

3차원 함몰 지형에서 소멸파 성분의 영향

Effects of evanescent modes on three-dimensional depression of seabed

정 태 화* / 김 형 준** / 조 용 식***

Jung, Tae-Hwa / Kim, Hyung-Joon / Cho, Yong-Sik

Abstract

Evanescence modes which are the other solutions of the Laplace equation for the linear dispersion equation may affect the wave transformation especially when a water depth varies abruptly. In this study, the effects of evanescent modes for a three-dimensional depression of seabed are investigated by using the eigenfunction expansion method. A convergence test is first carried out by changing numbers of domains and evanescent modes. The wave transformation for various depressions of seabed is then calculated under condition that the solution of the eigenfunction expansion method is converged.

keywords : eigenfunction expansion method, wave transformation, evanescent mode, depression of seabed

요 지

파랑의 문제에서 진행파 성분 이외에 Laplace 방정식의 또 다른 해인 소멸파 성분은 주로 수심이 급하게 변화할 때 파랑의 변형에 영향을 미친다. 본 연구에서는 고유함수전개법을 사용하여 3차원 함몰 지형에서 파랑의 변형에 대한 소멸파 성분의 영향을 검토하였다. 먼저, 구간의 수와 소멸파 성분의 수에 변화를 주면서 수렴성 검사를 하였으며 다음으로 소멸파 성분을 고려하면서 3차원 함몰지형에서의 파랑변형을 연구하였다.

핵심용어 : 고유함수전개법, 파랑의 변형, 소멸파 성분, 함몰 지형

1. 서 론

심해에서 발생한 파랑은 천해영역에 진입하면서 회절, 굴절, 천수, 쇄파 또는 반사등의 현상을 겪으면서 변형을 일으킨다. 이렇게 변형된 파랑은 해안 환경이나 연안 구조물의 안정성에 직간접적인 영향을 미치기 때문에 이러한 파랑변형을 정확하게 예측하는 일은 해안 공학의 관점에서 매우 중요한 일이 아닐 수 없다. 파랑

변형을 예측하는 방법에 관하여 지금까지 많은 연구가 이루어졌으며, 그 중 하나가 고유함수전개법을 이용한 해석적인 접근법이다. 고유함수전개법은 수치모델을 이용하지 않고 선형파 성분의 해를 구할 수 있는 해석적인 기법 중 하나이며, Bessel 함수를 이용하는 해석해 (Dean, 1964; Bender and Dean, 2003; Lin and Liu, 2005; Chang and Liou, 2007)와는 달리 소멸파 성분을 고려하면서 다양한 수심 변화 및 조건에서 해를 구할

* 한밭대학교 토목공학과 전임강사, 공학박사
Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea
** 한양대학교 건설환경공학과 석사과정
Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
*** 교신저자, 한양대학교 건설환경공학과 교수, 공학박사
Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
(e-mail: ysc59@hanyang.ac.kr)

수 있다는 장점이 있다.

고유함수전개법을 이용한 연구는 Bremmer (1951)가 전자기파에 적용하면서 처음으로 제시한 후 Takano (1960)가 파랑 변형 연구에 적용하면서 본격적으로 진행되었다. 국내에서는 조용식과 이창훈(1998)이 수심이 변화하는 지형의 반사율 산정을 위해 사용하였으며, 정재상 등(2007)이 다열 불투과성 수중방과제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 해석을 위해 사용하였다. 최근 강규영 등(2007)은 고유함수전개법을 2차원 함몰 지형에 적용하여 수렴해를 얻기 위한 적절한 수의 소멸과 성분과 구간의 수를 검토한 바 있다. 국외 연구로는 Kirby and Dalrymple (1983), Liu *et al.* (1992), Cho and Lee (2000) 및 Bender and Dean (2003) 등이 있다. 그러나 기존에 수행된 대부분의 연구는 연직 2차원 지형에 국한되어 수행되어 왔다.

3차원 지형에 대한 고유함수전개법은 Bender and Dean (2005)에 의해서 처음으로 제시되었다. 그러나 그들의 연구에서는 수렴해를 얻기 위한 구간 및 소멸과 성분의 개수에 관한 다양한 검토가 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 다양한 3차원 함몰 지형에 대하여 수렴해를 얻기 위한 구간 및 소멸과 성분의 개수에 관하여 검토해 보았다. 수심의 영향을 받는 천해영역 및 중간수심영역에서 축대칭 함몰 지형의 방사 방향 기울기 및 곡률에 변화를 주면서 구간을 나누어 해의 수렴성을 확인하여 적절한 구간의 수를 결정한 후 소멸과 성분의 수를 달리하면서 해의 수렴성을 체크하였다. 마지막으로 수렴성이 확보된 해석해를 이용하여 다양한 기울기를 갖는 함몰 지형에서 소멸과 성분을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 파랑변형을 비교하여 소멸과 성분이 파랑변형에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 고유함수전개법

2.1 해의 유도

유체를 비압축성 및 비회전성이라고 가정하면 다음과 같은 3차원 Laplace 방정식을 지배방정식으로 사용할 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 속도포텐셜을 의미하며, r , θ 및 z 는 각각 방사 방향, 원주 방향, 연직 방향 좌표를 의미한다. 해의 형태를 $\phi(r, \theta, z) = R(r)\Theta(\theta)Z(z)$ 로 가정한 후 연직

방향 성분을 다음과 같이 진행과 성분으로 가정하면,

$$Z(z) = \cosh(k(h+z)) \quad (2)$$

Eq. (1)은 Bessel 방정식으로 변환이 되어 Bessel 함수($J_n(kr)$ 및 $H_n(kr)$)를 해의 형태로 취한다. 여기서 h 는 수심을 의미하며 k 는 다음과 같은 분산관계식을 통하여 구하여지는 파수이다.

