한국해안 · 해양공학회논문집
제 20 권 제 5 호, pp. 429~438, 2008년 10월

우각부 방파제의 우각부 부근에서의 다방향불규칙 파랑의 파고분포에 관한 연구

A Study on the Wave-height Distribution of Multidirectional Random Waves at the Concave Corner by Refracted Breakwater Systems

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

요 지 : 본 연구는 방파제의 법선이 일직선상이 아닌 우각부를 갖는 방파제의 전면 그리고 우각부 부근에서 다방향불규칙파의 파고를 예측하는 것이다. 본 연구에서는 경계적분방정식을 이용하여 도제 전면에서의 파고분포에 관한 수치계산을 실시하고, 얻어진 결과를 合田 等(1971)이 제시한 고유함수의 엄밀해와 근사해, 그리고 기존의 다른 수치해에 의해 얻어진 결과와 비교한다. 또한, 우각부 방파제에 의한 불규칙파의 파고분포의 결과를 기존의 해석해의 결과와 비교 검증한다. 이러한 비교 검증 결과를 토대로 하여, 우각부 제체각과 입사방향을 다양하게 설정하여 우각부 방파제 전면에서의 파고분포를 제시하였고, 현재 건설 중인 우각부 방파제의 전면에서 파고 예측을 실시한다. 모든 경우에 대하여 훌륭한 일치를 나타내고 있으며, 본 연구는 다양한 형태의 우각부(혹은 직선상) 방파제에 의한 불규칙파랑의 파고분포의 평가를 위하여 유효하게 사용될 수 있다.

핵심용어 : 경계요소법, 다방향 불규칙파, 우각부 방파제

Abstract : The present study is to predict the multidiretional random wave height at the front face and concave corner of a refracted breakwater which is not straight. The numerical simulation on wave height at the front face of an insular breakwater is performed by using the boundary element method, and obtained results have been compared with those of exact- and analytical solutions of the eigenfunction presented by Goda *et al.* (1971) and the other existing numerical solution. Also, the results of wave-height distribution due to the refracted breakwater have been validated through comparisons with previous results of analytical solution. Based on the validation through these comparisons, several wave-height distributions at the interested region have been illustrated for various conditions related with concave corner angles and the wave incidence, and then the prediction of wave height are simulated at the front face and concave corner of a refracted breakwater under construction currently. Excellent agreements have been obtained in all cases, and this study can effectively be utilized for predicting random waves for various breakwater system.

Keywords : boundary element method, multidirectional random waves, refracted breakwater

1. 서 론

입사파향에 대하여 우각부를 형성하는 법선을 갖는 방파제(우각부 방파제)의 우각부 부근에서는 파랑에너지가 집중되는 현상이 나타날 수 있다. 즉, 이러한 우각부 방파제는 일직선상 방파제의 경우에 비하여 입사파와 반사파의 상호작용에 의한 간섭 및 우각부 각도의 상태 등에 따라서 우각부 부근에서 파고가 보다 더 높게 나타날 가능성이 있으며, 이것은 바로 방파제에 작용하는 파압이나 파력을 증대시키는 요인이 될 수 있다(三井와 村上, 1967; 鴻上 등, 1972; 小丹와 大里, 1976; 角野 등, 1978). 일직선상의 반무한 방파제에 대한 파랑의 회절이나 반사등의 예측에 관하여는 Sommerfeld해를 도입한 Penny and Price (1944)의 연구가 있으며, 우각부 방파제의 우각부 부근에

*중앙대학교 토목공학과(Department of Civil Engineering, Chung-Ang University)
**청주대학교 토목환경공학과(Corresponding author: Sungduk Kim, Dept. of Civil & Environment Engineering, Cheongju University, Cheongju, Chungbuk, 360-764, Korea, sungduk@cju.ac.kr)

서의 파고분포 예측에 관하여는 대표적으로 三井와 村上(1967), 鴻上 등(1972), 小丹와 大里(1976), 그리고 角野 등(1978)의 연구가 있다.

三井와 村上(1967)는 우각부(예각부 및 직각포함) 혹은 불룩 튀어나온 형태의 다양한 구조물 불연속부에서의 파고분포를 취급한 것으로, 취급 방법은 Penny and Price (1944)의 이론을 Fourier급수 형태로 일반해 및 특별해를 각각 구하여 이용한 것이다. 이들이 구한 해에 의해 얻은 결과는 수리모형실험 결과와 비교 검토하여 좋은 일치를 보이고 있다. 鴻上 등(1972)은 우각부 방파제의 우각부 각도를 150°, 120°, 그리고 직각인 90°로 설정함에 따라 굴곡각이란 표현을 사용하여 굴곡부에서 파고 및 파압분포를 실험적으로 조사하였다. 실험결과 굴곡부의 각도가 커질수록 파고비가 감소하는 경향을 나타내고, 굴곡부에서의 파압분포는 mound 폭과 높이에 따라 영향을 받지만 실험범위에서 최대 연직파압분포는 P_{max}=4~6 wH 정도인 것으로 보고하고 있다.

小丹와 大里(1976) 및 角野 등(1978)은 우각부를 갖는 방파제의 전면에서 파고를 계산할 수 있는 수치적인 방법을 사용하였다. 이들의 방법은 三井와 村上(1967), 鴻上 등(1972)이 제시한 기존의 방법이 반무한제를 대상으로 한 해석해이기 때문에 방파제의 유한한 길이와 우각부를 중심으로 상이한 좌·우측 방파제 길이 등의 문제에 대처하고, 동시에 반사율을 고려한 적분방정식을 기본방정식의 형태로 채택하고 있다. 즉, Green 정리에 의해 얻어지는 경계적분방정식을 사용한 규칙파의 결과들이다. 그러나, 小丹와 大里(1976)는 직접법의 경계적분방정식(direct boundary integral equation)(예: Lee, 1971)을 角野 등(1978)은 간접법의 경계적분방정식(indirect boundary integral equation) (예: Barrailer와 Gaillard, 1967)을 적용한 것이다.

