에서부터 파고가 감소한 상태로 파가 입사하므로 항입구와 항만 내에서 파고 감소 효과가 나타났다. 특히 항

Table 1. The effect of decreasing wave height for random waves (RMS value; full reflection)

Line	Case	Case nf-2	Case nf-3
A-A'		24.1%	21.8%
B-B'		24.6%	24.0%
X-X'		25.9%	27.6%
Y-Y'		24.0%	16.1%

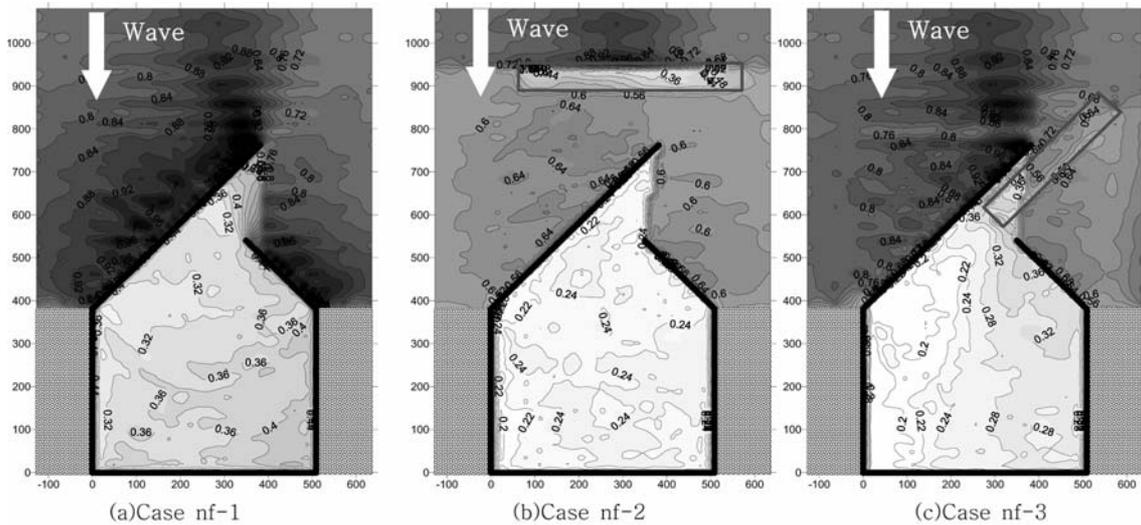


Fig. 4. Contour plots of diffraction coefficients in a harbor with fully reflecting boundary for random waves ($h=7$ m, $d=14$ m, $\theta_R=90^\circ$, $B_2 = 50$ m, $B_3 = 35$ m, $L_2 = 400$ m, $L_3 = 250$ m, $S_{\max} = 25$).

중앙의 좌우측에서 파고 감소효과가 잘 나타났고, 항만 내부 끝에서의 재반사가 현저히 줄어들었다. 이것은 Pit의 불연속 수심 차이에 의해서 Pit 배후로 입사파가 약화되어 진행하게 되기 때문에 파고 감소 효과로 나타나게 된다. 이 경우 0.22~0.24의 회절파고비 분포를 나타내며, Pit를 설치하지 않은 Case nf-1는 0.32~0.38의 회절파고비의 분포를 나타낸다.

경사방향 Pit(Case nf-3)의 경우는 Pit의 항내 끝부분에서 약간의 교란이 발생하여 항 입구에서 수평방향보다는 파고가 높게 나타났고, 교란의 영향으로 우측 방파제 근처에서도 수평방향보다는 파고가 상대적으로 높게 나타났다. 반면에 좌측 방파제 부근과 항만 중앙에서는 파고의 감소효과가 나타났다. 이 경우 0.2~0.32의 회절값 분포를 나타냈다. 불규칙파의 경우 파고비의 분포가 규칙파의 경우(김과이, 2007)에 비해 단순한 형태로 나타났다.

