

	(19) 대한민국특허청(KR) (12) 공개특허공보(A)	(11) 공개번호 10-2014-0097783 (43) 공개일자 2014년08월07일
(51) 국제특허분류(Int. Cl.) G06F 19/00 (2011.01) G06F 17/11 (2006.01)		(71) 출원인 한밭대학교 산학협력단
(21) 출원번호 10-2013-0010279		대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(22) 출원일자 2013년01월30일		(72) 발명자
심사청구일자 2013년01월30일		정태화
		대전광역시 유성구 동서대로 125 한밭대학교 S8동230호
		(74) 대리인
		김정수

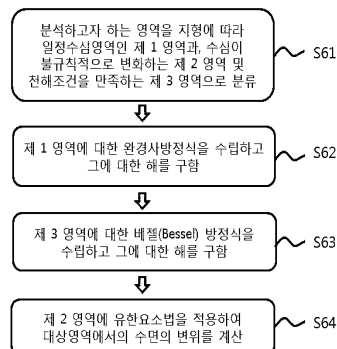
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 **완경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법**

(57) 요약

본 발명은 수치기법을 이용하여 완경사 방정식(mild-slope equation)을 이용한 유한 요소모형(finite element model)에서 경사 경계면(inclined boundaries)을 효율적으로 처리할 수 있는 방법에 관한 것으로, 본 발명에 따르면, 종래, 유한 요소모형에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 단점을 해소하기 위해, 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되기 때문에 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며 또한 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여 경사진 경계면을 적절하게 처리할 수 있는 완경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법이 제공된다.

대 표 도 - 도6



특허청구의 범위

청구항 1

연안에서 발생하는 수리현상을 해석하기 위한 유한 요소모형(finite element model)에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면(inclined boundaries)에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 문제점을 해소하기 위해, 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되므로 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며, 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여 환경사 방정식(mild-slope equation)을 이용한 유한 요소모형에서 경사진 경계면을 용이하게 처리하기 위한 일련의 처리를 컴퓨터에 실행시키도록 구성되는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법에 있어서,

상기 일련의 처리는,

분석하고자 하는 영역을 지형의 형태에 따라 제 1 영역, 제 2 영역 및 제 3 영역의 3개의 영역으로 분류하는 영역분류단계;

상기 제 1 영역에 대한 환경사방정식을 수립하고, 수립된 상기 환경사방정식에 대한 해를 구하는 제 1 영역 분석단계;

상기 제 3 영역에 대한 베셀(Bessel) 방정식을 수립하고, 상기 베셀 방정식에 대한 해를 구하는 제 3 영역 분석단계; 및

상기 제 2 영역에 유한요소법을 적용하여, 대상영역에서의 수면의 변위를 계산하는 제 2 영역 분석단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 영역분류단계는,

입사파와 반사파가 공존하는 일정수심영역을 상기 제 1 영역으로 분류하고,

수심이 불규칙적으로 변화하는 영역을 상기 제 2 영역으로 분류하며,

천해조건을 만족하는 영역으로서 기울기가 일정한 것으로 가정할 수 있는 영역을 상기 제 3 영역으로 분류하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 제 1 영역 분석단계는,

비압축성, 비점성 유체의 비회전 흐름을 가정할 때, 선형파에 관한 1차원 형태의 환경사 방정식을 이하의 수학적 식으로 나타내도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$\frac{d}{dx} \left(CC_g \frac{d\eta}{dx} \right) + k^2 CC_g \eta = 0$$

(여기서, n 는 자유수면변위이고, C 는 파속도이며, C_g 는 군속도이고,

$$\omega^2 = gk \tanh kh$$

ω 는 각속도, g 는 중력가속도, h 는 수심이라 할 때, k 는 수학적
정되는 파수이다)

에 의해 결

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 제 1 영역 분석단계는,

상기 환경사 방정식을 이하의 수학적식으로 나타내지는 이차 선형 상미분방정식으로 변환하고,

$$\frac{d^2 \eta}{dx^2} + k^2 \eta = 0$$

이하의 수학적식에 근거하여 상기 이차 선형 상미분방정식의 일반해를 구하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$\eta_1 = Ae^{ik_1 x} + Be^{-ik_1 x}$$

(여기서, 아래첨자 '1'은 제 1 영역을 나타내며, k_1 은 h_1 에 해당하는 파수를 의미하고, 입사파의 파고를 1이라 할 때, 미정 계수 A 는 1이고, 미정 계수 B 는 반사율 R 이다.)

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 제 3 영역 분석단계는,

파속도 및 군속도를 이하의 수학적식에 근거하여 근사하고,

$$C = C_g \approx \sqrt{gh}$$

상기 환경사 방정식을 이하의 수학적식에 의해 근사하며,

$$g \frac{d}{dx} \left(h \frac{d\eta_3}{dx} \right) + \omega^2 \eta_3 = 0$$

수심이 선형적으로 변할 경우, 상기 제 3 영역 내부에서의 기울기 m 을 고려한 $X = h(L) - h(L)(x - L)m$ 의 변수치환을 이용하여, 이하의 수학적식에 의해 지배방정식을 수립하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정

식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$X \frac{d^2 \eta_3}{dX^2} + \frac{d\eta_3}{dX} + s \eta_3 = 0$$

$$s = \frac{\omega^2}{gm^2}$$

(여기서, s는 이며, X는 제 3 영역 내부에서의 수심을 나타낸다.)

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 제 3 영역 분석단계는,

$t^2 = 4Xs$ 의 변수치환을 이용하여, 이하의 수학식에 의해 베셀(Bessel) 방정식이 수립하고,

$$t^2 \frac{d^2 \eta_3}{dt^2} + t \frac{d\eta_3}{dt} + t^2 \eta_3 = 0$$

이하의 수학식에 의해 제 3 영역에서의 해를 베셀(Bessel) 함수의 형태로 나타내도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$\eta_3 = CJ_0(2\sqrt{X(x)s}) + DY_0(2\sqrt{X(x)s})$$

(여기서, J_0 는 제 1종 0차 Bessel 함수, Y_0 는 제 2종 0차 Bessel 함수를 의미한다)

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 제 3 영역 분석단계는,

해안선에 접근할수록 수심 X 및 변수 $t = \sqrt{4Xs}$ 가 0으로 수렴하게 되어 상기 베셀(Bessel) 함수의 Y_n 이 발산하는 것을 방지하기 위하여, D = 0으로 하고 이하의 수학식에 근거하여 상기 제 3 영역에서의 해를 구하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$\eta_3 = CJ_0(2\sqrt{X(x)s})$$

청구항 8

제 7항에 있어서,

상기 제 2 영역 분석단계는,

자유수면변위를 $\eta = N^T \eta_2^e$ 라 할 때, 이하의 수학식에 의해 상기 환경사방정식을 개별요소에 대한 적분식으로 변환하고,

$$-\int_{\Omega^e} N \left[\frac{d}{dx} \left(CC_g \frac{dN^T}{dx} \eta_2^e \right) \right] - k^2 CC_g \int_{\Omega^e} NN^T d\Omega^e \eta_2^e = 0$$

(여기서, Ω^e 는 요소, N은 미리 규정한 보간함수 벡터, T는 전치행렬을 만드는 연산자, η_2^e 는 제 2 영역에서의 절점 자유수면 벡터를 의미한다)

이하의 수학식에 의해 전체행렬식을 구성하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$\sum_e \left(CC_g \int_{\Omega^e} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} d\Omega^e - k^2 CC_g \int_{\Omega^e} NN^T dA \right) \eta_2^e - CC_g N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=L} + CC_g N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

