

碩士學位論文

海底面 에너지消散을考慮한 潛堤의 境界要素解析



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

梁 順 普

2003年 12月

海底面 에너지消散을考慮한 潛堤의 境界要素解析

指導教授 金南亨

梁順普

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



梁順普의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2003年 12月

Boundary Element Analysis on the Submerged
Breakwater Considering Energy Dissipation of Seabed

Soon-Bo Yang

(Supervised by professor Nam-Hyeong Kim)



A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
List of Figures	iii
Summary	vi
I. 서 론	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적	2
3. 논문의 구성	2
II. 경계요소해석	3
1. 기본 방정식	3
2. 가상경계처리	7
3. 경계요소법에 의한 정식화	9
1) 모서리점의 취급	10
2) 투과층 영역에 대한 정식화	10
3) 투과층을 제외한 영역에 대한 정식화	12
4. 저면에서의 에너지일산 방정식	15
III. 경계요소해석의 타당성 검토	20
1. 잠제의 형상에 대한 타당성 검토	20
2. 투과저면 위의 파의 감쇠 검토	24
IV. 경계요소해석의 결과와 고찰	29
1. 불투과저면 위의 파의 진행	29
2. 투과저면 위의 파의 진행	29

3. 잠제 형상에 대한 적용	31
1) 직사각형 잠제를 설치하였을 때	31
2) 사다리꼴형상 잠제를 설치하였을 때	32
V. 결 론	44
VI. 참고문헌	46



List of Figures

Fig. 1	Analytical Region and Coordinate	4
Fig. 2	Definition of notation	11
Fig. 3	Corner point and outwardly drawn normal	11
Fig. 4	Sketch of impermeable submerged breakwater	21
Fig. 5	Sketch of trapezoidal type impermeable submerged breakwater	21
Fig. 6	Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater($q = 0.2$) ; — Other numerical solutions(Ijima et al) and ◦ ◦ ◦ , • • • Present solutions(BEM)	22
Fig. 7	Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater of trapezoidal type($q = 0.3$) ; — Other numerical solutions(Ijima et al) and ◦ ◦ ◦ Present solutions(BEM)	23
Fig. 8	Dimension damping coefficient versus depth	25
Fig. 9	Wave propagation on uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1$)	26
Fig. 10	Wave propagation over uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1$)	27
Fig. 11	Wave propagation over uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.5$)	28
Fig. 12	Wave profile and velocity field over uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1$)	29
Fig. 13	Wave profile and velocity field over uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1$)	30
Fig. 14	Wave profile and velocity field over uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.5$)	30

Fig. 15	Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform impermeable bottoms. ($h/L = 0.1$)	34
Fig. 16	Comparison of wave profile over uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1, q = 0.1$)	34
Fig. 17	Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform porous bottoms. ($R = 0.05, h/L = 0.1$)	35
Fig. 18	Comparison of wave profile over uniform porous bottom. ($R = 0.05, h/L = 0.1, q = 0.1$)	35
Fig. 19	Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform porous bottoms. ($R = 0.1, h/L = 0.1$)	36
Fig. 20	Comparison of wave profile over uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1, q = 0.1$)	36
Fig. 21	Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater of trapezoidal type on uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1$)	37
Fig. 22	Comparison of wave profile over uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1, q = 0.1$)	37
Fig. 23	Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater of trapezoidal type on uniform porous bottom. ($R = 0.05, h/L = 0.1$)	38
Fig. 24	Comparison of wave profile over uniform porous bottom. ($R = 0.05, h/L = 0.1, q = 0.1$)	38
Fig. 25	Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater of trapezoidal type on uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1$)	39
Fig. 26	Comparison of wave profile over uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1, q = 0.1$)	39

Fig. 27	Comparison of transmission coefficients for the submerged breakwater on impermeable bottom	40
Fig. 28	Comparison of transmission coefficients for the submerged breakwater on porous bottom($R = 0.1$)	41
Fig. 29	Comparison of transmission coefficients for the submerged trapezoidal breakwater on impermeable bottom	42
Fig. 30	Comparison of transmission coefficients for the submerged trapezoidal breakwater on porous bottom($R = 0.1$)	43



Summary

The ability of a coastal or ocean engineer to predict the wave reflection and transmission through a submerged breakwater plays an important role when assessing the overall effectiveness of such a structure in protecting a harbor and beach from ocean waves. The reflection characteristics may indicate the accessibility to the harbor through the breaker's influence on the wave near the entrance of the harbor, while the transmission characteristics may show the effectiveness of the breakwater to protect the harbor from the energy of incident waves.

In addition to wave protection, submerged breakwaters have several advantages on the coastal environment and the ecosystem. Thus, the development of analytical models for these structures has recently received considerable attention. Analytical studies have been performed to predict the wave height of reflected and transmitted waves.

