

함몰지형 위를 통과하는 파의 변형에 관한 해석해

Analytic Solution of Wave Propagating over Depressive Seabed

김수영*, 이승오*, 정태화**

홍익대학교 토목공학과*, 한밭대학교 토목공학과**

Sooyoung Kim(freedance80@gmail.com)*, Seung Oh Lee(seungoh.lee@hongik.ac.kr)*,
Tae-Hwa Jung(thjung@hanbat.ac.kr)**

요약

축대칭 함몰지형 위를 통과하는 파의 변형에 관한 확장형 완경사 방정식의 해석해를 유도하였다. 함몰지형내의 수심은 함몰지형의 중심으로부터의 거리의 멱에 비례하여 변화된다. 지배방정식은 변수분리법을 이용하여 상미분방정식으로 변환되었으며 Hunt(1979)의 근사식을 이용하여 계수들을 파속과 군속도의 항으로 이뤄진 양함수의 형태로 나타냈다. 확장형 완경사 방정식의 바닥의 곡률과 경사의 제곱으로 이뤄진 항은 멱급수형태로 변환하였다. 마지막으로 Frobenius 급수를 사용하여 확장형 완경사 방정식의 해석해를 유도하였다. 유도된 해석해는 FEM으로 도출된 수치해와 기존의 완경사 방정식의 해석해와 비교하여 검증하였다.

■ **중심어** : | 확장형 완경사 방정식 | 함몰지형 | 해석해 |

Abstract

An analytic solution to the extended mild-slope equation was derived for waves propagating over an axi-symmetric pit. The water depth inside the pit was in proportion to a power of radial distance from the center of pit. The equation was transformed into the ordinary differential equation using the method of separation of variables. The coefficients of differential terms were expressed as an explicit form composing of the phase and group velocities. The bottom curvature and the square of bottom slope terms, which were added to the extended mild-slope equation, were expressed as power series. Finally, using the Frobenius series, the analytic solution to the extended mild-slope equation was derived. The present analytic solution was validated by comparing with the numerical solution obtained from FEM.

■ **keyword** : | Extended Mild Slope Equation | Depressive Seabed | Analytic Solution |

1. 서론

해안에서의 파랑의 전파는 연안의 생태계와 지형의 변화에 영향을 주며 해안의 방파제와 같은 인공구조물에도 직·간접적인 영향을 끼친다. 따라서 파랑의 변형

을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다. 대부분의 파랑은 심해에서 바람에 의해 만들어지며, 해안으로 전파되면서 굴절, 회절, 반사, 천수 및 쇄파 등의 현상을 통해 변형이 된다. 이러한 변형을 모의하는 방법으로는 수치모의, 수리모형실험 또는 해석해를 이용하는 경우

가 있다. 수치모델은 현재 가장 활발하게 이용되는 방법으로 다양한 지형 및 파랑의 조건에 대해서 해석이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 수치해석적인 방법은 오차의 위험성 때문에 수치모델을 검증해야 하는 번거로움이 있으며 파랑문제의 경우, 경계조건을 처리하기가 쉽지 않다. 현재까지 경계조건 설정 방법에 관하여 많은 기법이 제시되었으나 경계면에 도달하는 다방향의 파를 적절하게 처리할 수 있는 기법은 제시되지 않고 있다. 두 번째 방법인 수리모형실험은 실제의 자연현상을 그대로 재현하여 해석하기 때문에 신뢰도가 높지만 축척에 의한 오차나 계측장비에 의한 오차가 발생할 수 있다. 또한 다른 방법들에 비해 비용과 시간이 많이 소요된다는 단점도 있다. 마지막 방법인 해석해를 이용하는 방법은 복잡한 지형을 단순화시켜서 해석하며 지배방정식 또한 단순화시키기 위해 많은 가정사항을 적용시킨다. 따라서 단순하고 제한된 경우에만 적용할 수 있다는 단점이 있다. 그러나 지배방정식으로부터 수학적으로 직접 해를 구하기 때문에 수치오차나 계측 오차가 발생하지 않으며 다른 방법에 비해 빠르고 간편하게 해를 구할 수 있다는 장점이 있어 현재까지 활발히 연구가 되고 있다.