청구항 9

제 8항에 있어서,

상기 제 2 영역 분석단계는,

경계점(x = 0, L)에서 이하의 수학식으로 나타내지는 동역학적 및 운동학적 연속조건을 적용하고,

$$\eta_1 = \eta_2, \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \quad at \ x = 0$$

$$\eta_2 = \eta_3, \frac{\partial \eta_2}{\partial x} = \frac{\partial \eta_3}{\partial x} \quad at \ x = L$$

이하의 수학식에 의해 나타내지는 관계식을 구하며,

$$\left. \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right|_{x=0} = (-ik_1 \eta_2(x) + 2ik_1) \Big|_{x=0} \approx N \left. \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \right|_{x=0}$$

$$\left. \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right|_{x=L} = \frac{J_0'(2\sqrt{h(x)s})}{J_0(2\sqrt{h(x)s})} \eta_2(x) \Big|_{x=L} \approx N \left. \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \right|_{x=L}$$

상기 관계식을 상기 전체행렬식에 대입하여 계산함으로써, 이하의 수학식에 의해 대상 영역에서의 수면변위를 계산하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$\sum_e \left(\int_{\Omega^e} CC_g \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} d\Omega^e \right) \eta_2^e - \frac{J_0'(2\sqrt{h(x)s})}{J_0(2\sqrt{h(x)s})} CC_g N \eta_2^e \Big|_{x=L}$$

$$-ik_1 CC_g N \eta_2^e \Big|_{x=0} = -2ik_1 CC_g \Big|_{x=0}$$

청구항 10

제 9항에 있어서,

상기 처리방법은,

상기 제 1 영역 분석단계, 상기 제 2 영역 분석단계 및 상기 제 3 영역 분석단계를 통하여 얻어진 분석결과를 검증하는 검증단계를 더 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

청구항 11

제 10항에 있어서,

상기 검증단계는,

이하의 수학식에 의해 구해지는 해석해와 상기 상기 제 1 영역 분석단계, 상기 제 2 영역 분석단계 및 상기 제 3 영역 분석단계를 통하여 얻어진 수치해를 비교함으로써 상기 수치해의 검증을 수행하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법.

$$\eta_{analytic} = \begin{cases} e^{ik_1 x} + \frac{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) - J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})}{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) + J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})} e^{-ik_1 x}, & x \leq 0 \\ \frac{2ik_1}{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) + J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})} J_0(2\sqrt{X(x)s}), & x > 0 \end{cases}$$

청구항 12

청구항 1항 내지 11항 중 어느 한 항에 기재된 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법을 컴퓨터에 실행시키도록 구성된 프로그램이 기록된 기록매체.

청구항 13

연안에서 발생하는 수리현상을 해석하기 위해 유한 요소모형을 이용한 분석을 수행하는 분석시스템에 있어서,

청구항 1항 내지 11항 중 어느 한 항에 기재된 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법을 이용하여 경사경계를 처리하도록 구성된 것을 특징으로 하는 분석시스템.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 수치기법을 이용하여 환경사 방정식(mild-slope equation)을 이용한 유한 요소모형(finite element model)에서 경사 경계면(inclined boundaries)을 효율적으로 처리할 수 있는 방법에 관한 것이다.

[0002] 더 상세하게는, 본 발명은, 종래, 유한 요소모형에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 단점을 해소하기 위해, 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되기 때문에 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며 또한 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여 경사진 경계면을 보다 용이하게 처리할 수 있는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법에 관한 것이다.

배경기술

[0003] 종래, 연안에서 발생하는 다양한 수리현상을 해석하기 위해 많은 방정식들이 제시되었으며, 대표적인 것 중의 하나가 Berkhoff(1972)에 의해 제안된 환경사 방정식(mild-slope equation)이다.

[0004] 이러한 환경사 방정식은, 비록 선형파에 대해서만 적용할 수 있다는 단점이 있으나, 회절과 굴절을 동시에 모의하면서도 비교적 쉽게 수치해를 구할 수 있다는 장점이 있어, 처음 소개된 이래 많은 학자들에 의해 꾸준히 연

구되었으며, 현재까지도 항만설계 등에 널리 사용되고 있다.

- [0005] 또한, 일반적으로, 지배방정식이 환경사 방정식인 모형의 수치해를 얻기 위해서는, 주로 유한요소법과 유한차분법이 사용된다.
- [0006] 이러한 두 수치기법은 서로 각각의 장단점을 가지고 있으며, 즉, 연안에서 발생하는 문제의 경우에는, 지형이 불규칙적이며 복잡하기 때문에 이러한 경계면의 처리에 유리한 유한요소법이 주로 사용된다(Panchang et al., 2000; Park et al., 1994; Walkley and Berzins, 2002; Woo and Liu, 2004a; Woo and Liu, 2004b 참조).
- [0007] 아울러, 수치모형의 정확한 수치해를 얻기 위해서는, 지배방정식뿐만 아니라 경계조건도 적절하게 처리되어야 하며, 예를 들면, 파가 진행하는데 장애물이 없는 경우에는 파는 외해로 그대로 빠져나가게 되고, 이러한 파의 방사와 관련해서는 Sommerfeld(1896)가 제안한 방사경계조건이 널리 사용되고 있다.
- [0008] 여기서, 상기한 바와 같은 방사경계조건을 이용할 경우, 연직 2차원과 같이 빠져나가는 파의 방향이 일정한 경우에는 문제가 없으나, 수평 2차원 문제처럼 외해로 빠져나가는 파의 방향이 일정하지 않은 경우에는 방사경계조건의 처리를 제대로 수행하기 어렵다.
- [0009] 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해, 종래, 경계면에 도달하기 전에 대부분의 파를 소멸시켜버리는 스폰지 경계층이라는 새로운 개념의 경계처리방식이 제시된 바 있다(Larsen and Darcy, 1983; Lee and Suh, 1998 참조).
- [0010] 더 상세하게는, 파의 진행방향에 구조물이 있거나 또는 해안선과 같이 지형이 막혀 있는 경우에는 파의 반사가 발생하게 되며, 따라서 이러한 반사현상을 적절히 모의할 수 있어야 한다.
- [0011] 그러나 이와 같은 경계면의 처리가 매우 중요함에도 불구하고, 직립형태의 장애물이 있는 경우에는 완전반사 또는 부분반사 조건을 적절히 줄 수 있는 반면, 경계면에서의 장애물이 기울어져 있는 경우, 수심이 0이 되며 이러한 경계 조건을 처리하기가 쉽지 않다.
- [0012] 여기서, 이에 대한 대안으로, 지배방정식의 형태가 시간의존형인 경우에는 이동경계기법을 이용하여 경계조건을 처리하는 방법이 제시된 바 있으나, 정상 상태(steady state)의 지배방정식을 사용하는 경우에는 적당한 처리방법이 아직까지 제시된 바 없다.
- [0013] 따라서 상기한 바와 같이, 경계조건의 처리가 어려운 경사진 경계면에 대하여도 적절히 처리가 가능한 새로운 경계 처리기법 제공하는 것이 바람직하나, 아직까지 그러한 요구를 모두 만족시키는 장치나 방법은 제공되지 못하고 있는 실정이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0014] 본 발명은 상기한 바와 같은 종래기술의 문제점을 해결하고자 하는 것으로, 따라서 본 발명의 목적은, 연안에서 발생하는 다양한 수리현상을 해석하기 위해 제시된 기존의 방법들은 유한 요소모형에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 종래기술의 문제점을 해소하기 위해, 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서 경사 경계면을 효율적으로 처리할 수 있는 경

사경계 처리방법을 제공하고자 하는 것이다.

