

사다리꼴형상 잠제의 수리특성에 관한 경계요소해석

김남형⁽¹⁾, 양순보⁽²⁾

Boundary Element Analysis on the Hydraulic Characteristics of Submerged Breakwater with Trapezoidal Type

by

Nam-Hyeong Kim⁽¹⁾ and Soon-Bo Yang⁽²⁾

요 약

본 연구에서는 경계요소법을 이용하여 불투과성 사다리꼴형상 잠제에 의한 파랑의 반사율과 투과율을 이론적으로 수치해석 하였다. 해석기법으로는 유체와 투과성 영역을 동시에 해석할 수 있는 파압함수를 사용하였으며, 이론적으로 간단히 하기 위해, 투과성 영역내의 파랑의 운동은 선형소산계수와 부가질량계수를 도입하여 정식화하였다. 사다리꼴형상 잠제의 소파특성은 잠제의 법면경사의 변화에 대한 의존도가 높은 것을 알 수 있었다.

Abstract

The reflection and transmission of submerged breakwater with trapezoidal type are computed numerically using boundary element method. The analysis method is based on the wave pressure function with the continuity in the analytical region including fluid and porous structures. Wave motion within the porous structures is simulated by introducing the linear dissipation coefficient and added mass coefficient. The results indicate that transmission and reflection coefficient are determined due to the change of slope of submerged breakwater with trapezoidal type.

Keywords: Boundary Element Method, Submerged Breakwater, Wave Pressure Function, Transmission Coefficient, Reflection Coefficient.

1. 서 론

해안·항만에 설치되어 있는 소파 구조물의 하나로서 잠제는 수질 보전과 경관상 뛰어난 성질을 가지고 있다.

잠제의 수리학적 특성은 여러 각도로부터 수많은

이론적 혹은 실험적인 연구가 이루어져 왔으며, 이러한 해안구조물에 의한 파랑저감효과를 예측하는 것이 중요시되고 있다. 또한 항만구조물을 장기적으로 안정성을 유지하기 위하여, 세굴이나 침하가 일어나기 어려운 단면설계를 행하는 것도 중요하다(김[1999]).

(1) 제주대학교 해양과학부, nhkim@cheju.ac.kr

(2) 제주대학교 대학원 토목해양공학과, beeo17@hotmail.com

지금까지의 실험적 연구에 의하면, 반사율이 적은 완경사의 단면 형상이 세굴이나 침하에 대하여 유리하다고 알려져 있다. 그러나 이러한 유리한 단면을 사전에 예측하는 것 또한 상당히 어렵다(泉宮 등[1989]; Somchai 등[1989]).

종래의 해석법은 투과영역을 포함하는 파동 문제에 대한 이론적인 계산 방법으로서, 투과층 내의 유체의 저항을 속도에 비례하는 등가선형 저항으로 취급함으로써 속도포텐셜 ϕ 가 가정되고, 이 속도포텐셜 ϕ 를 미지량으로 하는 해석기법(Kioka[1989]; Ijima 등[1971])이 이용되어 왔다. 그러나 이러한 종래의 해석기법은 속도포텐셜 ϕ 가 각 경계영역면에서 유체운동의 연속조건을 만족시켜야 할 필요가 있으므로, 그 처리 방법이 복잡하며, 실용적이라고 할 수 없다.

여기서 제안한 파압함수를 미지량으로 하는 해석기법(Takikawa and Kim[1992a, b])을 이용하면, 각 경계 영역에서 유체의 연속 조건을 특별히 고려할 필요가 없고, 에너지 소산을 포함하는 폭넓은 파동 문제를 쉽게 해석 할 수가 있다.

본 연구에서는, 여러 형태의 잠제형상 중 세굴이나 침하에 대하여 유리한 사다리꼴형상 잠제를 선택하였으며, 사다리꼴형상 잠제의 범면경사의 변화에 따른 파랑의 반사율과 투과율을 파압함수를 미지량으로 사용하는 경계요소법(김과서[1995]; 김[2002])을 이용하여 수치해석 하고자 한다.

2. 경계요소해석

좌표계는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 투과성 구조물을 포함한 유체영역에서의 파랑의 특성을 해석할 때에는 전체의 해석영역이 각각 다른 공극율과 유체저항을 가지는 영역으로 구성되어 있으므로 각 영역마다 세분화된 유체 운동을 고려해야 한다.