본 연구에서는 직접법의 경계적분방정식을 적용한 小丹와 大里(1976)의 연구와 유사한 방법으로 기본방정식을 채택하여 규칙성분파를 취급하고, 얻어진 규칙파의 결과는 小丹와 大里(1976)와 三井와 村上(1967)의 결과와 비교 검토하기로 한다. 다음으로 불규칙파에서 이산화된 규칙성분파에 대한 다방향불규칙파랑 이론을 응용하여 방파제 우각부의 전면부근에서의 다양한 파랑입사각과 우각부 조건에 대한 파고분포의 특성을 조사하는 것으로 한다. 또한, 응용사례로서 현재 축조중인 울산신항 남방파제의 우각부 부근에서의 파고분포를 조사하여 검토하기로 한다.

2. 기본 이론

2.1 지배방정식

우각부를 갖는 방파제의 전면에 수심 h가 일정한 곳에 규칙파가 입사하는 것을 가정한다. 직교좌표계에서 정수면상에 각각 x, y축, 그리고 연직상향으로 z축을 취한다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 방파제의 주위를 S로 나타낸다. 방파제의 전면은 유공블럭이나 소파구조물이 설치되어 있는 경우, 그 때의 반사율을 Kr로 나타낸다. Fig. 1에서 숫자 1~7은 방파제의 경계요소의 격자점을 나타내고, F1~F45는 방파제 전면에서의 계산지점을 나타낸다.

유체의 성질을 비점성, 비압축성 그리고 유체입자의 운동을 비회전성으로 가정하면 식 (1)의 속도포텐셜이 존재하고, 이것은 식 (2)와 같이 Laplace 방정식을 만족해야 한다.

$$\Phi(x,y,z,t) = \phi(x,y,z)e^{-i\sigma t} \tag{1}$$

여기서, σ는 각주파수(=$2\pi/T$, T는 주기), t는 시간이다. 또한 $\phi(x, y, z)$는 시간과 독립인 공간 속도포텐셜이다.

$$\nabla^2\Phi(x,y,z,t) = 0 \tag{2}$$

속도포텐셜의 해를 구하기 위하여 다음과 같이 경계조건을 설정한다.

$$\left(\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2}\right)_{z=0} + g\left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)_{z=0} = 0 \tag{3}$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0 \tag{4}$$

속도포텐셜 식은 다음과 같이 얻을 수 있으며

$$\Phi(x,y,z,t) = \frac{ga_i}{\sigma}\cdot f(x,y)\cdot\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(kh)}e^{-i\sigma t} \tag{5}$$

a_i는 입사파의 진폭, k는 파수($2\pi/L$, L은 파장)이고, σ는 각 주파수($2\pi/T$)이다. $f(x, y)$는 입사파, 반사파 및 산란파

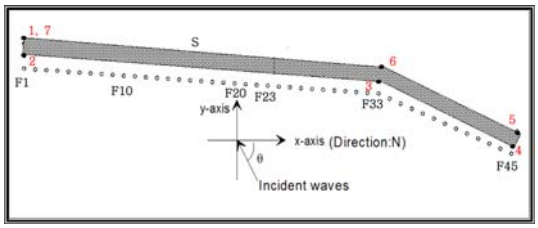

Fig. 1. Definition sketch of a refracted breakwater and interested measuring points from F1 to F45.

를 표시하는 파동함수이다. 이 파동함수를 각 각의 성분으로 나타내면, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x,y) = f_i(x,y) + f_r(x,y) + f_s(x,y) \tag{6}$$

여기서 입사파와 반사파는 다음과 같다.

$$f_i(x,y) = -ie^{-ik(x\cos\theta + y\sin\theta)} \tag{7}$$

$$f_r(x,y) = -ie^{-ik(x\cos\theta - y\sin\theta)} \tag{8}$$

따라서, 산란에 의한 산란파의 파동함수를 구하면 방파제에 의한 회절, 반사 등을 구할 수 있게 된다. 회절영역의 임의의 지점(x, y)에서의 $f_s(x, y)$는 Green 제2정리를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다(Lee, 1971).

$$f_s(x,y) = -\frac{i}{4}\int_S \left[f_s(\xi,\eta)\frac{\partial}{\partial n}(H_o^{(1)}(kr)) - \frac{\partial f_s}{\partial n}(\xi,\eta)(H_o^{(1)}(kr)) \right] ds \tag{9}$$

한편, 수역의 임의 한 점(x, y)이 방파제의 경계선상의 점(ξ, η)으로 접근하고 그 때의 반사율 Kr을 고려하면 식 (9)는 다음과 같이 된다(小舟와 大里, 1976).

$$f_s(\xi,\eta) = -\frac{i}{2} \int_S \left[f_s(\xi',\eta')\cdot\frac{\partial}{\partial n}(H_o^{(1)}(kr)) - Kr(H_o^{(1)}(kr))\cdot\frac{\partial}{\partial n} f_s(\xi',\eta') \right] ds \tag{10}$$

여기서, (ξ, η)는 경계 S 상의 경계요소의 좌표, (ξ', η')는 경계요소의 중앙좌표, ds는 반시계 방향의 각 경계적분 구간의 적분변수(경계요소), $H_o^{(1)}(kr)$은 제 1종 0차의 Hankel 함수이다. 또한, r은 내역의 임의 지점(x, y)와 경계상의 (ξ, η)점과의 거리로서 식 (11)로 주어진다.

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2} \tag{11}$$

$$K_d = \left| f_i(x,y) + f_s(x,y) \right| \tag{12}$$

이와 같이 단일 주파수 및 단일 방향에 대하여 식 (12)을 이용하여 성분파의 결과를 얻는다. 결국, 각 성분파가 모든 주파수 및 방향에 대하여 계산을 실시하게 된다. 이렇게 하여 모든 성분파들에 대한 계산결과를 누적 중첩시켜, 다방향불규칙파의 결과를 얻어 낼 수 있다. 주파수 스펙트럼은 Mitsuyasu spectrum을 사용하였고, 또한 방향함수는 Mitsuyasu형의 방향분산함수(directional spreading function)를 사용하였다.

