

## Pit에 의한 부분반사율을 갖는 항내에서의 파랑 회절에 관한 연구 The Wave Diffraction in a Partial-Reflecting Harbor due to Submarine Pit

김성덕\* · 이홍식\*  
Sung Duk Kim\* and Hong Sik Lee\*

**요 지** : 본 연구는 항만입구 부근에서 해저준설을 실시하여 Pit를 설치하였을 경우 이에 따른 항내, 항만입구 주위, 그리고 항외곽 수역에서의 파랑장에 관한 것이다. 항내 및 항외에서의 파랑장은 평면2차원으로 취급하고, 준설에 의한 Pit는 장방형의 형태로 구성한다. 본 연구에서 사용한 해는 경계적분 방정식(BIE)을 기본으로 하여 얻어진 Green 함수를 이용하여 수치계산을 실시한다. 본 연구에서는 입사각 90° 및 부분 반사 경계면을 갖는 항내 안벽으로 적용하여 그 결과를 제시한다.

**핵심용어** : 경계적분 방정식, Green 정리, Pit

**Abstract** : The present study is to estimate the effect of diffracted wave fields inside a harbor, around harbor entrance and outer breakwater, when a navigation channel is dredged in the vicinity of the a harbor entrance. The wave field of the problem is considered to be two-dimensional plane and the configuration of the submarine pit on the sea bed is designated by a single rectangular type. The numerical simulation is performed by using the solution of the Green function based on the boundary integral equation. The results of this study is illustrated by applying the normal incidence and partially reflecting boundaries.

**Keywords** : boundary integral equation, Green's theorem, pit

### 1. 서 론

본 연구는 항만 입구 주변과 항외에 해저준설을 실시하여 Pit를 설치한 경우, 이에 따른 항내, 항만 입구 주위, 그리고 항외곽 방파제 수역에서 Pit와 파랑과의 상호작용에 관한 것이다. 우선 Pit와 파랑과의 상호작용 문제에 관한 연구는 Kreisel(1949), Lee and Ayer(1981), Kirby and Dalrymple(1983)이 있으며, 연직 장방형 trench를 통과하는 경우에 대한 해석해를 제시하였다. 평면 2차원 혹은 3차원 문제에 대하여는 규칙파를 대상으로 한 Williams(1990), Williams and Vazquez(1991), McDougal et al.(1996)의 연구가 있다. 최근, Lee et al.(2003), Lee and Williams(2004), Lee(2004)는 다방향 불규칙파 이론을 적용하여 파랑과의 상호작용을 연구하였으며, 방향집중 매개변수의 값을 변화시켜 불규칙파의 회절을 연구하였다. 또한, 항내파고분

포에 관한 문제로 Gaillard(1984), Isaacson and Qu(1990), Lee and Williams(2002) 등이 있다.

한편, 본 연구는 위의 두 문제를 결합한 것으로서 Pit를 항만 입구 근처에 설치할 때, Pit에 의해 항내 파고가 감소하는 효과를 조사하는 것이다. Pit의 크기는 긴 형태의 장방형의 모형으로 고안하고, 파고조사 대상항은 항만 안벽의 반사율을 고려하며, 그 범위는 항입구에 직각으로 입사하는 경우에 대하여 회절계수의 변화를 조사하였다. 이론해석에 대한 연구는 경계적분 방정식(BIE)을 이용하여 선형파 이론을 이용하였고, 입사파의 주기가 10초일 때 항내 반사율은 0.35(부분반사)와 0.95(완전반사)에 대하여 수치계산을 하였다. 본 연구에서 얻어진 결과에 대하여 齊藤 등(1993)에 의하여 수행된 실험결과와의 비교검토를 통하여 신뢰성을 확인하였고, 주로 Pit 설치에 따른 파고변화 형태를 조사하였다.

\*중앙대학교 토목공학과(Corresponding author: Sung Duk Kim, Department of Civil Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Korea, ttik@wm.cau.ac.kr).

## 2. 실험 및 이론

### 2.1 실험조건

齊藤 등(1993)은 폭 24 m, 길이 33 m, 깊이 1.5 m의 평면 수조에서 수리모형 실험을 하였다. 수조의 한 변에는 폭 50 cm × 48개의 피스톤 타입 비연속형 Serpent형 조파장치가 설치되어 있고, 다른 3면은 소파재로 덮여져 있다. 실험에 사용한 항만모형은 1/50축척의 모형이고, 항만모형의 항외벽에는 충분한 소파재를 설치하여 모형으로부터의 반사를 억제하고 모형의 주방파제 선단은 수조 연안 방향 중앙에서 5 m 지점에 설정하였다. 항만수리모형에는 모든 항내벽을 직립의 내수 베니어판으로 만든 것(직립벽형)과 소파공을 설치한 소파벽형의 2종류이다. 수치모형 실험은 입사파 주기 및 일정수심의 계산조건( $T=9.97s$ ,  $h=7m$ )을 근거로 실시하였다. 항내의 수면변동은 항내벽에서 50 cm 내측의 영역을 50 cm 혹은 25 cm 간격의 격자점에서 측정하였고, 소파공은 잠제형(潛堤型) 소파블록과 소파재로 제작하였다. 항만 모형의 조사선 A-A', B-B', X-X', Y-Y'상에서의 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다.

