

방파제 시스템에 영향을 미치는 해저 Trench 준설 제원 설정의 분석

김성덕* · 이호진**

*청주대학교 토목환경공학과 · **충북대학교 토목공학과

The Analysis of Specification of Submarine Trench Affecting the Breakwater System

Sung Duk Kim* · Ho Jin Lee**

*Department of Civil and Environmental Engineering, Cheongju University

**Department of Civil Engineering, Chunbuk National University

Abstract

The present study is to estimate the effect of wave height affecting at the front face of breakwater systems due to specification of submarine trench such as distance from breakwater to dredged area and width of dredge. The wave diffraction field, which is important hydraulic factor in the ocean, is considered to be two dimensional(2D) plane and the configuration of the submarine dredge on the sea bed designated by single horizontal long-rectangular pit system according to the various specific conditions of dredged locations. The numerical simulation is performed by using Green function based on the boundary integral equation and meshed at moving boundary conditions. The results of present numerical simulations are illustrated by applying the normal incidence. It is shown that the ratios of wave height at the front face of breakwater was varied by dependance of distant from breakwater to dredged area and width of dredge. It means that, when the navigation channel or pit breakwater is dredged on seabed, engineers have to consider the specification of dredge. This study can effectively be utilized for safety assessment to various breakwater systems in the ocean field and provided for safety construction of offshore structure.

Keywords : Submarin Trench, Wave Diffraction, Hydraulic Factor, Navigation Channel, Offshore Structure

1. 서론

최근의 해안 공사는 필요한 토사를 얻기 위하여 해저 준설을 실시하며, 이러한 해저준설은 선박의 안전한 항로를 확보하기 위하여 어항 및 항만 입구에서 실시하고 있다. 또한 항내에 퇴적되거나 매몰된 토사를 제거하기 위하여 해저준설을 실시하기도 한다. 이처럼 신항만 건설 또는 외해에 해안 구조물을 건설하기 위하여 해저준설이 일반적으로 행해지고 있다.

해저준설로 인하여 발생하는 해저면의 불연속점은 파랑변형을 야기하기 때문에 천해역에서의 신항만 건설 또는 인공섬 건설을 실시할 때 회절파고비 및 파고 증폭 정도를 고려해야 한다. 특히, 항만 및 어항에는 안전을 위하여 외해에 일직선 방파제 또는 우각부 방파제가 설치되며, 외해에서 형성되어 진행되는 파는 직접적으로 방파제와 상호작용을 하기 때문에 우각부 방파제의 경우 제간부의 안전에 영향을 받는다. 이는 우각부에 파랑에너지가 집중되기 때문이다. 이러한 파랑에너지

† 교신저자 : 이호진, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410 공과대학 토목공학과

M·P: 010-8956-5582, E-mail: lhjce@chungbuk.ac.kr

2009년 4월 접수; 2009년 5월 수정본 접수; 2009년 6월 게재확정

의 집중현상 및 천해파의 파고를 외해에서부터 감소시키기 위하여 해저준설 또는 해저 trench를 설치한다.

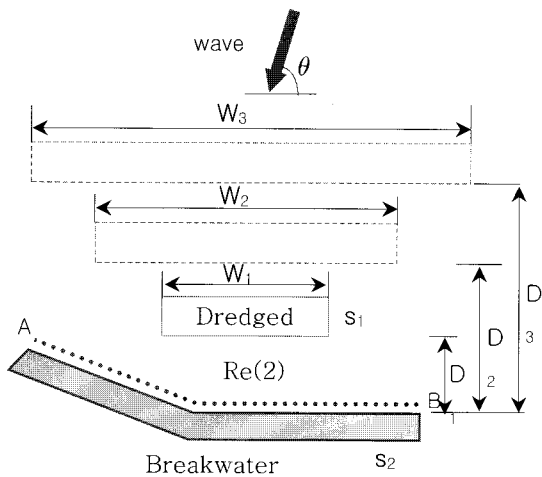
해저준설은 수심의 불연속성을 갖기 때문에 입사파랑 및 외해 방파제와의 상호작용을 검토해야만 한다.

특히 외해 방파제와의 상호작용에 있어서 준설 폭 및 준설 영역과 방파제 간 사이의 길이제원에 따른 회절파고비 및 파고 증폭이 다양하게 나타나기 때문에 방파제 전면에서의 안전성을 확보하기 위하여 해저준설 위치를 결정하기 위한 사전 검토가 필요하다.