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

여기서 ω 는 각주파수, g 는 중력가속도를 의미한다.

연직 방향 분포를 다음과 같이 소멸과 성분으로 가정하면,

$$Z(z) = \cos(\kappa_m(h+z)) \quad (4)$$

Eq. (1)은 수정 Bessel 방정식이 되며 해의 형태는 수정 Bessel 함수($k_n(\kappa_m r)$ 및 $I_n(\kappa_m r)$)가 된다. 여기서 κ_m 은 소멸과의 파수를 의미하며 다음과 같은 식을 통하여 구할 수 있다.

$$\omega^2 = -g\kappa_m \tan(\kappa_m h) \quad (m=1 \rightarrow \infty) \quad (5)$$

수심이 변화하는 영역을 일정한 수심의 연속이라고 가정하면 Fig. 1과 같이 세 개의 영역이 존재할 수 있다.

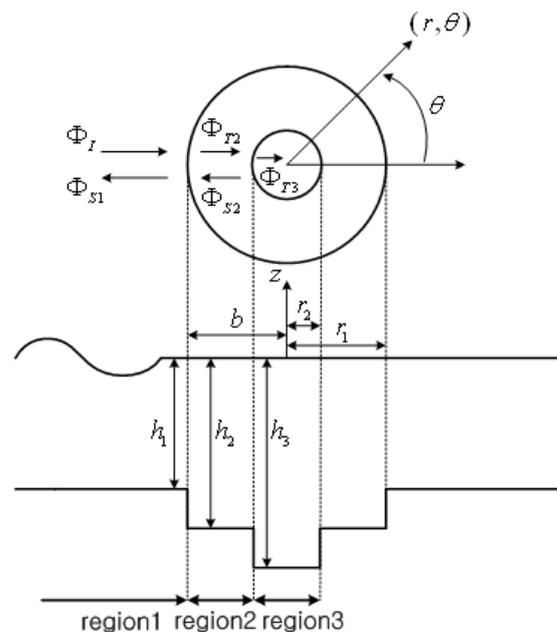


Fig. 1. Schematic Diagram of Depression of Seabed

영역 1에서는 입사파와 이러한 입사파가 영역 2에 의해 사방으로 산란하면서 생기는 산란파가 존재하게 되며, 영역 2에서는 영역 1의 입사파 중에서 산란되지 않은 투과파와 영역 3에 의해 산란된 산란파가 존재한다. 마지막으로 가장 안쪽 지역인 영역 3에서는 영역 2에서 산란되지 않은 투과파만이 존재한다. 각각의 영역에서 해의 형태는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_I(r, \theta, z, t) + \phi_S(r, \theta, z, t) \\ &= M_I \left[\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_{1,n} \cos(n\theta) J_n(k_1 r) \right] \\ &\quad \times \frac{\cosh[k_1(h_1 + z)]}{\cosh(k_1 h_1)} e^{-i\omega t} \\ &\quad + \left[\sum_{n=0}^{\infty} A_{1,n} \cos(n\theta) H_n^1(k_1 r) \right] \\ &\quad \times \frac{\cosh[k_1(h_1 + z)]}{\cosh(k_1 h_1)} e^{-i\omega t} \\ &\quad + \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{1,n,m} K_n^{egat} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \frac{\cos[\kappa_{1,n}(h_1 + z)]}{\cos(\kappa_{1,n} h_1)} \right] \cos(n\theta) \right\} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \phi_2 &= \phi_T(r, \theta, z, t) + \phi_S(r, \theta, z, t) \\ &= \left[\sum_{n=0}^{\infty} A_{2,n} \cos(n\theta) H_n^1(k_2 r) \right] \\ &\quad \times \frac{\cosh[k_2(h_2 + z)]}{\cosh(k_2 h_2)} e^{-i\omega t} \\ &\quad + \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \alpha_{2,n,m} K_n(\kappa_{2,m} r) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \frac{\cos[\kappa_{2,m}(h_2 + z)]}{\cos(\kappa_{2,m} h_2)} \right] \cos(n\theta) \right\} e^{-i\omega t} \\ &\quad + \left[\sum_{n=0}^{\infty} B_{2,n} \cos(n\theta) J_n(k_2 r) \right] \\ &\quad \times \frac{\cosh[k_2(h_2 + z)]}{\cosh(k_2 h_2)} e^{-i\omega t} \\ &\quad + \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_{2,n,m} I_n(\kappa_{2,m} r) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \frac{\cos[\kappa_{2,m}(h_2 + z)]}{\cos(\kappa_{2,m} h_2)} \right] \cos(n\theta) \right\} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \phi_3 &= \phi_T(r, \theta, z, t) \\ &= \left[\sum_{n=0}^{\infty} B_{3,n} \cos(n\theta) J_n(k_3 r) \right] \\ &\quad \times \frac{\cosh[k_3(h_3 + z)]}{\cosh(k_3 h_3)} e^{-i\omega t} \\ &\quad + \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \beta_{3,n,m} I_m(\kappa_{3,m} r) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times \frac{\cos[\kappa_{3,m}(h_3 + z)]}{\cos(\kappa_{3,m} h_3)} \right] \cos(n\theta) \right\} e^{-i\omega t} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $M_I = -igH/2\omega$ 는 입사파의 파고와 관련된 값이며, n 은 고유 함수의 개수, m 은 소멸파의 개수 그리고

