

## 투과 저면을 고려한 잠제 주변의 파형에 관한 수치해석

김 남 형 · 양 순 보

제주대학교 토목환경공학전공

### Numerical Analysis on the Wave Profile by a Submerged Breakwater on Porous Bottoms

Nam-Hyeong Kim and Soon-Bo Yang

Major of Civil Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

The wave profile by a submerged breakwater on porous bottoms is 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 structures. Wave motion within the porous structures is simulated by introducing the linear dissipation coefficient and the added mass coefficient. The results indicate that the wave over porous bottoms travels being damped.

**Key words** : boundary element method, submerged breakwater, wave pressure function

#### 서 론

최근 경제 활동의 확충 및 국민소득의 증가에 따라 해안역에 있어서 자연환경의 보존, Water-Front 및 Resort 개발의 중요성이 보다 강조되고 있다. 그러나 기존의 방파제 등과 같은 해안·항만구조물은 해저에서부터 수면위로 건설되어 해수유동을 차단하므로 해안환경측면에서 그 기능을 충분히 발휘할 수가 없기 때문에, 최근에 파랑제어라는 원래의 목적에 부합될 뿐만 아니라, 해안환경 및 생태계측면에서도 우수한 기능을 갖는 잠제에 대한 연구를 활발히 수행하여 오고 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).

종래의 해석법은 투과영역을 포함하는 파동 문제에 대한 이론적인 계산 방법으로서, 투과층내의 유체의 저항을 속도에 비례하는 등가선형저항으로 취급함으로써 속도포텐셜  $\phi$  가 가정되고, 이 속도포텐셜  $\phi$  를 미지량으로 하는 해석기법(Kioka, 1989; Ijima 등, 1971)이 이용되어 왔다. 그러나 이러한 종래의 해석기법은 속도포텐셜  $\phi$  가 각 경계 영역에서 유체운동의 연속조건을 만족시켜야 할 필요가 있으므로, 그 처리방법이 복잡하며, 실용적이라고 할 수 없다.

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

본 연구에서는, 파압함수를 미지량으로 사용하는 경계요소법(김과 서, 1995; 김, 2002)을 이용하여 여러 형태의 잠제형상 중 직사각형 잠제를 선택하였으며, 투과 저면에 의한 잠제 주변의 파형과 불투과 저

면에 의한 잠재 주변의 파형을 비교·분석하였다.

### 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  $S_1$ 은 자유수면, 경계  $S_2$ 는 해저 저면에 의한 경계이고, 경계  $S_3$ 는 해석상 설정한 가상 경계를 의미하며, 이 가상 경계에서의 유체의 운동은 연속성을 만족해야 한다. 경계  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ 으로 둘러싸인 해석 영역에서는 유체의 운동을 미소진폭운동으로 가정하여 선형해석을 한다.

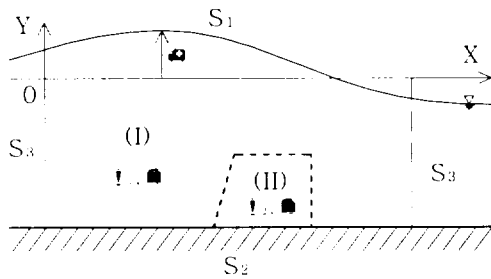


Fig. 1. Analytical Region and Coordinate.