해저 준설과 파랑의 상호작용 문제에 관한 연구로는 1980년대부터 Lee & Ayer[1]를 시작으로 Kirby & Dalrymple(1983), Williams & Vazquez (1991), McDougal 등(1996)의 연구를 들 수 있다[2][3][4]. 이들은 입사파랑이 규칙파일 때 2차원 또는 3차원의 파랑의 상호작용 문제에 대하여 연구하였다.

본 연구는 신항만 건설 또는 인공섬 건설시에 설치되는 외해 방파제(offshore breakwater)로부터 준설영역까지의 거리 및 준설 폭에 따른 외해 방파제 전면에서의 파랑의 상호작용에 의한 회절 파고비를 조사한 것이다. 즉, 방파제 시스템의 안전성을 확보하기 위한 적절한 준설 폭 및 방파제와 준설간의 거리를 설정하는 데 목적이 있다.

본 연구의 방법으로 우선 해저 준설을 수평으로 긴 형태의 장방형으로 고안하고 선형파 이론을 이용하며, 주기가 10초인 파가 직각으로 입사할 때 수치계산을 하였다. 이때, 방파제와 준설간의 거리비를 4가지의 다른 경우로 설정하였으며, 준설 폭도 4가지의 다른 경우로 조사하였다. 즉, 총 16가지의 수치실험을 실시하였으며, 본 수치실험에서 얻어진 결과들을 그래프, 2차원 및 3차원 투영도로 나타냈다. 또한, 수치계산은 격자 시스템을 이용한 경계 요소법 (Boundary Element Method)을 기초로 하여 지배방정식을 설정하여 2절에 제시하였다.



[그림 1] Trench와 방파제 시스템의 레이아웃

2. 이론

2.1 지배 방정식

[그림 1]은 방파제 시스템으로부터 외해쪽으로 떨어진 곳에 해저준설을 실시한 경우의 모형을 나타낸다.

S1은 준설 경계선, S2는 방파제의 경계선을 나타낸다. AB 라인은 방파제 전면에서의 수치모형 계산 라인을 나타낸다. W는 준설 폭 D는 방파제와 준설영역간의 거리를 나타낸다.

유체의 성질을 비점성, 비압축성 그리고 유체입자의 운동을 비회전성으로 하는 미소진폭파 운동으로 가정하면 속도 포텐셜은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi_1(x, y, z, t) = \phi_1(x, y) \cosh k_1(z + d) e^{-i\sigma t}; \quad (1)$$

$$\Phi_2(x, y, z, t) = \phi_2(x, y) \cosh k_2(z + h) e^{-i\sigma t}; \quad (2)$$

여기서, σ 는 각주파수 ($= 2\pi/T$, T는 주기), t는 시간이다. 식 (1)은 준설 내부 영역(Region 1)의 속도 포텐셜이고, 식 (2)는 외해 및 방파제와 준설 사이의 영역, 그리고 방파제 배후의 영역(Region 2)의 속도 포텐셜이다.

식 (1)과 식 (2)는 다음의 Helohltz 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial y^2} + k_j^2 \phi_j = 0 \quad (j=1,2) \quad (3)$$

경계적분방정식과 Green 함수를 적용하면, 방파제 경계와 해저 불연속 면 및 준설 영역에서의 상호작용으로 인해 임의지점에 있는 함수 $\phi(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$\phi(x, y) = - \int_{S_1 + S_2} \left[\phi_j(r') \frac{\partial G_j}{\partial n}(r, r') + G_j(r, r') \frac{\partial \phi_j}{\partial n}(r') \right] dS \quad (4)$$

여기서, j=1,2이고, 수역의 임의지점 $r = (x, y)$, 방파제 및 준설 경계상의 점 $r' = (x', y')$ 이다.

$G_j(j = 1, 2)$ 는 Green 함수이고 다음 식으로 주어진다.

$$G_j(r, r') = \frac{i\pi}{2} H_0^{(1)}(k_j R) \quad (j=1,2) \quad (5)$$

여기서, $H_0^{(1)}(k_j R)$ 은 제 1종 0차의 Hankel 함수이

다. $R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$ 이다.