아래첨자 $j(=1,2,3)$ 는 영역을 나타낸다. A, B, α 그리고 β 는 각각의 영역에서의 진폭을 나타내는 미지 계수이며, γ_n 은 다음과 같이 정의되는 Euler 상수이다.

$$\gamma_n = \begin{cases} 0 & \text{for } n=0 \\ 1 & \text{for } n \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

2.2 경계조건

고유함수 전개법으로 표현된 식은 수심이 급변하는 구간에 적용되어진다. 따라서 수심이 연속적으로 변하는 지역에 대해서는 적당한 구간으로 나누어 계단형 지형으로 표현한 후 식을 적용할 필요가 있다. 이론상으로는 무한개의 소멸파를 고려해야 하지만 수치적으로 계산하기 위해 N_e 개의 소멸파만을 고려하고, N_s 개의 구간에 적용하면 $(N_s - 1)(2 + 2N_e)$ 개의 미지 계수가 생기게 된다. 미지 계수를 구하기 위해서는 경계조건이 필요하며 이것을 이용하여 미지 계수값을 구할 수 있다. 경계조건은 수심이 변하는 지점에서 경계조건을 사용하여 구할 수 있다.

$$\phi_j = \phi_{j+1} \quad (r = r_j, j = 1 \rightarrow N_s) \quad (10)$$

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial r_j} = \frac{\partial \Phi_{j+1}}{\partial r_j} \quad (r = r_j, j = 1 \rightarrow N_s) \quad (11)$$

Eq. (10)은 동역학적 경계조건으로 경계면에서 압력이 연속임을 의미하며, Eq. (11)은 운동학적 경계조건으로 경계면에서 방사 방향 유속이 연속임을 나타낸다. 이 식을 풀기 위해 양변을 수심에 대해 적분하며, 고유함수의 직교성을 이용한다. 수심이 깊어지는 구간 $(-h_2 \leq -h_1)$ 에 경계조건을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{-h_1}^0 \phi_1(r, z) \cosh[k_1(h_1 + z)] dz = \quad (12a)$$

$$\int_{-h_1}^0 \phi_2(r, z) \cosh[k_1(h_1 + z)] dz$$

$$\int_{-h_1}^0 \phi_1(r, z) \cos[\kappa_{1,n}(h_1 + z)] dz = \quad (12b)$$

$$\int_{-h_1}^0 \phi_2(r, z) \cos[\kappa_{1,n}(h_1 + z)] dz \quad (n = 1 \rightarrow N_e)$$

$$\int_{-h_1}^0 \frac{\partial \phi_1}{\partial r}(r,z) \cosh[k_2(h_2+z)] dz = \int_{-h_1}^0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r}(r,z) \cosh[k_2(h_2+z)] dz \quad (12c)$$

$$= \int_{-h_2}^0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r}(r,z) \cosh[k_2(h_2+z)] dz$$

$$\int_{-h_1}^0 \frac{\partial \phi_1}{\partial r}(r,z) \cos[\kappa_{2,n}(h_2+z)] dz = \int_{-h_1}^0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r}(r,z) \cos[\kappa_{2,n}(h_2+z)] dz \quad (12d)$$

$$= \int_{-h_2}^0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r}(r,z) \cos[\kappa_{2,n}(h_2+z)] dz \quad (n=1 \rightarrow N_c)$$

Eqs. (12a) and (12b)는 동역학적 경계조건을 적용한 것으로 Eq. (12a)는 진행파 성분에 대해서 그리고 Eq. (12b)는 소멸파 성분에 대해서 고유함수의 직교성을 이용하였다. Eqs. (12c) and (12d)는 운동학적 경계조건을 적용하였으며 Eq. (12c)는 진행파 성분에 대해서, Eq. (12d)는 소멸파 성분에 대해서 고유함수의 직교성을 이용하였다. 운동학적 경계조건인 경우 수심이 깊은 구간에서 연직벽에 대한 유속은 불투과성에 의해 항상 '0'이므로 적분 하한을 깊은 수심 값으로 표현할 수 있다. Eqs. (12b) and (12d)의 경우 소멸파의 개수만큼 식이 만들어진다. 수심이 알아지는 구간($-h_1 \leq -h_2$)에 대해서도 같은 방법으로 경계조건을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{-h_2}^0 \phi_1(r,z) \cosh[k_2(h_2+z)] dz \quad (13a)$$

$$= \int_{-h_2}^0 \phi_2(r,z) \cosh[k_2(h_2+z)] dz$$

$$\int_{-h_2}^0 \phi_1(r,z) \cos[\kappa_{2,n}(h_2+z)] dz \quad (13b)$$

$$= \int_{-h_2}^0 \phi_2(r,z) \cos[\kappa_{2,n}(h_2+z)] dz \quad (n=1 \rightarrow N_c)$$

$$\int_{-h_1}^0 \frac{\partial \phi_1}{\partial r}(r,z) \cosh[k_1(h_1+z)] dz \quad (13c)$$

$$= \int_{-h_2}^0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r}(r,z) \cosh[k_1(h_1+z)] dz$$

$$\int_{-h_1}^0 \frac{\partial \phi_1}{\partial r}(r,z) \cos[\kappa_{1,n}(h_1+z)] dz \quad (13d)$$

$$= \int_{-h_2}^0 \frac{\partial \phi_2}{\partial r}(r,z) \cos[\kappa_{1,n}(h_1+z)] dz \quad (n=1 \rightarrow N_c)$$

$(N_s - 1)(2 + 2N_c)$ 개의 식을 연립하여 계산하면 미지

계수를 모두 구할 수 있으므로 전체 계산 영역에서의 파고 값을 계산할 수 있다.