3.2 부분반사($K_r=0.35$)를 갖는 항내에서의 Pit에 의한 파고변화 효과(불규칙파)

Fig. 5는 다방향 불규칙파 환경에서 안벽이 소파벽($K_r=0.35$)인 경우의 파고 비교를 나타낸다. Fig. 5(a)에 나타낸 조사선 A-A'상에서 4 m 지점을 제외하고는 실험값과 계산값(Case np-1)이 아주 잘 일치한다. 수평방향 Pit(Case np-2)는 Pit가 없는 경우보다 파고가 약 11.4% 감소하였다. 즉, Pit 준설을 하면 소파벽에서도 역시 파고 감소 효과가 나타난다. 경사방향 Pit(Case np-3)은 직립벽인 경우와 마찬가지로

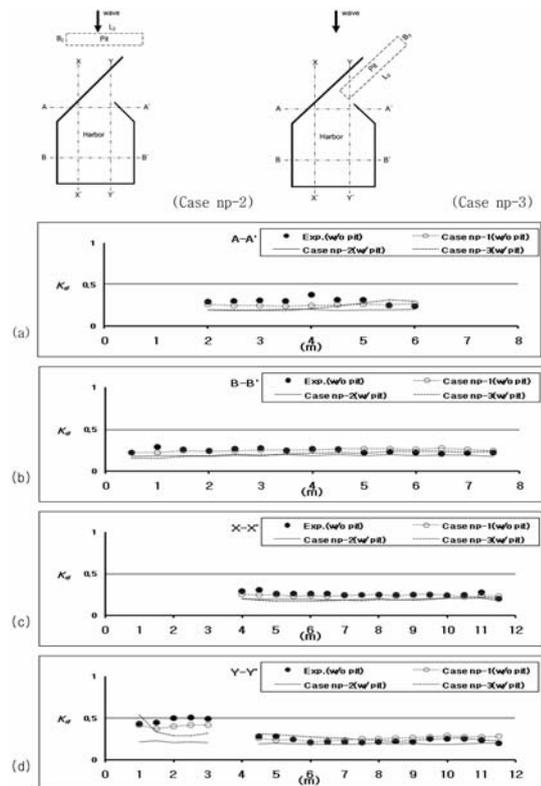


Fig. 5. Wave height distribution in a harbor with partially reflecting boundary for random waves ($h=7$ m, $d=14$ m, $\theta_R=90^\circ$, $B_2 = 50$ m, $B_3 = 35$ m, $L_2 = 400$ m, $L_3 = 250$ m, $S_{\max} = 25$, $K_r = 0.35$).

로 소파벽의 경우에도 길이가 짧은 우측 방파제의 끝과 Pit의 경계부분이 만나게 되어 교란을 일으킴으로서 Pit와 파랑과의 상호작용이 나타나서 파고가 높게 나타났다. 이 경우 약 9.3%의 파고 감소 효과를 나타냈다.

Fig. 5(b)에 나타낸 조사선 B-B'상에서 실험치와 계산치의 비교결과는 좋은 일치를 나타내고 있다. 수평방향 Pit(Case np-2)은 조사선 전체적으로 파고 감소가 나타났고, 약 6.0%의 파고 감소 효과가 나타났다. 경사방향 Pit(Case np-3)은 항내 좌측에서의 파고 감소가 잘 나타났고, 약 5.8%의 파고 감소 효과를 나타냈다.

Fig. 5(c)에 나타낸 조사선 X-X'상에서 실험치와 계산치가 매우 잘 일치하였다. 수평방향 Pit(Case np-2)의 경우는 약 6.5%의 파고감소가 나타났고, 다른 조사선들의 경우 보다 파고 감소효과가 나타나지 않는 이유는 X-X' line과 가까운 부분의 항내에 소파제를 설치하여 소파 효과를 높였기 때문이라고 판단된다. 이에 반하여 경사방향 Pit(Case np-3)의 경우 약 7.2%의 파고 감소를 나타냈다.