경계 B_1 은 자유수면, 경계 B_2 는 해저 암반이나 구조물 등에 의한 불투과 경계이고, 경계 B_3 는 해석상 설정한 가상 경계를 의미하며, 이 가상 경계에서의 유체의 운동은 연속성을 만족해야 한다. 경계 B_1, B_2, B_3 으로 둘러싸인 해석 영역에서는 유체의 운동을 미소진폭운동으로 가정하여 선형해석을 한다.

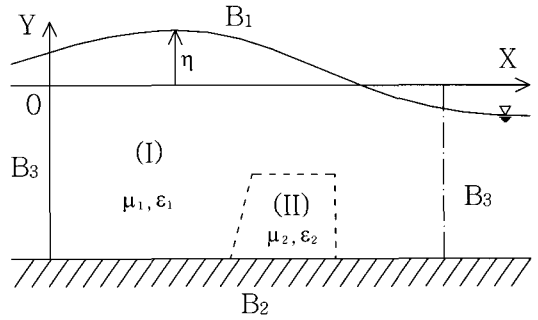


Fig. 1 Analytical Region and Coordinate.

해석영역을 이루고 있는 각 투과영역에 있어서, X 방향 및 Y 방향의 평균유속을 각각 u, v 로 나타내며, 압력을 P , 유체의 밀도를 ρ 로 한다. 에너지 소산을 가져오는 유체의 연속방정식 및 운동방정식은 각 투과영역에 대해서, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\epsilon} \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - F_x \\ \frac{1}{\epsilon} \frac{Dv}{Dt} &= -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho} + g \cdot y \right) - F_y \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ϵ 는 공극율, g 는 중력가속도이다. 또, F_x, F_y 는 유체운동에 대한 에너지 소산(유체저항)의 X, Y 방향의 성분을 의미한다. 에너지 일산항은 레이놀드수가 매우 작은 경우를 제외하면, 일반적으로 비선형이며, 유체가 가속도운동을 하는 경우에는 부가질량력으로서 유체저항이 작용한다. 여기서는 비선형적인 에너지 일산항을 등가(等價)인 선형소산계수 μ 와 부가질량계수 C_m 을 이용하여, 다음 식으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} F_x &= \mu \cdot u + (1-\epsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial t} \\ F_y &= \mu \cdot v + (1-\epsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial v}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하고, 가속도의 이송항을

무시하면 선형화된 다음의 운동방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\rho} \right) - \mu \cdot u \\ \frac{1}{V} \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\rho} + g \cdot y \right) - \mu \cdot v \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\frac{1}{V} = \frac{1}{\epsilon} (1 + C_m \cdot (1 - \epsilon))$ 이다. 식(4)에 의해, 유체 운동은 속도포텐셜 $\Phi(x, y, t) = \text{Re}\{\phi(x, y)e^{i\sigma t}\}$ 의 존재를 가정할 수 있다. 유체의 운동방정식(4)를 적분하면, 유체운동의 기초식(1)과 (2)는 속도포텐셜을 이용하여, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \cdot \phi + \frac{P}{\rho} + g \cdot y = 0 \quad (6)$$

경계조건으로서는, 각 영역마다 대응하는 조건을 채용하는 것으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

경계 S_1 ;

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{y=0} \\ \eta = -\frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi V \right) \Big|_{y=0} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{경계 } S_2 ; \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (n : \text{외향법선방향}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{경계 } S_3 ; \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \\ (\phi_0 : \text{해석영역 외부의 속도포텐셜}) \end{aligned} \quad (9)$$

또, 각 영역의 경계면에서는 유체운동의 연속조건(질량유속과 에너지유속)을 만족할 필요가 있다.

$$\text{질량 유속 ; } \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{에너지 유속 ;} \\ \left(\frac{P}{\rho g} + y \right) = -\frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mu \phi V \right) \equiv H \end{aligned} \quad (11)$$

