

축 대칭 지형에서의 처오름 높이

Run-up Height around Axis-symmetric Topographies

정태화*, 류용욱**

한밭대학교 건설환경공학부*, 한국건설기술연구원 수자원하천연구소**

Tae-Hwa Jung(thjung@hanbat.ac.kr)*, Yong-Uk Ryu(yuryu@kict.re.kr)**

요지

본 연구에서는 수심이 해안선에서 0이 되며 임의로 변하는 축 대칭 지형의 주변을 통과하는 파를 해석하기 위하여 타원형 완경사 방정식을 이용한 수치모델을 개발하였다. 수치해석을 위해 전체 영역을 세 부분으로 구분하였는데, 안쪽 및 바깥쪽 영역에서는 기존 해석해를 활용하였으며, 가운데 영역에서는 지배방정식에서 유한요소기법을 적용하였다. 영역 1에서의 해석에는 변수분리법 및 Frobenius 급수를 사용하였다. 개발된 수치해는 기존에 존재하는 해석해와 비교하여 타당성을 검증하였으며 다양한 경우에 적용하여 활용성을 검토하였다.

■ 중심어 : | 처오름 높이 | 섬 | 수치 해석 |

Abstract

In this study, we develop numerical model using the elliptic mild-slope equation for waves propagating around axis-symmetric topographies where the water depth varies arbitrarily having zero at the coastline. The entire region is divided into three regions. In the both of inner and outer regions, an existing analytical solutions are used. In the middle region, the finite element technique is applied to the governing equation. To get the solution, the methods of separation of variables, Frobenius series are used. Developed solution is validated by comparing with previously developed analytical solution. We also investigate various cases with different bottom topographies.

■ keyword : | Run-up Height | Island | Numerical Method |

1. 서론

섬 또는 돌출된 구조물 주변으로 파가 입사하는 경우 천수, 굴절 및 회절이 동시에 발생하기 때문에 매우 복잡한 거동을 보인다. 이러한 파의 거동을 해석하기 위하여 많은 방정식들이 사용되었으며, 그 중에 대표적인 방정식이 Berkhoff에 의해 제안된 완경사 방정식이다 [3]. 비록 선형파에 대해서만 적용할 수 있다는 단점이

있지만, 회절과 굴절을 동시에 모의할 수 있다는 장점이 있어 아직까지 널리 사용되고 있다. 섬과 같이 돌출된 지형의 경우 해안선에서의 수심이 0이 된다. 이 경우, 비정상 상태의 방정식을 사용하면 이동경계조건을 처리하여 비교적 수월하게 경계조건을 처리할 수 있지만 [4][11], 정상 상태의 방정식을 사용하면 수심이 0이 되는 지점에서 파수가 발산하며 파속도 및 군속도가 0이 되어 경계조건을 처리하기가 쉽지 않다. Mei는 경사

* 본 연구는 “2012년도 한밭대학교 교내 학술연구비” 및 “한국건설기술연구원 KICT2014-0217” 지원으로 수행되었습니다.

접수일자 : 2015년 02월 06일

심사완료일 : 2015년 04월 14일

수정일자 : 2015년 04월 14일

교신저자 : 류용욱, e-mail : yuryu@kict.re.kr

면의 법선방향으로의 유량이 0이라는 경계조건 ($\lim_{h \rightarrow 0} hu \cdot n = 0$)을 제시하여 위 문제를 해결하려 하였다.

그러나, 이 역시도 수치적으로 구현하기가 쉽지 않다[14].