Historically, the mathematical treatment of water wave theory by various investigators assumed a rigid, impermeable horizontal bottom. In nature, however, the actual bottom varies drastically from locales in the Gulf in Mexico where the muds behave as viscous fluids, to riffled porous sand beds, to rough rocky bottoms. The degree of bed rigidity, the porosity, and the roughness all influence the wave profile. This interaction with the bottom results in wave damping and a local change in wave kinematics. Significant wave damping can occur if the bottom is very soft, or if the waves propagate a long distance; in either case, conventional methods are no longer strictly valid

If the presence of the wave over the bottom results in significant seabed deformation and stresses, soil failure and significant forces on buried pipelines and on bottom-mounted structures may occur(Dean and Dalrymple, 1984).

The objective of the this paper is to develop analytical model to predict the motion of incident, reflected, transmitted waves over porous bottom. For the case of an arbitrary structure in the arbitrary bottom, the fluid action becomes the motion of energy dissipation due to fluid resistance caused by the geometry and material of the structure. Since energy dissipation is generally nonlinear, a linear coefficient of flow resistance corresponding to the velocity of the structure is introduced. In conventional analytical methods, the unknown velocity potential is used as the continuous function between analytical domains(Kioka, 1989; 井島 and 佐佐木, 1971). However, the problem is difficult to solve analytically because of the inhomogeneous and anisotropic domain.

The theoretical approach used in this paper is based on the wave function, which is the continuous function throughout the analytical region, including the fluid and submerged breakwaters. The unknown quantity expressed by the wave pressure function is simulated using a boundary element method(Takikawa and Kim, 1992a, 1992b). In order to verify this method, the reflection and transmission coefficient of a submerged breakwater are investigated. The numerical results are compared with other theoretical ones.

As a result of this study, the wave over porous bottom of unlimited thickness travels being damped in shallow water. But the wave in deep water travels without being damped.

I. 서 론

1. 연구 배경

최근 경제 활동의 확충 및 국민 소득의 증가에 따라 해안역에 있어서 자연환경의 보존, Water-Front 및 해양 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 부합할 뿐만 아니라, 해안환경 및 생태계 측면에서도 우수한 기능을 갖는 잠제에 대한 연구가 활발히 수행되고 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 중요하며(김과 김, 1998; 김, 1999), 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).

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

과거의 파동이론에 대한 수치 해석은 여러 학자들에 의해 해저면이 고정되고 불투과인 수평면으로 가정하여 이루어져 왔다. 그러나 자연에서 실제의 해저면은 불투과층으로만 이루어진 것이 아니라 다양한 매질로 이루어진 경우가 많다(Dean and

Dalrymple, 1984).

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

2. 연구 목적

본 논문에서는 여러 형태의 잠제형상 중 직사각형 잠제와 세굴이나 침하에 대하여 유리한 사다리꼴형상 잠제를 선택하여, 파랑의 반사율과 투과율을 비교하여 타당성을 검증하였으며, 투과 저면에 의한 잠제 주변의 파형과 불투과 저면에 의한 잠제 주변의 파형 및 속도벡터를 파압함수를 미지량으로 사용하는 경계요소법(김과 서, 1995; 김, 2002)을 이용하여 비교·분석하였다.



3. 논문의 구성

본 논문에서는 우선 II장에서 경계요소해석을 하기위한 각각의 가상경계에 대한 기본방정식 전개 및 경계요소법에 의한 정식화(이산화)를 하고, 투과 저면을 고려한 분산관계식을 유도한다. 다음으로 III장에서는 불투과 저면위의 직사각형 잠제와 사다리꼴형상 잠제에 대한 타당성 검토 및 투과저면 위를 진행하는 파에 대한 감쇠를 검토한다. IV장에서는 불투과 저면 및 투과 저면 위를 진행하는 파를 속도벡터 및 파형을 통하여 비교하였으며, 이를 직사각형 잠제와 사다리꼴형상 잠제에 적용을 하여 비교·분석을 한다. 마지막으로 V장에서는 결론으로서 본 논문에서 얻어진 결론들을 종합적으로 서술하고 있다.

II. 경계요소해석

1. 기본 방정식

좌표계는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 투과성 구조물을 포함한 유체영역에서의 파랑의 특성을 해석할 때에는 전체의 해석영역이 각각 다른 공극률과 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 가상경계에서의 유체의 운동은 연속성을 만족해야 한다. 경계 S_1, S_2, S_3 으로 둘러싸인 해석 영역에서는 유체의 운동을 미소진폭운동으로 가정하여 선형해석을 한다.

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.