### 2.2 지배방정식

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. 유체의 성질을 비점성, 비압축성 그리고 유체입자의 운동을 비회전성으로 하는 미소진폭파 운동으로 가

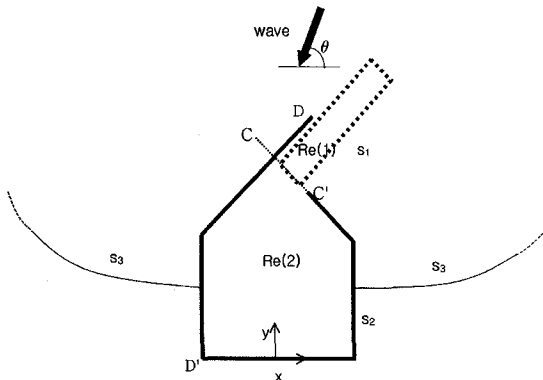


Fig. 1. Layout of pit and harbor.

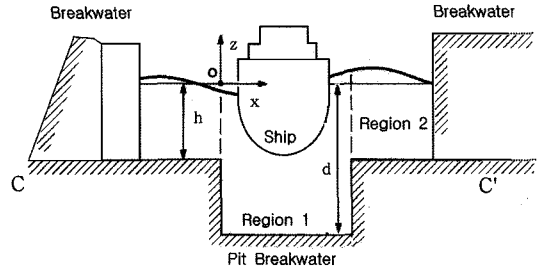


Fig. 2. Definition sketch of rectangular pit configuration and boundary surfaces.

정하면 속도 포텐셜이 존재하고, 일반적으로 다음처럼 정의된다.

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z) \cdot e^{-i\omega t} \quad (1)$$

여기서,  $\omega$ 는 각주파수( $=2\pi/T$ ,  $T$ 는 주기),  $t$ 는 시간이다. 또한  $\phi(x, y, z)$ 은 시간에 관계가 없는 공간 속도포텐셜로 표시된다. 식 (1)과 유체 연속식에 적용하는 것에 의해 Laplace 방정식이 얻어진다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

이 식이 유체운동의 지배방정식이고, 이하에 표시한 경계 조건 하에서 이것을 해석하는 것에 의해 속도포텐셜이 결정된다. 수심  $h$ 와 Pit 저면수심  $d$ 의 불투과성에 대한 저면 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0; \quad z = -h, \quad z = -d \quad (3)$$

유체운동이 확정하는 평균 자유표면( $z=0$ )에 있는 경계조건으로서 운동학적 조건과 역학적 조건 및 해저면에서의 저면 경계조건을 만족하는 지배방정식 (2)의 일반해는 다음 형태로서 주어진다.

$$\phi_1(x, y, z) = \frac{g a_i}{\sigma} \cdot f_1(x, y) \cdot \frac{\cosh[k_1(z+d)]}{\cosh(k_1 d)}; \quad \text{Region 1} \quad (4)$$

$$\phi_2(x, y, z) = \frac{g a_i}{\sigma} \cdot f_2(x, y) \cdot \frac{\cosh[k_2(z+h)]}{\cosh(k_2 h)}; \quad \text{Region 2} \quad (5)$$

식 (4)는 Pit 준설에 의한 Pit 내부 영역( $R_1$ ) 속도포텐셜이고, 식 (5)는 항내외( $R_2$ )에서의 속도 포텐셜이다. 여기서,  $a_i$ 는 입사파의 진폭,  $d$ 는 Pit의 수심,  $h$ 는 항내의 일정수심, 첨자 1은 Pit 영역, 첨자 2는 Pit를 제외한 영역을 나타내며,  $k_j(j=1,2)$ 는 파수이고, 다음의 분산식에서

얻어진다.

$$\omega^2 = gk_1 \tanh(k_1 d); \text{ Region 1} \quad (6)$$

$$\omega^2 = gk_2 \tanh(k_2 h); \text{ Region 2} \quad (7)$$

여기서,  $\omega$ 는 각속도( $\omega=2\pi/T$ ,  $T=1/f$ )이고,  $g$ 는 중력가속도이다. 또한,  $f_j(x, y)$ ( $j=1, 2$ ) 입사파, 반사파 및 산란파를 표시하는 파동함수이다. 지금, 이 파동함수를 각 성분으로 나타내면, 다음 식으로 표시된다.

$$f_j(x, y) = f_{i,j}(x, y) + f_r(x, y) + f_s(x, y) \quad j=1, 2 \quad (8)$$

여기서,  $f_i, f_r, f_s$ 는 각각 입사파와 반사파의 파동함수이고,  $f_s$ 는 산란파의 파동함수이다.  $f_s(x, y)$ 는 다음의 Helmholtz 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 f_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f_s}{\partial y^2} + k_j^2 f_s = 0 \quad j=1, 2 \quad (9)$$

입사파를 Fig. 1에 표시한 것처럼  $x$ 축과  $\theta$ 의 각도를 가지고 진행하는 파로 생각하고, 그 파형을 다음식으로 표현한다.

$$\zeta_j = \zeta_i = a_j \cos\{k_j(x \cos \theta + y \sin \theta) + \omega t\} \quad j=1, 2 \quad (10)$$

이 파형에 대응하는 속도 포텐셜을 확정시키는 복소함수  $f_i(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$f_i(x, y) = -ie^{-ik_j(x \cos \theta + y \sin \theta)} \quad j=1, 2 \quad (11)$$

또한, 항만에서의 반사파에 의한 함수  $f_r(x, y)$ 를 다음식으로 표시될 수 있다.

$$f_r(x, y) = -ie^{-ik_j(x \cos \theta - y \sin \theta)} \quad j=1, 2 \quad (12)$$

이상에서 산란항  $f_s(x, y)$ 를 결정하면 식 (4)와 (5)에 의해 속도 포텐셜  $\phi(x, y, z)$ 이 결정되고, 수역내의 파동이 확정된다. 따라서 문제는  $f_s(x, y)$ 를 결정하는 것이다.