본 연구에서는 앞서 언급한 세 가지 방법 중에서 해석해와 관련된 연구를 수행하였다. 해석해와 관련된 연구는 Homma(1950)에 의해 포물선형 천퇴위를 지나가는 장파의 해석해가 제시되면서 본격적으로 시작되었다[3]. 이후, Vastano and Reid(1967)[10], Jonsson et al.(1976)[5]은 Homma가 제시한 동일한 지형에 대한 장파의 해석해를 제시하였다. Yu and Zhang(2003)[11]은 기존에 고려되었던 지형을 모두 포함하면서 기울기의 변화가 고려된 해석해를 유도하였다. 최근에 Liu et al.(2004)[8]은 Hunt(1979)[4]가 제안한 파수에 관한 근사식을 사용하여 Homma가 제시한 지형에서 심해까지 적용이 가능한 해석해를 유도하여 해석해의 활용성을 높였다.

반면, Suh et al. (2005)[9]은 기존의 돌출 지형에 대한 연구와는 달리 함몰 지형에 대한 연구를 수행하여 함몰 지형의 중심으로부터 거리의 제곱에 비례하여 감소하는 경우 그 위를 통과하는 장파의 해석해를 제시하였으

며 Jung and Suh (2007)[6]는 동일한 지형에 대하여 깊은 수심까지 적용이 가능한 해석해를 유도하였다. 또한 기존의 연구에서 해석해를 유도하기 위하여 사용하였던 지배 방정식에 바닥 곡률과 바닥 경사의 제곱항을 추가하여 급변하는 수심에서도 적용이 가능한 장파의 해석해(Jung and Suh, 2008)[7]를 유도하였다. 본 연구에서는 Jung and Suh (2008)[7]가 제안한 해석해를 확장하여 심해까지도 적용이 가능하도록 확장형 완경사 방정식의 해석해를 유도하였다. 유도된 해석해는 동일한 지배방정식을 유한요소법으로 구한 수치해 및 기존의 완경사 방정식의 해석해와 비교하여 타당성을 검증하였다.

II. 기본이론

1. 지형의 형상

해석해를 유도하기 위하여 본 연구에서 고려하는 축대칭 함몰지형은 [그림 1]과 같으며 함몰지형 주변에서의 수심은 식 (1)과 같이 된다.

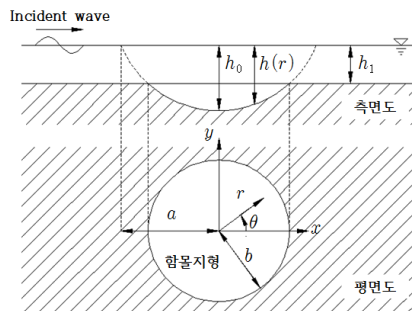


그림 1. 함몰지형의 형상

$$h = \begin{cases} h_0 \left(1 - \frac{r^\alpha}{a^\alpha}\right) & r < b \\ h_1 = h_0 \left(1 - \frac{b^\alpha}{a^\alpha}\right) & r \geq b \end{cases} \quad (1)$$

여기서, h_0 는 원점에서의 수심이며, a 는 함몰지형의 반지름을 자유수면까지 연장했을 때 가상의 반지름, b

는 함몰지형의 반지름이다. 또한 α 는 함몰지형 내부의 수심변화율을 결정하는 차수를 의미하는 양의 정수이다. α 값에 따른 지형의 형상은 [그림 2]에 도시하였으며 본 연구에서는 α 가 2일 경우에 대해서 파랑의 변형을 연구하였다.