3. 결과 분석

본 연구에서 유도된 해를 이용하여 Fig. 2와 같이 함몰 지형에 대한 소멸파 성분의 영향을 검토해 보았다. Fig. 2에서 h_0 는 함몰 지형 중심에서의 수심, h_1 은 함몰 지형 밖에서의 일정수심, b 는 함몰 지형의 반지름, a 는 함몰 지형을 자유수면까지 연장하였을 경우 자유수면에서의 반지름을 의미하며 $a = b/\sqrt{1-h_1/h_0}$ 의 관계식을 이용하여 구할 수 있다. 여기서 α 는 차수를 의미한다.

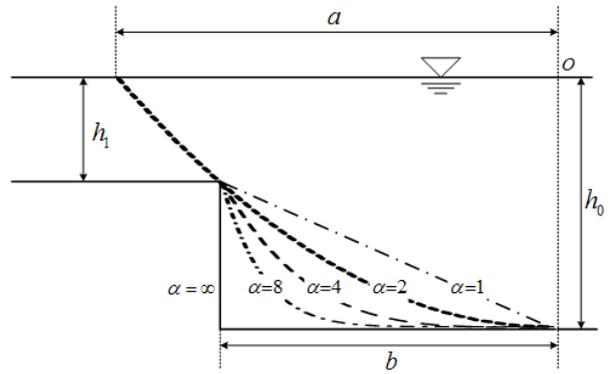


Fig. 2. Depth Variation for Different α

함몰 지형 내부에서의 수심은 Eq. (14)를 사용하여 나타내었다. 본 연구에서는 다양한 함몰 지형을 고려하기 위하여 천해영역($kh = 0.167$)과 중간수심영역($kh = 1.336$)에서 $\alpha = 1$ 및 8의 값을 사용하여 모의하였다.

$$h = \begin{cases} h_0 \left(1 - \frac{r^\alpha}{a^\alpha}\right), & 0 \leq r < b \\ h_1 = h_0 \left(1 - \frac{b^\alpha}{a^\alpha}\right), & b \leq r \end{cases} \quad (14)$$

여기서, r 은 중심에서 방사 방향의 거리를 의미한다.

3.1 구간의 수 검토

고유함수 전개법을 적용하여 해를 구하기 위해서는 지형을 일정 수심을 가지는 여러 구간으로 나누어 계산하여야 한다. 구간을 적게 나누었을 경우 해의 정확도가 떨어지게 되며, 지나치게 많이 나누었을 경우에는 계산 시간이 오래 걸리기 때문에 수렴해를 얻기 위해 필요한 적절한 구간의 수를 검토할 필요가 있다. 본 연구에서 사용하는 해는 서로 다른 수심을 갖는 영역에서의 경계에서 정합조건을 사용하여 구하게 된다. 따라서 수렴성 검토는 경계선에서의 파고분포를 이용하여 수행하였으며 일반적으로 원점에서 멀어질수록 수렴속도가 느려지기 때문에 가장 바깥쪽 경계선을 수렴기준선으로 정하였다. 각각의 파랑 및 지형조건에서 변수심을 구성하는 일정수심의 수를 다르게 한 후 상대파고값을 비교하는 방법을 통해 적절한 구간의 수를 확인하였다. 여기에서, 상대파고란 그 지점에서의 파고값을 입사파의 파고값으로 나눈 무차원값을 의미한다. Fig. 3은 함몰 지형의 경계에서 원호 방향으로 구간의 수에 따른 해의 수렴성을 검토한 것이다. Fig. 1에서 정의되었듯이 파가 입사하는 함몰 지형의 전면은 입사각이 180도이며 후면은 0도가 된다. 해를 얻기 위한 계산 조건은 $h_0 = 6.4\text{ m}$, $h_1 = 3.2\text{ m}$, $b = 0.5L$, $kh = 0.167$ 이며 소멸파 성분은 고려하지 않았다. 여기서, L 은 파수 k 에 해당하는 파장을 의미한다. 수심이 완만하게 변하는 경우, 즉 차수가 낮은 경우($\alpha = 1$)에는 구간의 수를 10개 정도로만 나누면 수렴하는 결과를 보였으나 수심이 급변하는 경우($\alpha = 8$)에는 구간의 수를 20개 이상으로 나누어야 수렴하였다. 그러나 구간의 수에 따른 파고 변화는 두드러지게 발생하지 않았다.