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

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

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) - F_x \quad (2)$$

$$\frac{1}{\epsilon} \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{P}{\rho} + g \cdot y \right) - F_y$$

여기서,  $\epsilon$ 는 공극율,  $g$ 는 중력가속도이다. 또,  $F_x$ ,  $F_y$ 는 유체운동에 대한 에너지 소산(유체저항)의

$X$ ,  $Y$ 방향의 성분을 의미한다. 에너지 소산항은 레이놀드수가 매우 작은 경우를 제외하면, 일반적으로 비선형이며, 유체가 가속도운동을 하는 경우에는 부가질량력으로서 유체저항이 작용한다. 여기서는 비선형적인 에너지 소산항을 등가(等價)인 선형소산계수  $\mu$ 와 부가질량계수  $C_m$ 을 이용하여, 다음 식으로 나타낸다.

$$F_x = \mu \cdot u + (1 - \epsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$F_y = \mu \cdot v + (1 - \epsilon) \cdot C_m \cdot \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하고, 가속도의 이송항을 무시하면 선형화된 다음의 운동방정식이 얻어진다.

$$\frac{1}{V} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P}{\rho} \right) - \mu \cdot u$$

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

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

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

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

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

$$\text{경계 } S_1 : \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{y=0}$$

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

$$\text{경계 } S_2 : \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{K}{\mu} \frac{\partial p_s}{\partial n} \quad (n : \text{외향법선방향}) \quad (8)$$

$$\text{경계 } S_3 : \frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \phi_b}{\partial n}$$

( $\phi_b$  : 해석영역 외부의 속도포텐셜) (9)

여기서  $p_s$  는 간극수압을 의미하며,  $K$  는 투수계수를 의미한다.

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

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

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

해석수법으로는 식(7)~(10)의 속도포텐셜  $\phi$  를 미지량으로 나타내는 경계값의 문제로 취급할 수가 있다. 그러나 속도포텐셜  $\phi$  를 미지량으로 해석하는 영역분할법의 경우, 각 영역에서  $\phi$  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 파압함수  $H$  가 전 해석 영역을 통해서 연속적인 것에 착안하여, 이것을 미지량으로 하는 해석수법을 이용한다. 입사파의 각주파수  $\sigma$  ( $= 2\pi/T$ ,  $T$ =주기)에 의해 유체 운동의 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.

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

식(14)의 각 조건식으로부터, 파압함수  $H$  에 관한 경계값 문제로 되며, 각 영역마다  $\epsilon, \mu$  을 대입함으

로서, 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 (金 등, 1991; 김, 1995; 김과 양, 2003)에 상세히 소개되어 있으므로, 여기서는 생략한다.

해석 경계 조건의 분산 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma^2 - gk \tanh kh = -i \frac{\sigma K}{\nu} (gk - \sigma^2 \tanh kh) \quad (15)$$

여기서  $\nu$  는 동점성계수이다. 이 분산 관계식은 복잡하며, 복소수  $k$  를 산출한다. 그리고  $k = k_r + ik_i$  로 나타내어진다.  $k$  의 실수부는 실제의 파수를 나타내며, 파장과 관계가 있다. 그리고 허수부는 진폭의 감소를 결정한다. 식(15)의  $R(= \sigma K/\nu)$  는 일반적으로 작으며, 모래에 대하여  $10^{-6} - 10^{-2}$ 이고, 일반적인 범위의 자갈인 경우  $10^{-1}$ 이다(Dean and Dalrymple, 1984; Cruz et al., 1997).

## 수치해석 및 고찰

### 일정한 투과저면 위의 파형분포

대략적인 결과는 식(15)의 분산관계식으로 얻을 수 있으며, 그 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 실선은 Reid and Kajiura(1957)에 의한 계산결과이며, 본 연구와 일치하는 것을 알 수 있다.

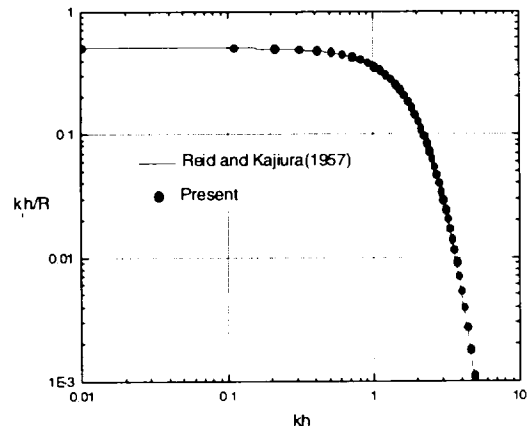


Fig. 2. Dimension damping coefficient versus depth.