해석기법으로는 식(7)~(10)의 속도포텐셜 ϕ 를 미지량으로 나타내는 경계치의 문제로 취급할 수가 있다. 그러나 속도포텐셜 ϕ 를 미지량으로 해석하는 영역분할법의 경우, 각 영역에서 ϕ 가 식(10)을 만족시킬 필요가 있으므로, 불균질한 영역이 혼재하는 문제에 대해서는 처리 방법이 복잡하며, 실용적이라고 할 수 없다. 따라서 여기서는 식(11)에 나타나는 과압함수 H 가 전 해석 영역을 통해서 연속적인 것에 착안하여, 이것을 미지량으로 하는 해석수법을 이용한다. 입사파의 각주파수 $\sigma (=2\pi/T, T=\text{주기})$ 에 의해 유체운동의 주기성을 고려하여,

$$H(x, y, t) = \text{Re}\{h(x, y)e^{i\sigma t}\} \quad (12)$$

로 한다. 여기서, $i = \sqrt{-1}$ 이다. 식 (11)으로부터,

$$\phi = -\beta \cdot H, \quad \beta = \frac{g \cdot V}{(i \cdot \sigma + \mu \cdot V)} \quad (13)$$

가 얻어진다. 식(13)을 이용하여, 식(5)~(11)로 나타내는 각 조건식을 대입하면, 다음식과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \text{전체영역 : } \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\beta \frac{\partial H}{\partial y} \right) &= 0 \\ \text{경 계 } S_1 : i\sigma H \Big|_{y=0} &= -\beta \frac{\partial H}{\partial y} \Big|_{y=0} \\ \text{경 계 } S_2 : \beta \frac{\partial H}{\partial n} &= 0 \\ \text{경 계 } S_3 : \beta \frac{\partial H}{\partial n} &= \beta \frac{\partial H_0}{\partial n}, \left(H_0 = -\frac{1}{\beta} \phi_0 \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

식(14)의 각 조건식으로부터, 과압함수 H 에 관한 경계값 문제로 되며, 각 영역마다 ϵ, μ 을 대

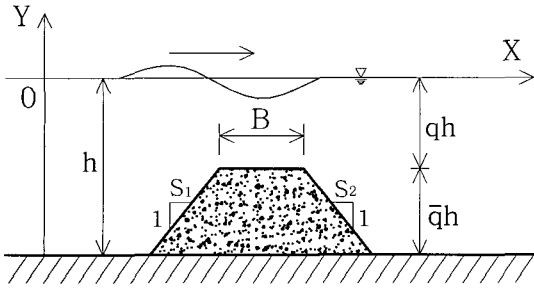


Fig. 2 Sketch of Trapezoidal Typed Impermeable Submerged Breakwater.

입함으로서, 영역을 구분하지 않고 해석할 수가 있다.

해석영역의 가상 경계 S_3 에서의 조건은, 에너지 유속의 연속성을 고려했으며, 가상 경계의 처리방법과 경계요소법에 의한 정식화에 관해서는 참고문헌(김 등[1991]; Takikawa 등[1992b]; 김 [1995]; 井島 등[1971])에 상세히 소개되어 있으므로, 여기서는 생략한다.

3. 수치계산 및 고찰

과동장(場)의 해석에 있어서, 구조물 주변의 흐름은 정상파와 산란파 등이 발생하기 때문에 가능한 경계면을 구조물에서 멀리 취하는 것이 바람직하다. 따라서 여기서는 앞에 있는 잠제의 선단에서 가상경계면까지 2과장분의 거리를 취했다.

Fig. 2에서 나타낸 불투과 사다리꼴 형상의 잠제 요소의 분할은 수심방향으로 각각 10요소, 자유수면은 110요소, 잠제의 전·후 간격은 40요소, 잠제의 천단고는 20요소, 잠제의 측벽은 5요소이며, 전체 요소는 240개로 분할하였다.

Fig. 3은 불투과 직립잠제에 대한 해석기법의 검증을 위해 수치계산 한 예로서, Fig. 1의 유체의 영역(Ⅰ)을 $\mu = 0$, 공극률 $\epsilon = 1$, 잠제의 영역(Ⅱ)을 $\mu = 0$, 공극률 $\epsilon = 0$ 으로 놓고, 입사파의 무차원주파수 $\sigma^2 h/g$ 에 대응하는 불투과 잠제의 반사율을 나타낸 것이다. Fig. 3에서 실선은 井島 등[1971]의 영역분할법에 의한 계산 결과이며, $\circ \circ \circ$, $\cdot \cdot \cdot$ 은 경계요소법으로 얻은 해석 결과이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 직립 불투과