축 대칭 지형에서의 파랑변형해석은 해석해 위주로 수행되었다. 많은 해석해들이 해안선에서의 경계조건을 손쉽게 처리하기 위하여 해안선이 연직의 벽으로 구성되어 있는 비현실적인 지형들을 해석대상으로 가정하였다[2][5][7][10][19][21]. Zhang and Zhu는 콘(cone) 형태의 섬에 대해 장파의 해석해를 유도하였으며[20], 그들이 유도한 해석해는 Mei[14]가 제안한 경계조건을 만족시킨다. 그러나 해석해를 유도하면서 장파의 가정과 수심조건을 사용하였기 때문에 천해조건을 벗어나는 파나 콘 이외의 형태에 대해서는 적용할 수 없다는 단점이 있다. 이후 Jung 등에 의해 Mei의 경계조건을 만족시키면서 좀 더 다양한 지형에 대해 적용할 수 있는 장파의 해석해가 제시되었지만[8], 역시나 중간수심 영역이나 심해역의 조건에서는 사용이 불가능하며, 수심이 무작위로 변하거나 방사방향으로 증가하다가 다시 감소하는 등 해석해를 유도하면서 사용한 수직조건으로 표현하기 힘든 지형에서는 적용하기 어려운 단점이 있다. 이는 해석해를 사용할 경우에 불가피하게 발생하는 현상으로 이를 극복하기 위해서는 수심조건에 자유로운 수치해를 사용할 수 밖에 없다. 수치해의 경우, 3차원 문제를 해석하기 위해서는 많은 격자가 필요하기 때문에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있긴 하지만 최근에 이러한 문제점을 해결하려는 연구들이 있다 [1]. 1차원 또는 2차원의 문제인 경우에는 상대적으로 적은 시간이 걸리기 때문에 널리 활용되고 있다.

완경사 방정식으로부터 수치해를 얻는 위해서는 주로 유한요소법과 유한차분법이 사용된다. 대상 영역이 비교적 단순한 경우에는 유한차분법이 선호되지만 [9][12][16], 해안선을 포함하는 복잡한 지형의 경우에는 유한요소모형이 더욱 선호된다[15][17][18]. 그러나 유한요소모형을 사용하는 경우에도 경계조건을 원활히 주기 위하여 해안선이나 항만구조물이 있는 경계지점은 연직벽이 있는 경우로 가정하여 수치해를 구하였다.

따라서, 본 연구에서는 실제의 지형처럼 경사진 경계에서 경계조건을 처리할 수 있는 방법을 제안하였다.

이를 위해 경사진 경계면을 포함하는 영역을 전체 계산 영역에서 분리하여 처리하였다. 이 영역의 크기를 충분히 작게 하면 기울기가 일정하면서 장파의 조건을 만족하게 된다. 따라서 기존에 Zhang and Zhu[20]에 의해 제안된 해석해를 사용할 수 있게 된다. 나머지 영역에서는 유한요소법을 이용하여 수치해를 구하였으며 적절한 정합조건을 사용하여 전체 영역에 대하여 파랑변형을 모의하였다. 본 연구에서 구한 수치해는 기존의 해석해와 비교하여 변수분리법과 Frobenius 급수를 사용한 접근법의 타당성을 검토하였으며 다양한 지형에 적용하여 파랑변형을 검토하였다.

II. 해의 유도

2.1 영역 1 및 3에서의 해

비회전성, 비압축성 및 비점성 유체의 흐름에 대하여 선형파의 지배방정식은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다[1].

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + \omega^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad (1)$$

여기서, ∇ 은 수평 미분 연산자, η 는 자유 수면, C 는 파속도, C_g 는 군속도, 그리고 ω 는 각 주파수를 의미한다. 축대칭 지형에 적용이 용이하도록 식 (1)을 원통형 좌표계로 바꾸면 다음과 같은 편미분 방정식이 된다.

$$CC_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + \frac{d(CC_g)}{dr} \frac{\partial \eta}{\partial r} + \frac{1}{r} CC_g \frac{\partial \eta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} CC_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial \theta^2} + \omega^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad (2)$$

해의 형태를 $\eta(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} R_n(r) \Theta_n(\theta)$ 로 가정하여 변수 분리법을 사용하면 식 (2)는 다시 다음과 같은 2개의 식으로 나누어진다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(CC_g \frac{\partial R_n}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} CC_g \frac{\partial R_n}{\partial r} + \left(\omega^2 \frac{C_g}{C} - \frac{n^2}{r^2} CC_g \right) R_n = 0 \quad (3)$$

$$\Theta_n(\theta) = C_{1n}\cos n\theta + C_{2n}\sin n\theta \quad (4)$$

여기서, $R_n(r)$ 은 고유값(eigenvalue) n 에 해당하는 r 의 함수이며 C_{1n} 과 C_{2n} 은 미지 상수들이다. 해를 구하기 위하여 해석영역을 [그림 1]과 같이 세 영역으로 나눈다. 영역 1은 해안선을 포함하는 영역으로 r_0 의 값을 충분히 작게 하면 항상 장파의 조건을 만족하며 일정 수심으로 가정할 수 있다. 이 경우 식 (3)은 다음과 같이 되며,