경계조건을 적용하면 수역의 임의의 지점에 있는 함수 $\phi(x,y)$ 는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(x,y) = & - \int_{S_1} \left[\phi_1(r') \frac{\partial G_1}{\partial n}(r,r') \right. \\ & \left. + G_2(r,r') \frac{h}{d} \left(\frac{\partial \phi^I}{\partial n} \right) \right] dS \\ & - \int_{S_2} \left[\phi_2(r') \frac{\partial G_2}{\partial n}(r,r') \right. \\ & \left. - G_2(r,r') \frac{h}{d} \left(\frac{\partial \phi^I}{\partial n} + \frac{\partial \phi^R}{\partial n} \right) \right] dS \end{aligned} \quad (6)$$

수역의 임의점 (x,y) 에서 방파제 설계시 안정설계과 고 산정에 기여할 수 있는 수리학적 인자인 회절계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_j = |\phi_j(x,y) + \phi^I(x,y)| \quad (j=1,2) \quad (7)$$

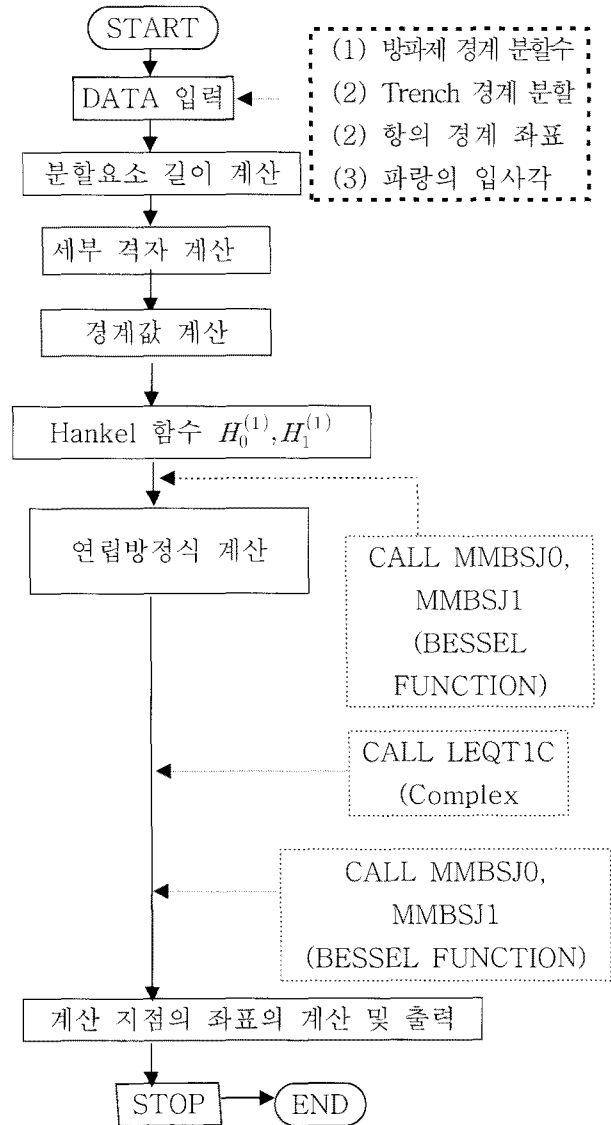
[그림 2]는 본 연구의 수치모델 흐름도이다. 따라서, 본 수치모델 흐름도를 통해서 수치계산의 결과값이 산출되었고, 결과값에 대한 유용성을 검증하기 위하여 실험 논문과 비교 검토하였으며, 본 연구의 분석은 그래프 및 2차원과 3차원 투영도로 3절에 나타냈다.

3. 수치 분석 및 결과

3.1 수치모델의 검증

2절에 제시된 이론식과 수치 계산식을 컴퓨터 프로그램화하여 얻은 결과값들을 본 절에서 상세하게 분석하였다. 우선 본 연구 수치모델의 검증을 위하여 연주흙 등(2002)의 실험결과와 비교하였다[5]. 실험에 사용된 수조는 길이 25m, 폭 80m, 높이가 1.0m이고, 10m 구간의 측벽은 철재로 구성된다. 또한, 15m 구간의 측벽은 파랑을 관측할 수 있는 강화유리가 부착된 2차원 조파수조이며, 조파기는 피스톤형이다. [그림 3]은 연주흙 등(2002)의 실험결과와 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 연주흙 등(2002)의 실험에서 보면, 외해에서 파가 진행하여 불연속적인 면을 갖는 준설영역을 통과한 후에 회절파고비가 안정적으로 진행되는 것을 발견할 수 있다. 이는 외해에서의 강한 파랑 에너지가 준설영역의 불연속면에 의해 약화된다는 것을 의미한다.