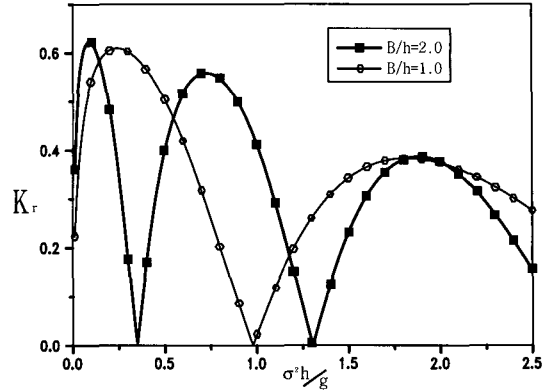


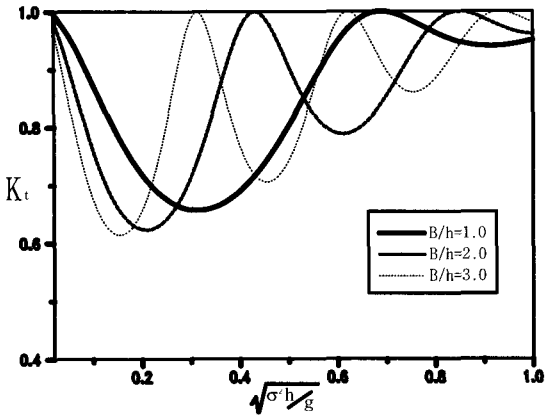
Fig. 3 Comparison of Reflection Coefficient for an Impermeable Submerged Breakwater ($q=2.0$); — Other numerical Solutions (Ijima et al) and $\circ \circ \circ$, $\cdot \cdot \cdot$ Present Solutions(BEM).

잠제에 대한 양 해석기법의 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 해석기법의 타당성과 유효성이 검증되었다.

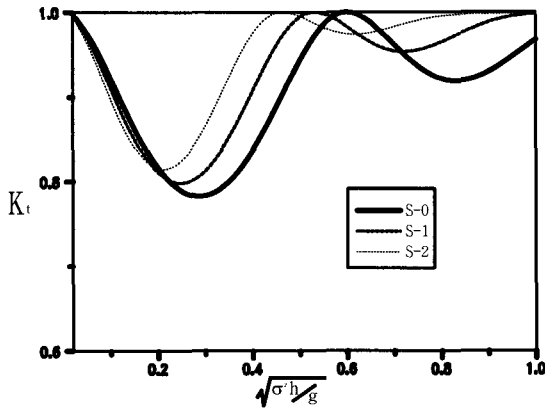
Fig. 4의 (a), (b), (c)의 각 그림은 불투과 잠제의 투과율을 나타낸 것이다. 각 그림에서 (a)와 (b)는 잠제의 법면경사 S 측, S_1 , S_2 를 동시에 같은 비율로 변화 시킬 때의 경우이며, 그리고 (c)는 잠제의 폭 B를 변화 시킬 때의 투과율에 미치는 영향을 여러 입사파에 관련된 파라메타 $\sqrt{\sigma^2 h/g}$ 에 대해 계산한 결과이다.

Fig. 4 (a), (b)를 통하여, 제체의 법면경사의 효과는, 법면경사가 완만할수록 투과율이 크게 되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 천단위의 수심비 qh 가 작을수록 평균투과율은 작아지는 경향을 보이는 것도 알 수 있다. 그리고 Fig. 4 (c)의 잠제폭의 투과율에 대한 효과는 잠제폭이 커져도 진동주기만이 변한다는 것을 알 수 있다.

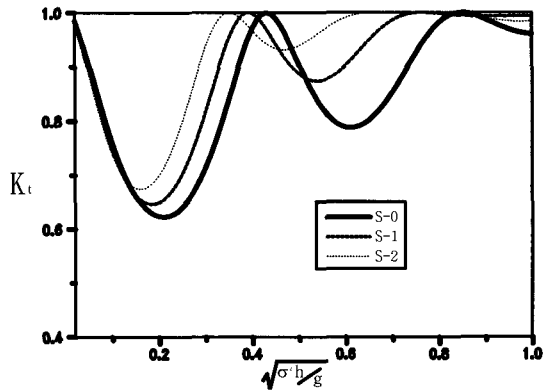
Fig. 5(a)와 5(b)는 천단위 수심 qh 가 0.1, 0.3인 경우로 해안방향의 법면을 1:1로 고정하고, 외해 방향의 법면경사를 1:1, 1:2, 1:3으로 변화시켰을 때의 계산결과이다. 법면경사의 변화에 의한 반사율의 차이는 거의 없으며, 법면경사에 따라 최대 반사율이 단주기 쪽으로 약간 이동하는 것을 알 수 있다. 또 법면경사가 1:1인 경우 반