- [0015] 또한, 본 발명의 다른 목적은, 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되기 때문에 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며 또한 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여 경사진 경계면을 적절하게 처리할 수 있는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법을 제공하고자 하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0016] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해, 본 발명에 따르면, 연안에서 발생하는 수리현상을 해석하기 위한 유한 요소모형(finite element model)에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면(inclined boundaries)에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 문제점을 해소하기 위해, 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되므로 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며, 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여 환경사 방정식(mild-slope equation)을 이용한 유한 요소모형에서 경사진 경계면을 용이하게 처리하기 위한 일련의 처리를 컴퓨터에 실행시키도록 구성되는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법에 있어서, 상기 일련의 처리는, 분석하고자 하는 영역을 지형의 형태에 따라 제 1 영역, 제 2 영역 및 제 3 영역의 3개의 영역으로 분류하는 영역분류단계; 상기 제 1 영역에 대한 환경사방정식을 수립하고, 수립된 상기 환경사방정식에 대한 해를 구하는 제 1 영역 분석단계; 상기 제 3 영역에 대한 베셀(Bessel) 방정식을 수립하고, 상기 베셀 방정식에 대한 해를 구하는 제 3 영역 분석단계; 및 상기 제 2 영역에 유한요소법을 적용하여, 대상영역에서의 수면의 변위를 계산하는 제 2 영역 분석단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법이 제공된다.

- [0017] 여기서, 상기 영역분류단계는, 입사파와 반사파가 공존하는 일정수심영역을 상기 제 1 영역으로 분류하고, 수심이 불규칙적으로 변화하는 영역을 상기 제 2 영역으로 분류하며, 천해조건을 만족하는 영역으로서 기울기가 일정한 것으로 가정할 수 있는 영역을 상기 제 3 영역으로 분류하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

- [0018] 또한, 상기 제 1 영역 분석단계는, 비압축성, 비점성 유체의 비회전 흐름을 가정할 때, 선형파에 관한 1차원 형태의 환경사 방정식을 이하의 수학식으로 나타내도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$\frac{d}{dx}\left(CC_g \frac{d\eta}{dx}\right) + k^2 CC_g \eta = 0$$

- [0019]
- [0020] (여기서, η 는 자유수면변위이고, C는 파속도이며, C_g 는 군속도이고,

$$\omega^2 = gk \tanh kh$$

- [0021] ω 는 각속도, g는 중력가속도, h는 수심이라 할 때, k는 수학식 1에 의해 결정되는 파수이다)

- [0022] 아울러, 상기 제 1 영역 분석단계는, 상기 환경사 방정식을 이하의 수학식으로 나타내지는 이차 선형 상미분방정식으로 변환하고,

$$\frac{d^2 \eta}{dx^2} + k^2 \eta = 0$$

[0023]

[0024] 이하의 수학식에 근거하여 상기 이차 선형 상미분방정식의 일반해를 구하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$\eta_1 = Ae^{ik_1 x} + Be^{-ik_1 x}$$

[0025]

[0026] (여기서, 아래첨자 '1'은 제 1 영역을 나타내며, k_1 은 h_1 에 해당하는 파수를 의미하고, 입사파의 파고를 1이라 할 때, 미정 계수 A는 1이고, 미정 계수 B는 반사율 R이다.)

[0027] 더욱이, 상기 제 3 영역 분석단계는, 파속도 및 군속도를 이하의 수학식에 근거하여 근사하고,

$$C = C_g \approx \sqrt{gh}$$

[0028]

[0029] 상기 환경사 방정식을 이하의 수학식에 의해 근사하며,

$$g \frac{d}{dx} \left(h \frac{d\eta_3}{dx} \right) + \omega^2 \eta_3 = 0$$

[0030]

[0031] 수심이 선형적으로 변할 경우, 상기 제 3 영역 3 내부에서의 기울기 m 을 고려한 $X = h(L) - h(L)(x - L)m$ 의 변수치환을 이용하여, 이하의 수학식에 의해 지배방정식을 수립하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$X \frac{d^2 \eta_3}{dX^2} + \frac{d\eta_3}{dX} + s \eta_3 = 0$$

[0032]

$$s = \frac{\omega^2}{gm^2}$$

[0033] (여기서, s는 $\frac{\omega^2}{gm^2}$ 이며, X는 제 3 영역 내부에서의 수심을 나타낸다.)

[0034] 또한, 상기 제 3 영역 분석단계는, $t^2 = 4Xs$ 의 변수치환을 이용하여, 이하의 수학식에 의해 베셀(Bessel) 방정식이 수립하고,

$$t^2 \frac{d^2 \eta_3}{dt^2} + t \frac{d\eta_3}{dt} + t^2 \eta_3 = 0$$

[0035]

[0036] 이하의 수학식에 의해 제 3 영역에서의 해를 베셀(Bessel) 함수의 형태로 나타내도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$\eta_3 = CJ_0(2\sqrt{X(x)s}) + DY_0(2\sqrt{X(x)s})$$

[0037]

[0038] (여기서, J_0 는 제 1종 0차 Bessel 함수, Y_0 는 제 2종 0차 Bessel 함수를 의미한다)

[0039] 아울러, 상기 제 3 영역 분석단계는, 해안선에 접근할수록 수심 X 및 변수 $t = \sqrt{4Xs}$ 가 0으로 수렴하게 되어 상기 베셀(Bessel) 함수의 Y_n 이 발산하는 것을 방지하기 위하여, $D = 0$ 으로 하고 이하의 수학식에 근거하여 상기 제 3 영역에서의 해를 구하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$\eta_3 = CJ_0(2\sqrt{X(x)s})$$

[0040]

[0041] 더욱이, 상기 제 2 영역 분석단계는, 자유수면변위를 $\eta = N^T \eta_2^e$ 라 할 때, 이하의 수학식에 의해 상기 환경사 방정식을 개별요소에 대한 적분식으로 변환하고,

$$-\int_{\Omega^e} N \left[\frac{d}{dx} \left(CC_g \frac{dN^T}{dx} \eta_2^e \right) \right] - k^2 CC_g \int_{\Omega^e} NN^T d\Omega^e \eta_2^e = 0$$

[0042]

[0043] (여기서, Ω^e 는 요소, N은 미리 규정한 보간함수 벡터, T는 전치행렬을 만드는 연산자, η_2^e 는 제 2 영역에서의 절점 자유수면 벡터를 의미한다)

[0044] 이하의 수학식에 의해 전체행렬식을 구성하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0045]

$$\sum_e \left(CC_g \int_{\Omega^e} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} d\Omega^e - k^2 CC_g \int_{\Omega^e} NN^T dA \right) \eta_2^e - CC_g N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=L} + CC_g N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

[0046]

[0047] 또한, 상기 제 2 영역 분석단계는, 경계점($x = 0, L$)에서 이하의 수학식으로 나타내지는 동역학적 및 운동학적 연속조건을 적용하고,

$$\eta_1 = \eta_2, \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \quad at \ x = 0$$

[0048]

$$\eta_2 = \eta_3, \frac{\partial \eta_2}{\partial x} = \frac{\partial \eta_3}{\partial x} \quad at \ x = L$$

[0049]

[0050] 이하의 수학식에 의해 나타내지는 관계식을 구하며,

$$\left. \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right|_{x=0} = (-ik_1 \eta_2(x) + 2ik_1) \Big|_{x=0} \approx N \left. \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \right|_{x=0}$$

[0051]

$$\left. \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \right|_{x=L} = \frac{J_0'(2\sqrt{h(x)s})}{J_0(2\sqrt{h(x)s})} \eta_2(x) \Big|_{x=L} \approx N \left. \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \right|_{x=L}$$

[0052]

[0053] 상기 관계식을 상기 전체행렬식에 대입하여 계산함으로써, 이하의 수학식에 의해 대상 영역에서의 수면변위를 계산하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$\sum_e \left(\int_{\Omega^e} CC_g \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} d\Omega^e \right) \eta_2^e - \frac{J_0'(2\sqrt{h(x)s})}{J_0(2\sqrt{h(x)s})} CC_g N \eta_2^e \Big|_{x=L}$$

$$-ik_1 CC_g N \eta_2^e \Big|_{x=0} = -2ik_1 CC_g \Big|_{x=0}$$

[0054]

[0055] 아울러, 상기 처리방법은, 상기 제 1 영역 분석단계, 상기 제 2 영역 분석단계 및 상기 제 3 영역 분석단계를 통하여 얻어진 분석결과를 검증하는 검증단계를 더 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

[0056] 더욱이, 상기 검증단계는, 이하의 수학식에 의해 구해지는 해석해와 상기 상기 제 1 영역 분석단계, 상기 제 2 영역 분석단계 및 상기 제 3 영역 분석단계를 통하여 얻어진 수치해를 비교함으로써 상기 수치해의 검증을 수행하도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$\eta_{analytic} = \begin{cases} e^{ik_1 x} + \frac{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) - J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})}{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) + J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})} e^{-ik_1 x}, & x \leq 0 \\ \frac{2ik_1}{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) + J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})} J_0(2\sqrt{X(x)s}), & x > 0 \end{cases}$$

[0057]

[0058] 또한, 본 발명에 따르면, 상기에 기재된 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법을 컴퓨터에 실행시키도록 구성된 프로그램이 기록된 기록매체가 제공된다.

