

투과성 구조물에 의한 평면파랑변형해석 Analysis of Wave Field Transform by Permeability Structure

최낙훈¹, 윤희면², 이민기², 김도삼², 中村孝幸³

Nack Hoon Choi¹, Hee Myun Yoon², Min Gi Lee², Do Sam Kim² and T.Y.Nakamura³

1. 서 론

3차원 파동장 문제를 평면2차원 문제로 변환하여 해석하기 위해서는 일반적으로 완경사방정식과 같이 연직방향으로 적분된 형태의 지배방정식을 적용하게 된다. 여기서, 투과성 구조물에 대한 3차원 파동장의 수치해석법은 아직 연구개발의 여지를 많이 남겨두고 있는 실정이다.

기존의 연구로 Yu(1995)는 선형포텐셜 이론을 사용하여 투과방파제에 직각으로 입사했을 때의 회절문제를 해석할 수 있는 모델을 개발하였다. 이 모델은 임의입사각에 대한 모델로 확장되었으나(Yu and Togashi 1996; McIver 1999), 방파제의 폭이 입사파의 파장에 비하여 작아야 한다는 제약조건이 따른다. 그리고, Lynett et al.(2002)은 투과방파제에 의한 약비선형·약분산성 고립파의 회절문제를 해석할 수 있는 모델을 제시하고 실험을 통하여 검증하였다.

한편, 투과방파제 주변의 평면파랑장 해석에 대한 연구로서는 井島 등(1973)이 Green함수를 이용하여 방파제내의 유체운동에 대한 저항이 유속에 비례한다는 가정 하에 항내 파랑해석법을 제시하였고, 酒井 등(1978)은 투과방파제 경계의 선유량 결정에 있어서 임의반사율 경계조건을 투과파에도 동일한 방법으로 적용할 수 있도록 확장하고, 반무한방파제의 이론해와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 鈴井 등(1984)은 에너지평형방정식 모델에 투과제를 통과하기 직전의 격자에서 다음 격자로 유입하는 파에너지를 투과율에 대응하여 감소시키는 방법을 사용하고

평면수리실험과 비교하였다. 그리고, 전 등(2002)은 투과파를 허용하는 부유식 방파제에 반사와 투과 경계조건을 적용하여 항내의 파고분포를 해석하였으며, 김 등(2002,2003)은 Green함수법과 고유함수 전개법을 병용하는 수치해석으로 말뚝계류와 Catenary계류된 부유식 방파제에 대한 파랑해석 및 동적거동에 대하여 연구하였다. 그리고, 팍 등(2003)은 시간의존 완경사방정식 모델에 임의투과율 경계조건을 도입하여 투과 사석방파제로 이루어진 항만의 평면파랑장을 해석할 수 있는 모델을 제시하였으며, 수치실험 결과와 비교하였다.

여기서, 평면 2차원 파동장의 수치해석법으로는 대표적으로 완경사방정식에 기초한 유한차분법 혹은 유한요소법과 연직선 Green함수에 기초한 특이점분포법(中村 등, 2002. 6; 2002. 10) 등이 제안되어 있다. 유한차분법 혹은 유한요소법은 대상의 전 해역을 미소 면요소로 분할한다는 측면에서 상당한 계산시간이 요하는 반면에 수심변화를 고려할 수 있다는 장점이 있고, 특이점분포법은 투과성 구조물의 경계면과 항만경계면만을 미소 선요소로 분할한다는 측면에서 계산시간이 짧다는 장점이 있는 반면에 수심의 변화를 고려하는 방법이 일반화되어 있지 않다.

본 연구에서는 2차원 수치해석에서 얻어진 파랑변형율과 임의의 파랑변형율을 평면파동장에 설치된 투과성 구조물에 특이점분포법을 적용하여 평면파랑변형을 산정하였으며, 임의의 실험예를 모델로 하여 수치해석을 실시하였다. 여기서, 투과성 구조물인 부방파제에 대한 투과율과 반사율은 김 등(2004)의 2

¹ 한국해양대학교 토목환경시스템공학부 석사과정

² 한국해양대학교 토목환경시스템공학부

³ 日本愛媛大學工學部

차원 수치해석결과를 사용하였으며, 다른 형식의 투과성 구조물에는 임의의 투과율과 반사율을 적용하였다.