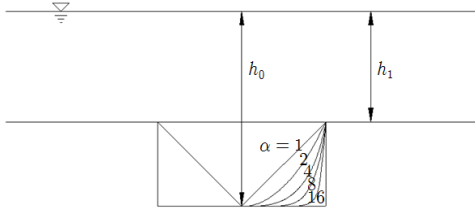


그림 2. α 값에 따른 함몰지형의 형상

2. 수학적 이론

기존의 환경사 방정식은 급변하는 수심에서는 적용이 어렵다는 단점이 있었다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 기존의 환경사 방정식에 바닥의 기울기와 곡률항을 추가한 확장형 환경사 방정식이 여러 연구자에 의해 다양한 형태로 유도되었다. 각각의 확장형 환경사 방정식은 개발한 연구자에 의해 제시된 형태가 각각 다르다. 하지만 소멸과 성분을 고려하지 않으면서 단주기를 갖는 선형파의 경우 모두 동일항 형태로 귀결이 된다. 본 연구에서는 이 중에서 식 전개가 용이한 Chandrasekera and Cheung(1997)[2]에 의해 제시된 확장형 환경사 방정식을 지배방정식으로 사용하였다(식 (2) 참조).

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + \left[\sigma^2 \frac{C_g}{C} + f_1(kh) \nabla^2 hg + f_2(kh) (\nabla h)^2 gk \right] \eta = 0 \tag{2}$$

여기서, η 은 복소수로 표현되는 표면 수위이며, C 는 파속, C_g 는 군속도, σ 는 각주파수를 의미한다. k 는 파수, h 는 수심, g 는 중력가속도이며 f_1 과 f_2 는 식(3), 식(4)와 같이 표현된다.

$$f_1(kh) = \frac{1}{8 \cosh^3(kh) [2kh + \sinh(2kh)]} \times \tag{3}$$

$$[-4kh \cosh(kh) + \sinh(3kh) + \sinh(kh) + 8(kh)^2 \sinh(kh)] - \frac{kh \tanh(kh)}{2 \cosh^2(kh)}$$

$$f_2(kh) = \frac{-\operatorname{sech}^2(kh)}{6[2kh + \sinh(2kh)]^3} \times [8(kh)^4 + \tag{4}$$

$$16(kh)^3 \sinh(2kh) - 9\sinh^2(2kh) \cosh(2kh) + 12(kh) \{1 + 2\sinh^4(kh)\} \{kh + \sinh(2kh)\}]$$

해석해 유도를 용이하게 하기 위하여 원형좌표계를 사용하였으며 그 결과 식 (2)는 다음과 같이 변형된다.

$$CC_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + \frac{d(CC_g)}{dr} \frac{\partial \eta}{\partial r} + \frac{1}{r} CC_g \frac{\partial \eta}{\partial r} \tag{5}$$

$$+ \frac{1}{r^2} CC_g \frac{\partial^2 \eta}{\partial \theta^2} + [\sigma^2 \frac{C_g}{C} + f_1(kh) \nabla^2 hg$$

$$+ f_2(kh) (\nabla h)^2 gk] \eta = 0$$

식(5)를 해석적으로 풀기 위해서는 파속과 군속도를 포함하는 미분항의 계수들을 양함수의 형태로 변환해야 한다. 파속 및 군속은 식(6)과 같다.

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \tag{6}$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$$

파속 및 군속도가 kh 값의 음함수로 표현되므로 이를 양함수의 형태로 바꾸기 위하여 Hunt(1979)[4]가 제안한 근사식을 사용하였다. Hunt의 근사식은 식(7)과 식(8)의 형태로 정리된다.

$$(kh)^2 = \nu^2 + \frac{\nu}{P(\nu)} \tag{7}$$

$$P(\nu) = 1 + \frac{2}{3}\nu + \frac{16}{45}\nu^2 + \frac{152}{945}\nu^3 + \frac{896}{14175}\nu^4 + \frac{3392}{155925}\nu^5 + \dots \tag{8}$$

여기서, $\nu = \sigma^2 h/g$ 이며 다항식 $P(\nu)$ 를 사용할 때 2차 이상의 항을 사용하면 식(7)은 $\nu \rightarrow 0$ 인 경우와 $\nu \rightarrow \infty$ 인 경우의 선형 분산관계식의 근사식인 $\sigma^2 = gk^2 h$ 와 $\sigma^2 = gk$ 를 모두 만족한다. [그림 3]은 Hunt의 근사식을 이용하여 구한 파속 C 와 선형 분산관계식으로부터 구한 파속 C_{Airy} 을 비교한 것이다. $P(\nu)$ 의 차수가 증가할수록 선형 분산관계식의 결과와의 오차가 감소하였다. 본 연구에서 해의 수렴성을 해석적으로 판단할 수 있는 최대차수인 4차 다항식까지만 사용하였다. 4차항까지만 사용하였을 때의 최대상대오차는 중간수심영역에서 발생하였으며 그 값은 약 0.8% 정도 되었다.