(1) Mitsuyasu 주파수 스펙트럼

$$S(f) = 0.2572\frac{H_{1/3}^2}{T_{1/3}^4} f^{-5} \exp[-1.0288(T_{1/3}f)^4] \tag{13}$$

여기서, $H_{1/3}$, $T_{1/3}$은 각각 유의파의 파고와 주기이다.

(2) 방향함수

방향분산함수 $G(f, \theta)$는 Mitsuyasu의 방향분산함수를 사용한다.

$$G(f,\theta) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s}\frac{\theta}{2} \tag{14}$$

여기서,Γ는 감마함수, s는 방향집중도를 나타내는 parameter이다.

(3) 방향스펙트럼 이산화

불규칙 회절파를 계산하기 위해서는 주파수스펙트럼을 M개, 파향을 N개로 각 각 이산화하여 M, N개의 성분파를 구성시킨다. 이산화된 각 성분주파수 및 방향성분에 대한 선형회절파의 계산을 실시한다. 각 각 분할되어 이산화된 대표주파수는 Nagai(1972)가 제시한 식을 사용하였다.

$$f_N = \frac{1}{0.9T_{1/3}} \sqrt{2.9124N\left[Erf\left(\sqrt{2\ln\left(\frac{N}{N-1}\right)}\right) - Erf\left(\sqrt{2\ln\left(\frac{N}{N-1}\right)}\right)\right]} \tag{15}$$

여기서 $Erf(\ )$는 오차함수(Error function), f_N은 N번째 분할구간의 대표 주파수이다. 한편, 방향분할 $d\theta$은, 균등하게 분할함으로서 다음 식으로 구한다

$$d\theta = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{M} \tag{16}$$

여기서 $\theta_{\max}$, $\theta_{\min}$은 주방향에서의 편각이다. 분할 영역내의 대표 파향은 영역내의 중심 파향이다. 본 연구에서는 N=10, N=37로 사용하였다(10×37=370 component waves). 즉, 방향이 0°부터 360°까지 5°간격으로 분할되기 때문에 은 37개 방향이 된다.

3. 결과 및 분석

3.1 수리모형실험

현대건설 주식회사와 (주)대영엔지니어링(2004)에서는 우각부를 형성하고 있는 울산신항 남방파제를 대상으로 대형수리모형실험을 실시하였다. 길이 48 m, 폭 48 m, 깊이 1.2 m의 평면수조를 이용하였으며, 조파판의 크기가 폭 3 m, 높이 1.2m 그리고 조파 유효폭 30 m인 10개의 조파판으로 구성되어 독립적으로 작동하는 불규칙파 조파기를 사용하였다. 최대발생파는 최대수심은 0.9 m에 대하여 파고 0.3 m와 주기 0.3~0.5 sec이다. 조파기는 일방향 불규칙파 조파기로서 실험파의 입사방향에 따라 이동이 가능하다.

방파제의 모형은 수조 가용공간과 설계파의 입사파향을 검토하여 적절히 배치하고, 수조바닥에 50 cm 간격의 정방격자를 그린 후 이를 참조하여 수심을 재현하였다. 각 등수심별로 모래를 채우고, 그 위에 약 5 cm~7 cm 두께의 시멘트 모르타르를 입혀 바닥지형 및 해안을 형성한 고정상 모형을 제작하였다. 수리모형실험에는 1/150의 축척모형으로 제작하고, 수조벽면은 1:2 경사의 자갈로 피복하여 전면에 소파시설을 배치하여 반사파 발생을 최소화하였다.

실험파는 주파수 스펙트럼을 고려한 일방향 불규칙파를 적용하였으며, 모형수심상 약 DL.(-)26 m~DL.(-)28 m 지점의 수심상에 기준점을 설정하여 파고계를 배치한 후 조파신호를 반복 수정하여 실험파를 설정하였다. 태풍시 천해역의 불규칙파는 비교적 넓은 주파수대를 가지며 Mitsuyasu 스펙트럼이 이와 같은 특성을 잘 나타내는 것을 고려하여 Mitsuyasu 스펙트럼을 이용하여 실험파를 선택하였다. 실험파를 설정하는 방법으로 우선 기준점에 위치한 파고계로부터 독취된 자료를 분석하여 유의파고($H_{1/3}$) 및 유의주기($T_{1/3}$)가 수치모형실험결과와 근사하도록 조정하며 반복 실시하였다.

실험파는 모형상 600 sec 동안 불규칙파를 조파한 후 약 410 sec 동안의 독취자료를 이용하여 설정하였다. 여기서, 조파시간 600 sec는 약 735파(유의주기 10 sec 기준)에 해당하며, 분석시간 410 sec는 약 502파(유의주기 10 sec 기준)에 해당한다. 실험파에 대한 통계분석은 zero-up crossing 방법으로 해석하였다.

남방파제의 소파특성에 대하여 방파제 단면을 4개안을 대상으로 수행하였다. 남방파제 대안 제1안은 항외측에 64ton급 TTP, 항내측에 25ton급 TTP를 피복하는 것이고, 대안 제2안은 항외측에 80ton급 SEALOCK, 항내측에 유공율 20%의 반원형 슬릿 케이슨을 설치하는 것이다. 대안 제3안과 제4안은 제2안에서 반원형 슬릿 케이슨의 유공율이 각각 25%와 30%인 것을 제외하고는 제2안과 동일하다. 실험조건에서 항외측 단면에 대하여 실험실시 결과, 대안 제1안의 반사율(Kr)은 0.26~0.48, 대안 제2안은 0.26~0.48 범위로 각각 계측되었다.