Fig. 5(d)에 나타낸 조사선 Y-Y'상에서 실험치와 계산치가 잘 일치하고 있다. 수평방향 Pit(Case np-2)의 경우 항입구에서 파고 감소가 크게 나타났고, 항내에서도 파고 감소 효과가 좋게 나타났으며, 약 13.9%의 파고 감소 효과가 나타났다. 경사방향 Pit(Case np-3)은 항 입구에서 파고 감소가 나타났지만, 항내에서는 우측방파제와 Pit의 상호작용으로 파고가 다소 높게 나타났다. 이 경우 항입구에서의 감

Table 2. The effect of decreasing wave height for random waves(RMS value; partial reflection, $K_r=0.35$)

Line \ Case	Case nf-2	Case nf-3
A-A'	11.4%	9.3%
B-B'	6.0%	5.7%
X-X'	6.5%	7.2%
Y-Y'	13.9%	11.4%

소 효과로 약 11.4%의 파고 감소 효과를 나타냈다.

Table 2는 부분반사의 벽면을 갖는 항내에서 다방향 불규칙과 환경에서의 각 Case별 파고 감소 효과를 나타낸다.

Fig. 6은 다방향 불규칙과 환경에서 Case np-1, Case np-2 및 Case np-3의 등파고비 분포도를 나타낸다. Pit가 없는 Case np-1보다 Pit를 설치한 Case np-2와 Case np-3의 항내 파고분포가 상대적으로 낮게 나타났고, 항외에서 Pit 준설로 인한 파에너지 감소로 항내 반사를 상당히 저감시키거나 파고를 감소시키는 것을 발견할 수 있다. Case np-1의 항내 파고비는 0.22~0.27로 나타났고, 수평방향 Pit(Case np-2)의 경우 Pit에 의해 파가 제어되어 파고비가 0.18~0.2로 나타났으며, 경사방향 Pit (Case np-3)은 우측 방파제 부근에서 파고가 높게 나타나는 것을 제외하고는 항 좌측과 우측 끝에서 파고가 감소하고 있다. 이 경우 0.16~0.24를 나타냈다.