### 2.3 경계 조건

두 영역간의 파랑장 경계면에 질량 수송과 압력의 연속성을 고려하면 다음과 같은 관계식을 얻는다(Stoker, 1957).

$$\frac{\partial f_1}{\partial n} = h \frac{\partial f_2}{\partial n} \quad \text{Boundary } S_1 \quad (13)$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 \quad \text{Boundary } S_1 \quad (14)$$

영역  $S_3$ 에서의  $f_s(x, y)$  산란형태는 Sommerfeld의 방사 조건을 만족해야 한다.

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \sqrt{r} \left( \frac{\partial f_s}{\partial r} - ik_j f_s \right) = 0 \quad j=1, 2 \quad (15)$$

Pit와 항에서의 경계인  $S_1$ 과  $S_2$ 상에 있는 경계조건은 다음 식과 같이 나타난다.

(i) Pit가 없는 경우

경계  $S_2$ 상에서

$$\frac{\partial f}{\partial n} = 0, \frac{\partial f_s}{\partial n} = -\left( \frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \quad (16)$$

(ii) Pit가 있는 경우

경계  $S_1$ 상에서  $\frac{\partial f}{\partial n} = 0$ 과 식 (12)에 의해서 다음과 같다.

$$\frac{\partial f_s}{\partial n} = \frac{h \partial f_i}{d \partial n} \quad (17)$$

경계  $S_2$ 상에서 항내에서의 입사파는 Pit에 의한 회절파의 영향으로 입사와 반사가 되므로  $\partial f / \partial n = 0$ 과 식 (13)에 의해서 다음식으로 된다.

$$\frac{\partial f_s}{\partial n} = -\frac{h}{d} \left( \frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \quad (18)$$

### 2.4 Green 정리에 의한 경계적분방정식

경계적분방정식과 Green 정리를 적용하여 Pit 및 항만 영역으로 확대하면, 수역의 임의지점  $P(x, y)$ 에 있는 함수  $f_s(x, y)$ 는 Pit를 설치하지 않은 경우에는 식 (19)로 나타낼 수 있고, Pit를 설치한 경우 식 (20)로 나타낼 수 있다.

$$f_s(x, y) = \frac{1}{2} \int_{S_2+S_3} \left[ f_s(\xi, \eta) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) - \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) \cdot \frac{\partial}{\partial n} f_s(\xi, \eta) \right] \quad (19)$$

$$f_s(x, y) = \frac{1}{2} \int_{S_1+S_2+S_3} \left[ f_s(\xi, \eta) \cdot \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_1 r) \right) - \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_1 r) \right) \cdot \frac{\partial}{\partial n} f_s(\xi, \eta) \right] \quad (20)$$

여기서,  $(\xi, \eta)$ 은 경계선  $S_1, S_2$ 상의 점의 좌표,  $\partial / \partial n$ 은 Fig. 1에 표시한 위치의 법선 방향의 도함수,  $H_0^{(1)}(k_j r)$ 은 0차 제 1종 Hankel 함수이다. 지금, 가상경계선  $S_3$ 는 파의

산란 영향이 없어지고  $S_3$ 상에서의  $f_s(\xi, \eta) = 0$ 으로 된다. 식 (19)와 (20)에 경계조건을 적용하고 반사율  $K_r$ (小丹와 大里, 1976; Lee and Williams, 2002)을 고려하면 수역의 임의의 지점  $P(x, y)$ 에 있는 함수  $f_s(x, y)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_s(x, y) = -\frac{1}{2} \int_{S_2} \left[ f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) \left( \frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (21)$$

$$f_s(x, y) = -\frac{1}{2} \int_{S_1} \left[ f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_1 r) \right) + \frac{h}{d} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_1 r) \right) \left( \frac{\partial f_i}{\partial n} \right) \right] ds - \frac{1}{2} \int_{S_2} \left[ f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) \frac{h}{d} \left( \frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (22)$$

수역의 임의점  $(x, y)$ 를 경계상의 임의점  $(\xi, \eta')$ 에 접근시키면 경계상의  $f_s$ 에 관한 다음의 적분방정식이 얻어진다.

$$f_s(\xi, \eta') = -\int_{S_2} \left[ f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) \left( \frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (23)$$

$$f_s(\xi, \eta') = -\int_{S_1} \left[ f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_1 r) \right) + \frac{h}{d} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_1 r) \right) \left( \frac{\partial f_i}{\partial n} \right) \right] ds - \int_{S_2} \left[ f_s(\xi, \eta) \frac{\partial}{\partial n} \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) + K_r \left( -\frac{1}{2} i H_0^{(1)}(k_2 r) \right) \frac{h}{d} \left( \frac{\partial f_i}{\partial n} + \frac{\partial f_r}{\partial n} \right) \right] ds \quad (24)$$

따라서 식 (21-24)를 해석하는 것에 의해서  $f_s(x, y)$ 가 결정되며, 임의점  $(x, y)$ 에 있는 회절계수  $K_d$ 는 식 (25)로 계산된다.