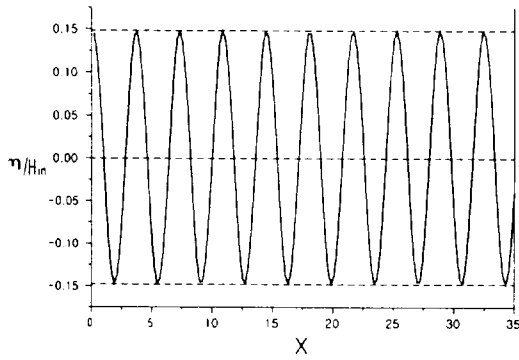
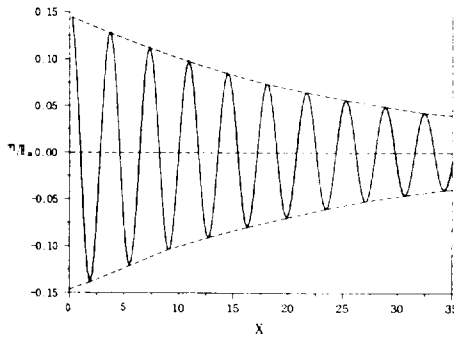
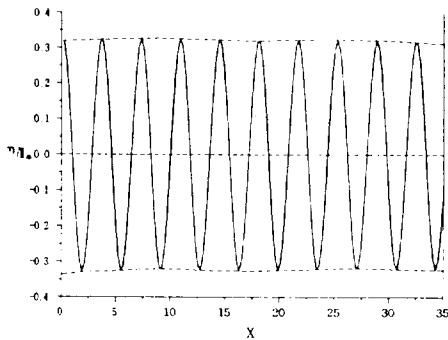


Fig. 3. Wave propagation on uniform impermeable bottoms. ( $h/L=0.1$ )

Fig. 3는 불투과 수평 저면 위를 진행하는 파를 나타낸 것이며, 진폭의 감쇠 없이 진행된다는 것을 알 수 있다.



(a)  $R=0.1, h/L=0.1$



(b)  $R=0.1, h/L=0.5$

Fig. 4. Wave propagation over uniform porous bottoms.

Fig. 4 (a), (b)는 무한대의 일정한 투과 저면 위를 진행하는 파를 나타낸 것으로서, Fig. 4의 (a)는 상대

수심( $h/L$ )이 0.1인 경우, 즉 천해역을 나타내며, (b)는 상대수심( $h/L$ )이 0.5인 경우, 즉 심해역을 나타낸 것이다. Fig. 4의 (a)를 통하여 상대수심( $h/L$ )이 0.1인 경우 파의 진폭의 감쇠가 지수적으로 일어나는 것을 알 수 있으며, (b)를 통하여 상대수심( $h/L$ )이 0.5인 경우 파의 진폭의 감쇠가 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 자유표면 아래의 입자 속도가 투과층에 영향을 주지 않아, 투과층을 통하여 에너지 일산을 일으키는 침투속도가 무시할 정도로 작기 때문이다(Reid and Kajiura, 1957; Dean and Dalrymple, 1984; Cruz et al., 1997).