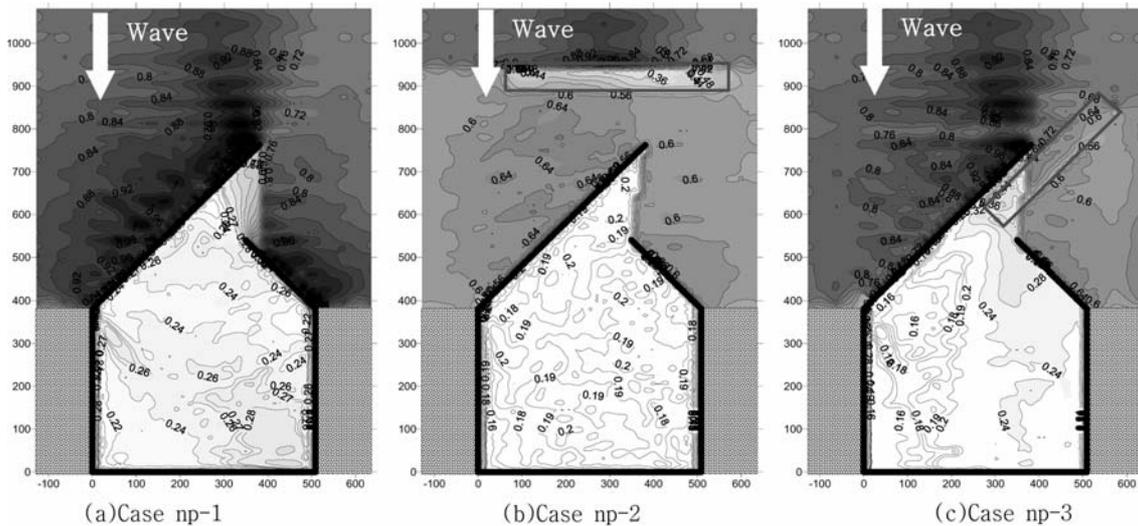


Fig. 6. Contour plots of diffraction coefficients in a harbor with partially reflecting boundary for random waves ($h=7$ m, $d=14$ m, $\theta_r=90^\circ$, $B_2=50$ m, $B_3=35$ m, $L_2=400$ m, $L_3=250$ m, $S_{\max}=25$, $K_r=0.35$).

4. 결 론

본 연구에서는 항만 입구 부근에 다양한 Pit 설치에 따른 항내파고분포에 대한 Pit의 효과를 조사한 것이다. 경계 요소법에 입각하여 수치모델을 구성하고 Pit 영역 및 항만 영역의 경계면을 수백 개의 Segment로 이산화하는 자동 알고리즘을 사용하여 계산하였다. 또한, 다방향 불규칙파의 주기분할은 10, 방향분할은 36으로 하며, 방향이 0°부터 시작하여 360°까지 5°간격으로 분할되기 때문에 총 370개(10개 주기분할×37개 방향)의 규칙파 결과들을 중첩하여 Pit에 의한 회절을 계산하여 불규칙 파랑을 이용한 파랑장의 결과를 얻게 된다. 파랑이 입사할 때, 직립벽(완전반사)인 항에서의 Pit에 의한 파랑의 특성을 보면, 항외에 Pit를 설치한 경우 Pit의 수심차에 의한 에너지 감소로 Pit 배후로 파고가 감소하였고, 좌우측 방파제와 Pit 사이의 수역에서 파고가 탁월하게 감소하였다. 특히 항의 우측 끝에서의 다중반사가 탁월하게 감소되었다.

좌측 안벽이 소파벽(부분반사)인 항에서의 Pit에 의한 파랑의 특성을 보면, 직립벽인 경우에 비해 파고 감소율은 적게 나타났지만, Pit를 설치한 경우 좌측 안벽(소파벽) 부근 해역에서의 파고가 우측 안벽보다 낮게 나타났으며, 이는 소파기능의 효과도 높여주고 있다고 판단된다. 불규칙파의 경우 파고분포가 규칙파(김과 이, 2007)인 경우에 비해 단순한 형태를 나타냈다.

이상의 결과들을 분석해 보면, Pit를 항외 및 항 입구에 설치하면 Pit 배후로 파고가 감소하였고, Pit에 의해 파의 에너지가 약화된 상태로 항으로 다시 입사하게 된다. 이로 인해 항 입구 및 항내에서의 파고가 낮게 분포하고, 항내에서의 파고가 감소되었다. 본 연구를 통해서 얻어진 정보는 항만 입구 부근의 준설항로 설치나, 해안 및 항만의 유지관리 등의 파고예측을 매우 정도 높히 예측할 수 있으며, 이외에도 해안 구조물 해석에 대하여 다양하게 적용될 수 있으며, 특히 불규칙 파랑의 모형은 실시설계 등에 정밀도 높은 파고를 예측하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 또한 신항만 건설시의 항내·외의 파랑 상호작용과 wave field 및 해양 구조물 건설에 필요한 정보를 제공할 수 있다.

감사의 글

본 연구(제2저자)는 2005년도 중앙대학교 교내연구비의 지원을 받았으며, 학교당국에 감사의 뜻을 표하는 바입니다.