(a) Effect of Slope(B/h=2.0, qh=0.2)

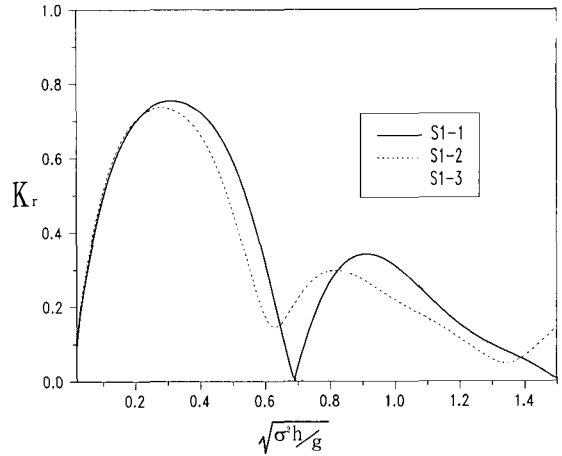


(b) Effect of Slope(B/h=2.0, qh=0.1)

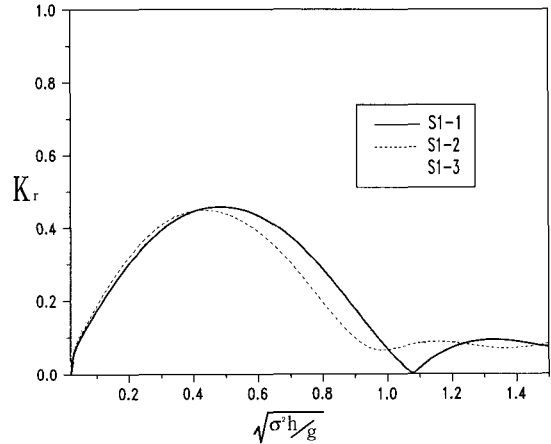


(c) Effect of Width (qh=0.1, S=1)

Fig. 4 Transmission Coefficient for an Impermeable Submerged Breakwater with Trapezoidal Type.



(a) Effect of Slope(B/h=1.0, qh=0.1)

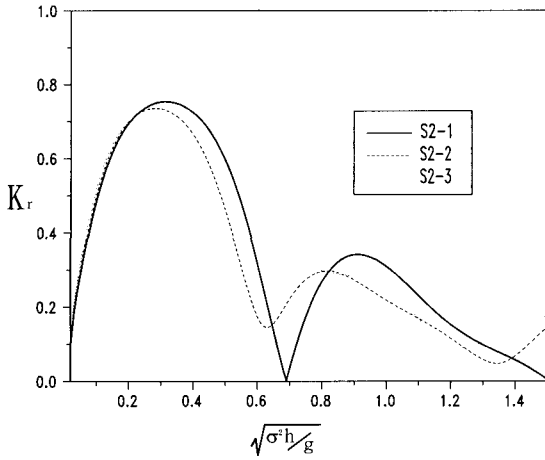


(b) Effect of Slope(B/h=1.0, qh=0.3)

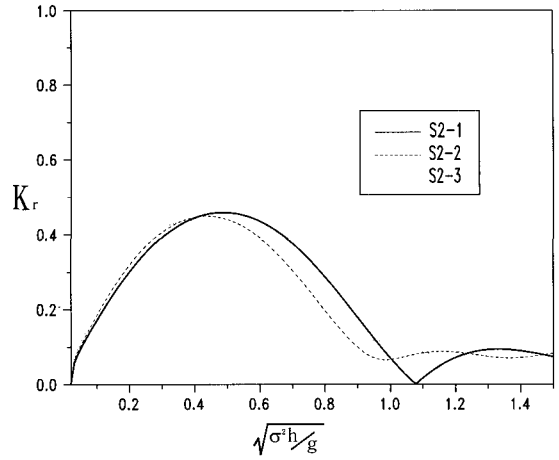
Fig. 5 Reflection Coefficient for an Impermeable Submerged Breakwater with Trapezoidal Type (the case of changes on the offshore side).