3.2 수치해석 검증

본 연구에서 사용한 수치모형은 Green정리에 의한 경계적분방정식을 사용하므로 방파제(혹은 구조물)의 형상이 임의의 평면 형태에 대하여 적용할 수 있는 특징을 가지고 있다. 방파제(구조물) 경계에 있어서 임의의 반사율과 방파제 구간별로 서로 다른 반사율을 부여할 수도 있다. 또한, 본 연구의 수치모형은 불규칙파랑의 응용에 있어서 이산화 된 다수의 각 성분파에 대하여 경계요소의 격자망이 Fig. 1에서의 6개 지점(7번 좌표는 1번 좌표와 동일)의 방파제 좌표를 지정함으로서 자동적으로 생성되도록 구성되어 있다. 따라서 불규칙파랑의 응용문제에 있어서 시간적으로 유리하며 작업효율성이 높다는 장점이 있다(Lee and Williams, 2002; Lee *et al*., 2003; Lee, 2004).

小丹와 大里(1976)는 방파제의 길이가 1L, 2L 및 3L(L은 입사파장)의 일직선상의 도제에 각 각 입사각 30°, 60° 및 90°인 경우에 대하여 도제의 경계면에서의 파고분포에 관한 수치실험을 실시하였다. 그들은 아홉 가지 경우의 수치계산 결과들을 검토하기 위하여 合田 등(1971)이 해석해를 이용하여 얻은 결과와 비교하였다. 여기서, 合田 등(1971)의 연구는 이미 도제에 의한 회절파에 대하여 엄밀해(Exact solution) 및 해석해(Analytical solution)를 제시하고 각각의 해를 이용하여 주기 9초의 입사파에 대한 도제 경계면에서의 파고분포를 제시한 것이다. 따라서, 小丹와 大里(1976)의 연구결과에서는 小丹와 大里가 얻어낸 계산치를 Approximate solution, 合田 등(1971)의 결과를 Strict(Exact)- 및 Analytical solution의 형식으로 도제에 의한 회절파의 파고분포를 나타내고 있다. 본 연구에서도 小丹와 大里(1976)가 실시하였던 방법과 같이 合田 등(1971) 및 小丹와 大里(1976)가 실시하였던 연구와 동일조건하에서 도제 전면에서의 파고분포를 구하기 위하여 수치계산을 먼저 실시하였다. 여기에서는 지면상, 도제의 길이가 3 L의 경우에 대하여 입사각이 각각 30°, 60° 및 90°로 입사하는 경우를 대상으로 비교 결과를 Figs. 2-4에 나타내었다.

Fig. 2는 완전반사면을 갖는 길이 3 L의 도제 전면에 90°로 입사하는 경우의 전면에서의 파고분포를 나타낸 것

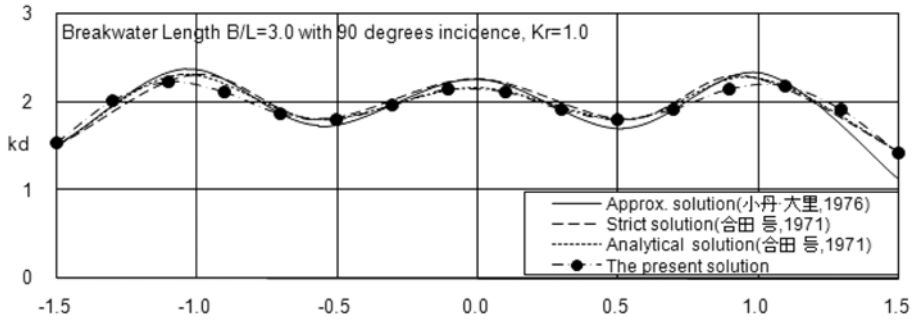

Fig. 2. Comparison of the results of present study with those of approximate-, strict- and analytical- solutions.

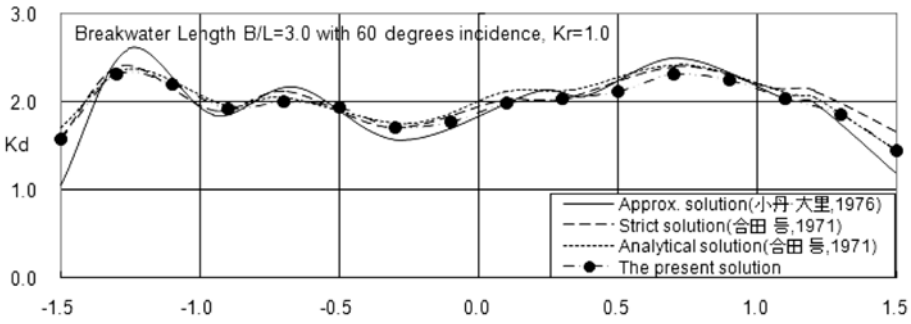

Fig. 3. Comparison of the results of present study with those of approximate-, strict- and analytical- solutions.

이다. 본 연구에 의한 결과는 symbol(•)을 사용하여 나타냈고, 小舟와 大里(1976) 및 合田 등(1971)의 결과를 각각 실선 및 파선과 점선으로 나타냈다. 직립형 도제의 전면에서 완전반사에 의해 중복파가 형성되고 평균적으로 파고비는 2.0을 나타내고 있지만, 파랑의 2차원 평면문제 취급 시 나타날 수 있는 파고비 K_d가 2.0을 기준으로 증감을 나타내고 있다.