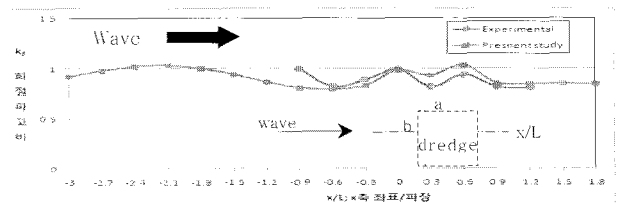
연주흙 등(2002)의 수리실험은 다양한 조건에서의 트랜치 모형을 설정하고, 8개 지점에 게이지를 설치하여



[그림 2] 수치모델의 흐름도

측정한 결과이다. 이러한 결과를 바탕으로 한 연구 성과들을 발표하여 인정받았으므로, 연주흙 등(2002)의 실험 결과와 본 연구의 결과를 비교하여 그 타당성을 검증하는 것은 의미있는 일이다.

본 연구의 결과값과 연주흙 등(2002)의 실험 결과의 유형과 파고분포도가 잘 일치하므로 본 연구의 수치계산을 활용하여 3.2와 3.3절에 방파제 거리비와 폭에 따른 분석을 실시하였다.



[그림 3] 실험 결과와 본 모델의 회절파고 비교

3.2 수치실험 방법

본 연구에서는 입사주기는 10초, 준설 영역의 수심(d)은 14m, 그 외의 영역 수심(h)은 7m, 그리고 입사각 90°의 조건에서 준설 제원에 따른 방파제의 안전성에 영향을 미치는 수리학적 인자인 회절과고비를 조사하였다. 준설 제원은 입사파장(L)의 비로 나타냈다.

<표1>은 계산조건을 나타낸다. 즉, Case 1D1W는 거리(D) 1파장(1L)과 준설 폭(W) 1파장(1L)을 나타낸다.

본 연구의 계산 데이터는 김성덕 등 (2001)과 McDougal 등(1996)이 적용한 것과 같이 파장(wave length) L에 대하여 x(준설폭 방향)축과 y축(거리비 방향)으로 무차원하여 계산하였다[6]. 이는 무차원을 통하여 수치계산의 범위를 단일화하고, 일정비율 즉, 1L 간격으로 준설조사 지점을 변화시켜 가장 적절한 준설 폭과 거리비를 설정한다. 이때 준설 폭과 거리비의 한계를 4L로 한 이유는 4L이 넘어가는 지역은 대수심 지역이므로 현실적으로 준설하기가 쉽지 않기 때문이다.

[표 1] 수치계산 조건

width Distance	1L	2L	3L	4L
1L	1D1W	1D2W	1D3W	1D4W
2L	2D1W	2D2W	2D3W	2D4W
3L	3D1W	3D2W	3D3W	3D4W
4L	4D1W	4D2W	4D3W	4D4W