[0059] 아울러, 본 발명에 따르면, 연안에서 발생하는 수리현상을 해석하기 위해 유한 요소모형을 이용한 분석을 수행하는 분석시스템에 있어서, 상기에 기재된 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법을 이용하여 경사경계를 처리하도록 구성된 것을 특징으로 하는 분석시스템이 제공된다.

발명의 효과

[0060] 상기한 바와 같이, 본 발명에 따르면, 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서 경사 경계면을 효율적으로 처리할 수 있는 경사경계 처리방법이 제공됨으로써, 연안에서 발생하는 다양한 수리현상을 해석하기 위한 기존의 방법들에 있어서 유한 요소모형에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 문제점을 해소할 수 있다.

[0061] 또한, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되기 때문에 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며 또한 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여 경사진 경계면을 적절하게 처리할 수 있는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법이 제공됨으로써, 종래기술의 방법들에서는 경계조건의 처리가 어려웠던 경사진 경계면을 적절히 처리할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0062] 도 1은 도 1은 본 발명에 적용되는 대상 영역(computational domain)에 대한 정의를 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명에 의해 구해진 수치해와 기존의 해석해를 비교하기 위한 검증 과정에 적용된 지형의 예를 나타내는 도면이다.

도 3은 서로 다른 기울기를 가지는 경우에 대하여 무차원화된 진폭에 대한 수치해와 해석해의 비교결과를 각각 나타내는 도면이다.

도 4는 도 2와 동일한 지형 조건에서 입사파의 조건을 달리하면서 수치해의 수렴성을 검토한 결과를 나타내는 도면이다.

도 5는 도 2와 동일한 지형에서 입사파의 조건을 달리하면서 본 발명에 따른 경계조건을 사용하였을 경우의 수치해와 사용하지 않았을 경우의 수치해를 비교한 결과를 나타내는 도면이다.

도 6은 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 플로차트이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0063] 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법의 구체적인 실시예에 대하여 설명한다.
- [0064] 여기서, 이하에 설명하는 내용은 본 발명을 실시하기 위한 하나의 실시예일 뿐이며, 본 발명은 이하에 설명하는 실시예의 내용으로만 한정되는 것은 아니라는 사실에 유념해야 한다.
- [0065] 또한, 이하의 본 발명의 실시예에 대한 설명에 있어서, 종래기술의 내용과 동일 또는 유사하거나 당업자의 수준에서 용이하게 이해하고 실시할 수 있다고 판단되는 부분에 대하여는, 설명을 간략히 하기 위해 그 상세한 설명을 생략하였음에 유념해야 한다.
- [0066] 즉, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 연안에서 발생하는 다양한 수리현상을 해석하기 위해 제시된 기존의 방법들은 유한 요소모형에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 종래기술의 문제점을 해소하기 위해, 경사 경계면을 효율적으로 처리할 수 있는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법에 관한 것이다.
- [0067] 또한, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되기 때문에 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며 또한 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여 경사진 경계면을 적절하게 처리할 수 있는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법에 관한 것이다.
- [0068] 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 상기한 바와 같은 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법의 구체적인 실시예에 대하여 상세하게 설명한다.
- [0069] 즉, 본 발명은, 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되기 때문에 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며, 또한, 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수 있다는 두 가지 조건에 근거하여, 경사진 경계면을 적절하게 처리할 수 있도록 구성되는 경계 처리기법을 제안하고자 하는 것이다.
- [0070] 먼저, 도 1을 참조하면, 도 1은 본 발명에 적용되는 대상 영역(computational domain)에 대한 정의를 나타내는 도면이다.
- [0071] 더 상세하게는, 도 1에 나타낸 바와 같이, 본 발명에서는 대상영역을 세 영역으로 분류하며, 먼저, 영역 1은 일정수심 영역으로 입사파와 반사파가 공존하며, 영역 2는 수심이 불규칙적으로 변화하는 영역으로 유한요소법을 적용하는 영역이고, 마지막으로 영역 3은 천해조건을 만족하는 영역으로 구간의 폭을 충분히 좁게 설정하면 기울기가 일정하다고 가정하여도 무방한 영역이다.

[0072] 다음으로, 지배 방정식에 대하여 설명한다.

[0073] 비압축성, 비점성 유체의 비회전 흐름을 가정하면, 선형파에 관한 1차원 형태의 환경사 방정식은 이하의 [수학식 1]과 같이 나타낼 수 있다.

[0074] [수학식 1]

$$\frac{d}{dx}\left(CC_g \frac{d\eta}{dx}\right) + k^2 CC_g \eta = 0$$

[0075]

[0076] 여기서, η 는 자유수면변위를 의미하며, C는 파속도, C_g 는 군속도, k는 이하의 [수학식 2]에 의해 결정되는 파수이다.

[0077] [수학식 2]

$$\omega^2 = gk \tanh kh$$

[0078]

[0079] [수학식 2]에 있어서, ω 는 각속도, g는 중력가속도, h는 수심을 의미한다.

[0080] 또한, 영역 1에서는 일정수심이기에 때문에 [수학식 1]은 이하의 [수학식 3]과 같은 이차 선형 상미분방정식이 된다.

[0081] [수학식 3]

$$\frac{d^2 \eta}{dx^2} + k^2 \eta = 0$$

[0082]

[0083] 아울러, [수학식 3]에 대한 일반해는 이하의 [수학식 4]와 같다.

[0084] [수학식 4]

$$\eta_1 = Ae^{ik_1 x} + Be^{-ik_1 x}$$

[0085]

[0086] 여기서, [수학식 4]에 있어서, 아래첨자 '1'은 영역 1을 나타내며, k_1 은 h_1 에 해당하는 파수를 의미한다.

[0087] 또한, 입사파의 파고를 1이라고 가정하면, 미정 계수 A와 B는 각각 1과 반사율 R로 나타낼 수 있다.

[0088] 계속해서, 영역 3은 장파의 영역이므로 파속도 및 군속도는 이하의 [수학식 5]와 같이 근사될 수 있다.

[0089] [수학식 5]

$$C = C_g \approx \sqrt{gh}$$

[0090]

[0091] 따라서 [수학식 1]은 이하의 [수학식 6]과 같이 근사될 수 있다.

[0092] [수학식 6]

$$g \frac{d}{dx} \left(h \frac{d\eta_3}{dx} \right) + \omega^2 \eta_3 = 0$$

[0093]

[0094] 수심이 선형적으로 변할 경우, 영역 3 내부에서의 기울기 m 을 고려한 $X = h(L) - h(L)(x - L)m$ 의 변수치환을 이용하면, 지배방정식은 이하의 [수학식 7]과 같이 된다.