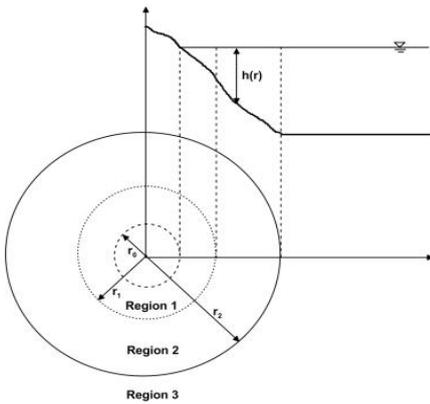


그림 1. 계산 영역 개요도

$$h \frac{d^2 R_{1,n}}{dr^2} + \left(\frac{h}{r} + \frac{dh}{dr} \right) \frac{dR_{1,n}}{dr} + \left(\frac{\omega^2}{g} - \frac{n^2 h}{r^2} \right) R_{2,n} = 0 \quad (5)$$

해는 다음과 같이 주어진다[20].

$$R_{1,n} = A_n \sum_{m=0}^{\infty} a_{m,n} (1-r^{-1})^m \quad (6)$$

$$a_{m,n} = \begin{cases} \frac{\omega^2}{gh_1} \left(\frac{r_1}{r_0} - 1 \right) = -v^2, m = 1 \\ \frac{1}{4} (v^4 - 3v^2 + n^2), m = 2 \\ \frac{[3(m-1)^2 - v^2] a_{m-1,n}}{(m)^2} \\ - \frac{[3(m-2)^2 - n^2] a_{m-2,n}}{(m)^2} \\ + \frac{[(m-3)^2 - n^2] a_{m-3,n}}{(m)^2} \quad m \geq 3 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, 아래첨자 1은 영역을 나타내며 A_n 은 아직 결정되지 않은 미지 상수이다. 영역 3은 점을 둘러싸고 있는 일정 수심을 갖는 영역으로, 식 (3)의 파속도(C)와 군속도(C_g)가 상수가 되며, 따라서 해는 다음과 같은 형태로 표현이 가능하다[11].

$$R_{3,n} = R^I + R^S = i^n \varepsilon_n J_n(kr) + D_n H_n^{(1)}(kr) \quad (8)$$

여기서, R^I 및 R^S 는 각각 입사파 및 산란파에 해당하는 부분이며, J_n 은 제 1종 n 차 Bessel 함수, $H_n^{(1)}$ 는 제 1종 n 차 Hankel 함수, D_n 은 미지 상수를 의미하며, ε_n 은 다음과 같이 정의되는 Jacobi 상수이다.

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1, n = 0 \\ 2, n \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 영역 2에서의 해

영역 2는 수심이 변하는 구간으로 전체 영역의 대부분을 차지한다. 유한요소법을 이용하여 영역 2에서의 해를 구하기 위해서는 지배방정식을 유한요소식으로 변형시켜야한다. 전체 영역 중 유체 영역을 이산화하여 $R_{2,n} = N^T R_{2,n}^e$ 로 표현한 후 식 (3)의 지배방정식에 대입하여 Galerkin 방법을 적용하면 다음과 같이 개별요소에 대한 적분식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & - \int_{\Omega^e} N \left[\frac{d}{dr} \left(C C_g \frac{dN^T R_{2,n}^e}{dr} \right) \right] d\Omega^e \\ & - \int_{\Omega^e} N \left(\frac{1}{r} C C_g \frac{dN^T R_{2,n}^e}{dr} \right) \\ & - \int_{\Omega^e} N \left[\left(\omega^2 \frac{C_g}{C} - \frac{n^2}{r^2} C C_g \right) N^T R_{2,n}^e \right] d\Omega^e = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, Ω^e 는 요소, N 은 보간함수벡터, T 는 전치행렬을 만드는 연산자, 그리고 $R_{2,n}^e$ 는 절점에서의 $R_{2,n}$ 값으로 구성된 벡터를 의미한다. 첫 번째 식을 부분적분한 후 각 요소의 시스템 행렬을 더하면 다음과 같이 전체 행렬식이 구성된다.