2. 해석 이론

2.1 투과성 구조물을 포함하는 항만영역의 파고 분포 산정법

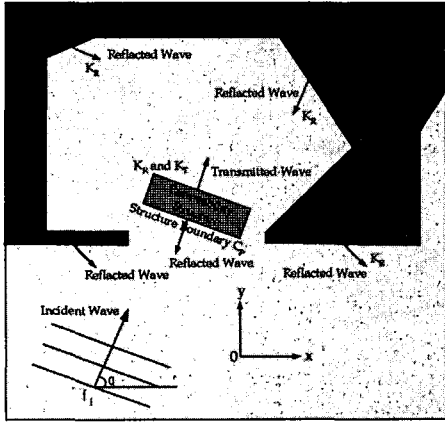


Fig. 1. Analysis model and coordinates

본 연구에서 적용하고 있는 투과성 구조물에 의한 평면파랑변형의 계산법은 다음과 같은 순서로 수행된다.

Step.1 : 투과성 구조물을 불투과성 구조물로 간주하여 투과파의 영향을 무시한 해석을 수행한다. 이때, 입사파랑의 수위변동과 속도포텐셜은 다음의 식 (1),(2)로, 회절산란파의 속도포텐셜은 식(3)으로 주어진다.

$$\eta_f(x, y, t) = \text{Real} \left[\frac{H}{2} \exp \{ i(k_x x + k_y y - \sigma t) \} \right] \quad (1)$$

$$\phi_f(x, y, z) = -i \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \phi_f(x, y) \quad (2)$$

$$\phi_s(x, y, z) = -i \frac{gH}{2\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \phi_s(x, y) \quad (3)$$

여기서, H 는 입사파고, σ 는 각진동수($2\pi/T$, T : 입사파의 주기), $k_x = k \sin \theta$, $k_y = k \cos \theta$, k 는 파진행방향의 파

수, θ 는 입사파향각, ϕ 는 다음 식으로 나타낸다.

$$\phi_f(x, y) = e^{i(k_x x + k_y y)} \quad (4)$$

따라서, ϕ_s 는 다음의 경계적분식으로 구해진다.

$$\phi_s = \int_{C_L + C_p} f_s(\xi, \zeta) G(x, y, \xi, \zeta) ds(\xi, \zeta) \quad (5)$$

여기서, C_L 은 Fig. 1에 나타난 항만경계, C_p 는 투과성 구조물경계, f_s 는 파원강도 분포함수, G 는 평면 Green함수로 다음의 식으로 주어진다.

$$G(x, y, \xi, \zeta) = -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr) \quad (6)$$

여기서, $H_0^{(1)}$ 은 0차 제1종 Hankel함수이다.

Step.2 : Step.1의 경계적분식에서 미지수인 파원강도 분포함수 f_s 는 다음의 식과 같이 투과성 구조물의 표면 및 항만경계상에서 임의반사율의 조건을 대입하여 이산화된 대수연립방정식을 해석함으로써 산정된다.

$$\begin{aligned} & \int_{C_L + C_p} f_s(\xi, \zeta) \left\{ ika(x, y)G(x, y, \xi, \zeta) \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial G(x, y, \xi, \zeta)}{\partial \nu} \right\} ds(\xi, \zeta) \\ & = - \left\{ ika(x, y)\phi_f(x, y) + \frac{\partial \phi_f}{\partial n} \right\}_{(x, y) \text{ on } C_L + C_p} \quad (7) \end{aligned}$$

여기서,

$$\alpha(x, y) = \frac{1 - K_r(x, y)e^{i\delta(x, y)}}{1 + K_r(x, y)e^{i\delta(x, y)}} \Big|_{(x, y) \text{ on } C_L + C_p} \quad (8)$$