[0095] [수학식 7]

$$X \frac{d^2 \eta_3}{dX^2} + \frac{d\eta_3}{dX} + s \eta_3 = 0$$

[0096]

[0097] 여기서, [수학식 7]에 있어서, s 는 이하의 [수학식 8]과 같이 정의되며, X 는 실질적으로 영역 3 내부에서의 수심을 나타낸다.

[0098] [수학식 8]

$$s = \frac{\omega^2}{gm^2}$$

[0099]

[0100] 여기서, 다시 한번 $t^2 = 4Xs$ 의 변수치환을 사용하면, 최종적으로 이하의 [수학식 9]와 같은 베셀(Bessel) 방정식이 구해진다.

[0101] [수학식 9]

$$t^2 \frac{d^2 \eta_3}{dt^2} + t \frac{d\eta_3}{dt} + t^2 \eta_3 = 0$$

[0102]

[0103] 따라서, 영역 3에서의 해는 이하의 [수학식 10]과 같이 Bessel 함수의 형태로 표시된다.

[0104] [수학식 10]

$$\eta_3 = CJ_0(2\sqrt{X(x)s}) + DY_0(2\sqrt{X(x)s})$$

[0105]

[0106] 여기서, [수학식 10]에 있어서, J_0 는 제 1종 0차 Bessel 함수, Y_0 는 제 2종 0차 Bessel 함수를 의미한다.

[0107] 또한, 해안선에 접근하게 되면 수심 X 및 변수 $t = \sqrt{4Xs}$ 는 0으로 수렴하게 되어 [수학식 10]의 두 번째 항 Y_n 은 발산하게 된다.

[0108] 이는, 해안선에서의 파고값이 유한하다는 물리적인 조건에 위배되기 때문에, 이를 방지하기 위하여 $D = 0$ 으로 놓고 최종적으로 영역 3에서의 해는 이하의 [수학식 11]과 같이 나타낼 수 있다.

[0109] [수학식 11]

$$\eta_3 = CJ_0(2\sqrt{X(x)s})$$

[0110]

[0111] 계속해서, 정식화 과정에 대하여 설명한다.

[0112] 영역 2에서의 해를 유한요소법을 이용하여 구하기 위해서는, 지배방정식을 유한요소식으로 변형시켜야 한다.

[0113] 즉, 유체영역을 이산화하여 자유수면변위를 $\eta = N^T \eta_2^e$ 로 표현한 후, [수학식 1]의 지배방정식에 Galerkin 방법을 적용하면 이하의 [수학식 12]와 같이 개별요소에 대한 적분식을 얻을 수 있다.

[0114] [수학식 12]

$$-\int_{\Omega^e} N \left[\frac{d}{dx} \left(CC_g \frac{dN^T}{dx} \eta_2^e \right) \right] - k^2 CC_g \int_{\Omega^e} NN^T d\Omega^e \eta_2^e = 0$$

[0115]

[0116] 여기서, [수학식 12]에 있어서, Ω^e 는 요소, N은 미리 규정한 보간함수 벡터, T는 전치행렬을 만드는 연산자, η_2^e 는 영역 2에서의 절점 자유수면 벡터를 의미한다.

[0117] 첫 번째 적분식을 부분적분한 후 각 요소의 시스템 행렬을 더하면 이하의 [수학식 13]과 같이 전체행렬식이 구성된다.

[0118] [수학식 13]

$$\sum_e \left(CC_g \int_{\Omega^e} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} d\Omega^e - k^2 CC_g \int_{\Omega^e} NN^T dA \right) \eta_2^e - CC_g N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=L} + CC_g N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$$

[0119]

[0120] 또한, 경계점(x = 0, L)에서 이하의 [수학식 14]와 [수학식 15]에 나타난 바와 같은 동역학적 및 운동학적 연속 조건을 사용하면, [수학식 16] 및 [수학식 17] 과 같은 관계식을 얻게 된다.

[0121] [수학식 14]

$$\eta_1 = \eta_2, \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \quad at \ x = 0$$

[0122]

[0123] [수학식 15]

$$\eta_2 = \eta_3, \frac{\partial \eta_2}{\partial x} = \frac{\partial \eta_3}{\partial x} \quad at \ x = L$$

[0124]

[0125] [수학식 16]

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} = (-ik_1 \eta_2(x) + 2ik_1) \Big|_{x=0} \approx N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=0}$$

[0126]

[0127] [수학식 17]

$$\frac{\partial \eta_2}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{J_0'(2\sqrt{h(x)s})}{J_0(2\sqrt{h(x)s})} \eta_2(x) \Big|_{x=L} \approx N \frac{\partial \eta_2^e}{\partial x} \Big|_{x=L}$$

[0128]

[0129] 따라서 [수학식 16] 및 [수학식 17]을 [수학식 13]에 대입하여 계산함으로써, 대상영역에서의 수면변위를 계산할 수 있다.

[0130] [수학식 18]

$$\sum_e \left(\int_{\Omega^e} CC_g \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N^T}{\partial x} d\Omega^e \right) \eta_2^e - \frac{J_0'(2\sqrt{h(x)s})}{J_0(2\sqrt{h(x)s})} CC_g N \eta_2^e \Big|_{x=L}$$

$$-ik_1 CC_g N \eta_2^e \Big|_{x=0} = -2ik_1 CC_g \Big|_{x=0}$$

[0131]

[0132] 다음으로, 도 2 내지 도 5를 참조하여, 상기한 바와 같이 하여 구해진 해의 검증에 대하여 설명한다.

[0133] 먼저, 도 2를 참조하면, 도 2는 본 발명에 의해 구해진 수치해와 기존의 해석해를 비교하기 위한 검증 과정에 적용된 지형의 예를 나타내는 도면이다.

[0134] 즉, 본 발명자들은, 본 발명에서 유도한 식을 검증하기 위하여 해석해와 본 발명의 수치해를 도 2에 나타난 바와 같이 표현되는 지형에 적용하여 비교함으로써 구해진 해의 검증을 수행하였다.

[0135] 여기서, 해석해는, 이하의 [수학식 19]에 나타난 바와 같이, 상기한 [수학식 4]와 [수학식 11]에 대하여 [수학식 14] 및 [수학식 15]로 표현되는 동역학적 및 운동학적 경계조건을 적용하면 구할 수 있다.

[0136] [수학식 19]

$$\eta_{analytic} = \begin{cases} e^{ik_1 x} + \frac{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) - J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})}{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) + J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})} e^{-ik_1 x}, & x \leq 0 \\ \frac{2ik_1}{ik_1 J_0(2\sqrt{X(0) \cdot s}) + J_0'(2\sqrt{X(0) \cdot s})} J_0(2\sqrt{X(x)s}), & x > 0 \end{cases}$$

[0137]

[0138] 여기서, 해석해의 경우는 천해영역에서만 성립되기 때문에, 입사파의 조건은 $kh_1 = 0.05\pi$ 로 설정하여 천해조건을 만족하도록 하였으며, 일정 수심 영역에서의 수심은 $h_1 = 5.0m$ 로 가정하였다.

[0139] 다음으로, 도 3을 참조하면, 도 3은 상기한 바와 같이 $kh_1 = 0.05\pi$ 일 때 서로 다른 기울기를 가지는 경우에 대

하여 무차원화된 진폭을 비교한 결과를 나타내는 도면이다.