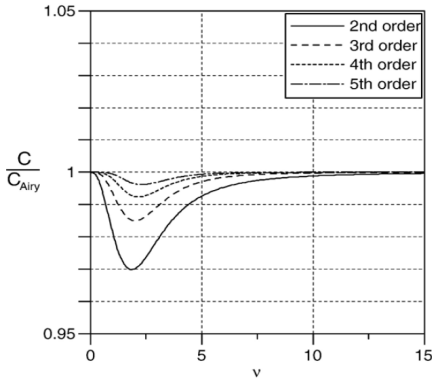


그림 3. 선형분산관계식과 Hunt 근사식의 비교

식(7)을 식(6)에 대입해서 정리하면 미분항들의 계수로 사용된 CC_g , C_g/C , $d(CC_g)/dr$ 값이 양함수의 형태로 나타난다(식(9)~(11) 참조).

$$CC_g \approx \frac{g^2}{2\sigma^2} \frac{\nu(P(\nu)+1)}{P(\nu)+1} \quad (9)$$

$$\frac{C_g}{C} \approx \frac{2P(\nu)+1}{2P(\nu)} \quad (10)$$

$$\frac{d(CC_g)}{dr} \approx \frac{g}{2} \frac{3(P(\nu)+1)-2(P(\nu)\nu+1)}{(P(\nu)\nu+1)(P(\nu)+1)} \frac{dh}{dr} \quad (11)$$

마지막으로 바닥 곡률 및 바닥의 경사와 관련 있는 f_1 과 f_2 가 포함된 항을 멱급수를 이용하여 근사하였다(식(12), 식(13) 참조).

$$f_1(kh) = \sum_{s=0}^{\infty} a_s r^s \quad (12)$$

$$= a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + a_4 r^4 + a_5 r^5 + \dots$$

$$f_2(kh)k = \sum_{s=0}^{\infty} b_s r^s \quad (13)$$

$$= b_0 + b_1 r + b_2 r^2 + b_3 r^3 + b_4 r^4 + b_5 r^5 + \dots$$

식(12) 및 (13)의 계수 값들은 식(14)와 식(15)와 같이 최소자승법을 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum \left[f_1(kh) - \sum_{s=0}^{\infty} a_s r^s \right]^2 = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial a} \sum \left[f_2(kh)k - \sum_{s=0}^{\infty} b_s r^s \right]^2 = 0 \quad (15)$$

앞에서 식(9)~(15)까지 계산된 계수들을 식(5)에 대입하고 정리하면 식(16)과 같다.

$$\frac{g^2}{2\sigma^2} \frac{\nu[P(\nu)+1]}{P(\nu)\nu+1} \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} \quad (16)$$

$$+ \frac{g}{2} \frac{3[P(\nu)+1]-2[P(\nu)\nu+1]}{[P(\nu)\nu+1][P(\nu)+1]} \frac{dh}{dr} \frac{\partial \eta}{\partial r}$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{g^2}{2\sigma^2} \frac{\nu[P(\nu)+1]}{P(\nu)\nu+1} \frac{\partial \eta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\nu[P(\nu)+1]}{P(\nu)\nu+1} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \theta^2}$$

$$+ \left[\sigma^2 \frac{P(\nu)+1}{2P(\nu)} + \left[\sum_{s=0}^{\infty} a_s r^s \right] \nabla^2 h g \right] \eta = 0$$

$$+ \left[\sum_{s=0}^{\infty} b_s r^s \right] (\nabla h)^2 g$$

변수 분리법을 사용하면 식(16)의 해는 식(17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_1(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} R_n(n) \cos(n\theta) \quad (17)$$