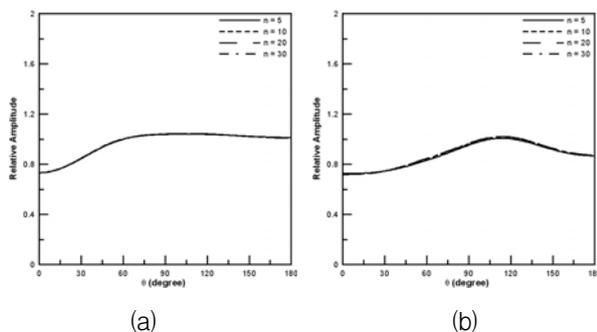


Fig. 3. The Variation of Relative Amplitude for Different Numbers of Step in the Shallow Water Depth: (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 8$

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 조건에서 상대수심을 중간수심영역($k_1 h_1 = 1.336$)으로 바꾸어 구간의 수에 따른 해의 수렴성을 검토한 것이다. $\alpha = 1$ 인 경우에는 구간의 수를 30 정도로 나누면 수렴하는 결과를 보였으나 $\alpha = 8$ 인 경우에는 50 이상으로 나누어야 수렴하는 해를 얻을 수 있었다. 결론적으로 연직 2차원 모델의 결과와 비슷하게 수심 변화가 크고 상대수심이 증가할수록 수렴하기 위해서는 많은 구간이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한 파가 입사하는 정면에서 소멸파의 영향을 가장 크게 받았으며 후면으로 갈수록 영향이 줄어들었다.

3.2 소멸파의 수렴성 검토

다음으로 수렴해를 얻기 위해 필요한 소멸파 성분의 개수를 조사해 보았다. 3.1절의 결과를 참고하여 충분한 수의 구간을 나눈 후, 소멸파 성분의 개수를 다르게 하면서 상대파고값을 비교하였다. Figs. 5 and 6은 각각 Figs. 3 and 4의 동일한 경계선을 따라 천해영역과 중간수심영역에서 상대파고를 계산하여 비교한 그림이다. 계산 조건은 Fig. 3에서 사용한 조건과 동일하다. 천해 영역에서는 바다 경사면이 완만한 경우 소멸파의 영향을 거의 받지 않았으며 경사면이 급한 경우에도 소멸파 성분의 영향은 미미하게 발생하였다. 중간수심 영역에서는 소멸파 성분의 영향이 크게 나타났다. 전체적으로 함몰 지형의 전면부와 후면부에서 소멸파의 영향이 크게 나타났으며 이러한 영향은 기울기가 급할수록 크게 발생하였다. 소멸파 성분이 고려됨에 따라 소멸파 성분이 고려되기 전보다 파랑의 반사가 커지고 회절이 줄어들면서 함몰 지형의 전면부와 후면부에서는 파고가 증가하였으며 옆면에서는 파고가 감소하는 경향이 발생하였다.

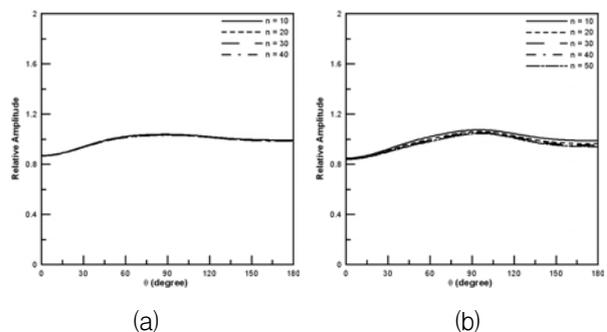


Fig. 4. The Variation of Relative Amplitude for Different Numbers of Step in the Intermediate Water Depth: (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 8$

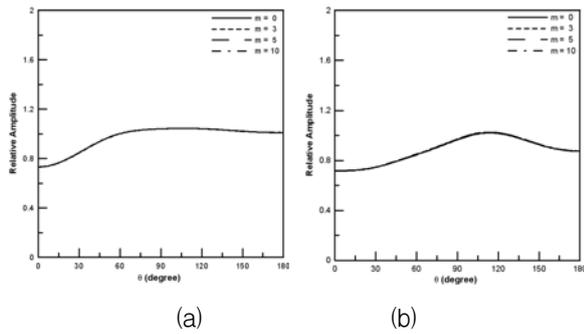


Fig. 5. The Variation of Relative Amplitude for Different Numbers of Evanescent Mode in the Shallow Water Depth: (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 8$

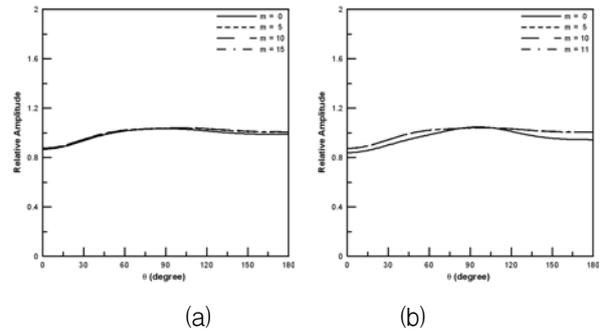


Fig. 6. The Variation of Relative Amplitude for Different Numbers of Evanescent Mode in the Intermediate Water Depth: (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 8$

Table 1. Numbers of Region and Evanescent Mode for Convergence

	천해영역($kh = 0.167$)		중간수심영역($kh = 1.336$)	
	구간의 수	소멸파의 개수	구간의 수	소멸파의 개수
$\alpha = 1$	10	3	30	10
$\alpha = 8$	20	3	50	10

3.3 소멸파의 영향

지금까지 수렴하는 해를 얻기 위해 필요한 구간의 수와 소멸파 성분의 수를 검토해 보았다. 이러한 값을 바탕으로 $\alpha = 1$ 및 8인 함몰 지형에서 소멸파 성분의 영향을 검토해 보았다. 원호 방향으로의 파고분포는 Figs. 5 and 6에 도시하였기 때문에 이번 절에서는 x 및 y 방향으로의 파고분포에 대한 그림만 추가하였다. 계산을 위해 사용한 구간 및 소멸파 성분의 수는 Table 1과 같다.