참고문헌

- 김성덕, 이홍식(2007). Pit에 의한 부분반사율을 갖는 항내에서의 파랑 회절에 관한 연구. 한국해양·해양공학회지, 19(5), 502~510.
- 이홍식, 이보형(2001). Pit에 의한 파랑의 회절에 관한 연구. 대학토목학회논문집, 21(50-B), 531540.
- Gaillard, P.(1984). Combined refraction-diffraction calculations with directional wave spectra. Proceedings of the 19th Intl. Conf. on Coastal Engrg., ASCE, New York, 1040-1056.
- Goda, Y., Takayama, T., and Suzuki, Y.(1978). Diffraction diagrams for directional random waves. Proceedings of the 16th Intl. Conf. on Coastal Engrg., ASCE, New York, 628-650.
- Isaacson, M. and Qu, S.(1990). Waves in a harbor with partially reflecting boundaries. Coastal Engineering, 14, 193-214.
- Kirby, J.T. and Dalrymple, R.A.(1983). Propagation of obliquely incident water waves over a trench. Journal of Fluid Mechanics, 133, 47-63.
- Kreisel, H.(1949). Surface waves. Quart. Appl. Math., 7, 21-44.
- Lee, H.S.(2004). Boundary element modeling of multidirectional random wave diffraction by multiple rectangular submarine pits. Engineering Analysis with Boundary Elements, 28(9), 1149-1155.
- Lee, H.S. and Kim, S.D.(2006). A comparison of several wave spectra for the random wave diffraction by a semi-infinite breakwater. Ocean Engineering, 33(14-15), 1954-1971.
- Lee, H.S., Lee, B.H., and Kim, S.D.(2003). Multidirectional random wave interactions with submarine rectangular pits. KSCE Journal of Civil Engineering, 7(2), 93-105.
- Lee, H.S. and Williams, A.N.(2002). Boundary element modeling of multidirectional random waves in a harbor with partially reflecting boundaries. Ocean Engineering, 29(1), 39-58.
- Lee, H.S. and Williams A.N.(2004). The diffraction of multidirectional random waves by rectangular submarine pits. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, 126(1), 9-15.
- Lee, J.J. and Ayer, R.M.(1981). Wave propagation over a rectangular trench. Journal of Fluid Mechanics, 110, 335-347.
- McDougal, W.G., Williams, A.N., and Furukawa, K.(1996). Multiple-Pit breakwaters. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 122(1), 27-33.
- Miles, J.W. (1967). Surface-wave scattering matrix for a shelf. Journal of Fluid Mechanics, 28, 755-767.
- Mitsuyasu, H.(1972). The one-dimensional wave spectra at limited fetch. Proceedings of the 13th Intl. Conf. Coastal

- Engg, ASCE, New York, 289-306.
- Mitsuyasu, H., Tasai, F., Suhara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., and Rikiishi, K.(1975). Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *Journal of Physical Oceanography*, 5, 750-760.
- Nagai, K.(1972). Diffraction of the irregular sea due to breakwaters. *Coastal Engineering in Japan, JSCE*, 15, 59-67.
- Newman, J.N.(1965). Propagation of water waves over an infinite step. *Journal of Fluid Mechanics*, 23, 399-415.
- Takezawa, M., Lee, H.S., Lee, B.H., Kim, I.J., and Williams, A.N.(2000). Diffraction of water waves due to a pit breakwater. *Proceedings of the 9th Intl. Conf. Hydraulic Engineering Software VIII*, WIT Press, UK, 243-252.
- Williams, A.N.(1990). Diffraction of long waves by rectangular pit. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 116, 459-457.
- Williams, A.N. and Vazquez, J.H.(1991). Wave interaction with a rectangular pit. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME, 113, 193-198.
- 齊藤榮一, 沖 政和, 青木琢三, 磯部雅彦.(1993). 港灣模型を用いた波の變形特性に関する研究. *海岸工学論文集*, 第40卷, 56-60.
- 小丹浩治, 大里男.(1976). 防波堤隅角部附近の波高分布に関する研究. *港灣技術究報告書*, 15卷, 第2, 55-88.

Received May 21, 2008

Accepted June 12, 2008