- [0140] 여기서, 도 3에 있어서, x축은 입사파의 파장으로 무차원화하였으며, y축은 입사파의 진폭으로 무차원화하였다.
- [0141] 도 3a는 기울기가 아주 완만한 경우($m = 0.05$)에 해당하며, 도 3b는 기울기가 아주 급한 경우($m = 0.9$)에 해당한다.
- [0142] 또한, 수치해의 경우에는 $kh = 0.01\pi$ 를 만족시키는 지점에서 내해 경계조건을 사용하였다.
- [0143] 이 경우, 입사파의 조건이 천해 조건을 만족시키므로 내해 경계지점은 어느 지점으로 잡아도 무방하다.
- [0144] 아울러, 본 발명에서 사용한 모델은 쇄파나 바닥 마찰과 같은 에너지 감쇠를 고려하지 않았기 때문에 완전반사가 발생하며, 따라서 위상 값을 비교함으로써 수치해의 정확도를 측정할 수 있다.
- [0145] 즉, 도 3에 나타난 바와 같이, 기울기에 상관없이 두 경우 모두 수치해와 해석해가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.
- [0146] 또한, 기울기가 급한 경우에는 해안선 부근($x(0)$)에서 반사가 발생하는 반면, 기울기가 완만한 경우에는 경사 지형 위로 반 파장 이상 진행하면서 천수 현상이 발생하였음을 알 수 있다.
- [0147] 다음으로, 도 4를 참조하여, 천해 영역을 벗어난 지역에서의 적용성을 검토한 결과에 대하여 설명한다.
- [0148] 즉, 도 4를 참조하면, 도 4는 도 2와 동일한 지형 조건에서 입사파의 조건을 달리하면서 수치해의 수렴성을 검토한 결과를 나타내는 도면이다.
- [0149] 여기서, 이 경우는 초기 입사파가 천해 영역을 벗어나기 때문에 내해 경계지점을 어느 지점으로 잡느냐에 따라 해의 정확도가 결정된다.
- [0150] 본 발명에서는 내해 경계지점의 조건을 $kh_2 = 0.5\pi, 0.3\pi, 0.1\pi, 0.05\pi$ 및 0.01π 로 각각 다르게 하면서 파고값을 비교해 보았다.
- [0151] 즉, 도 4a는 입사파의 조건이 $kh_1 = 1.0\pi$ 이며, 도 4b는 $kh_1 = 2.0\pi$ 이고, 두 경우 모두 내해 경계지점이 천해 영역을 벗어난 경우에는 서로 다른 위상값을 보이지만 천해 영역에 가까운 $kh_2 = 0.3\pi$ 조건부터 비슷한 값을 보이다가 천해조건에서는 서로 거의 일치하는 것을 알 수 있다.
- [0152] 다음으로, 도 5를 참조하여, 본 발명에 따른 경계조건을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 수치해를 비교한 결과에 대하여 설명한다.

- [0153] 즉, 도 5를 참조하면, 도 5는 도 2와 동일한 지형에서 입사파의 조건을 달리하면서 본 발명에 따른 경계조건을 사용하였을 경우의 수치해와 사용하지 않았을 경우의 수치해를 비교한 결과를 나타내는 도면이다.
- [0154] 여기서, 본 발명에 따른 경계조건을 사용하지 않은 경우에 대해서는 일반적으로 가상의 수직벽이 존재하여 수평 방향 유속이 0이라고 가정하였다.
- [0155] 또한, 가상벽이 존재하는 위치는 오차를 최소화하기 위하여 최대한 해안선에 가깝게 하였으며, 다양한 수치모의를 통하여 수치해의 변화가 더 이상 발생하는 않는 지점을 산출하여 $kh = 0.005\pi$ 가 되는 지점에 위치한다고 가정하였다.
- [0156] 아울러, 경사면의 기울기는 0.1로 하였으며, 입사파의 주기는 상대수심이 $kh = 0.05\pi, 0.5\pi, 1.0\pi$ 를 각각 만족하도록 설정하여 천해, 중간수심영역, 심해 모두를 고려하였다.
- [0157] 도 5에 있어서, 도 5a는 상대수심이 0.05π 인 경우로 천해조건을 만족하며, 이 경우에는 해석해가 존재하기 때문에 해석해를 함께 비교하였다.
- [0158] 따라서 도 5a에 나타난 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 본 발명에 따라 유도된 경계조건을 사용하였을 경우에는 해석해와 잘 일치하지만 사용하지 않았을 경우에는 약간의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.
- [0159] 또한, 이러한 결과는 5b 및 도 5c에서도 유사한 결과가 나타난 것을 알 수 있다.
- [0160] 즉, 도 5a 내지 도 5c로부터, 두 수치해의 차이는 중간수심영역에서 가장 컸으며, 심해, 천해역순으로 감소함을 알 수 있으며, 또한, 도시되지는 않았으나, 기울기가 커질수록 오차는 감소하였으며, 기울기가 작아질수록 오차는 증가하는 것이 확인되었다.
- [0161] 이는, 기울기가 커질수록 연직의 가상벽과 가까워지고, 기울기가 작아질수록 연직의 가상벽과 멀어지기 때문에 오차도 이에 따라 변하는 것으로 해석할 수 있다.
- [0162] 따라서 상기한 바와 같이 하여, 본 발명에 따르면, 유한요소모형에서 경사진 경계면의 처리기법을 제시할 수 있다.
- [0163] 더 상세하게는, 일반적으로 유한요소모형을 이용한 경사진 지형의 수치모의에서는 해안선에서의 수심이 0이 되기 때문에 경계조건을 처리하기가 쉽지 않지만, 본 발명에 따르면, 해안선 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하는 영역이 존재한다는 점과, 이러한 영역을 아주 작게 설정하면 기울기가 일정한 수심이라고 가정할 수 있다는 점을 경사 경계 처리에 적용하여, Bessel 함수를 사용하는 해석해를 구할 수 있으며, 이를 유한요소모형과 결합하여 경사진 경계면을 가지는 임의의 지형에 적용 가능한 유한요소모형을 제시할 수 있다.
- [0164] 또한, 본 발명자들은, 상기한 바와 같이, 해석해가 존재하는 천해영역에서는 해석해와 비교하여 본 발명에 따른 방법의 타당성을 검증하였으며, 천해영역 이외에서는 수렴성 검토를 통하여 본 발명에 따른 방법의 적용성을 검증하였다.

- [0165] 아울러, 본 발명자들은, 본 발명에 따른 경계기법을 사용하지 않았을 경우의 해와 비교하여 그 차이를 검토하였고, 다양한 수치실험 결과, 중간수심영역에서 기울기가 완만할수록 오차가 커지는 것을 확인할 수 있었다.
- [0166] 계속해서, 도 6을 참조하여, 상기한 바와 같은 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법의 구체적인 구성에 대하여 설명한다.
- [0167] 즉, 도 6을 참조하면, 도 6은 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 플로차트이다.
- [0168] 더 상세하게는, 도 6에 나타난 바와 같이, 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법은, 먼저, 분석하고자 하는 영역을, 도 1에 나타난 바와 같이, 그 지형에 따라 입사파와 반사파가 공존하는 일정수심영역인 제 1 영역과, 수심이 불규칙적으로 변화하여 유한요소법을 적용하는 영역인 제 2 영역 및 천해조건을 만족하는 영역으로 기울기가 일정한 것으로 가정할 수 있는 영역인 제 3 영역의 3개의 영역으로 분류한다(단계 S61).
- [0169] 다음으로, 상기한 [수학식 1] 내지 [수학식 4]를 통하여 설명한 바와 같이 하여, 상기한 제 1 영역에 대한 환경사방정식을 수립하고 그에 대한 해를 구한다(단계 S62).
- [0170] 계속해서, 상기한 [수학식 5] 내지 [수학식 11]을 통하여 설명한 바와 같이 하여, 상기한 제 3 영역에 대한 베셀(Bessel) 방정식을 수립하고 그에 대한 해를 구한다(단계 S63).
- [0171] 이어서, 상기한 [수학식 12] 내지 [수학식 18]를 통하여 설명한 바와 같이 하여, 상기한 제 2 영역에 유한요소법을 적용하여 대상영역에서의 수면의 변위를 계산한다(단계 S64).
- [0172] 여기서, 본 발명에 따른 처리방법은, 상기한 [수학식 19] 및 도 2 내지 도 5를 참조하여 설명한 바와 같이 하여, 상기한 바와 같이 하여 구해진 결과를 검증하는 단계를 더 포함하도록 구성될 수 있다.
- [0173] 아울러, 상기한 바와 같은 일련의 과정은, 상기한 바와 같은 처리를 수행하도록 구성된 전용의 하드웨어를 통해 구현되거나, 또는, 컴퓨터와 같은 범용의 처리장치에 상기한 바와 같은 일련의 단계들을 수행하도록 구성되는 프로그램이나 그러한 프로그램을 기록한 기록매체의 형태로 제공될 수도 있다.
- [0174] 따라서 상기한 바와 같이 하여, 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법을 구현할 수 있다.
- [0175] 또한, 상기한 바와 같이 하여 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법을 구현함으로써, 본 발명에 따르면, 연안에서 발생하는 다양한 수리현상을 해석하기 위한 기존의 방법들에 있어서 유한 요소모형에 사용된 지배방정식이 타원형 미분방정식인 경우에는 연직 방향으로 경사진 경계면에서의 경계처리가 용이하지 못하였던 문제점을 해소할 수 있다.
- [0176] 또한, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 경사진 경계면에서는 수심이 0이 되기 때문에 경계면 부근에서는 항상 장파의 조건을 만족하며 또한 일정한 기울기를 가질 경우 선형장파의 해는 베셀(Bessel) 함수로 나타낼 수