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

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

여기서, ϵ 는 간극률, g 는 중력가속도이다. 또, F_x, F_y 는 유체운동에 대한 에너지 소산(유체저항)의 X, Y 방향의 성분을 의미한다. 에너지 소산항은 레이놀드수가 매우

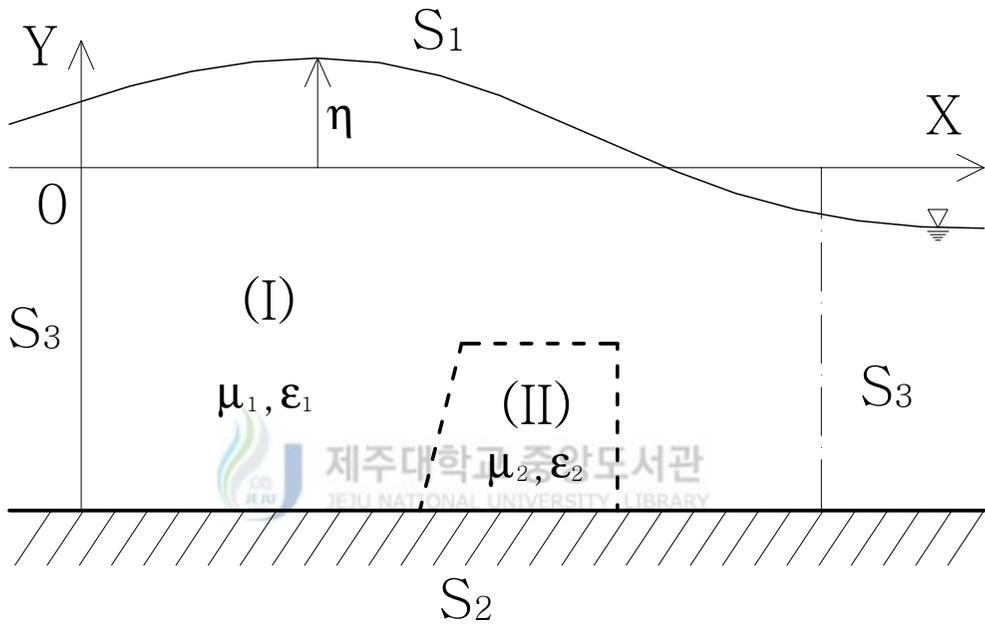


Fig. 1. Analytical region and coordinate.

작은 경우를 제외하면, 일반적으로 비선형이며, 유체가 가속도 운동을 하는 경우에는 부가질량력으로서 유체저항이 작용한다. 여기서는 비선형적인 에너지 소산항을 등가(等價)인 선형소산계수 μ 와 부가질량계수 C_m 을 이용하여, 다음 식으로 나타낸다.

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

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

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

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, 유체 운동의 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.

$$\text{경계 } S_1 ; \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_{y=0}, \quad \eta = - \frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu \Phi V \right) \Big|_{y=0} \quad (7)$$

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

$$\text{경계 } S_3 ; \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} \quad (9)$$

(Φ_o : 해석영역 외부의 속도포텐셜)

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

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

$$\text{mass-flux} ; \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} \quad (10)$$

$$\text{energy-flux} ; \left(\frac{P}{\rho g} + y \right) = - \frac{1}{gV} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu \Phi V \right) \equiv H \quad (11)$$

해석수법으로는 식 (7)~(10)의 속도포텐셜 Φ 를 미지량으로 나타내는 경계값의 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 식 (11)에 나타낸 파압함수 H 가 전 해석 영역을 통해서 연속적인 것에 대해 착안하여, 이것을 미지량으로 하는 해석수법을 이용한다. 입사파의 각주파수 $\sigma (= 2\pi/T, T = \text{주기})$ 에 의해 유체 운동의 주기성을 고려하여,

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

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, 다음 식으로 고쳐 쓸 수 있다.

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

식 (14)의 각 조건식으로부터, 파압함수 H 에 관한 경계값 문제로 되며, 각 영역마다 ϵ , μ 를 대입함으로써, 영역을 구분하지 않고 해석할 수가 있다.



2. 가상경계처리

Fig. 1에 표시한 것과 같이 유체중의 경계 S_3 는 수치해석으로부터 영역을 유한영역으로 하기위해 만들어진 가상경계이다. 이 경계가 개방되어있는 경우, 이 경계내외의 유체는 식 (10), (11)의 연속조건을 만족하여야한다. 이러한 경계를 취하는 방법에 대해서 미소진폭파의 운동의 경우, 몇 개의 방법이 제안되어 있지만, 여기에서는 Takikawa 와 Kim (1992a, 1992b)의 비교적 취급이 간단한 각 경계에서의 파압함수와 외향법선 미분값과의 관계를 기술하는 방법을 나타낸다.