3.3 방파제와 준설 영역 거리에 따른 결과

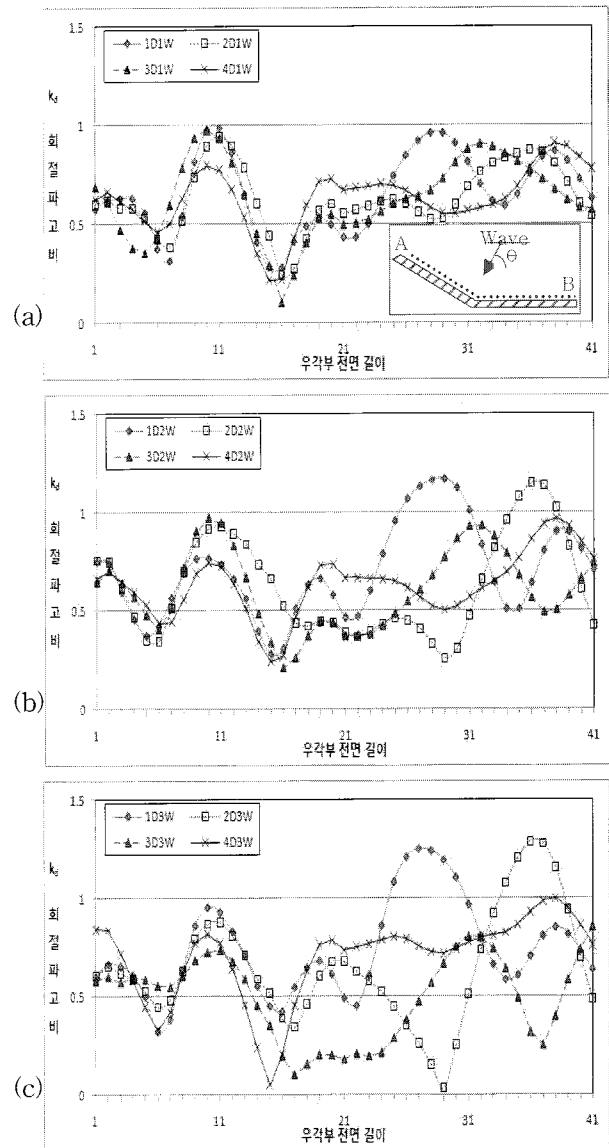
우선 외해에 설치된 방파제는 우각부 형태로 고안하여 설치하였고, 준설 형태는 장방형 형태이다. 준설 수심은 다른 영역 수심의 2배이며, 입사주기는 10초, 입사각은 90°로 하였다. [그림 4](a) ~ [그림 4](d)는 각각 1~4파장으로 준설 폭(W)이 일정할 때 방파제로부터 준설 영역까지의 거리(D)에 따른 회절과고비의 변화를 나타낸다. 거리비에 따른 분석 과정을 살펴보면 우선 준설 폭을 일정하게 정해 놓은 후에 4가지 경우의 거리비(1D~4D)를 적용하여 회절과고비를 조사하였다. 회절과고비의 유형과 준설 지점 위치에서의 변화 사항을 거리비에 따라 조사하였다.

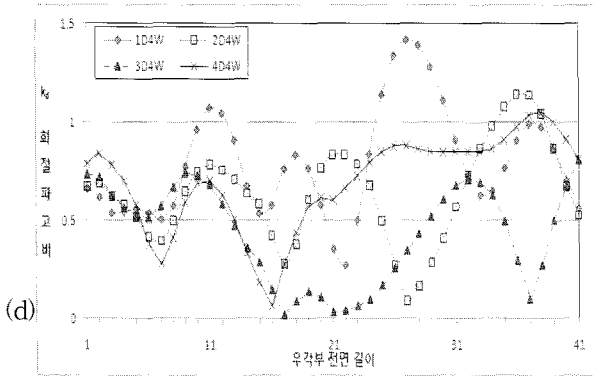
[그림 4]에서 보면 준설 폭이 일정할 때, 방파제와 준설 영역간의 거리가 가까울수록 회절과고비가 높게

나타났다. 특히 준설 폭이 가장 크고(4W) 거리가 가장 가까운(1D) 경우(1D4W)에서 가장 큰 진폭의 회절과고비(1.5) 및 파랑의 진동이 크게 나타났다([그림 4](d)).

이는 가까운 거리에서 파랑 및 불연속면의 해저수심 및 경계면이 넓은 준설 폭 그리고 방파제간의 상호작용으로 인해 파의 산란이 발생하여 파고를 증폭시켰고, 방파제로부터의 반사 중복파가 커졌기 때문이다.

또한 외해에서 입사하는 파랑 에너지는 준설 영역을 거쳐 감소하게 되는 데, 방파제와 준설간의 거리가 짧기 때문에 파랑 에너지가 약화되기 전에 중복파(Standing wave)가 형성되었기 때문이다. 해저준설을 실시할 때 준설 폭이 작은 경우에는 준설 영역과 방파제간의 거리에 따라 회절 파고비의 차이가 크게 나타나지 않으므로([그림 4](a)), 거리의 영향을 고려하지 않을 수 있다.