$$\sum_e \left[\int_{\Omega^e} \left(CC_g \frac{dN}{dr} \frac{dN^T}{dr} \right) d\Omega^e \right. \\ \left. - \int_{\Omega^e} \left(k^2 CC_g - \frac{n^2}{r^2} CC_g \right) NN^T d\Omega^e \right. \\ \left. - CC_g \frac{dR_{2,n}}{dr} \Big|_{r=r_2} + CC_g \frac{dR_{2,n}}{dr} \Big|_{r=r_1} \right] R_{2,n}^e = 0 \quad (11)$$

경계면 ($r = r_1, r_2$)에서 다음과 같은 동역학적 및 운동학적 연속조건을 사용하면,

$$R_{1,n} = R_{2,n}, \frac{dR_{1,n}}{dr} = \frac{dR_{2,n}}{dr} \quad \text{at } r = r_1 \quad (12)$$

$$R_{2,n} = R_{3,n}, \frac{dR_{2,n}}{dr} = \frac{dR_{3,n}}{dr} \quad \text{at } r = r_2 \quad (13)$$

다음과 같은 관계식을 얻게 되며,

$$\frac{dR_{2,n}(r_1)}{dr} = \frac{R'_{1,n}(r_1)}{R_{1,n}(r_1)} R_{2,n}(r_1) \quad (14)$$

$$\frac{dR_{2,n}(r_2)}{dr} = i^n \varepsilon_n k \left[1 - \frac{H_n^{(1)}(kr_2) J_n(kr_2)}{H_n^{(1)}(kr_2) J_n'(kr_2)} \right] J_n'(kr_2) \\ + k \frac{H_n^{(1)}(kr_2)}{H_n^{(1)}(kr_2)} R_{2,n}(r_2) \quad (15)$$

식 (14) 및 (15)를 식 (11)에 대입하면 영역 2에서의 유한요소식을 완성할 수 있다.

$$\sum_e \left[\int_{\Omega^e} \left(CC_g \frac{dN}{dr} \frac{dN^T}{dr} \right) d\Omega^e \right. \\ \left. - \int_{\Omega^e} \left(k^2 CC_g - \frac{n^2}{r^2} CC_g \right) NN^T d\Omega^e \right. \\ \left. - CC_g \left[i \varepsilon_n k \left(1 - \frac{H_n^{(1)}(kr_2) J_n(kr_2)}{H_n^{(1)}(kr_2) J_n'(kr_2)} \right) J_n'(kr_2) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{H_n^{(1)}(kr_2)}{H_n^{(1)}(kr_2)} R_{2,n}(r_2) \right] \right. \\ \left. + CC_g \frac{R'_{1,n}(r_1)}{R_{1,n}(r_1)} R_{2,n}(r_1) \right] R_{2,n}^e = 0 \quad (16)$$

위 식을 풀어 각각의 eigenvalue n 에 대하여 $R_{2,n}$ 을 구하면 식 (4)와 결합하여 다음과 같이 수면변위를 계산할 수 있다.

$$\eta_{2,n} = \sum_{n=0}^{\infty} R_{2,n} \cos n\theta \quad (17)$$

식 (4)의 $\sin n\theta$ 는 파의 대칭성 때문에 생략하였다. 또한, $R_{2,n}$ 의 값을 구하면 연속조건 (12) 및 (13)을 이용하여 영역 1 및 3에서의 수면변위도 구할 수 있다.