$$K_d = |f_i(x, y) + f_r(x, y) + f_s(x, y)| \quad (25)$$

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 완전반사를 갖는 항내에서의 Pit에 의한 파고변화 효과

본 연구에서의 모든 수치계산은  $10/L$ ( $L$ : 입사파장)의 선

요소(Line segment)로 분할하여 실시하였다. 입사주기  $T = 9.97s$ , 항내 수심 7 m, Pit 수심 14 m, 그리고 입사각  $90^\circ$ 의 조건에서 완전반사를 갖는 항내에서 Pit의 유무상태에 따른 항내파고분포를 조사하기로 한다. 항 입구 부근에 각각 2종류의 Pit, 즉 수평방향(Case 1-2) 및 경사방향(Case 1-3)의 평면적으로 배치한 것이다. 여기서, 수평방향 Pit(Case 1-2)는 폭 50 m, 길이 400 m이고, 경사방향 Pit(Case 1-3)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 유무상태에 따른 파고변화에 대한 비교를 위하여  $RMS(K_d)_S = \sqrt{\sum_{i=1}^M [(K_{d,w/o})_i - (K_{d,w/p})_i]^2 / M}$ 비를 사용하였다. 여기서, 아래첨자 w/p 및 w/o는 Pit가 있고 없는 상태의 회절계수값이다.

Pit가 없는 경우, Fig. 3(a)에 나타낸 조사선 A-A'상에서는 실험치가 계산치(Case 1-1)보다 약간 높게 나타나고 있으나 본 연구에서는 계산치가 비교적 잘 일치하고 있다. 수평방향 Pit(Case 1-2)를 설치한 경우 주 방파제와 부방파제 근처에서 파고가 감소하고, 중앙에서는 거의 비슷하게 나타나며, 이 경우 Pit가 없는 경우보다 파고가 약 17%(이하, RMS비) 감소하였다. 경사방향 Pit(Case 1-3)의 경우, 주 방파제 부근과 중앙에서는 비교적 낮은 파고 분포를 나타내며, 부 방파제 부근에서는 파고비가 높게 나타나고 있다. 이것은 길이가 짧은 부 방파제의 끝과 Pit의 경계부분이 만나게 되어 교란을 일으킴으로서 Pit와 파랑과의 상호작용에 의한 것이다. 이 경우 Pit가 없는 경우와 비교하여 파고가 약 20.4% 감소하였다.

Fig. 3(b)에 나타낸 조사선 B-B'상에서,  $x$ 축 3 m~5 m 부근에서 계산치(Case 1-1)와 실험치 파고의 높낮이가 비슷하게 나타나지만 계산치의 파고가 다소 높게 나타나게 되는 데, 이는 평면수조 양 옆에 소파제를 설치하여 실험을 실시하였기 때문에 실험치가 항 중앙에서 다소 낮게 나타나는 경향을 나타낸다. Case 1-2의 경우 항만 좌우측 부근에서는 파고가 감소하고, 항만 중앙에서는 감소치가 적게 나타나며, 이 경우 파고가 약 12% 감소하였다. Case 1-3의 경우 좌측 안벽 부근에서는 큰 파고 감소가 나타나고, Case 1-2 보다는 감소폭이 크게 나타났으며, 이 경우 파고가 약 19.2% 감소하였다.

Fig. 3(c)에 나타낸 조사선 X-X' 상에서 항내의 중심부에서는 계산치가 다소 높게 나타나며 항입구와 항내 끝에서는 실험치가 다소 높게 나타난다. Pit를 설치하지 않은 경우 5.5 m와 6 m 지점 사이에서 가장 큰 회절 파고