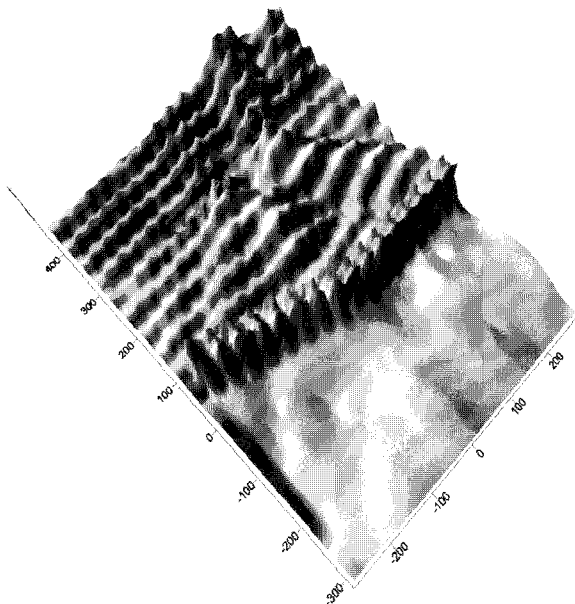




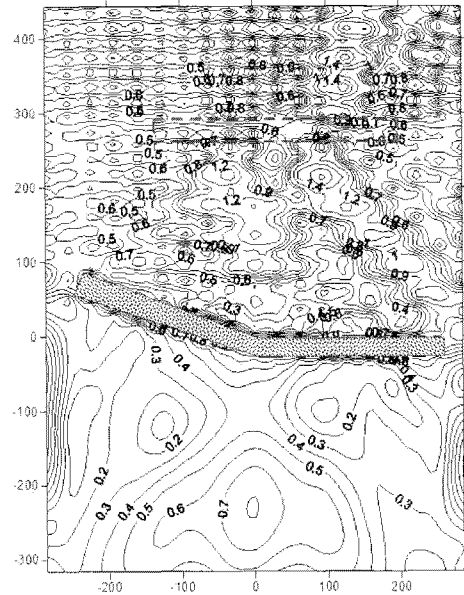
[그림 4] 방파제와 준설영역간 거리에 따른 파고 분포

반면에 준설 폭이 커질수록 가급적 1~2과장의 거리(1D~2D)는 피해야 하며, 가장 먼 4과장 거리(4D)보다는 3과장 거리(3D)에서 가장 낮고 정온한 회절 파고비를 나타내므로(Fig.3(c),(d)), 3과장 거리(3D)와 4과장 준설 폭(4W)에서 가장 안전한 준설 위치를 설정할 수 있다.

[그림 5]는 준설 폭이 3L(3W)이고, 방파제와 준설간의 길이가 3L(3D)인 경우의 파고 분포를 3차원 투영도 그래픽으로 나타낸 것이다. [그림 6]은 2차원 등고선도를 나타낸다. 그림에서 점선으로 표시된 부분은 해저준설 영역을 나타낸다. [그림 5]에서 보면 우각부 방파제의 우각점 앞단과 우측 끝단에서 방파제에 의하여 반사파가 발생하여 파고가 높게 나타나지만 준설 영역의 불연속적 수심에 의하여 파고가 감소하는 것을 잘 나타내고 있다. 이는 외해에서의 입사파랑이 불연속 수심에 의하여 제어되기 때문이다.



[그림 5] 3차원 파고분포도



[그림 6] 2차원 등고선도

또한, 방파제에 의한 반사파의 영향을 적게 받기 위해서는 준설 영역과 외해 방파제 간의 거리를 3과장이상이 되도록 설계할 필요가 있다.

이상의 분석 결과를 보면 준설 폭이 일정할 때 거리에 따라 회절파고비가 다르게 나타남을 알 수 있고, 회절파고비가 가장 안정적인 경우는 준설폭이 4과장이고, 준설 거리가 3과장일 때로 나타났다.

3.4 준설 폭에 따른 결과

준설 폭에 따른 분석을 위한 연구방법으로는 다음과 같다. 외해에 설치된 방파제는 우각부 형태로 고안하여 설치하였다. 준설 형태는 장방향 형태이고 준설 수심은 다른 영역 수심의 2배이며, 입사주기는 10초, 입사각은 90° 하였다.

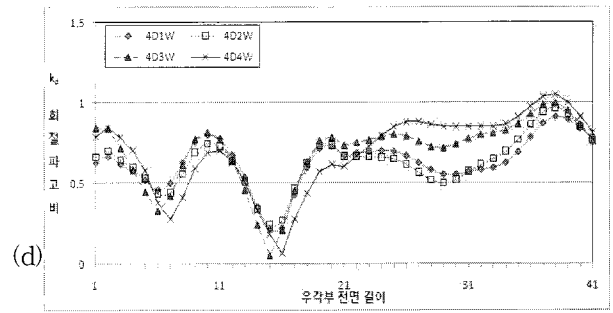
준설폭에 따른 분석 과정을 살펴보면 우선 준설과 방파제의 거리비를 일정하게 정해 놓은 후에 4가지 경우의 준설폭(1W~4W)를 적용하여 회절파고비를 조사하였다. 회절파고비의 유형과 준설 지점 위치에서의 변화 사항을 준설폭에 따라 조사하였다.