III. 검증

본 논문에서 제시한 식의 타당성을 검토하기 위하여 기존에 존재하는 해석해와 비교해 보았다. 먼저 [그림 2]와 같이 일정한 경사를 갖는 지형에 대하여 Zhang and Zhu[20]에 의해 유도된 장파의 해석해와 비교를 해 보았다. 앞서 설명한 바와 같이 r_0, r_1 및 r_2 는 각각 원점에서부터 해안선, 영역1의 바깥 경계 및 영역2의 바깥 경계까지의 거리를 의미하며 h_1 및 h_2 는 각각 경계지점에서의 수심을 의미한다. 본 계산에는 $r_0 = 10km, r_2 = 30km$ 및 $h_2 = 4km$ 을 사용하였다. r_1 의 경우, Zhang and Zhu[20]의 해석해가 일정 경사면에 대하여 성립하는 해이기 때문에 입사파 조건이 천해수심 조건을 만족하면 어느 지점을 잡아도 무관하다. 본 계산에서는 상대수심 $kh_1 = 0.005\pi$ 를 만족하는 지점을 r_1 의 지점으로 설정하였다. 이때, $T = 12sec. (kh_2 = 0.056\pi)$ 가 입사파 주기인 경우는 $r_1 = 1.016r_0$ 가 되고, $T = 24sec. (kh_2 = 0.028\pi)$ 인 경우는 $r_1 = 1.064r_0$ 가 된다. 본 연구의 결과는 영역 1에서는 해석해를 사용하고 영역 2에서는 유한요소식을 사용하여 얻은 결과를 의미하며 해석하는 영역 1과 2를 하나의 영역으로 고려하여 구한 결과를 의미한다.

[그림 3]은 해안선의 위치에 따른 파고변화를 본 연구의 결과와 해석해로 비교한 그림이다. 주기 12초 및 24초 모두에서 본 연구의 결과와 해석해가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 섬의 전면 ($\theta = 0^\circ$)에서

는 입사파와 반사파의 중복에 의해 높은 파고가 형성되었으며 섬의 후면에서는 굴절과 회절에 의하여 높은 파고가 형성되는 것을 확인할 수 있다.

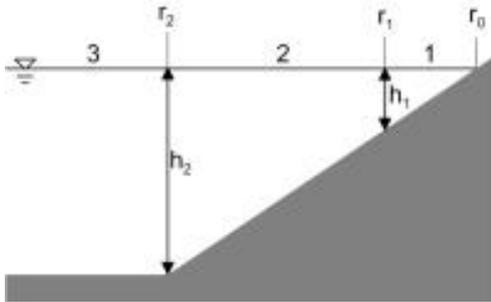


그림 2. Conical 섬의 계산 지형

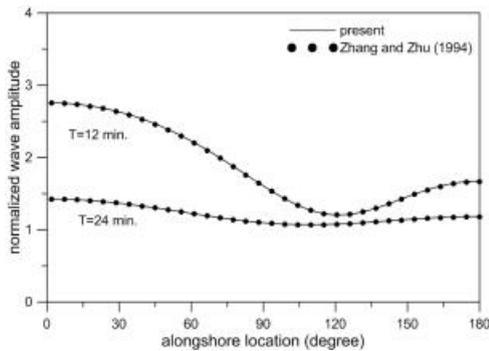


그림 3. Conical 섬 주변의 해석해와 수치해의 상대 파랑진폭 비교

다음으로 [그림 4]와 같이 해석해를 적용하기 힘든 포물선 형태의 섬에 돌출 지형이 있는 경우에 대하여 초오름 높이를 계산해 보았다. 변수심 영역에서 수심은 다음과 같이 정의된다.

$$h = h_{\delta} \left[\left(\frac{r}{r_0} \right)^2 - 1 \right] + h_r \quad (18)$$

$$h_{\delta} = \frac{h_2}{\left[\left(r_2/r_0 \right)^2 - 1 \right]} \quad (19)$$

$$h_r = \begin{cases} 0, & r_1 \leq r < r_{-1} \\ 1000 \sin(\pi/5000(r-r_{-2})), & r_{-1} \leq r < r_{-2} \\ 0, & r_{-1} \leq r < r_2 \end{cases} \quad (20)$$