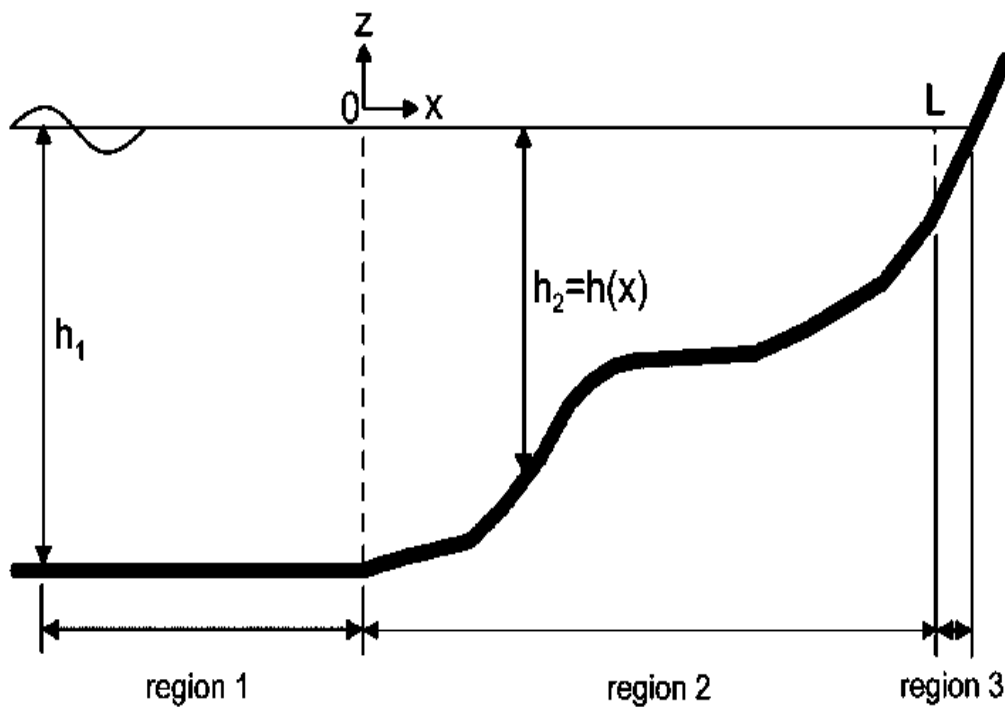
있다는 두 가지 조건에 근거하여 경사진 경계면을 적절하게 처리할 수 있는 환경사 방정식을 이용한 유한 요소 모형에서의 경사경계 처리방법이 제공됨으로써, 종래기술의 방법들에서는 경계조건의 처리가 어려웠던 경사진 경계면을 적절히 처리할 수 있다.

[0177]

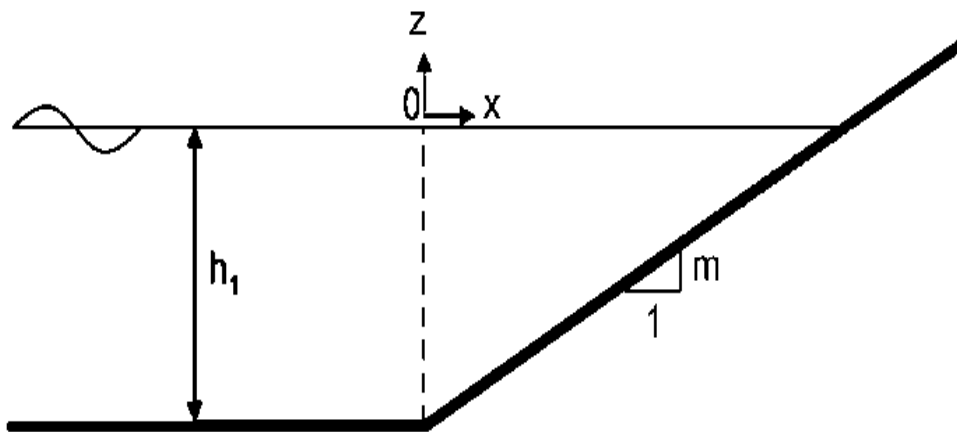
이상, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예를 통하여 본 발명에 따른 환경사 방정식을 이용한 유한 요소모형에서의 경사경계 처리방법의 상세한 내용에 대하여 설명하였으나, 본 발명은 상기한 실시예에 기재된 내용으로만 한정되는 것은 아니며, 따라서 본 발명은, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 설계상의 필요 및 기타 다양한 요인에 따라 여러 가지 수정, 변경, 결합 및 대체 등이 가능한 것임은 당연한 일이라 하겠다.