[그림 7]에서 보면 방파제와 준설 영역간의 거리가 일정한 경우, 모든 cases에서 준설 폭에 따른 회절 파고비의 유형이 비슷한 형태를 나타내고 있다. 이는 준설과 방파제 사이 영역에서의 파고 분포 혹은 회절 파고비가 준설 폭에 비해서 준설과 방파제 간의 거리에 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있다. [그림 7](a)와 (b)의 경우는 [그림 7](c)와 (d)에 비해 회절 파고비

가 높게 나타났으며, 회절 파괴비의 증폭률도 크게 나타남을 발견할 수 있다. 이는 상호작용을 받는 경계면을 갖는 요소들(수치 계산 요소)이 파랑의 산란과 반사를 발생시켜서 파괴의 증폭을 일으키기 때문이다.

해저준설과 방파제간의 거리가 일정한 경우 가장 정온하고 방파제의 안전성 확보에 기여하는 조건은 거리가 4파장(4D)인 경우로 나타났으며, 이때 준설 폭은 1파장에서 4파장까지 차이가 크게 나타나지 않았다. 준설 설계에 적용하기 위한 조건은 4파장 거리(4D)에서 2파장 또는 3파장 준설 폭(2W 또는 3W)으로 설정하는 것이 바람직하다고 판단된다([그림 6](d)).

이상의 분석 결과를 보면 준설 위치와 방파제와 거리비가 일정할 때 준설폭에 따라 회절파고비가 다르게 나타남을 알 수 있고, 회절파고비가 가장 안정적인 경우는 거리비가 4파장이고, 준설폭은 거리가 2파장 또는 3파장일 때로 나타났다. 즉, 거리비 및 준설폭의 변화에 따른 회절파고비의 안정적 분포를 위해서는 방파제 거리비는 최소한 3파장이상 준설폭은 2파장 이상으로 설치되어야 한다.



[그림 7] 준설폭에 따른 파괴분포

4. 결론

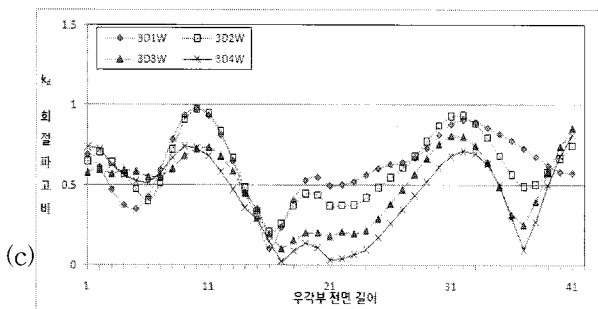
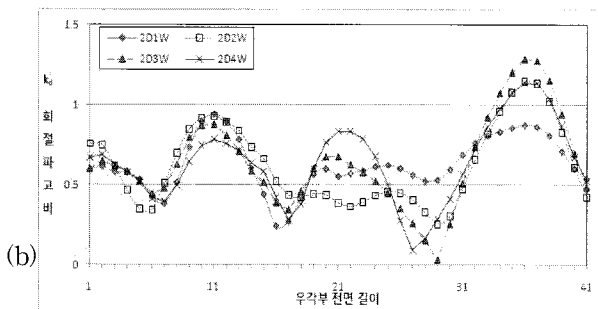
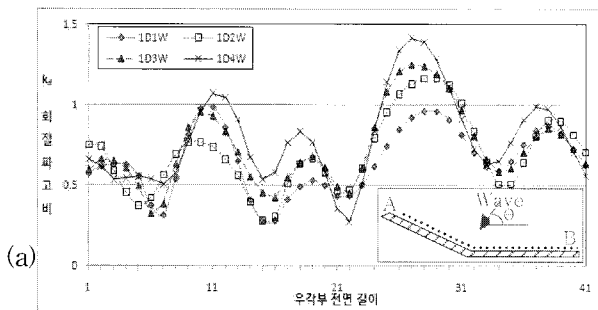
본 연구는 외해에서 파랑이 입사할 때, 우각부 형태의 방파제 전면 구역에서의 안전성 요소인 회절 파괴 분포에 대한 효과를 조사하기 위하여 준설 제원 즉, 방파제와 준설 영역간의 거리 및 준설 폭에 따른 회절 파괴비의 변화를 조사한 것이다. 수치적 모델은 경계요소법인 경계 적분 방정식을 이용하였고, 준설 수심이 다른 수심에 비해 2배이며, 입사주기가 10초, 입사파랑은 90°인 경우로 설정하였다.