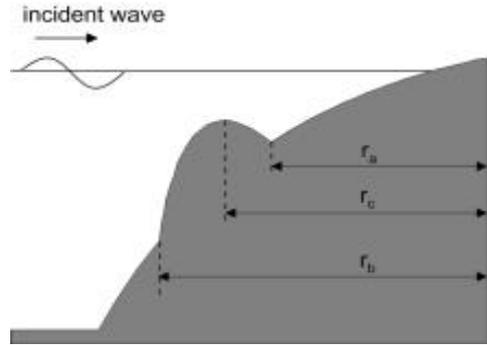
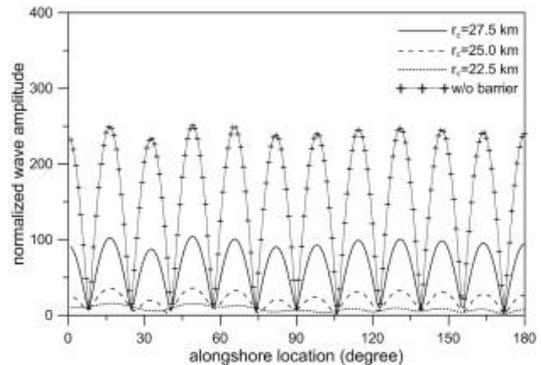
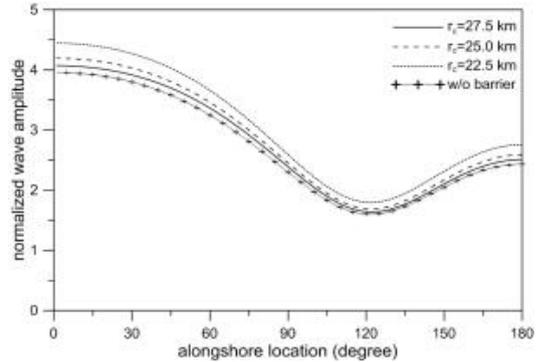


그림 4. Parabolic 섬의 계산 지형

지형조건은 $r_0 = 10km$, $r_2 = 30km$, $h_2 = 4km$, $r_{-1} = r_c - 250$ 및 $r_{-2} = r_c + 250$ 을 사용하였으며, r_c 값은 2250, 2500, 2750을 사용하여 둔덕의 위치에 따른 초오름 높이를 모의 하였다.



(a)



(b)

그림 5. r_c 에 따른 상대파랑진폭 비교 : (a) T=2 min; (b) T=12 min

[그림 5(a)는 주기 2초에 대하여 해안선에서의 파고 값을 비교한 그림이다. 둔덕이 포물선의 끝자락, 즉 깊은 수심쪽에 위치할 때는 천수효과가 상대적으로 약하게 발생하였지만 둔덕이 해안쪽으로 다가오면서 천수효과가 크게 발생하여 파고가 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 둔덕이 의해 상당한 에너지가 반사되어 둔덕이 없는 경우의 파고보다는 작게 관측이 되었다. [그림 5(b)와 같이 장파가 진행하는 경우에는 상대수심에 따른 천수효과가 크지 않기 때문에 초오름 높이가 둔덕의 위치에 크게 영향을 받지 않았다. 이 경우에는 앞선 경우와 반대로, 둔덕으로 인한 천수효과가 반사보다 크게 작용하여 둔덕이 있는 경우의 초오름 높이가 둔덕이 없는 경우보다 더 크게 발생하였다.

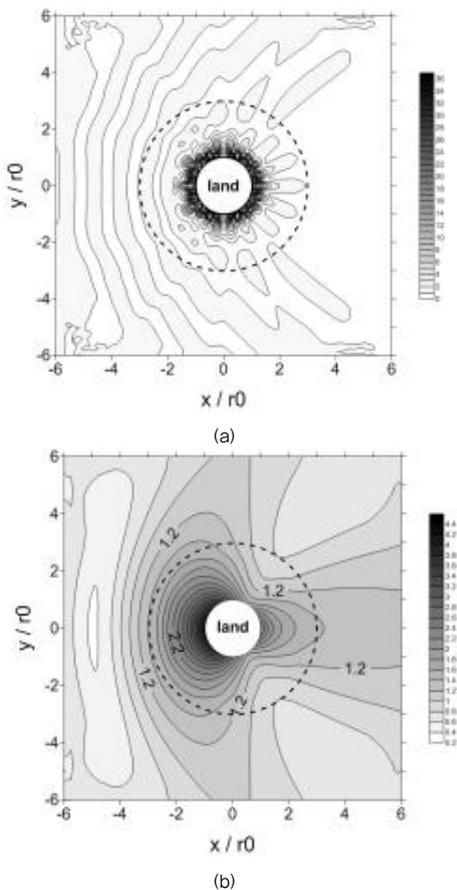


그림 6. 입사 주기에 따른 상대파랑진폭 비교
: (a) T=2 min; (b) T=12 min.