Fig. 3은 도제 전면에 60°의 경사 입사의 경우이며 도제 전면에서는 Fig. 2의 입사각 90°의 경우와 비슷한 분포를 나타내고 있으나, 경사중복파를 형성하기 때문에 파고비 K_d 값은 2.0을 중심으로 높고 낮은 파고비가 나타나고 있고, 도제 전면의 다른 한 측에서는 보다 큰 파고비를 나타낸다. 본 연구의 계산 결과, 입사각 60°의 경우에도 合田 등(1971)이 제시하였던 엄밀해 및 해석해의 결과와 매우 좋은 일치를 보이고 있고, 경사각의 입사각에 대하여도 적용이 가능한 모형임을 나타내주고 있다. 그러나 경사 입사의 경우에서 小舟와 大里(1976)의 결과와의 비교에서는 약간의 차이가 나타나고 있으나, 小舟와 大里(1976)의 결과보다 본 연구에 의한 결과가 合田 등(1971)의 엄밀해나 해석해의 결과에 보다 더 잘 일치하고 있다.

Fig. 4는 도제의 전면에 입사각이 30°인 경우이다. 입사각이 작을수록 경사중복파 형성에 따라 도제 양 끝단에서

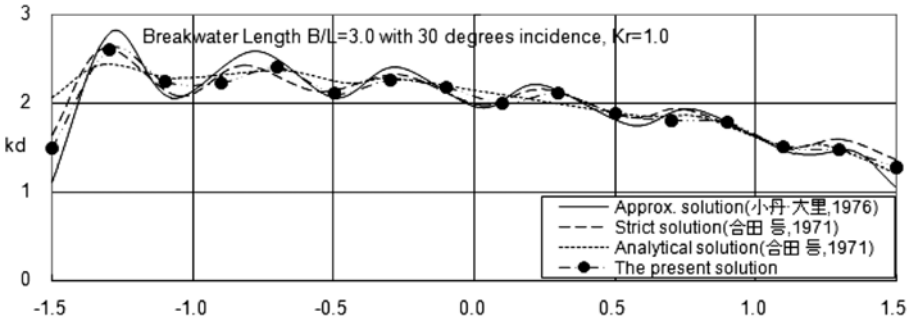

Fig. 4. Comparison of the results of present study with those of approximate-, strict- and analytical- solutions.

의 파고분포의 차이가 점점 증가하면서, 파고비는 방파제 전면의 좌우 양측에 약 1.5배의 차이를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 한편, Fig. 3의 비교 분석에서 나타났듯이 小丹와 大里(1976)의 결과는 경사 입사시 合田 등(1971)이 제시한 해석해의 결과와 차이를 보이고 있었으나, 30°의 경사 입사의 경우에 해당하는 Fig. 4에서에도 여전히 약간의 차이를 나타내고 있으며, 입사각이 작을수록 해석해의 결과와의 차이는 커지고 있다. 즉, 小丹와 大里(1976)의 방법이 입사경사에 대하여 도제의 양 끝단 부근에서 정도가 다소 저하되는 경향을 보이고 있다. 이것은 도제의 끝단에서의 경계선 취급문제에 있어서 발생될 수 있는 오차가 그 원인으로 보이지만 실용상 심각한 문제가 될 수 있는 정도는 아니다. 그러나 본 연구결과에서 얻어진 결과는 경사 입사각에 관계없이 合田 등(1971)이 제시한 엄밀해의 결과와 매우 잘 일치하고 있다. Figs. 2-4를 통하여 비교 분석한 결과, 본 연구에서 일직선상의 도제에 의한 회절문제에 대하여 실시한 수치모형의 실험결과는 기존의 연구와 비교하여도 매우 좋은 일치를 나타내고 있다.

다음으로, 우각부 방파제의 경우를 검토하기 위하여, 小丹와 大里(1976)가 수치계산을 실시하였던 우각부 방파제를 대상으로 검토하기로 한다. 방파제의 모형은 우각부에서 135°를 형성하고 있고, 우각점을 중심으로 좌·우 양측의 방파제의 길이(L1, L2)는 동일하게 2.0 L로 하며, 전면의 반사율은 로 하고, 그리고 파랑의 입사각은 45°인 경우를 설정하여 조사하였다. Fig. 5에서 실선으로 나타낸 것은 小丹와 大里가 구한 수치해의 결과이고, 점선으로 표시한 Absolute solution은 三井와 村上(1967)가 해석해에 의해 얻어낸 결과를 나타낸 것이며(小丹와 大里, 1976), 그리고 파선은 본 연구의 수치해에 의해 얻어진 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 세 연구 결과의 비교에서 만족할 만한 일치를 나타내고 있으나, 三井와 村上(1967)의 해석해 결과와 보다 더 일치하는 것은 小丹와 大里(1976)의 결과이다. 본 연구 결과는 小丹와 大里(1976)의 결과보다 약간 높은 파고비 분포를 나타내며, 파고비 분포의 경향은 유사하게 나타나고 있다. 三井와 村上(1967)의 방법은 무한하게 긴 방파제에 대한 경우이고, 유한한 길이와 폭을 갖는 우각부 방파제에 대하여 위상차나 입사·반사파의 상호작용에 의한 간섭에 의해 차이가 발생할 수 있다(Lee and Williams, 2002). 따라서, 유한한 길이와 폭을 갖는 우각부 방파제에 대한 수치해의 결과가 三井와 村上(1967)의 결과와 거의 일치하고 있는 小丹와 大里(1976)의 계산방법의 정도에는 약간의 의문점이 남는다.

3.3 우각부 제체각에 따른 파고분포 특징

Fig. 6은 우각부 방파제의 제체각의 변화에 따른 다방향 불규칙 파랑의 파고분포를 나타낸다. 계산조건은 방파제 전면에서의 반사율 Kr=0.8로 하고 우각부를 중심으로 양측의 길이를 동일하게 2파장($B/L_{1/3}$=2.0)의 구조물로 하였고, S_{max}=25로 하였다. 또한 불규칙파랑의 주 입사각은 3가지 경우(45°, 60°, 90°)로 하였다.

Fig. 6(a)는 우각부의 제체각이 120°인 경우의 다방향 불규칙 파랑의 파고분포를 나타낸다. 이 경우 방파제의 우각점을 기점으로 좌측 부분에서의 파고비 증폭률이 우측보다 높게 나타났고, 불규칙파의 주입사각이 작을수록 좌측에서의 파고비가 높게 나타났다. 반면에 주입사각이 90°인 경우는 전반적으로 비슷한 파고분포를 나타냈다.