준설 폭이 일정한 경우, 방파제와 준설 영역간의 거리가 가까울수록 회절 파괴비가 높게 나타났고, 회절 파괴비의 증폭도 크게 나타났다. 이는 파랑과 구조물과의 상호 작용 및 외해에서의 파랑 에너지가 약화되기 전에 중복파가 형성되기 때문이다. 준설 폭이 일정한 경우 3파장 거리(3D)와 4파장 준설 폭(4W)에서 준설 위치를 설정하는 것이 우각부 방파제 전면에서의 가장 안전한 회절 파괴비 분포 및 적은 증폭률을 확보할 수 있었다.

방파제와 준설 영역간의 거리가 일정한 경우 준설 폭의 차이에 관계없이 회절 파괴비의 유형이 비슷한 형태를 나타내고 있었다. 이는 준설과 방파제 사이 영역에서의 파괴 분포 혹은 회절 파괴비가 준설 폭에 비해서 준설과 방파제 간의 거리에 영향을 더 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

준설과 방파제간의 거리가 일정한 경우 4파장 거리(4D)와 2파장 또는 3파장 준설 폭(2W 또는 3W)에서 준설 위치를 설정하는 것이 우각부 방파제 전면에서 안전한 회절 파괴비를 확보할 수 있었다.

이상에서 본 연구는 최근에 많이 건설되고 있는 해양 구조물 및 인공섬 등의 해안 공사에서 수행되는 준설 작업의 제원을 설정하는 데 유용하게 사용될 것으로 기대된다. 이상기후 및 이상파랑 조건에서 방파제 전면 및 배후면에서의 안전성을 평가하는 데 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.



5. 참 고 문 헌

[1] J.J. Lee and R.M. Ayer, "Wave propagation over a rectangular trench", J. of Fluid Mechanics, Vol. 110, pp. 335~347, 1981.

[2] J.T. Kirby and R.A. Dalrymple, "Propagation of obliquely incident water waves over a trench", J. of Fluid Mechanics, Vol. 133, pp. 47~63, 1983.

[3] A.N. Williams and J.H. Vazquez, "Wave interaction with a rectangular pit", J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 113, pp. 193~198, 1991.

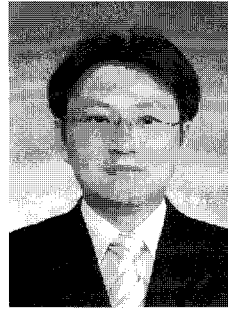
[4] W.G. McDougal, A.N. Williams, and K. Furukawa, "Multiple-Pit breakwaters", J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 122(1), pp. 27~33, 1996.

[5] 김성덕, 심재설, "이안제 배치에 의한 호안전면에서의 파랑-구조물 상호작용에 관한 연구", 대한토목학회 학술대회, pp. 1-4, 2001.

[6] 연주흠, 이호진, 김경호, "불연속 지형을 갖는 천해역에서의 파의 변형에 대한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집B, 22권, 1-B호, pp. 1~10, 2002.

저 자 소 개

김 성 덕



중앙대학교 토목공학과에서 학사, 석사, 박사학위를 취득하였고, 한국해양연구원 연구원 및 중앙대학교 대학원 및 학부의 시간강사를 거쳐 현재는 청주대학교 토목환경공학과 전임강사로 재직 중이다. 관심분야는 하천 해안 건설 분야의 수리학적 모델링 및 안전성 검토 등이다.

주소: 충청북도 청주시 상당구 내덕동 청주대학교 이공대학 토목환경공학과

이 호 진



충북대학교 토목공학과에서 학사, 석사, 박사학위를 취득하였고, 강원도립대학 겸임교수를 거쳐 현재는 충북대학교 토목공학과 겸임교수로 있음. 관심분야는 수공학에서의 안전성 검토 등.

주소: 충청북도 청주시 흥덕구 성봉로 410 충북대학교 공과대학 토목공학과