[그림 6]은 [그림 5]의 둔덕이 있는 경우에 대하여 섬 주변에서 파의 등고선을 그린 것이다. 주기가 짧은 경우에는 변 수심 영역에서 천수효과가 크게 발생하여 대부분의 에너지가 섬 주변에 집중되어 있는 반면에 장파가 입사하는 경우에는 섬 전면에서는 입사파와 반사파에 의해 증폭파가 형성되고 섬 후면에서는 회절파와 굴절파에 의해 높은 파고가 형성되면서 전체적으로 파 에너지가 고르게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 방사방향으로 임의의 수심을 가지는 축대칭 지형에 적용이 가능한 유한요소모형을 개발하였다. 실제의 지형은 대부분은 해안선에서 수심이 0이 된다. 이 경우 여러 가지 물리량들이 0 또는 발산이 되기 때문에 경계조건을 처리하기가 쉽지 않다. 시간의존형의 지배방정식을 가지는 경우에는 이동경계조건을 처리하여 이러한 지형에서의 경계치 문제를 처리하지만 시간비의존형 지배방정식에서는, 경계조건식이 Mei[14]에 의해 제시된 적은 있으나 이를 수치적으로 처리할 수 있는 방법은 아직까지 제시되지 못하고 있다. 다만 특정한 형태의 지형에 대해서 장파의 해석해가 제시된 바가 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존에 제시된 해석해를 활용하여 경계지점에서 수심이 0이 되며 임의의 지형을 가지는 축대칭 지형에 대해 해석이 가능한 유한요소모형을 개발하였다. 기존의 해석해를 활용하기 위하여 해석영역을 3개의 영역으로 세분화하였다. 가장 안쪽 영역은 해안선을 포함하는 영역이며 가운데 영역은 실제로 유한요소모형이 적용되는 영역 그리고 바깥 영역은 일정수심을 갖는 영역이다. 해석해는 일정한 기울기를 갖는 지형에 적용이 가능한 Zhang and Zhu[20]의 장파 해석해를 사용하였다. 영역 1의 크기를 충분히 작게 하면 바닥면의 기울기를 일정하다고 가정할 수 있으며 해안선을 포함하고 있기 때문에 항상 장파의 영역을 만족하게 된다. 따라서 이 영역에서는 Zhang and Zhu[20]의 해석해를 사용할 수 있다.

유도된 유한요소모형을 장파의 영역에서 기존에 준

제하는 해석해와 비교한 결과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 둔덕이 있는 경우에 적용해 본 결과, 심해파가 입사하는 둔덕의 위치가 해안선에서의 초오름 높이에 큰 영향을 미쳤으며 둔덕으로 인한 파의 반사가 천수보다 크게 발생하여 둔덕이 없는 경우보다 낮은 초오름이 발생하였다. 그러나 장파가 입사하는 경우에는 둔덕으로 인한 파의 반사보다 천수작용이 크게 발생하여 둔덕이 있는 경우에 더 높은 초오름 높이가 형성되었다. 둔덕이 해안선쪽으로 갈수록 초오름 높이가 증가하였으나 그 효과는 심해입사파에 비해 미미하였다.

참 고 문 헌

[1] 김석규, 김직수, 김상완, 노승우, 김서영, 황순욱 “슈퍼컴퓨팅환경에서의 대규모 계산 작업 처리 기술 연구”, 한국콘텐츠학회논문집, 제14권, 제5호, pp.8-17, 2014.