사울의 zero점이 나타나지만, 범면경사가 1:2, 1:3 인 경우에는 반사율의 zero점이 나타나지 않는 것도 알 수 있다. Fig. 6(a), (b)는 Fig. 5(a), (b)와 똑같은 조건아래에서 외해 방향의 범면경사를 1:1로 고정하고, 해안방향의 범면경사를 1:1, 1:2, 1:3으로 변화시켰을 때의 계산결과이며, Fig. 5와 같은 결과가 얻어졌다.

Fig. 5(a)와 Fig. 6(a) 그리고 Fig. 5(b)와 Fig



(a) Effect of Slope(B/h=1.0, qh=0.1)



(b) Effect of Slope(B/h=1.0, qh=0.3)

Fig. 6 Reflection Coefficient for an Impermeable Submerged Breakwater with Trapezoidal Type(the case of changes on the inshore side).

6(b)의 비교에서 알 수 있듯이 불투과 잠제 전후 법면경사의 변화에 의한 반사율은 거의 동일한 것을 알 수 있다.

이것은 천단위의 수심이 일정한 경우, 泉宮 등 [1990]이 행한 수치계산에서 입증되었듯이 불투과 잠제에 있어서 반사율은 불투과 잠제의 체적에 의해 결정되는 것을 나타내고 있다.

- 2) 천단위의 수심이 작을수록 투과율이 적어지는 것을 알 수 있다.
- 3) 완만한 법면경사의 잠제에 비하여 급한 법면경사의 잠제가 투과율이 작게 나타나는 것을 알 수 있다.
- 4) 잠제의 천단폭이 클수록 투과율이 작아지며, 진동주기 또한 변하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

사다리꼴형상 잠제의 법면경사의 변화에 따른 파랑감쇄 효과를 경계요소법을 이용하여 수치적으로 해석하여 보았다.

우선, 투과성영역을 포함한 천해파 운동의 해석에 대하여, 선형파동이론의 적용으로 인한 투과층의 저항계수를 선형화한 등가선형계수를 사용하였으며, 더욱이 파압이 유체 및 투과층의 전영역을 통과하는 연속함수임을 주목하여, 파압으로 표현된 경계값 문제에 대한 경계요소법의 적용을 기술하였다. 사다리꼴형상의 불투과 잠제 해석으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 반사율은 잠제의 체적과 파랑 주기에 대한 의존도가 높고, 장주기 입사파에 대해서 효과적인 것을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김남형 역, 1999, 소파구조물, 과학기술, pp. 320.
- [2] 김남형 역, 2002, 수치유체역학, 원기술, pp. 171~204.
- [3] 김남형, 1995, “경계요소법에 의한 복수투과 잠제의 파랑특성해석”, 대한토목학회논문집, 제 15권 제2호, pp. 425~431.
- [4] 金南亨·瀧川清·崔漢圭, 1991, “境界要素法

에 의한 波動場에 있어서 非線型波의 假想境界處理”, 韓國海岸·海洋工學會誌, 第3卷 第3號, pp. 176~183.

[5] 김남형·서일교 공역, 1995, 경계요소법기초, 원창출판사, pp. 207.

[6] Kioka, W., 1989, "Reflection surface water waves by parallel submerged breakwater", JSCE, No. 411(II-2), pp. 263~266.

[7] Ijima, T., Eguchi, Y. and Kobayashi, A., 1971, "A theory and experimental on the permeable breakwater and quay wall", T. R. No. 3, Coastal Engineering Research Laboratory, Kyushu University, Fukuoka, Japan. Apr.

[8] Takikawa, K. and Kim, N. H., 1992a, "Open boundary treatment of the finite amplitude wave using the boundary element", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 9, No. 4, pp. 331~338.

[9] Takikawa, K. and Kim, N. H., 1992b, "An analytical technique for permeable breakwaters using boundary element method", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 10, No. 4, pp. 299~305.

[10] 井島武士·佐佐木富雄, 1971, "潛堤の效果に關する理論的研究", 第18回海岸工學講演會論文集, pp. 141~147.

[11] 泉宮尊司·遠藤雅人, 1989, "潛堤および透過性構造物のある海浜における波動場解析", 海岸工學論文集, 第36卷, pp. 638~642.

[12] 泉宮尊司·古俣弘和·水上 淳, 1990, "透過性波浪制御構造物の線形抵抗係數および局所的反射率", 海岸工學論文集, 第37卷, pp. 544~548.

[13] Somchai·磯部雅彦·渡辺 晃, 1989, "透過潛堤による波浪變形の解析モデル", 海岸工學論文集, 第36卷, pp. 643~647.