도면

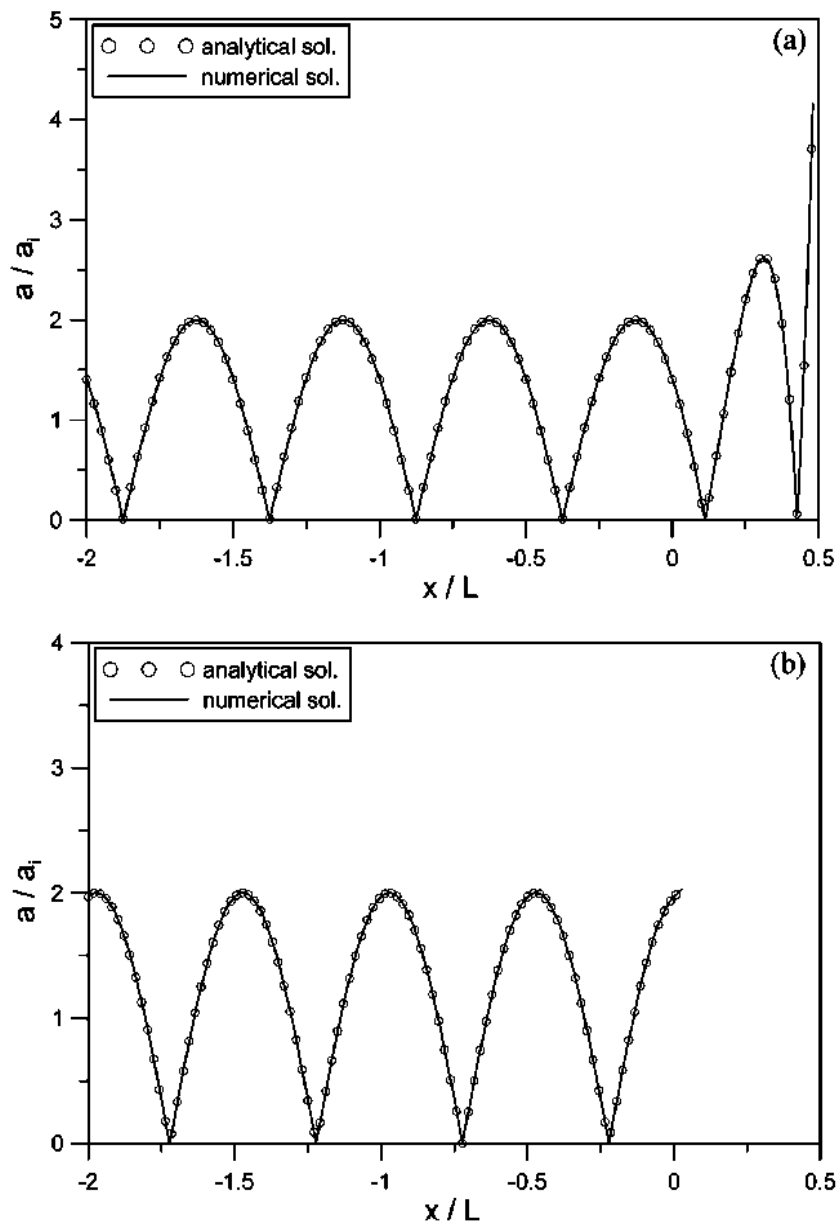
도면1



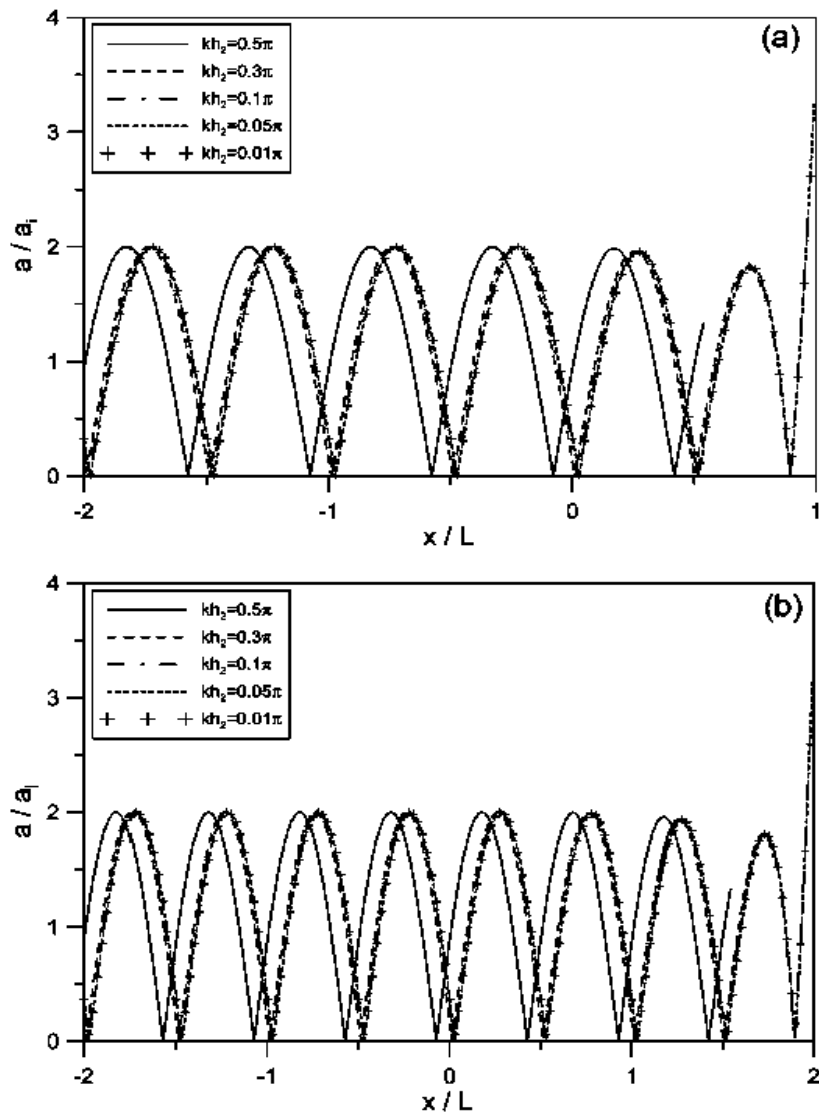
도면2



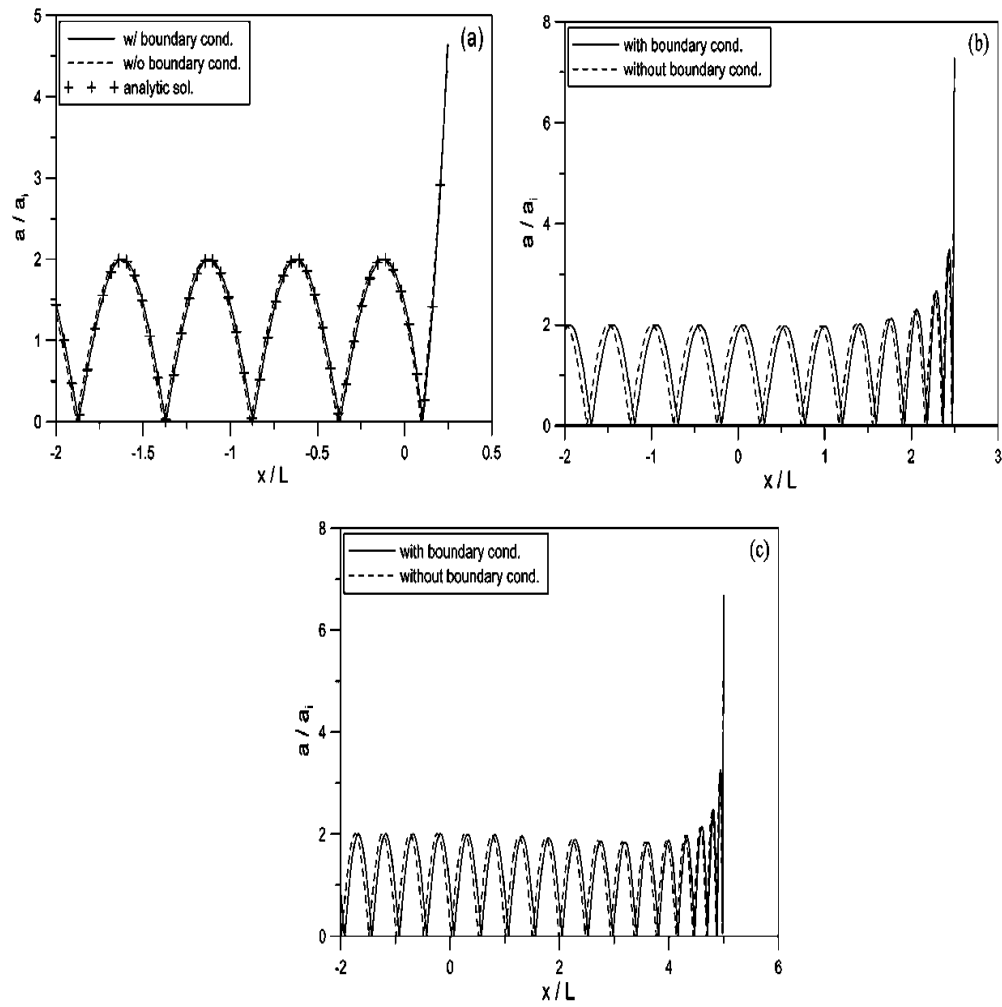
도면3



도면4



도면5



도면6