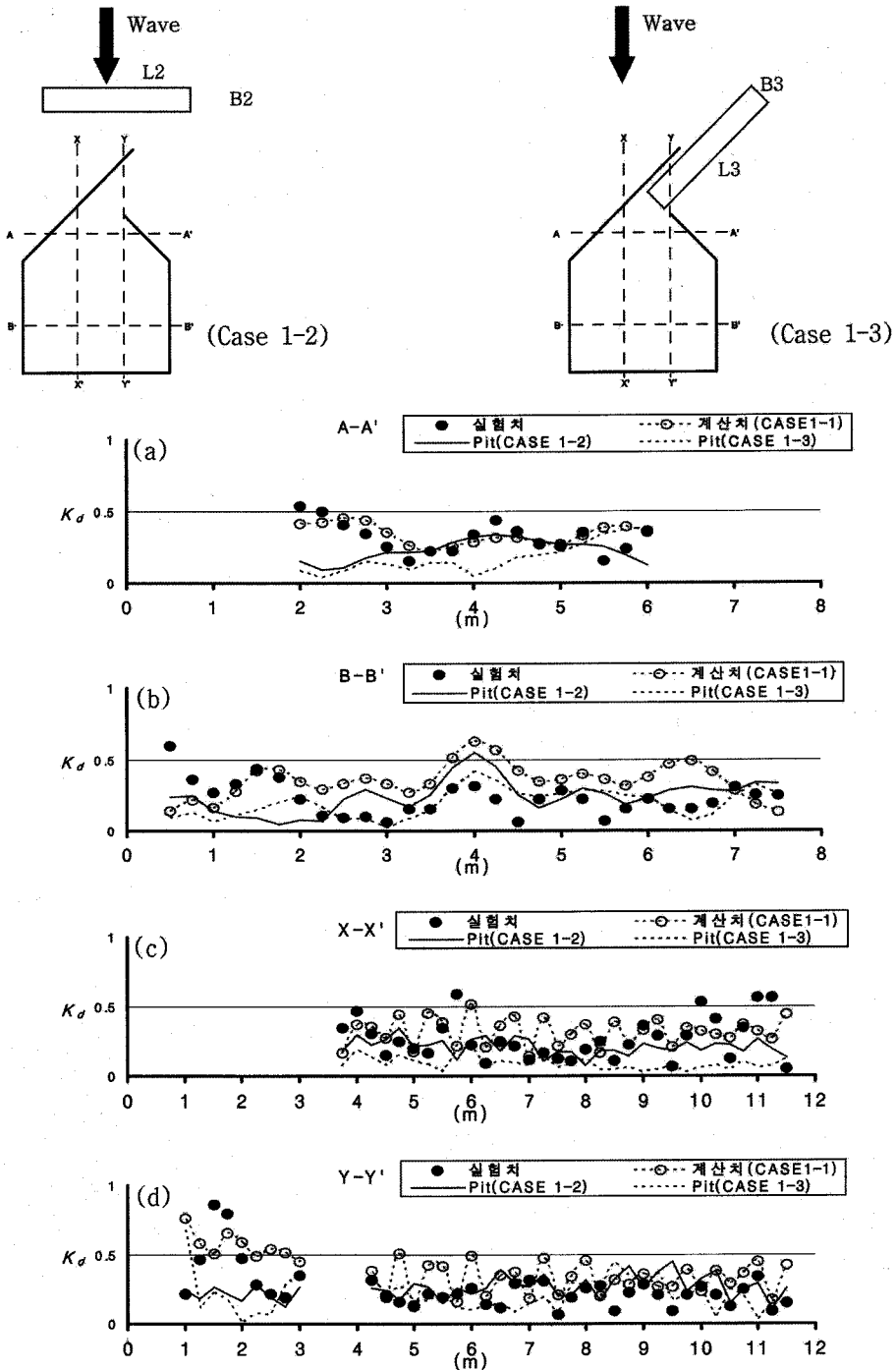


Fig. 3. Wave height distribution in a harbor with fully reflecting boundary ( $h=7$  m,  $d=14$  m,  $\theta=90^\circ$ ,  $L_2=50$  m,  $L_3=35$  m,  $B_2=400$  m,  $B_3=250$  m).

값이 나타나며, 항 끝에서의 반사파 영향으로 10 m~12 m 지점에서 파고가 높게 나타난다. 이처럼 Pit를 설치하지 않은 경우는 항 중앙을 제외하고 회전 파고값이 높게 나

타난다. Case 1-2의 경우 5.5m와 6m 지점 사이와, 10m~12 m 지점에서의 파고 감소가 되며, 전체적으로 파고가 낮게 분포하고 정온도가 향상되고 있음을 나타낸다. 이 경우 파

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

Line	Case	Case1-2	Case1-3
A-A'		17%	20.4%
B-B'		14.6%	19.2%
X-X'		14.7%	24.7%
Y-Y'		11.1%	18.8%

고가 약 23.3% 감소하였고, Case 1-3은 약 24.7% 감소하였다.

Fig. 3(d)에 나타난 조사선 Y-Y' 상에서 4 m~6 m 지점에서는 실험치가 다소 높게 나타나지만, 항내에서는 양호하게 일치한다. Case 1-2의 경우, 항 입구 및 4 m~6 m 지점에서 파고 감소가 나타나며, 항 끝으로 갈수록 감소폭이 적게 나타난다. 이 경우 파고가 약 16% 감소하였다. Case 1-3의 경우 항 입구 및 4 m~6 m 지점에서 Case 1-2보다 파고 감소효과가 좋게 나타나며, 약 18.8% 정도이다.

Table 1은 완전반사 벽면을 갖는 항내에서 각 Case별 파고 감소 효과를 나타낸다. 4가지 단면 중에서 Case 1-2는 A-A' line 상에서 Case 1-3은 X-X' line 상에서 가장 탁월하게 파고가 감소하고, 두 가지 경우 모두 수직라인의 파고 감소 효과의 정도가 높게 나타났다.

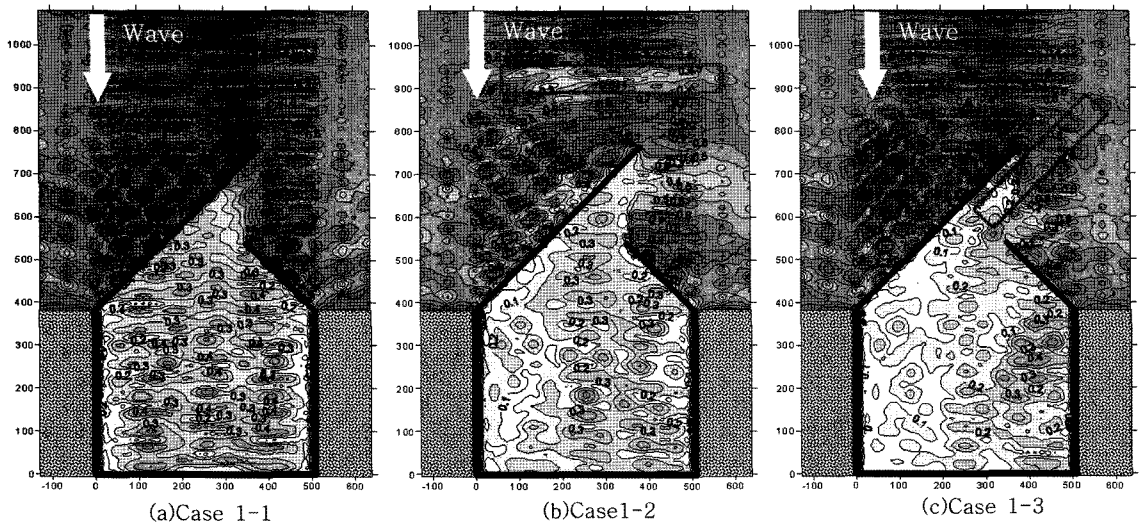
Fig. 4는 각각 Case 1-1, Case 1-2와 Case 1-3의 등파고비 분포도를 나타낸다. Case 1-1보다 Pit를 설치한 Case 1-2와 Case 1-3의 항내 파고분포가 상대적으로 낮게 나타나며,