여기서 아래첨자 1은 함몰 지형 내부를 의미하며 R_n 은 식(18)과 같이 정의되는 Frobenius 급수를 의미한다.

$$R_n(r) = \sum_{m=0}^{\infty} a_{m,n} r^{m+c} \quad (18)$$

식(1)과 식(17)을 식(16)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 이차상미분 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & [P(\nu)+1]^2 P(\nu)(a^\alpha-r^\alpha)r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} \\
 & + (-\alpha)P(\nu)\{3[P(\nu)+1]-2[P(\nu)\nu+1]\} \\
 & \times r^{2\alpha-1} \frac{dR}{dr} \\
 & + [P(\nu)+1]^2 P(\nu)(a^\alpha-r^\alpha)r \frac{dR}{dr} \\
 & - n^2 [P(\nu)+1]^2 P(\nu)(a^\alpha-r^\alpha)R \\
 & + \left\{ \begin{aligned} & \frac{\sigma^2}{gh_*} [P(\nu)\nu+1][P(\nu)+1]^2 \\ & + \frac{2\sigma^2}{g\epsilon} [P(\nu)\nu+1][P(\nu)+1]P(\nu) \\ & \times \left[\sum_{s=0}^{\infty} a_s r^s \right] (-\alpha^2 h_* r^{\alpha-2}) \\ & + \frac{2\sigma^2}{g\epsilon} [P(\nu)\nu+1][P(\nu)+1]P(\nu) \\ & \times \left[\sum_{s=0}^{\infty} b_s r^s \right] (\alpha^2 h_*^2 r^{2\alpha-2}) \end{aligned} \right\} r^2 R = 0
 \end{aligned} \tag{19}$$

여기서, $h_* = h_0/a^\alpha$ 그리고 $\epsilon = \sigma^2 h_0/g$ 이며, c 값을 구하기 위해 결정방정식(indicial equation)을 사용하면 식(18)에서 $c = \pm n$ 값을 구할 수 있으며, 따라서 해의 형태는 식(20)과 같이 된다.

$$R_{n,1} = \sum_{m=0}^{\infty} a_{m,n} r^{m+n} \tag{20}$$

$$R_{n,2} = R_{n,1} \ln r + \sum_{m=0}^{\infty} b_{m,n} r^{m-n} \tag{21}$$

원점($r=0$)에서 자유수면 변위가 유한하다는 조건을 사용하면 식(21)은 해의 형태로 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 식(20)을 해의 형태로 사용하였다. 식(20)을 식(19)에 대입하여 r 에 관한 동차항들을 정리하면 $a_{m,n}$ 을 구할 수 있으며 이 값들을 정리하면 최종적으로 함몰 지형 내부에서의 해를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_1 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n R_n \cos(n\theta) \tag{22}$$

여기서, A_n 은 경계 조건에 의해 결정되는 미지상수이다. 함몰 지형을 둘러싸고 있는 일정 수심영역에서의 해는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\eta_2 = \sum_{n=0}^{\infty} [a_i i^n \epsilon_n J_n(kr) + D_n H_n^{(1)}(kr)] \cos(n\theta) \tag{23}$$

여기서, a_i 는 입사파의 파고, i 는 단위 허수, J_n 은 제 1종 n 차 Bessel 함수, $H_n^{(1)}$ 은 제 1종 n 차 Hankel 함수, D_n 은 미지 상수이다. ϵ_n 은 Jacobian symbol을 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \begin{cases} 1, & n=0 \\ 2, & n \geq 1 \end{cases} \tag{24}$$

식(22)와 식(23)에 있는 미지 상수, A_n 과 D_n 을 구하기 위하여 $r=b$ 인 지점에서 다음과 같은 정합조건을 사용한다.

$$\eta_1 = \eta_2 \tag{25}$$

$$\frac{\partial \eta_1}{\partial r} = \frac{\partial \eta_2}{\partial r} \tag{26}$$

여기서, 식(25)와 식(26)은 각각 자유 수면에서의 압력과 유속이 연속임을 의미한다. 식(22)와 식(23)을 식(25) 및 식(26)에 대입하면 이원일차 연립방정식 2개를 얻을 수 있으며 이 식을 풀면 다음과 같이 미지 상수값을 계산할 수 있다.