여기서, K_r 은 투과성 구조물에 의한 반사율, $\delta(x, y)$ 는 반사파의 위상차이다. 그리고, 투과성 구조물에서 발생하는 투과파를 입력값으로 하여 항만 경계로부터의 반사파를 구하는 경우에 회절산란파 속도포텐셜은 다음의 경계적분식으로부터 산정된다.

$$\phi_R(x, y) = \int_{C_L + C_p} f_R(\xi, \zeta) G(x, y, \xi, \zeta) ds(\xi, \zeta) \quad (9)$$

이 때의 파원강도 분포함수는 부분반사조건을 적용하여 다음의 식으로 산정된다.

$$\int_{C_L + C_p} f_R(\xi, \zeta) \left\{ ika(x, y) G(x, y, \xi, \zeta) + \frac{\partial G(x, y, \xi, \zeta)}{\partial v} \right\} ds(\xi, \zeta) = \begin{cases} - \left\{ ika(x, y) \phi_T(x, y) + \frac{\partial \phi_T}{\partial v} \right\} & (x, y) \text{ on } C_L \\ 0 & (x, y) \text{ on } C_p \end{cases} \quad (10)$$

여기서, ϕ_T 는 투과성 구조물에서 발생된 투과파의 영향에 의한 항만경계상에서의 속도포텐셜을 나타내며, 이는 다음의 Step.3에서 얻어질 수 있다. 또한 점 (x, y) 가 투과성 구조물의 경계 C_p 상에 있을 때에 0이 되는 이유는 투과성 구조물 자체의 투과파가 반사파에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하고 있기 때문이다.

Step.3 : 투과성 구조물에서 발생하는 투과파의 영향에 대한 평가식은 Step.1의 경계적분식(5)와 동일하지만, 경계적분은 투과성 구조물의 경계선상에서만 수행된다. 이 경우의 파원강도 분포함수는 입사파의 속도포텐셜과 투과성 구조물을 제외한 항만경계에서 투과성 구조물로 입사하는 파랑성분의 속도포텐셜 및 투과성 구조물의 투과율 등을 고려한 적절한 조건식을 도입함으로써 다음과 같이 산정될 수 있다. 투과파의 수면변동 η_T 는 다음의 식으로 표현된다.

$$\eta_T(x, y, t) = K_I \eta_I(x, y, t) e^{i\delta_T} \quad (11)$$

여기서, K_I 는 투과성 구조물의 투과율, δ_T 는 투과율의 위상차이다.

자유표면에서 속도포텐셜의 진폭을 사용하여 나타내면, 위의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_T(x, y) = K_I \phi_I(x, y) e^{i\delta_T} \quad (12)$$

투과파의 전파방향은 투과현상에 의하여 변화되지 않는 것으로 가정한다. 따라서, 그의 법선방향미분과 입사파의 속도포텐셜 사이에는 다음의 관계식이

성립된다.

$$\frac{\partial \phi_T}{\partial v} = i(k_x x + k_y y) K_I \phi_I(x, y) e^{i\delta_T} \Big|_{(x, y) \text{ on } C_p} \quad (13)$$

입사파뿐만 아니라 투과성 구조물 이외의 항만경계에 의한 반사파도 존재하므로 위의 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \phi_T}{\partial v} = \left\{ i(k_x x + k_y y) \phi_I(x, y) + \frac{\partial \phi_R(x, y)}{\partial v} \right\} K_I \phi_I(x, y) e^{i\delta_T} \Big|_{(x, y) \text{ on } C_p} \quad (14)$$

여기서, ϕ_R 의 법선미분은 식(12)의 법선미분으로 산정된다. 또한, 식(13), (14)에서 ϕ_T 는 다음의 식으로 표현된다.

$$\phi_T(x, y) = \int_{C_L + C_p} f_T(\xi, \zeta) G(x, y, \xi, \zeta) ds(\xi, \zeta) \quad (15)$$

여기서, f_T 는 투과성 구조물을 빠져나가는 회절산란파(투과파)를 나타내는 파원강도 분포함수이며, 식(14)로 산정될 수 있다.