Fig. 7은 천해영역에서 $\alpha = 1$ 및 8인 경우에 소멸파 성분을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 상대 파고값을 계산하여 비교한 그림이다. Fig. 5의 결과와 마찬가지로 함몰 지형 내부의 기울기 변화에 상관없이

전체적으로 소멸파의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 함몰 지형의 전면($x/L < 0.5$)에서는 함몰 지형에 의해 반사된 파와 입사파가 중첩되어 부분 정상파가 형성되었으며 양 옆으로도 입사파와 굴절에 의한 산란파가 중첩되어 비슷한 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 파의 반사와 산란으로 인하여 함몰 지형의 후면($x/L > 0.5$)에서는 큰 파고 감소가 발생하였다. 함몰 지형의 후면 경계 앞 부근($x/L \approx 0.3 \sim 0.4$)에서는 후면 경계에서 반사된 파와 전면 경계를 지나온 투과파가 만나 정상파가 형성되었다.

Fig. 8은 중간수심영역에서 $\alpha = 1$ 및 8인 경우에 소멸파 성분을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 상대 파고값을 계산하여 비교한 그림이다. Fig. 6과 함께 고려해보면 전체적으로 소멸파 성분이 고려됨에 따라

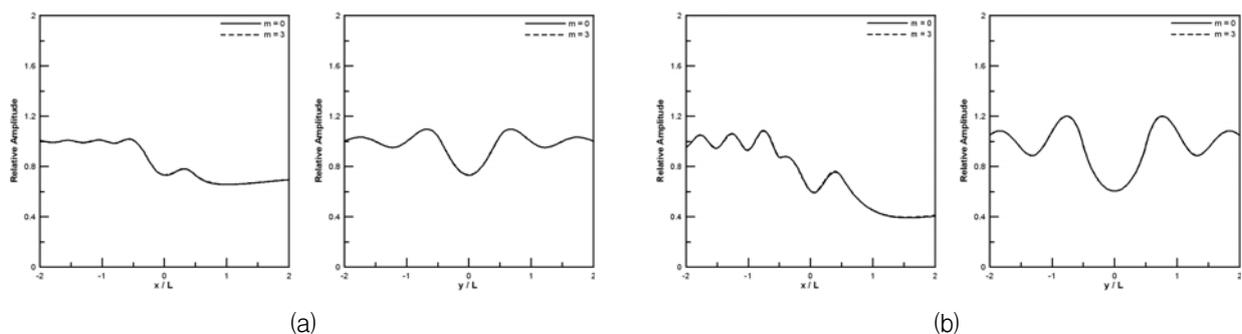


Fig. 7. Comparison of Relative Amplitude between with Evanescent Mode and without Evanescent Mode in the Shallow Water Depth: (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 8$

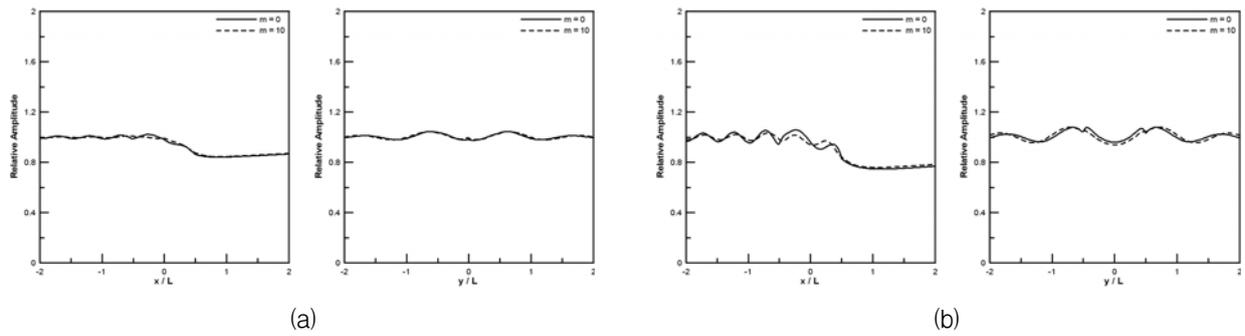


Fig. 8. Comparison of Relative Amplitude between with Evanescent Mode and without Evanescent Mode in the Intermediate Water Depth: (a) $\alpha = 1$; (b) $\alpha = 8$

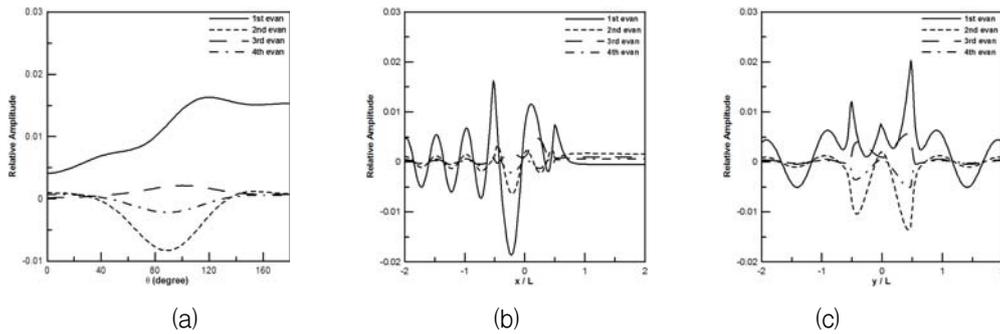


Fig. 9. Effect of Each Evanescent mode in the Shallow Water Depth: (a) Circumferential Direction; (b) x -axis; (c) y -axis