Fig. 6(b)는 우각부의 제체각이 135°인 경우이다. 이 경우 제체각이 120°인 경우보다 파고분포가 완만하게 나타나지만, 우각점 부근을 기점으로 좌측 부분에서의 파고비 증폭률이 우측보다 약간 높게 나타났다. 또한, 우각부 부근에서 여전히 변곡점이 나타나고, 파고비의 차이는 120°인 경우보다 작게 나타났다.

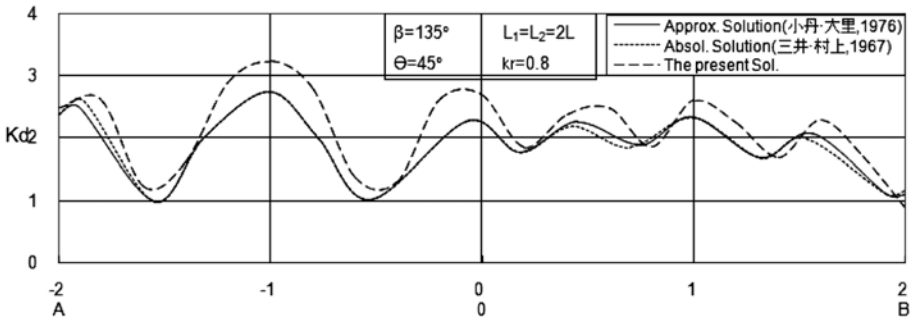

Fig. 5. Comparison of the results of present study with those of approximate and absolute solutions (B/L=4.0).

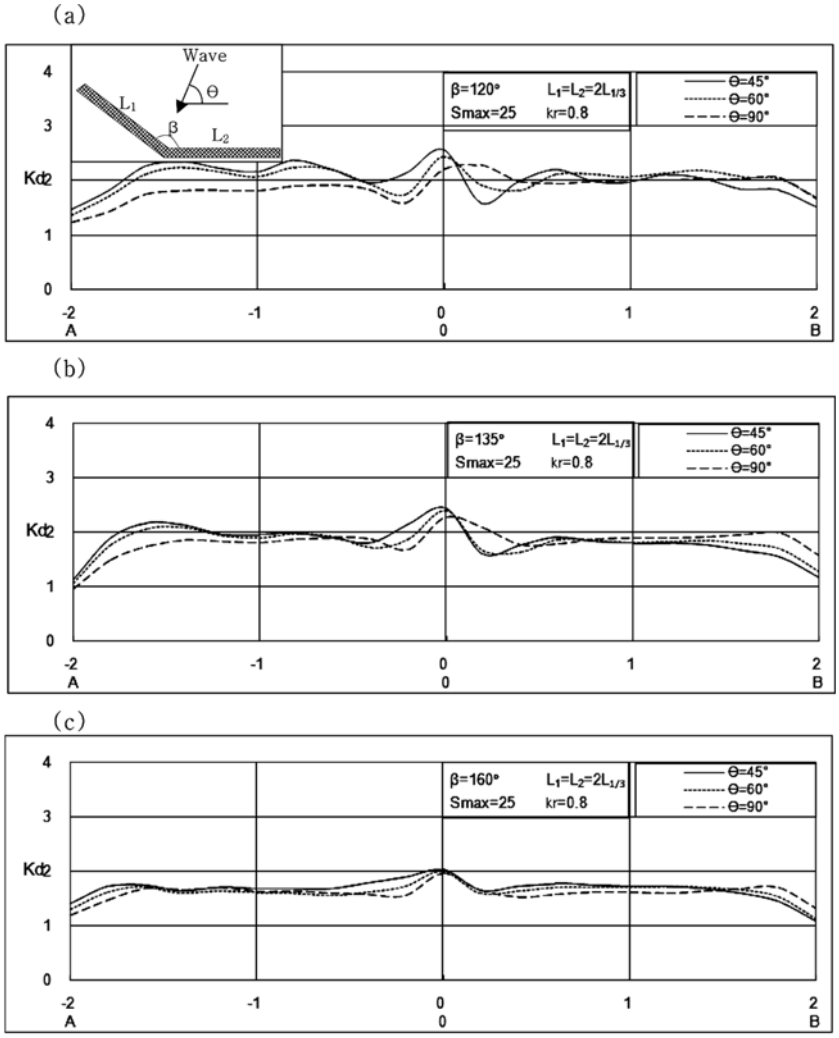

Fig. 6. (a)-(c) Wave-height distributions at the front face of a refracted breakwater due to random waves ($B/L_{1/3}$= 4.0, Kr = 0.8, S_{max}=25).

Fig. 6(c)는 우각부의 제체각이 160°인 경우이다. 이 경우 가장 완만한 파고분포를 나타냈고, 3가지 불규칙파 입사각에 따라 파고비의 큰 차이는 나타나지 않았다. 우각점 부근에서 약한 변곡점이 나타났고, 파고비의 차는 위의 두 경우보다 가장 작게 나타났다.

우각부 방파제의 제체각의 변화에 따른 파고분포를 비교하면, 제체각이 작을수록 우각부 좌측에서 파고비의 증폭률과 파고비가 높게 나타났고, 변곡점 부근에서의 파고비의 차이가 크게 나타났다.

3.4 반사율에 따른 우각부 전면에서의 파고분포 해석

현재 축조 중에 있는 울산신항 남방파제는 길이 2,170 m의 긴 방파제로서 160° 우각부를 형성하고 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 울산 남방파제를 대상으로 하여 다방향 불규칙파에 의해 우각부 부근과 전면에서 파고분포를 조사하였다. 방파제 전면에는 반사율 Kr=0.4와 Kr=0.95으로 각각 취하여 두 가지 경우로 설정하고, 반사율에 따른 우각부 방파제에서의 파고분포의 감소효과도 포함하여 파악할 수 있도록 하였다. 또한, 입사방향은 3방향(E, ENE 및 NNE)의 입사파에 대하여 수치계산을 실시하였다.