[2] 김수영, 이승오, 정태화, “함몰지형 위를 통과하는 파의 변형에 관한 해석해”, 한국콘텐츠학회논문집, 제12권, 제3호, pp.434-441, 2012.

[3] J. C. W. Berkhoff, “Computation of combined refraction and diffraction,” Proceedings of 13th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.471-490, 1972.

[4] Y. S. Cho, “Numerical simulations of tsunami propagation and run-up,” PHD Thesis, Cornell University, p.264, 1995.

[5] S. Homma, “On the behavior of seismic sea waves around island,” Geophys. Mag., Vol.9, pp.199-208, 1950.

[6] J. R. Houston, “Combined refraction and diffraction of short waves using the finite element method,” Applied, Oc. Res., Vol.3, pp.163-170, 1981.

[7] I. G. Jonsson, O. Skovgaard, and O. Brink-Kjaer, “Diffraction and refraction calculations for waves incident on an island,” J. of Marine Res., Vol.34,

pp.469-496, 1976.

[8] T. H. Jung, C. Lee, and Y. S. Cho, “Analytical solutions for long waves over a circular island,” Coastal Engrg., Vol.57, pp.440-446, 2010.

[9] C. Lee, W. S. Park, Y. S. Cho, and K. D. Suh, “Hyperbolic mild-slope equations extended to account for rapidly varying topography,” Coastal Engrg., Vol.34, pp.243-257, 1998.

[10] H. W. Liu, P. Lin, and N. J. Shankar, “An analytical solution of the mild-slope equation for waves around a circular island on a paraboloidal shoal,” Coastal Engrg., Vol.51, pp.421-437, 2004.

[11] P. J. Lynett, T. R. Wu, and P. L. F. Liu, “Modeling wave runup with depth-integrated equations,” Coastal Eng., Vol.46, pp.89-107, 2002.

[12] P. A. Madsen and J. Larsen, “An efficient finite-difference approach to the mild-slope equation,” Coastal Eng., Vol.11, pp.329-351, 1987.

[13] C. C. Mei, *The applied Dynamics of Ocean Surface Waves*, World Scientific, 1989.

[14] C. C. Mei, *Mathematical Analysis in Engineering*, Cambridge University Press, 1995.

[15] W. S. Park, I. S. Chun, and W. M. Jeoung, “Infinite element for the analysis of harbor resonances,” J. of KSCOPE, Vol.6, pp.139-149, 1994.

[16] K. D. Suh, C. L, Y. H. Park, and T. H. Lee, “Experimental verification of horizontal two-dimensional modified mild-slope equations model,” Coastal Engrg., Vol.44, pp.1-12, 2001.

[17] T. K. Tsay and P. L. F. Liu, “A finite element model for wave refraction and diffraction,” Applied Oc. Res., Vol.5, pp.30-37, 1983.

[18] B. Xu, V. Panchang, and Z. Demirbilek, “Exterior reflections in elliptic harbor wave models,” J. of Wtrwy., Port., Coast., and Oc. Engrg., ASCE, Vol.122, pp.118-126, 1996.

[19] X. Yu and B. Zhang, “An extended analytic solution for combined refraction and diffraction

of long waves over circular shoal,” Ocean Engrg., Vol.30, pp.1253-1267, 2003.

[20] Y. L. Zhang and S. P. Zhu, “New solutions for the propagation of long water waves over variable depth,” J. of Fluid Mech., Vol.278, pp.391-406, 1994.

[21] S. P. Zhu and Y. L. Zhang, “Scattering of long waves around a circular island mounted on a conical shoal,” Wave Motion, Vol.23, pp.353-362, 1996.

저 자 소 개

정 태 화(Tae-Hwa Jung)

정회원



- 2001년 2월 : KAIST 토목공학과(공학사)
- 2003년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 대학원 토목공학과(공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 건설환경공학과 부교수

<관심분야> : 해안공학

류 용 욱(Yong-Uk Ryu)

종신회원



- 1999년 2월 : 전남대학교 토목공학과(공학사)
- 2002년 8월 : Texas A&M 대학원 토목환경공학과(공학석사)
- 2006년 8월 : Texas A&M 대학원 토목환경공학과(공학박사)
- 2012년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야> : 해안공학