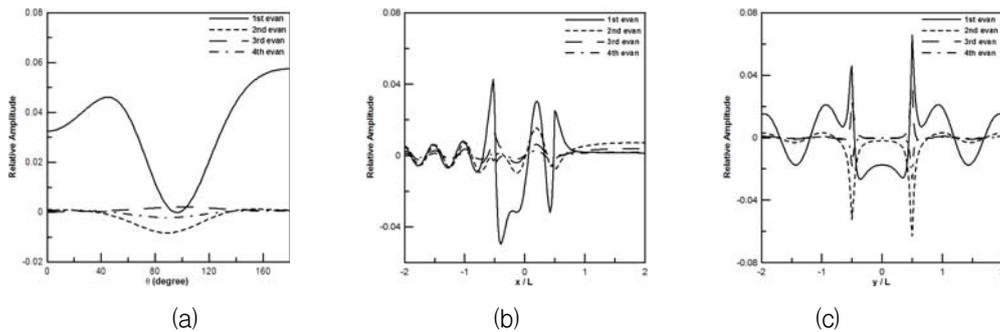


Fig. 10. Effect of Each Evanescent mode in the Shallow Water Depth: (a) Circumferential Direction; (b) x -axis; (c) y -axis

함몰 지형의 전면 및 후면에서 파고 상승이 발생하였으며 이러한 경향은 함몰 지형 내부의 수심이 급하게 변할수록 두드러지게 나타났다. 파고 분포는 소멸과 성분을 고려하지 않았을 경우에는 천해영역과 비슷한 경향이 나타났으나 소멸과 성분이 고려되었을 경우에는 파고 전면과 후면에서 파고가 상승하였으며 굴절에 의한 효과가 상대적으로 미미하게 나타났다.

다음으로 각각의 소멸과 성분이 파랑 변형에 미치는 영향을 검토해보았다. Figs. 9 and 10은 소멸과 성분의 영향이 크게 나타난 $kh = 1.336$ 인 조건에서 각각의 소멸과 성분에 의한 파고분포를 계산하여 나타낸 결과이

다. 즉, n 번째 소멸과 성분에 의한 파고분포는 n 번째 소멸과 성분까지 포함한 해석해에서 $n-1$ 번째 소멸과 성분까지 포함한 해석해의 값을 빼서 구하였다. 경계에서의 파고분포를 보면 홀수 번째 소멸과 성분은 양의 파고분포를 짝수 번째 소멸과 성분은 음의 파고분포 값을 가지면서 서로 다른 위상을 갖는 것을 알 수 있었다. 그러나 이러한 위상 차이는 x 축을 따라서는 경계를 벗어나면서 줄어들어 전체적으로 비슷한 위상을 보였다. 이러한 현상은 y 축을 따라서도 비슷하게 발생하였다. 각각의 소멸과 성분으로 인한 파고의 크기는 첫 번째 소멸과의 경우 가장 큰 $O(10^{-1})$ 정도였으며 그 이후로

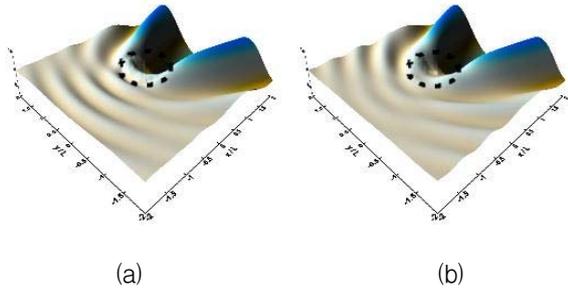


Fig. 11. Comparison of Relative Amplitude for $\alpha=1$ in the Intermediate Water Depth: (a) without Evanescent Mode (b) with Evanescent Mode

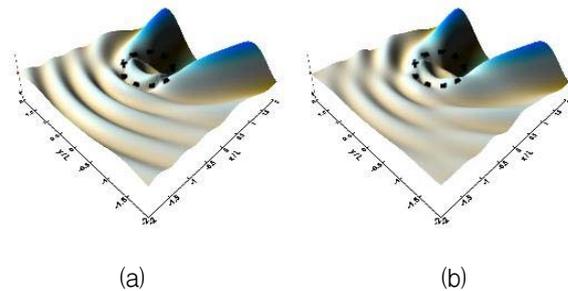


Fig. 12. Comparison of Relative Amplitude for $\alpha=8$ in the Intermediate Water Depth: (a) without Evanescent Mode (b) with Evanescent Mode

는 크게 감소하였다.