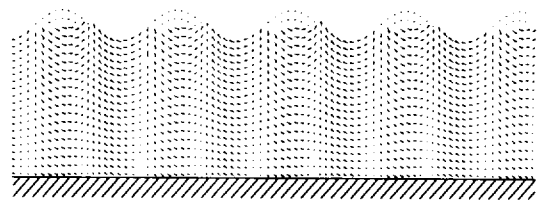


Fig. 5. Wave profile and velocity field over uniform impermeable bottoms. ( $h/L=0.1$ )

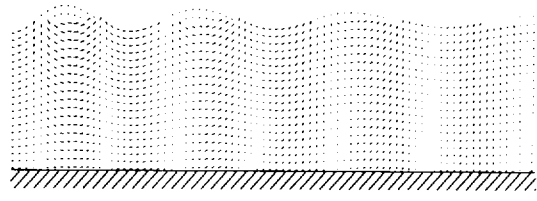


Fig. 6. Wave profile and velocity field over uniform porous bottoms. ( $R=0.1, h/L=0.1$ )

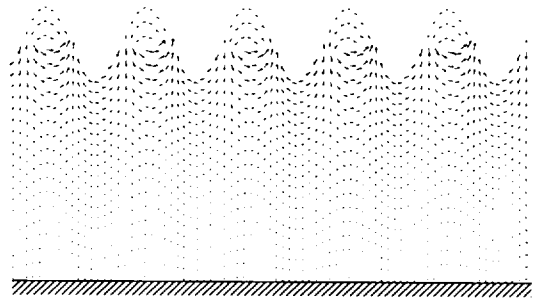


Fig. 7. Wave profile and velocity field over uniform porous bottoms. ( $R=0.1, h/L=0.5$ )

Fig. 5, 6, 7은 각각의 조건에 대한 파형 및 속도벡터를 나타낸 것이다. Fig. 5를 통하여 일정한 불투과

저면을 진행하는 파는 파의 진폭에 변화가 없이 진행한다는 것을 Fig. 3과 비교하여 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6을 통하여 천해역에서는 자유표면 아래의 입자속도가 투과층에 대하여 영향을 받기 때문에 파의 진폭이 감소하는 것을 Fig. 4(a)와 비교하여 확인할 수 있으며, Fig. 7을 통하여 심해역에서는 자유표면 아래의 입자속도가 투과층에 영향을 받지 않아 파의 진폭이 변화 없이 진행한다는 것을 Fig. 4(b)와 비교하여 확인할 수 있다.

잠제주변의 파형 및 속도벡터

파동장(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 2파장분의 거리를 취했다.

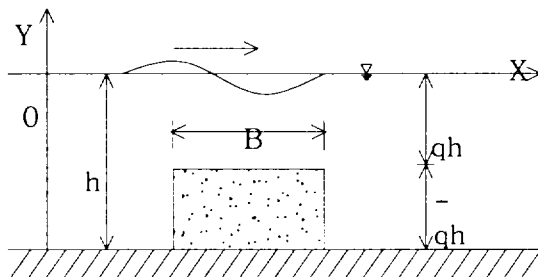


Fig. 8. Sketch of Impermeable Submerged Breakwater.

Fig. 8에서 나타낸 불투과 직사각형 형상의 잠제 요소의 분할은 수심방향으로 각각 10요소, 자유수면은 100요소, 잠제의 전·후 간격은 40요소, 잠제의 천단고는 20요소, 잠제의 측벽은 5요소이며, 전체 요소

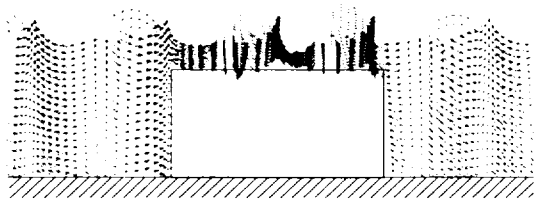


Fig. 9. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform impermeable bottoms. ( $h/L=0.1$ )

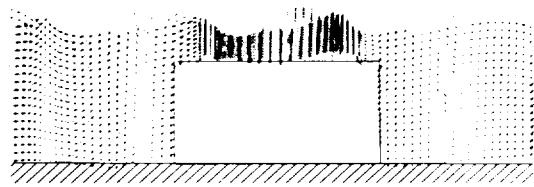


Fig. 10. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform porous bottoms. ( $R=0.1, h/L=0.1$ )

는 230개로 분할하였다.