따라서, 평면파동장의 임의점 (x, y) 에서 회절계수 K_d 및 위상 P_H 는 다음의 식으로 평가된다.

$$K_d(x, y) = \frac{|\phi_I(x, y) + \phi_S(x, y) + \sum (\phi_{R_i} + \phi_{T_j})|}{|\phi_I(x, y)|} \quad (16)$$

여기서, ϕ_{R_i} 와 ϕ_{T_j} 는 각 Step에서 구해지는 투과성 구조물에서 발생하는 투과파에 기인하는 반사파 및 투과파의 속도포텐셜을 나타낸다.

3. 수치해석의 결과

3.1 수치모델의 검증

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 일본토목학

회 해안공학위원회(1993)에서 제시한 결과와 콰 등 (2003)의 수치해석 결과를 함께 비교하였다.

검증 모델은 Fig. 2에 나타내는 바와 같은 영역에 $K_R=0.4$, $K_T=0.3$ 의 파랑변형율을 갖는 투과성 구조물이 설치되어 있는 경우를 고려하였다.

수치해석결과를 살펴보면, Fig. 3~5의 세 경우 모두 구조물의 전면에서는 반사파에 의한 부분중복파의 영향으로 1.0~1.5m의 파고가 나타나며, 구조물의 배후영역에서는 0.2~0.4m의 파고분포가 나타나는 것을 알 수 있다.

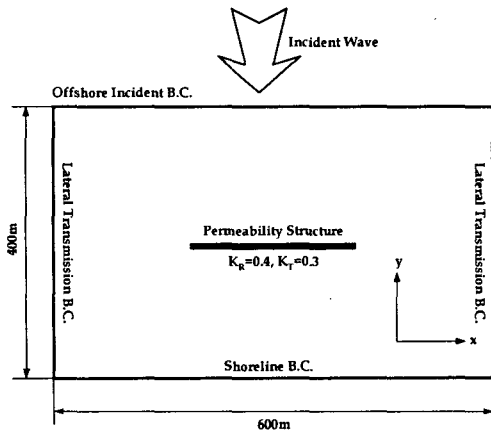


Fig. 2. Sketch of computation region for permeability structure.

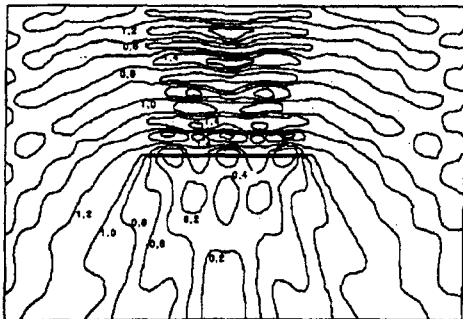


Fig. 3. Distribution of wave height(JSCE).

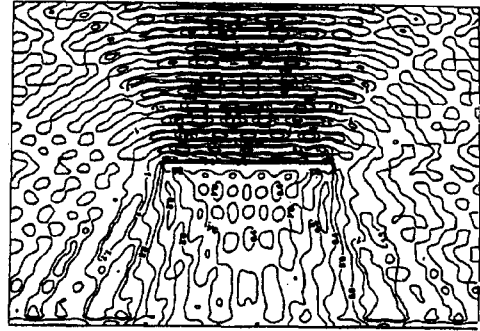


Fig. 4. Distribution of wave height(Kwak et al).

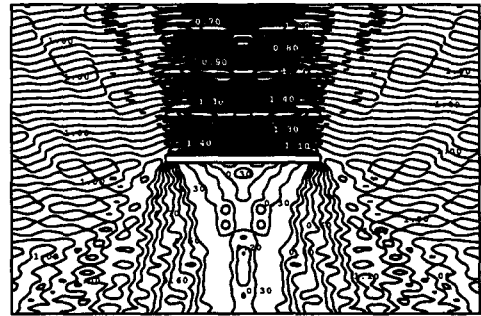


Fig. 5. Distribution of wave height(This study).