Fig. 7에서 x축은 파고의 측점을 나타내고, 격자번호 F33번이 우각부의 위치이고, 격자번호 F33번 이후 F45번까지가 굴절된 방파제이다. Fig. 7에서 보면 입사방향에 따라 큰 영향 없이 어느 입사방향에 대하여도 완만한 파고분포

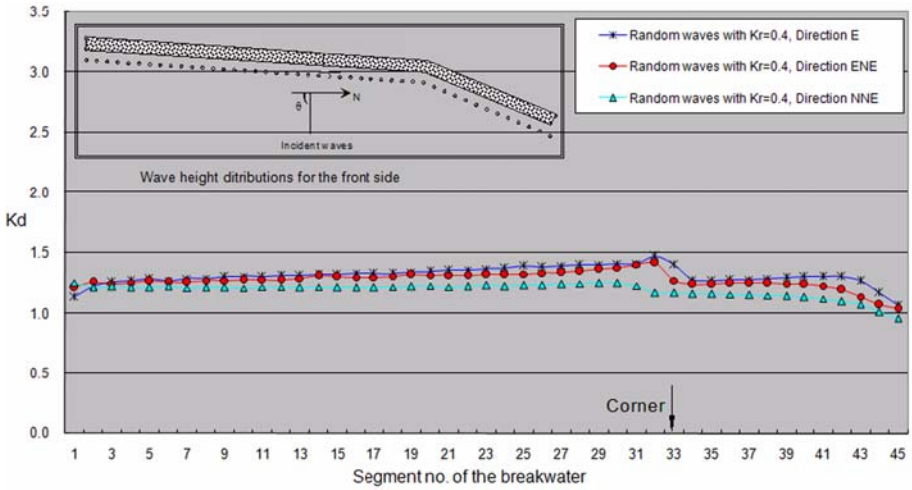

Fig. 7. Wave-height distributions at the front face of a refracted breakwater due to random waves(Kr = 0.4 and S_{max}=25).

를 나타내며, 가장 높은 파고비분포를 나타내는 방향은 E 방향이지만, 각 입사 방향별 비교에서 약간씩의 차이를 나타내고 있다. 이러한 입사방향별 파고분포의 차이는 Fig. 6(c)에 제시한 입사각에 따라 나타나는 파고분포의 비교 결과와 유사한 특징을 나타낸다. 우각부(격자번호 F33)에서 일단 파고가 감소하는 등의 변곡점을 잘 나타내고 있고 우각부의 좌우(남, 북 방향)측으로 파고분포의 급격한 감소, 혹은 증가와 같은 현상이 나타나지 않았다. 불규칙파랑의 주입사방향이 ENE 방향으로 입사할 때 좌측(격자번호 F23번 이전)에서의 파고는 작게 나타났고, 방파제 전면에서의 최대 파고비는 1.5를 초과하지 않았다.

세 방향의 모든 입사방향에 대하여 우각부 혹은 우각부 부근에서는 다른 계산점에 비하여 약간 높은 값을 나타내고 있다. 특히, 우각부의 각도가 160°인 경우는 작은 각에 비하여 현저한 중복파는 형성되지 않는 것으로 나타났다(Fig. 6(a-c)).

Table 1은 우각점(계산지점 F33) 전면에서의 본 연구 결과 및 현재 시공 중에 있는 (주)현대건설의 설계서 실험결과와 비교한 것이다. 본 연구에서 우각점 전면에 해당하는 계산지점(F33)에서의 불규칙파에 의해 계산된 파고비는 각각 ENE 입사방향의 경우 =1.275 와 E 입사방향의 경우 =1.405를 나타내고 있다(Fig. 7). 따라서 각각의 입사방향에 대한 유의설계파의 조건으로 환산하면 Table 1과 같은 결과를 얻는다. Table 1에서 볼 수 있듯이 본 연구에서의 예측치는 현대건설주식회사와 (주)대영엔지니어링(2004)의 설계서의 수리모형실험결과와도 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 이것은 우각부(혹은 예각부)를 갖는 굴절된 형태의 방파제에 의한 다방향 불규칙파의 파고계산을 정확하고, 손쉽게 수행할 수 있는 것이 입증되었다.

한편, 우각부 방파제 전면에 놓여 있는 소파구조물의 소파효과를 조사하기로 한다. Fig. 8은 방파제 전면에 소파구조물을 설치하지 않은 완전반사의 경우로서 Fig. 7에 나타낸 결과와 동일한 조건에 대하여 실시한 수치계산의 대한 결과를 나타낸다(본 연구에서의 수치계산은 완전반사의 경우 편의상 Kr = 0.95를 사용하였다). 소파구조물이 없는 경우는 당연히 세 방향 모두 방파제 전면 수역에서의 파고분포가 상당히 높게 나타나고 있으며, E방향과 ENE방향에서의 파고분포가 NNE 방향에 비해 높게 나타났다. 또한, E방향과 ENE 방향에서 우각부 지점에서의 변곡점이 뚜렷하게 나타나며, ENE 방향이 더욱 뚜렷하다. 이러한 결

Table 1. Comparison of the significant wave heights between the results of the experiment and the present study at the measuring point F33 (현대건설주식회사와 (주)대영엔지니어링, 2004).