$$A_n = a_i k i^n \epsilon_n \frac{J_n(kb)H_n^{(1)'}(kb) - J_n'(kb)H_n^{(1)}(kb)}{kR_n(b)H_n^{(1)'}(kb) - R_n'(b)H_n^{(1)}(kb)} \tag{27}$$

$$D_n = a_i i^n \epsilon_n \frac{kJ_n'(kb)R_n(b) - J_n(kb)R_n'(b)}{H_n^{(1)}(kb)R_n'(b) - kH_n^{(1)'}(kb)R_n(b)} \tag{28}$$

III. 결과분석

본 연구에서 유도한 해석해의 타당성을 검토하기 위하여 동일한 지배방정식을 사용하는 유한요소법을 사용한 수치해와 비교를 하였다. 유한요소의 격자는 6-절

점 삼각형 요소와 3-절점 무한 요소를 사용하였으며, 유한요소모델의 자세한 사항은 박우선 등(1994)[13] 또는 정원무(1998)[12]의 논문에 기술되어있다. 먼저 맥급수 형태로 표현되어 있는 $f_1(kh)$ 와 $f_2(kh)k$ 값의 정확해와 근사식을 비교하였다(그림 4 참조). 근사식은 식 (12) 및 (13)에서 처음 6개의 항만을 사용하였으며 계산에 사용된 조건은 $\alpha=2$, $h_0=6.4\text{ m}$, $h_1=3.2\text{ m}$, $b=1.6\text{ m}$, $k_1h_1=1.336$ 이다. 결과는 [그림 4]에 도시하였으며 정확해와 근사해가 거의 일치 하는 것으로 나타났다. 따라서 이후의 계산의 결과는 모두 근사 해를 이용하여 해석해의 값을 구하였다.

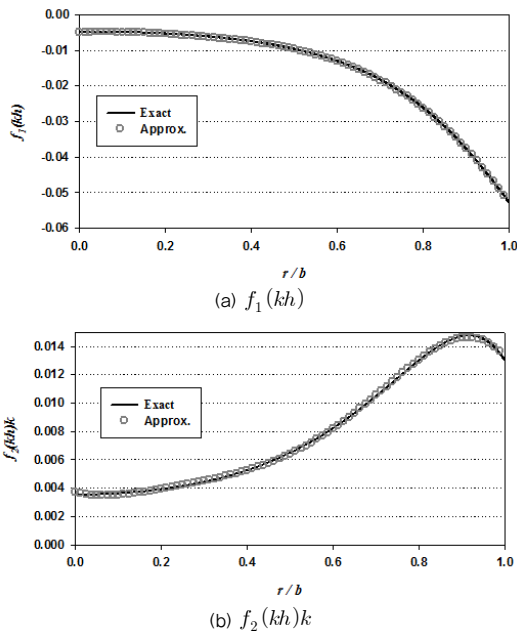


그림 4. $f_1(kh)$ 및 $f_2(kh)k$ 에 대한 정확해와 근사해의 비교

앞의 계산과 동일한 조건에 대해서 해석해와 수치해를 비교하였으며 $k_1h_1=1.336$ 이므로 중간수심영역의 조건을 갖는다. 그 결과 입사파의 파장이 짧아지면서 함몰지형에 의한 파장 변화가 크게 나타났으며 본 연구에서 유도한 해석해와 수치해는 동일한 위상변화를 보였다. 또한 기존의 환경사 방정식과 비교하였을 때 본 연구에서 계산된 해석해가 수치해와 더 일치하는 결과를 나타냈다.