다음의 Fig. 6(a),(b)는 투과경계조건에 대한 검토의 일환으로써 $K_R=0.4$ 로 고정하고, $K_T=0.0$ 으로 두고 계산한 결과이며, Fig. 7(a),(b)는 $K_T=0.4$ 로 변화시켜 계산한 콰 등의 결과와 비교한 것이다.

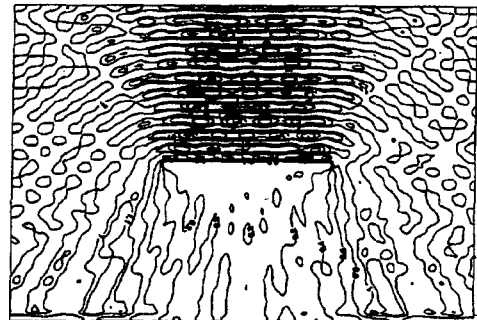


Fig. 6(a). Distribution of wave height ($K_T=0.0$, Kwak et al).

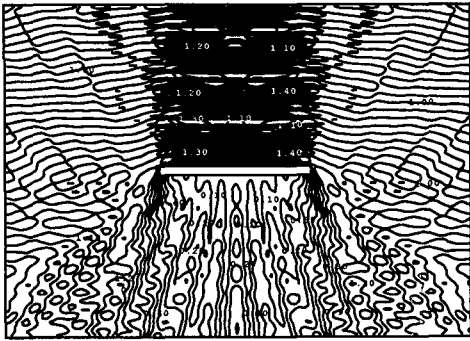


Fig. 6(b). Distribution of wave height ($K_T=0.0$, This study).

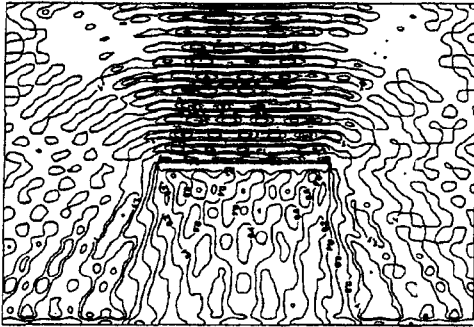


Fig. 7(a). Distribution of wave height ($K_T=0.4$, Kwak et al).

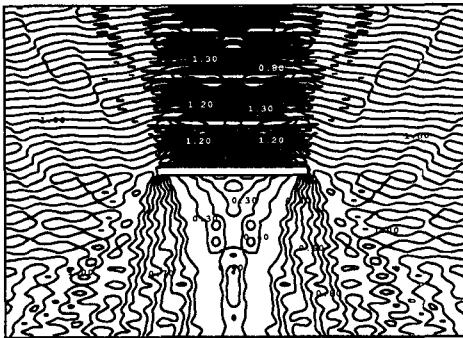


Fig. 7(b). Distribution of wave height ($K_T=0.4$, This study).

Fig. 6(a),(b)와 Fig. 7(a),(b)의 네 경우 모두 구조물의 전면에서는 반사파에 의한 부분중복파의 영향이 나타나며, Fig. 6(a)와 Fig.6(b)의 경우에는 불투과조건이 잘 반영되어 구조물 배후해역에서의 파고가 상당히 줄

어드는 것을 알 수 있으며, Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)의 경우에는 $K_T=0.3$ 인 Fig. 5에 비해 파고가 0.1~0.2m 정도 증가한 것을 확인할 수 있다.

이상의 수치해석 결과들이 잘 일치하므로 본 연구의 타당성을 검증 할 수 있다.

3.2 수치해석모델

투과성 구조물의 파랑변형율을 산정하기 위하여 김 등(2004)의 부방파제에 대한 2차원 수치해석 결과를 Fig. 8에 나타내며, 평면파랑변형을 해석하기 위해 Fig. 9와 같은 실험역에 설치된 투과성 구조물을 고려한다.