Figs. 11 and 12는 Fig. 8의 조건에서 전체 평면에 대한 자유수면을 그린 그림이다. 천해 조건의 경우 소멸파 성분의 영향이 거의 없을 뿐만 아니라 기존의 연구에서 많이 다루었기 때문에 본 연구에서는 중간수심 영역에서의 결과만을 분석해 보았다. Fig. 11은 수심이 완만하게 변하는 $\alpha=1$ 인 경우이다. 함몰 지형의 전면 경계부근에서, 소멸파 성분이 고려되지 않았을 경우에는 파고 변화가 급격하게 이루어졌으나 소멸파 성분이 고려되었을 경우에는 완만한 수면변위를 보였다. 결과적으로 함몰 지형의 전면에서 생성되는 부분 정상파의 크기도 감소하였다. Fig. 12는 수심이 급격하게 변하는 $\alpha=8$ 인 경우의 자유수면 그림이다. Fig. 11과 마찬가지로 소멸파 성분이 고려됨에 따라 함몰 지형의 전면 경계에서 파고가 감소하여 전면에서의 부분 정상파의 크기가 감소하였다. 이 경우, 함몰 지형의 내부에서의 파의 거동이 완만한 경우보다 복잡하게 나타났다. 함몰 지형의 후면 경계에서 반사가 크게 발생하여 이 파가 입사 방향에서 진행하는 파와 중첩이 되어 상대적으로 높은 파고가 함몰 지형의 후면 부근에서 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 고유함수 전개법을 이용하여 3차원 함몰 지형에서 소멸파가 파랑 변형에 미치는 영향을 연구하였다. 상대수심에 따라 수렴하는 정도는 달랐지만 일정 개수의 소멸파를 고려할 경우 수렴하는 경향을 알 수 있었다. 천해영역에서는 수심 변화에 상관없이 소멸파의 영향이 크지 않았으면 3개의 소멸파를 고려할 경우 충분히 수렴하는 결과를 얻었다. 반면 중간수심영역에서는 소멸파를 고려하지 않았을 경우와 고려하였을 경우의 파고 변화는 많은 차이를 나타냈으며

최소 10개 이상의 소멸파를 사용하여야만 수렴하는 해를 얻을 수 있었다.

수렴 해를 얻기 위해 필요한 구간의 수와 소멸파 성분의 개수에 대한 검토를 마친 후, 이 자료를 이용하여 수심 변화율이 서로 다른 함몰 지형에 대해 소멸파 성분의 영향을 검토하였다. 천해영역의 경우 소멸파 성분이 거의 영향을 미치지 않기 때문에 중간수심영역만을 고려하였다. 수심이 완만하게 변하는 경우와 급격하게 변하는 경우 모두 소멸파 성분이 고려됨에 따라 함몰 지형 전면 경계에서의 파고가 감소하였으며 결과적으로 함몰 지형 전면에서의 부분 정상파의 크기도 감소하였다. 수심 변화에 따른 차이점으로는, 함몰 지형이 완만하게 변하는 경우 함몰 지형 전면에서의 반사와 내부에서의 굴절에 의해 함몰 지형의 후면에서는 큰 파고 감소가 발생하였으나 함몰 지형 내부의 수심이 급격하게 변하는 경우에는 함몰 지형 후면 경계에서 파의 반사가 크게 발생하여 후면 경계 앞부분에서 상대적으로 높은 파고가 관측되었다.

감사의 글

본 논문의 1저자는 2009년도 한밭대학교 교내학술비 지원을 받아 연구를 수행하였으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 강규영, 정태화, 조용식 (2007). “다양한 함몰지형 위를 통과하는 파랑의 반사율 해석.” **한국수자원학회**, 제 40권, pp. 899-908.
- 정재상, 강규영, 조용식 (2007). “다열 불투과성 수중방파제를 통과하는 다방향 불규칙파랑의 해석.” **한국해안해양공학회지**, 제19권, pp. 29-37.

조용식, 이창훈 (1998). “수심이 변하는 지형을 통과하는 파랑의 반사율과 통과율 산정.” **대한토목학회 논문집**, 제18권, pp. 351-358.

Bender, C.J. and Dean, R.G. (2003). “Wave transformation by two-dimensional bathymetric anomalies with sloped transitions.” *Coastal Engineering*, Vol. 50, pp. 61-84.

Bender, C.J. and Dean, R.G. (2005). “Wave transformation by axisymmetric three-dimensional bathymetric anomalies with gradual transitions in depth.” *Coastal Engineering*, Vol. 53, pp. 331-351.

Bremmer, H. (1951). “The W.K.B approximation as the first term of a geometrical optical series.” *Communications on Pure and Applied Mathematics*, Vol. 4, pp. 105-115.

Chang, H.-K. and Liou, J.-C. (2007). “Long wave reflection from submerged trapezoidal breakwaters.” *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 185-191.

Cho, Y.-S. and Lee, C. (2000). “Resonant reflection of waves over sinusoidally varying topographies.” *Journal of Coastal Research*, Vol. 16, pp. 870-879.

Dean, R.G. (1964). “Long wave modification by linear transitions.” *Journal of Waterway and Harbors Division*, ASCE, Vol. 1, No. 90, pp. 1-29.

Kirby, J. and Dalrymple, R.A. (1983). “Propagation on oblique incident water waves over a trench.” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 133, pp. 47-63.

Lin, p. and Liu, H.-W. (2005). “Analytical study of linear long-wave reflection by a two-dimensional obstacle of general trapezoidal shape.” *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, pp. 822-830.

Liu, P.L.-F., Cho, Y.-S., Kostense, J.K. and Dingemans, M.W. (1992). “Propagation and trapping of obliquely incident wave groups over a trench with current.” *Applied Ocean Research*, Vol. 14, pp. 201-212.

Takano, K. (1960). “Effects d'un obstacle parallelepipedique sur propagation de la houle.” *Houille Blanche*, Vol. 15, pp. 247-267.

논문번호: 09-025	접수: 2009.03.02
수정일자: 2009.10.08/11.25	심사완료: 2009.11.25