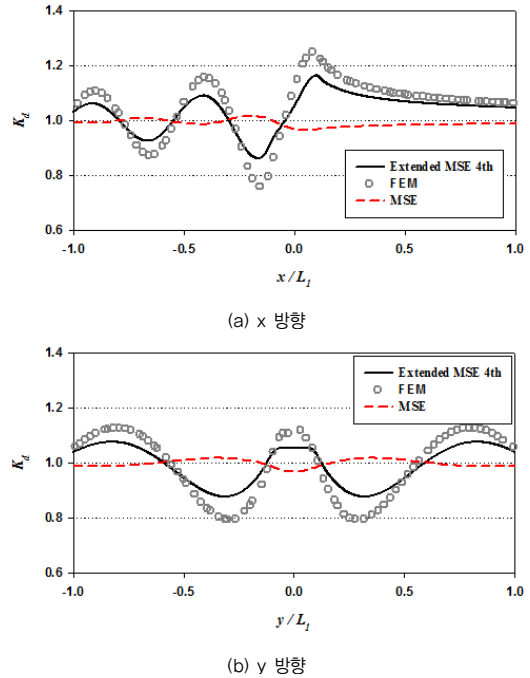
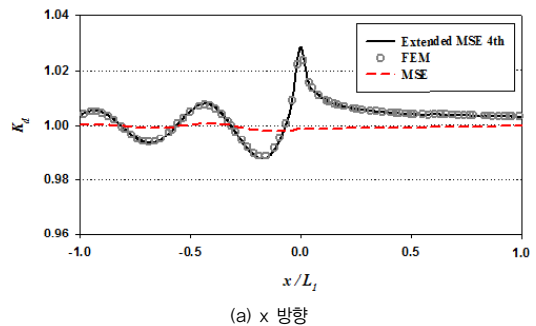
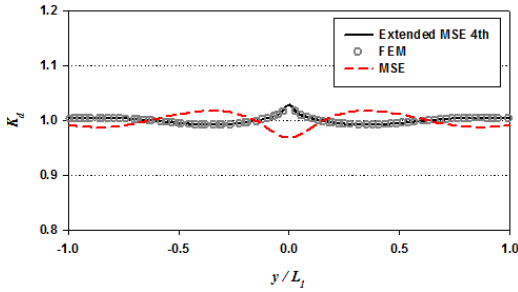


그림 5. 중간수심영역에서 해석해와 수치해의 비교

또한, 동일한 지형조건에서 천해영역($k_1h_1=0.167$)을 만족하는 경우의 해석해와 수치해를 비교하였다. 해석해와 수치해는 함몰지형에 의해 비슷한 파고 분포를 나타냈다. 함몰지형의 전면에서는 입사파와 반사파의 중첩으로 인해 정상파가 형성되었으며 함몰지형 양 옆으로도 입사파와 굴절파가 만나 정상파가 형성되는 것을 확인하였다[그림 6]. 중간수심영역과 마찬가지로 기존의 환경사 방정식보다 본 연구에서 계산된 해석해가 수치해와 더 일치하는 결과를 나타냈다.





(b) y 방향

그림 6. 천해영역에서 해석해와 수치해의 비교

중간수심영역과 천해영역에서의 해석해와 수치해의 비교 결과 중간수심영역에서 해석해와 수치해가 상대적으로 오차가 크게 나타났다. 이는 확장형 환경사 방정식의 해석해를 유도하는 과정에서 천해 가정을 사용하였고 또한 Hunt(1979)[4]의 근사식이 중간수심영역에서의 오차가 천해영역에서의 오차보다 상대적으로 크게 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 축대칭 함몰 지형 위를 통과하는 파의 변형에 대해서 확장형 환경사 방정식의 해석해를 유도하였다. 확장형 환경사 방정식의 기본 형태인 편미분 방정식을 상미분 방정식으로 변환하기 위해 변수분리법을 사용하였으며 파속과 군속도로 표현되는 계수들은 Hunt(1979)[4]가 제안한 파수에 관한 근사식을 이용하여 양함수의 형태로 나타났다. Hunt(1979)[4]의 근사식에 들어가는 다항식은 차수가 증가할수록 선형분산 관계식의 결과에 가까워지지만 4차항 이상에서는 그 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 해석적으로 수렴성을 판단할 수 있는 4차항까지만 적용하여도 해석해는 충분한 신뢰성을 갖는다고 판단된다. 또한 확장형 환경사 방정식은 기존의 환경사 방정식에 바닥 경사의 제곱항과 곡률항이 추가된 것인데 이 추가된 항은 멱급수의 형태로 변화하고 그 계수를 최소자승법을 이용하여 결정하였다. 실제의 함수값과 근사항들을 비교한 결과 멱급수 형태의 다항식의 처음 6개항만을 사용