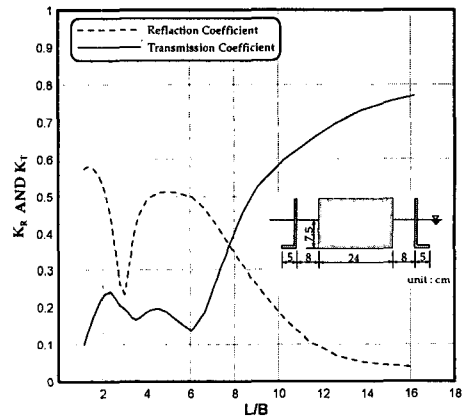


Fig. 8. Two-Dimensional numerical result.

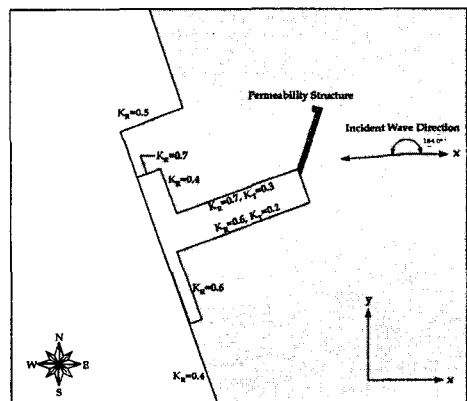


Fig. 9. Coordinates and analysis model.

입사파향, 항만경계에서의 반사율 그리고, 투과성 구조물로 설치된 부두에서의 투과율과 반사율은 Fig

9에 나타낸 바와 같고, 수심은 11.53m의 일정수심으로 가정하였으며, 파고는 2.25m, 주기는 $T=7.7, 8.0, 12.0\text{sec}$ 로 주기의 변화에 따른 평면파랑변형을 계산하였다.

주기의 변화에 따른 부방파제와 임의의 투과율을 고려한 구조물의 파랑변형형을 Table 1에 나타낸다.

Table 1. Condition of numerical model.

| Floating breakwater | | | | |
|-----------------------------|------------------|------|-------|-------|
| Case | Wave period(sec) | L/B | K_R | K_T |
| 1 | 7.7 | 3.55 | 0.4 | 0.175 |
| 2 | 8.0 | 3.75 | 0.45 | 0.18 |
| 3 | 12.0 | 6.05 | 0.5 | 0.125 |
| Free permeability structure | | | | |
| Case | Wave period(sec) | L/B | K_R | K_T |
| 4 | 7.7 | . | 0.3 | 0.5 |
| 5 | 8.0 | . | 0.2 | 0.7 |
| 6 | 12.0 | . | 0.1 | 0.8 |

3.3 수치해석 결과

먼저, 부방파제의 파랑변형형을 입력한 Fig. 10~12의 경우를 살펴보면, 비슷한 반사율을 가지므로, 구조물 전면에서 반사파에 의한 부분중복파의 생성으로 파고가 상승하는 것을 확인 할 수 있으며, 상대적으로 적은 반사율을 입력시킨 Fig. 13~15의 임의의 투과성 구조물에서는 구조물 전면에서의 파고가 현저히 줄어든 것을 알 수 있다. 그리고, 반사율이 가장 높은 Fig. 12의 Case 3의 경우가 구조물 전면에서의 파고가 가장 크다는 것도 확인 할 수 있다. 여기서, 입력된 반사율에 대한 파고분포가 수치해석에 의해 잘 구현되고 있음을 알 수 있다.

투과율의 경우에서도, 투과율이 가장 낮은 Case 3의 경우가 항내정온도가 가장 우수한 것으로 나타났으며, 비교를 위하여 상대적으로 큰 투과율을 가정한 Case 4~5의 경우는 항내로 유입되는 투과파의 영향과 투과된 파가 항만경계에서 반사되면서 생긴 부분중복파의 영향으로 항내정온도가 상당히 악화되는 것을 알 수 있다.