Case 1-2의 경우는 외해에서부터 파고가 감소한 상태로 파가 입사하므로 항 입구와 항만 내에서 파고 감소 효과가 나타난다. 특히 항 중앙의 좌우측에서 파고 감소효과가 잘 나타나고, 좌측안벽 부근에서 Pit를 설치하지 않은 경우 0.2~0.3의 회절값 분포를 보이나, Case 1-2의 경우 대부분이 0.1의 회절값 분포를 나타낸다.

또한 Pit의 불연속 수심 차이에 의해서 Pit 배후로 입사파가 약화되어 진행하게 되며, 이는 파고 감소 효과로 나타나게 된다. Case 1-3의 경우 Pit의 항내 끝부분에서 약간의 교란이 발생하여 항 입구에서 Case 1-2보다는 파고가 높게 나타나고, 교란의 영향으로 부 방파제 근처에서도 Case 1-2보다는 파고가 높게 나타나고 있으나, 주 방파제와 항만 중앙에서는 파고가 감소한다. 특히 주 방파제 근처 좌측 안벽의 회절값은 0.1이하의 분포를 나타내고, 항 중앙 Line에서는 Pit를 설치하지 않은 경우보다 약 50% 절감된 0.2를 나타낸다. 수평방향(Case 1-2)과 경사 방향(Case 1-3)의 Pit 준설을 한 부분에서도 파고 감소효과가 잘 나타나고 있다.

**3.2 부분반사를 갖는 항내에서의 Pit에 의한 파고변화 효과**

Fig. 5는 안벽이 소파벽( $K_R=0.35$ )이인 경우의 파고 비교를 나타낸다. Fig. 5(a)에 나타난 조사선 A-A'상에서 실험치가 항내 좌측에서 계산치보다 다소 높고 항내 우측은 계산치가 다소 높게 나타났으나 비교적 잘 일치한다. 수평방향 Pit(Case 2-2)는 1~4 m 지점에서 파고 감소가 있



**Fig. 4.** Contour plots of diffraction coefficients in a harbor with fully reflecting boundary( $h=7$  m,  $d=14$  m,  $\theta=90^\circ$ ,  $L_2=50$  m,  $L_3=35$  m,  $B_2=400$  m,  $B_3=250$  m).