하여도 실제의 함수에 매우 근접한다는 것을 파악하였고 따라서 해석해를 구하는 과정에서 6개의 항만을 사용하여 고차항을 근사하였다. 모든 계수들의 형태를 다항식의 형태로 바꾼 후 해의 형태를 Frobenius 급수로 가정하여 해를 구하였으며 Frobenius 이론에 의하여 해석해가 대부분의 파랑과 수심조건에 대해 수렴한다는 것을 알 수 있었다. 수치해와 해석해의 비교를 통해 천해역과 중간수심영역에서 파의 거동이 잘 모의되는 것을 확인하였다. 천해역에 비해 중간수심영역에서 상대적으로 큰 오차를 나타냈으며 이는 Hunt(1979)[4] 근사식이 중간수심영역에서 큰 오차를 나타냈기 때문인 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] J. C. W. Berkhoff, "Computation of combined refraction-diffraction," in Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp.471-490, 1972.
- [2] C. N. Chandrasekera and K. F. Cheung, "Extended linear refraction-diffraction model," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.123, pp.280-296, 1997.
- [3] S. Homma, "On the behavior of seismic sea waves around circular island," Geophysics Management. XXI, pp.199-208, 1950.
- [4] J. N. Hunt, "Direct solution of wave dispersion equation," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.105, pp.457-459, 1979.
- [5] I. G. Jonsson, O. Skovgaard, and O. Brink-Kjaer, "Diffraction and refraction calculations for waves incident on an island," Journal of Marine Research, Vol.34, pp.469-496, 1976.
- [6] T. H. Jung and K. D. Suh, "An analytic solution to the mild slope equation for waves propagating over an axis-symmetric pit," Coastal Engineering, Vol.54, pp.865-877, 2007.

[7] T. H. Jung and K. D. Suh, "An analytic solution to the extended mild-slope equation for long waves propagating over an axi-symmetric pit," Wave Motion, Vol.45, pp.835-845, 2008.

[8] 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 Engineering, Vol.51, pp.421-437, 2004

[9] K. D. Suh, T. H. Jung, and M. C. Haller, "Long waves propagating over a circular bowl pit," Wave Motion, Vol.42, pp.143-154, 2005.

[10] A. C. Vastano and R. O. Reid, "Tsunami response for island : verification of a numerical procedure," Journal of Marine Research, Vol.25, pp.129-139, 1967.

[11] X. Yu and Y. Zhang, "Scattering of long waves around a circular island mounted on a conical shoal," Wave Motion, Vol.23, pp.353-362, 1996.

[12] 정원무, 이길성, 박우선, 채장원. "확장형 환경사 방정식에 기초한 Galerkin 유한요소 모형", 한국해안·해양공학회지, 제10권, 제4호, pp.174-186, 1998.

[13] 박우선, 전인식, 정원무, "항만 부진동 해석을 위한 무한요소", 한국해안·해양공학회지, 제6권, 제2호, pp.139-149, 1994.

이 승 오(Seung Oh Lee)

정회원

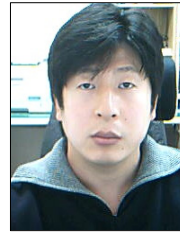


- 1997년 2월 : 한양대학교 토목공학과(공학사)
- 1999년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2006년 5월 : Georgia Institute of Technology 토목공학과(공학박사)

▪ 2007년 9월 ~ 현재 : 홍익대학교 토목공학과 조교수
 <관심분야> : 수리학, 환경수리학, 해안공학

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 토목공학과 조교수
 <관심분야> : 해안공학

저 자 소 개

김 수 영(Sooyoung Kim)

정회원



- 2007년 2월 : 홍익대학교 토목공학과(공학사)
- 2011년 2월 : 홍익대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

<관심분야> : 수리학, 수치모의, 해안공학