Fig. 9, 10은 각각 불투과 저면과 투과 저면 위를 진행하는 파를 불투과 직사각형 잠제에 대하여 적용한 것이다. Fig. 9를 통하여 일정한 불투과 저면 위를 진행하는 파는 잠제를 지나면서 파고가 감소하는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 10을 통하여 일정한 투과 저면 위를 진행하는 파는 투과저면의 에너지 일산과 잠제의 영향으로 파고가 현저히 감소되는 것을 확인할 수 있다.

결론

불투과 저면과 투과 저면 위를 진행하는 파의 파형과 속도벡터를 경계요소법을 이용하여 이론적으로 해석하여 비교해 보았으며, 이를 직사각형 잠제에 대하여 적용을 하였다.

우선, 투과성영역을 포함한 천해파 운동의 해석에 대하여, 선형파동이론의 적용으로 인한 투과층의 저항계수를 선형화한 등가선형계수를 사용하였으며, 더욱이 파압이 유체 및 투과층의 전영역을 통과하는 연속속도로서 주목하여, 파압으로 표현된 경계값 문제에 대한 경계요소법의 적용을 기술하였다.

본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

(A) 불투과 저면 위를 진행하는 파는 파의 진폭이 변화 없이 진행하는 것을 알 수 있으며, 천해역의 투과저면 위를 진행하는 파는 진폭이 감소하면서 진행하는 것을 알 수 있다.

(B) 심해역에서 투과 저면 위를 진행하는 파는 파의 진폭이 변화 없이 진행하는 것을 알 수 있으며, 이는 자유표면 아래의 입자속도가 투과 저면의 영향을 거의 받지 않기 때문이며, 또한 Fig. 7의 속도벡터를 통하여 확인할 수 있다.

(C) 불투과 직사각형 잠체에 대한 적용으로부터, 불투과 저면 위를 진행하는 파보다 투과 저면 위를 진행하는 파가 파고의 감쇠가 현저하다는 것을 알 수 있다.

### 참고 문헌

- 김남형. 1995. 경계요소법에 의한 복수투과잠체의 파랑 특성해석. 대한토목학회논문집, 15(2): 425-431.
- 김남형·양순보. 2003. 사다리꼴형상 잠체의 수리특성에 관한 경계요소해석. 한국해양환경공학회(계재예정중).
- 김남형·서일교 공역. 1995. 경계요소법기초. 원창출판사. 207pp.
- 김남형 역. 1999. 소파구조물. 청문각. 320 pp.
- 김남형 역. 2002. 수치유체역학. 원기술. pp.171-204.
- 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. 한국해양안·해양공학회지, 3(3): 176-183.
- Kioka, W. 1989. Reflection surface water waves by parallel submerged breakwater. JSCE., 411(II-2): 263-266.
- Ijima, T., Y. Eguchi and A. Kobayashi. 1971. A theory and experimental on the permeable breakwater and quay wall. Coastal Engineering Research Laboratory. Kyushu, Fukuoka. 3
- Takikawa, K. and N. H. Kim. 1992a. Open boundary treatment of the finite amplitude wave using the boundary element. Engineering Analysis with Boundary Elements, 9(4): 331-338.
- Takikawa, K. and N. H. Kim. 1992b. An analytical technique for permeable breakwaters using boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements, 9(4): 299-305.
- Cruz, E.C., M. Isobe, and A. Watanabe. 1997. Boussinesq equation for wave transformation on porous beds. Coastal Engineering, 30: 125-156.
- Reid, R.O. and K. Kajiura. 1957. On the damping of gravity waves over a permeable sea bed. Trans. AGU., 38(5): 662-666.
- Dean, R.G. and R. A. Dalrymple. 1984. WATER WAVE MECHANICS for Engineers and Scientists. Prentice-Hall Inc., New Jersey. pp. 261-283.