이상의 결과에서, 반사율과 투과율의 변화에 따른 투과성 구조물에 의한 평면파랑변형을 확인 할 수 있었으며, 입력된 반사율과 투과율에 대한 파고분포가 수치해석에 의해 잘 구현되고 있음을 알 수 있다.

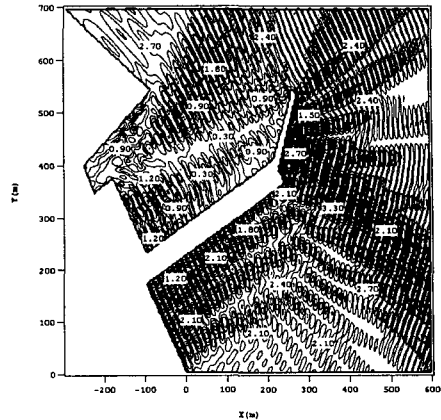


Fig. 10. Distribution of wave height(case 1).

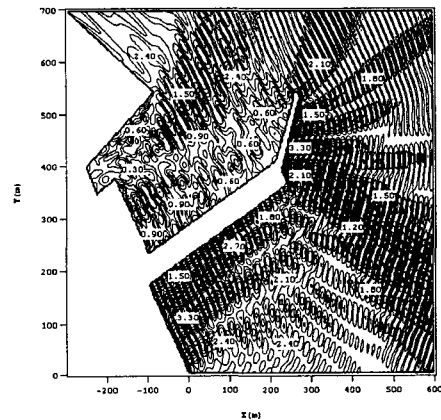


Fig. 11. Distribution of wave height(case 2).

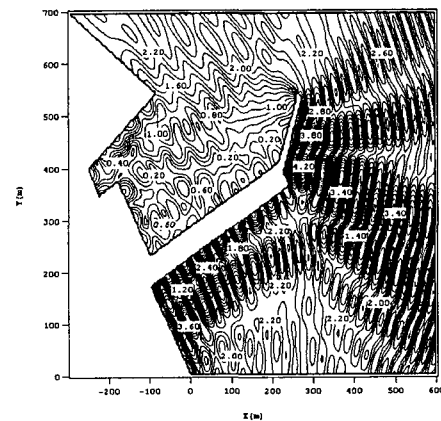


Fig. 12. Distribution of wave height(case 3).

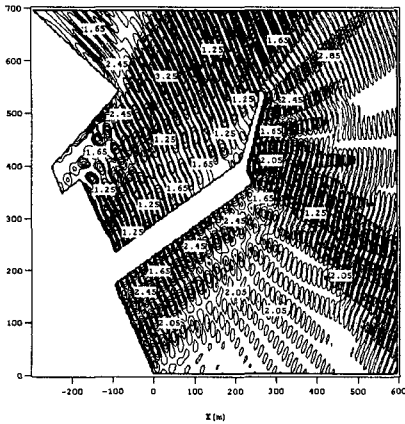


Fig. 13. Distribution of wave height(case 4).

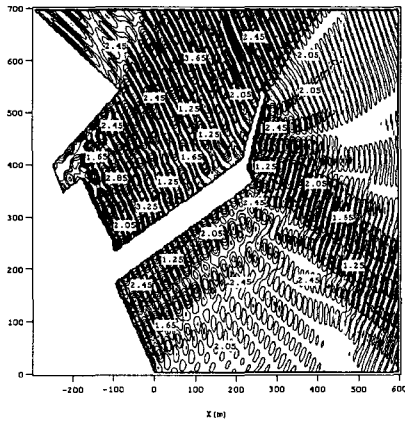


Fig. 14. Distribution of wave height(case 5).