입사 방향	$H_{1/3}$,$T_{1/3}$ (유의설계파)	우각점 전면에서의 계산파고(본 연구에 의한 결과)	우각점 전면 평균파고(설계서)
NNE	-	-	-
ENE	4.4 m, 8.0초	4.4×1.275=5.6 m	5.6 m
E	4.8 m, 8.0초	4.8×1.405=6.7 m	6.7 m

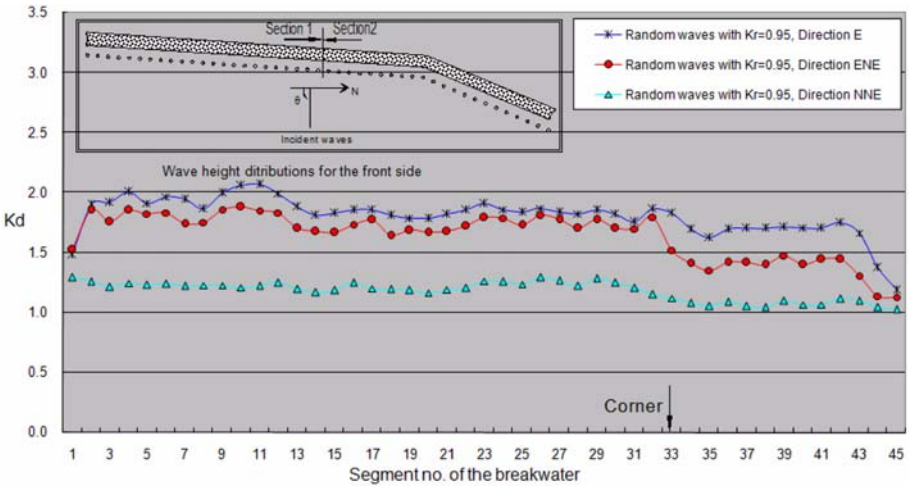

Fig. 8. Wave-height distributions at the front face of a refracted breakwater due to random waves(Kr = 0.95 and S_{max}=25).

과로부터 우각부 방파제 전면에 설치한 소파공의 효과는 우각부 방파제 전면에서의 파고분포를 줄이는데 그 효과가 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 다방향불규칙 파랑의 입사방향에 대하여 우각부를 갖는 방파제에서의 파고분포를 조사하였다. 우선, 본 연구에서는 기본적으로 직선형의 도제를 대상으로 규칙파를 이용한 合田 등(1971)의 엄밀해와 해석해 그리고 小丹와 大里(1976)의 수치해의 결과와 비교하였고, 우각부 방파제를 대상으로 한 三井와 村上(1967)의 해석해와 小丹와 大里(1976)의 수치해에 의한 연구결과와 비교 검토하였다. 그 결과 좋은 일치를 나타내고 있으며, 본 연구에 의한 파고예측에 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한, 우각부 방파제의 제체각의 변화 및 다양한 입사각에 따른 파고분포를 조사하였으나, 제체각이 작을수록 우각부 좌측에서 파고비의 증폭률과 파고비가 높게 나타나며, 우각점에서 파고분포상 변곡점이 강하게 나타나는 등 우각부 방파제에 대한 불규칙파의 파고분포 변화의 특징이 잘 나타나고 있다.

한편, 현재 축조중인 울산 남방파제를 대상으로 우각부 방파제 전면에서의 파고분포를 검토하였고, 방파제 전면에 설치된 소파공에 의한 소파효과도 입사 방향별로 확인하였다. 방파제 전면에서의 최대 파고비는 1.5를 초과하지 않았다. 우각부의 각도가 160°인 경우는 현저한 중복파는 형성되지 않는 것으로 나타났다. 반면에 소파공이 설치되지 않은 경우(완전반사) 우각부 방파제의 전면 부근에서 파고비가 크게 나타났다. 특히 3가지 주 입사방향 중 E방향에서의 회절파고가 가장 높게 나타났다. 또한, 우각점에서의 파고를 예측하기 위하여 시공 중인 관련회사의 자료를 검토하였으나, 본 연구에서 계산된 예측치와 정확하게 일치하고 있는데 이것은 매우 흥미로운 결과라고 할 수 있다. 이러한 연구과정을 통하여 본 연구의 신뢰성을 확인하였다. 이상으로 본 연구의 수치모형은 임의 반사율을 갖는 우각부 방파제 전면 혹은 우각부 부근에서의 불규칙파랑에 의한 파고분포의 예측에 손쉽고 유효하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

현대건설주식회사, (주)대영엔지니어링 (2004). 울산신항 남방파제 및 기타공사(제1공구)축조공사 실험보고서.

Barailler, L., and Gaillard, P. (1967). Evolution recente des modeles mathematiques dagitation due a la houle : Calcul de la diffraction en propondeur non uniforme. La Houille Blanche., 22(8), 861-869.

Isaacson, M. and Qu, S. (1990). Waves in a harbor with partially reflecting boundaries. Coastal Engineering, 14, 193-214.

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 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., Williams, A.N., Lee, B.H., and Oh, J. (2003). Diffraction of multidirectional random waves by multiple rectangular submarine pits. Ocean Engineering, 30(1), 85-106.

Lee, J.J. (1971). Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry. Journal of Fluid Mechanics, 45, 375-394.

Nagai, K. (1972). Diffraction of the irregular sea due to breakwaters. Coastal Engineering in Japan, JSCE, 15, 59-67.

Penny, W.G. and Price, A.T. (1944). Diffraction of water waves by breakwaters. Misc. Weapons Development Technical History 26, Artificial Harbors, Sec. 3D.

三井村上 (1967). 海岸構造物 不連續部の 波高分布 (第2報)-隅角部附近の 波高分布-. 第14回 海岸工學講演會論文集, 日本土木學會, 53-58.

合田良實, 吉村知司, 伊藤正彦 (1971). 島堤による波の反射および回折に關する研究. 港灣技術究報告書, 10卷, 第2號, 1-52.

鴻上雄三, 藤木信之, 堤敏郎, 上原泰正 (1972). 防波堤屈曲部附近の波高·波壓分布. 第19回 海岸工學講演會論文集,日本土木學會, 345-349.

小丹浩治, 大里逵男. (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卷, 第2號, 55-88.

角野昇八, 櫨田操, 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.

Received June 30, 2008
Accepted September 21, 2008