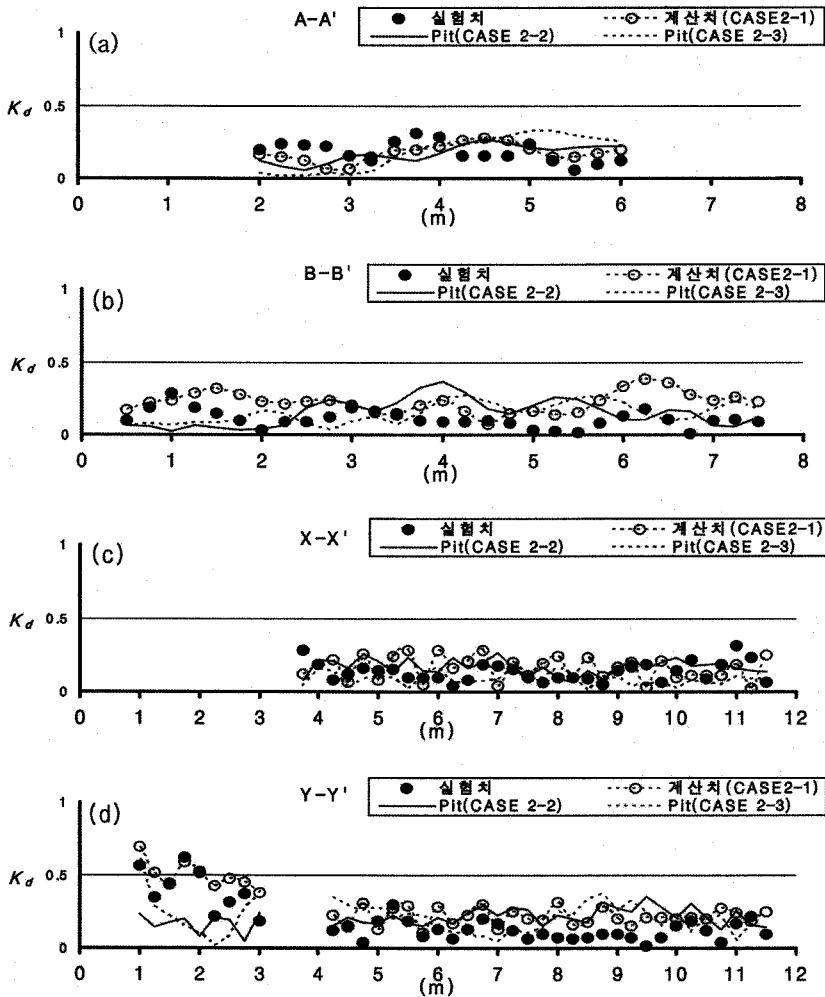


Fig. 5. Fig. 3. Wave height distribution in a harbor with partial reflecting boundary ( $h=7$  m,  $d=14$  m,  $\theta=90^\circ$ ,  $L_2=50$  m,  $L_3=35$  m,  $B_2=400$  m,  $B_3=250$  m,  $K_r=0.35$ ).

고, 5~6 m 지점에서는 약간 높게 나타나며, Pit가 없는 경우보다 파고가 약 1.3% 감소하였다. 큰 파고 감소는 없지만, Pit 준설을 하면 소파벽에서도 역시 파고 감소 효과가 나타난다. 경사방향 Pit(Case 2-3)은 주 방파제와 항 중앙에서는 파고 감소가 있지만 부 방파제 부근에서는 다소 높게 나타나고 있다. 이것은 소파벽의 경우에도 길이가 짧은 부 방파제의 끝과 Pit의 경계부분이 만나게 되어 교란을 일으킴으로서 Pit와 파랑파의 상호작용이 나타나며, 그 정도는 직립벽인 경우보다 작게 나타난다. 이 경우 약 0.4%의 파고 감소 효과를 나타낸다.

Fig. 5(b)에 나타난 조사선 B-B'상에서 Case 2-2는 항만 중앙을 제외하고는 파고 감소효과가 잘 나타나고, 항

만 중앙에서는 약간 높게 나타나며, 약 13.2%의 파고 감소 효과가 나타난다. Case 2-3은 약 7.6%의 파고 감소를 나타낸다.

Fig. 5(c)에 나타난 조사선 X-X'상에서 6 m, 8 m 지점을 제외하고는 실험치와 계산치가 거의 일치한다. Case 2-2의 경우는 약 0.3%의 파고감소가 나타나며, 다른 line들보다 파고 감소효과가 나타나지 않는 이유는 X-X' line과 가까운 부분의 항내에 소파제를 설치하여 소파 효과를 높였기 때문이라고 판단된다. 이에 반하여 Case 2-3의 경우 약 7.7%의 파고 감소를 나타낸다.

Fig. 5(d)에 나타난 조사선 Y-Y'상에서 실험치와 계산치는 8 m~10 m 지점을 제외하고 아주 좋은 일치를 나타

**Table 2.** The effect of decreasing wave height(RMS value; partial reflection)

Line	Case	Case2-2	Case2-3
A-A'		1.3%	0.4%
B-B'		13.2%	7.6%
X-X'		0.3%	7.7%
Y-Y'		18.3%	16.7%

낸다. Case 2-2의 경우 항 입구에서 파고 감소효과를 나타내며, 항내로 갈수록 감소폭이 적어진다. 항 입구에서 파고가 감소하는 것은 항외에서 Pit를 거치면서 파의 에너지가 상당히 소멸되었기 때문에 항입구에 도달하면서 파고가 감소한다고 판단되며, 이 경우 약 18.3%의 파고 감소 효과를 나타낸다. Case 2-3은 약 16.7%의 파고 감소 효과를 나타낸다.

Table 2는 부분반사의 벽면을 갖는 항내에서 각 Case 별 파고 감소 효과를 나타낸다. 4가지 단면 중에서 Case 2-2의 경우 Y-Y' line 상에서 가장 탁월하게 파고가 감소하고 있음을 나타내지만, 이는 항입구의 파고 감소가 탁월하기 때문에 실제 항만 내에서의 파고 감소는 Pit를 준설하지 않는 경우와 비교해서 B-B' line에서 탁월하게 나타난다. Case 2-2의 경우에 수직라인과 수평라인 모두에서 파고 감소효과가 나타나며, 항만 내에서 수직라인에 비해 수평라인의 파고 감소 효과의 정도가 높게 나타난다.

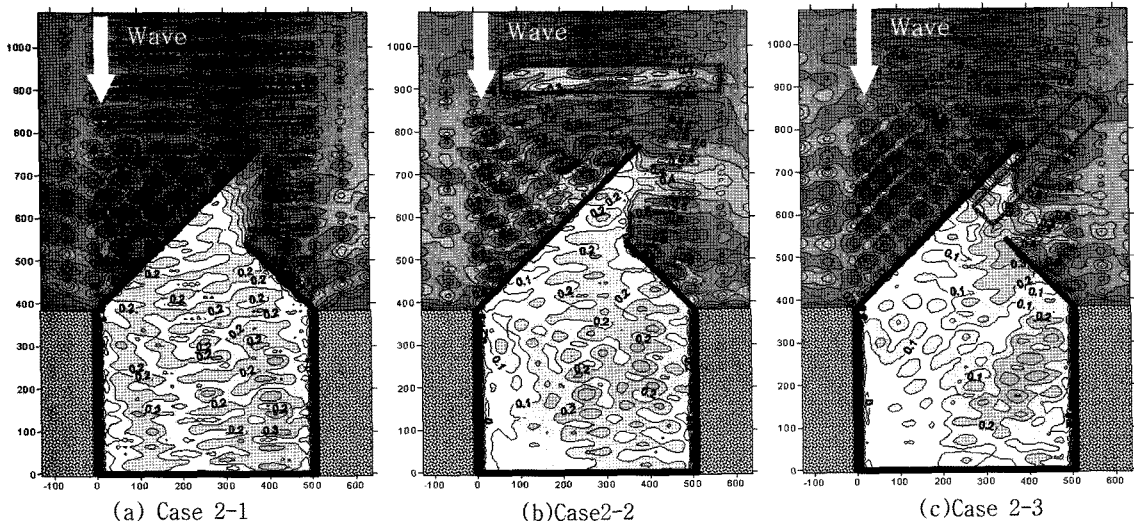
Fig. 6은 Case 2-1, Case 2-2 및 Case 2-3의 등파고비 분