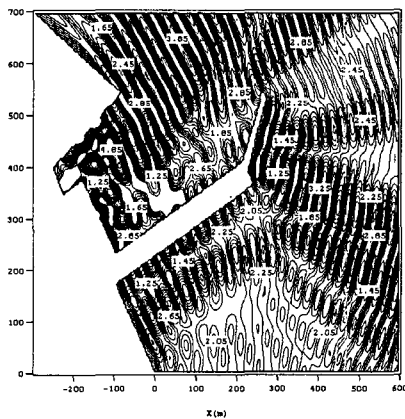


Fig. 15. Distribution of wave height(case 6).

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 수치해석에서 얻어진 파랑변형율과 임의의 파랑변형율을 평면파동장에 설치된 투과성 구조물에 적용하여 특이점분포법에 의해 평면파랑변형을 산정하였다. 본 연구의 검증을 위하여 실시한 투과이안제 주변의 파고분포 계산에서는 본 연구의 타당성이 잘 나타났으며, 실해역에 적용한 경우에도 반사율과 투과율에 따른 구조물 전면에서의 반사파와 구조물 배후에서의 투과파의 재현성이 좋은 것을 알 수 있었다. 따라서, 투과성 구조물의 계획 단계에서 항내정온도와 관련하여 구조물의 평면배치안이나, 구조물의 설계를 검토하기 위하여 본 수치해석이 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 박문수, 이기상, 편종근 (2003). 투과 사석방파제 주변의 파랑장 해석, 한국해안·해양공학회지, **15**(2), 116-126.
- 김도삼, 윤희면 (2002). 말뚝계류된 부방파제의 공간파랑제어 및 동적거동에 관한 연구, 한국해안·해양공학회지, **14**(3), 183-191.
- 김도삼, 최낙훈, 윤희면, 손병규 (2004). Catenary계류된 부방파제의 3차원 파랑변형에 관한 수치해석, 한국해양공학회 학술대회논문집, 241-248.
- 김도삼, 이광호, 최낙훈, 윤희면 (2004). 신형식 부방파제의 파랑제어에 관한 연구, 한국해안·해양공학회지, **16**(1), 1-9.
- 井島武士, 周宗仁, 湯村やす, 田淵幹修 (1973). 任意形狀の透過および不透過防波堤による波の散亂と波力, 海岸工學講演會論文集, **20**: 79-87.
- 酒井哲郎, 佐藤孝夫, 岩垣雄一 (1978). 任意反射率·任意透過率の防波堤による平面的な波浪變形の數値計算, 海岸工學講演會論文集, **20**: 98-102.
- 日本土木學會 海岸工學委員會 (1993). 波構造物地盤の調査·設計手法 調査·研究報告書, 58p.
- 鈴木康正, 森川高德, 迂安治, 水末英之, 平右哲也 (1994). 環境保全型防波堤周邊の波浪變形計算, 海岸工學論文集, **41**: 991-995.
- 中村孝幸, 水谷法美, 許東秀, 金度三 (2002). 港灣域における浮防波堤の平面配置問題に對する近似解法について, 日本海岸工學論文集, **49**: 681-685.
- 中村孝幸, 水谷法美, 許東秀, 金度三 (2002). 浮防波堤

の平面配置法と波浪制御効果に関する研究, 日本
海洋開発論文集, **18**: 299-304.

Lynett, P.J.-F., Liu, P.L.-F., Losada, I.J., and
Vidal, C. (2000). Solitary wave interaction with
porous breakwater. *J. Wtrwy., Port, Coast. and
Oc. Engrg., ASCE*, **126**(6), pp. 314-322.

McIver, P. (1999). Water wave diffraction by thin
porous breakwaters, *J. Wtrwy., Port, Coast. and
Oc. Engrg., ASCE*, **125**(2), pp. 66-70.

Yu, X. (1995). Diffraction of water waves by
porous breakwaters, *J. Wtrwy., Port, Coast. and
Oc. Engrg., ASCE*, **121**(6), pp. 275-282.

Yu, X. and Togashi, H. (1996). Combined diffraction
and transmission of water waves around a porous
breakwater gap, *Proc., 25th Int. Conf. Coast.
Engrg., ASCE, New York*, pp. 2063-2076.