포도를 나타낸다. Case 2-1보다 Pit를 설치한 Case 2-2와 Case 2-3의 항내 파고분포가 상대적으로 낮게 나타나며, 특별히 항 입구에서는 Case 2-1에 비해 Pit를 준설한 경우의 파고가 상당히 감소하고 있음을 나타낸다. Case 2-2의 경우 외해에서부터 파고가 감소한 상태로 파가 입사하므로 항 입구와 항만 내에서 파고 감소 효과가 나타나며, 좌측 안벽에서의 항내 반사를 상당히 저감시키거나 파고를 감소시키는 것을 발견할 수 있다.

Case 2-3의 경우 Pit의 항내 끝부분에서 교란이 발생하여 그 영향으로 부 방파제 배후에서 파고가 약간 높게 형성되고, 항만 우측 안벽에서도 파고가 좌측 보다는 높게 분포한다. 그러나, Case 2-3의 경우 좌측 안벽에서의 파고분포에 비해 우측 안벽에서의 파고가 높게 나타나는 것이며, Pit를 준설하지 않은 경우와 비교해서 우측 안벽에서는 파고가 거의 비슷한 분포를 나타내거나 다소 낮게 나타난다. 또한 항 중앙과 좌측에서 파고가 감소하며, 이는 Pit 준설로 인하여 파랑이 상당히 제어되었기 때문이라고 판단된다. 라인별 비교 중 수직라인 비교에서 Pit를 준설한 경우 Pit를 준설하지 않은 경우보다 파고 감소율이 낮거나 파고가 다소 높게 나타나는 경우가 발생했지만, 항만 내에서의 전체 비교에서는 파고 감소 효과가 잘 나타난다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 항만 입구 부근에 다양한 Pit 설치에 따



**Fig. 6.** Contour plots of diffraction coefficients in a harbor with partial reflecting boundary( $h=7$  m,  $d=14$  m,  $\theta=90^\circ$ ,  $L_2=50$  m,  $L_3=35$  m,  $B_2=400$  m,  $B_3=250$  m,  $K_r=0.35$ ).



른 항내파고분포에 대한 Pit의 효과를 조사한 것이다. 기존 연구에서는 부분반사 경계를 갖는 항내파고분포에 관한 연구(Lee and Willimas(2002)) 및 Pit 만을 고려하여 개방경계(Open boundary)를 대상으로 한 연구(Lee et al. (2003))가 있다. 그러나, 위의 연구들은 독립적으로 각각 실시되었지만, 본 연구에서는 이들의 연구를 새롭게 복합적으로 고려하여 Pit의 유무상태에 대한 항내파고를 연구한 것이다. 즉, 항만의 경계, Pit의 경계 및 Pit 수심의 불연속성 등 3가지 경우의 복합적 상호작용에 관한 것이고, 이에 대한 경계조건을 설정하여 경계적분방정식에 적용하였다. 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, 주부 방파제와 Pit 사이의 수역에서 파고가 탁월하게 감소하였다. Pit 설치로 항내에서의 정온도가 향상되었고, 항내의 파고 감소가 탁월하게 나타났다.

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.

이상의 결과들을 분석하여 보면, Pit를 항외 및 항 입구에 설치하면 Pit 배후로 파고가 감소하였고, Pit에 의해 파의 에너지가 약화된 상태로 항으로 다시 입사하므로 항 입구 및 항내에서의 파고가 낮게 분포했으며, 항내에서의 파고가 감소되었다. 항만 건설 혹은 운영에 있어서 적절한 Pit 설치에 의한 파랑의 회절이나 에너지 감소의 파랑 제어를 통하여 항로 운행중의 선박의 안정성을 확보할 수 있다.

## 참고문헌

- Gaillard, P. (1984). Combined refraction-diffraction calculations with directional wave spectra. Proc. Int. Conference on Coastal Engineering, ASCE, New York, 1040-1056.
- 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., 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, 122(1), 27-33.
- Stoker, J.J. (1957). Water waves. The mathematical theory with applications. Interscience, New York, N.Y.
- Williams, A.N. (1990). Diffraction of long waves by rectangular pit. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 116, 459-457.
- Williams, A.N. and Vazquez, J.H. (1991). Wave interaction with a rectangular pit. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 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. 海岸工學論文集, 第40卷, 56-60.
- 小丹浩治, 大里 滄男. (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号, 55-88.

Received September 19, 2007

Accepted October 22, 2007