Fig. 1에 표시한 것과 같이 X 축의 방향으로부터 파가 입사하는 경우를 생각할 수 있다. 이런 경우, 구조물 주변의 흐름은 이른바 정상파, 산란파 등이 발생하지만, 경계 S_3 을 구조물의 주변으로부터 충분히 떨어진 위치에 설정함으로써 이 파의 영향을 무시할 수 있으며, 입사파와 투과파의 각 위치에서의 속도포텐셜을 다음과 같이 취급

할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \text{입사위치;} \bar{\Phi}_{inp} &= \bar{\Phi}_i + \bar{\Phi}_r \\ \text{투과위치;} \bar{\Phi}_{out} &= \bar{\Phi}_t \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

여기서, $\bar{\Phi}_i$ 는 입사파, $\bar{\Phi}_r$ 는 반사파, $\bar{\Phi}_t$ 는 투과파를 나타낸다. $\bar{\Phi}_{inp}$ 와 $\bar{\Phi}_{out}$ 은 각각 입사 및 투과위치의 속도포텐셜을 의미한다.

이들을 미소진폭파에 의하여 표현을 하면, 각각 다음식과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Phi}_{inp} &= (e^{-ikx} + A_r e^{ikx}) \cdot \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \\ \bar{\Phi}_{out} &= A_t e^{-ikx} \cdot \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

여기서, a 는 파의 진폭이다. 식 (16)에서 A_r 과 A_t 는 각각 반사 및 투과파를 나타내는 미지(未知)의 복수계수이며, k 는 파수이다.

식 (13)와 식 (16)을 이용하면, 경계면에 있어서의 파압함수 및 외향법선유속

$-\beta H_o = \frac{\partial \bar{\Phi}_o}{\partial n}$ 는 다음 식으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \text{입사위치;} -\beta H_o = \Phi_o &= (e^{-ikx} + A_r e^{ikx}) \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \\ -\beta \frac{\partial H_o}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} &= -ik(e^{-ikx} - A_r e^{ikx}) \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \text{통과위치;} -\beta H_o = \Phi_o &= A_t e^{-ikx} \cdot \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \\ -\beta \frac{\partial H_o}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} &= -ik A_t e^{-ikx} \cdot \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h+y)}{\cosh kh} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (17)과 (18)에서 나타낸 것과 같이, 계산에 필요한 data는 가상경계 S_3 에서의 입사파에 관한 양(量)과 반사파 및 투과파를 규정하는 주파수 k 이다. 종래의 Helmholtz 형 방정식해법에서 볼 수 있는 것과 같이, 계산수십에서의 주파수를 규정하지 않고, 임의해저형상에서의 파동을 계산할 수 있다.

또한, 여기에서는 입사파를 미소진폭파이론에 의한 $\bar{\Phi}_i$ 를 이용하여 정식화하고 있지만, 파의 입사방향은 임의이고, 고려할 수 있는 입사조건을 입사위치에서의 속도 $-\beta H_o = \frac{\partial \bar{\Phi}_o}{\partial n}$ 의 조건으로서 부여하면 용이하다. 즉, 여기에서 나타낸 계산방법은 파동장 뿐만 아니라 흐름이 존재하는 경우 등 광범위한 속도포텐셜을 이용하는 유체의 미소진폭운동의 수치계산법으로서 이용할 수 있다.

3. 경계요소법에 의한 정식화



경계상의 2점을 각각 $p(x, y)$ 와 $q(\epsilon, \zeta)$ 로 하고, 2점 사이의 거리를 r 로 하자. Green의 공식에서 속도포텐셜 Φ 는 조화함수이기 때문에, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p \Phi_p &= \int_s \left(\Phi \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial \Phi}{\partial n} G \right) ds \\ G &= \ln \frac{1}{r} \\ r &= \sqrt{(x - \epsilon)^2 + (y - \zeta)^2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

여기서, $\alpha_p (p = 1, 2, \dots, N)$ 는 경계선 위의 절점 p 에서 두 접선 사이의 내각을 의미한다.

설명을 간단히 하기 위하여, Fig. 2에서 나타낸 것과 같이 영역 (I), (II)로 구성된

해석영역을 대상으로 한 정식화를 행한다. Fig. 2의 경계선 위에 합계 N 개의 절점을 배치하고, j 와 $j+1$ 번째 절점으로 구성된 j 번째 요소내의 $e_j(j=1, 2, \dots, N)$ 에 있어서, 파압함수 H 의 분포를 다음과 같은 1차함수로 근사시킨다.

$$\left. \begin{aligned} H &= N_j^T H_j \\ H_j^T &= (H_j, H_{j+1}) \\ N_j^T &= \left(1 - \frac{s}{e_j}, \frac{s}{e_j} \right) \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

여기서, s 는 요소 e_j 의 국소좌표를 의미하며, N 번째 요소에 대해서는 $j+1$ 번째의 절점값으로서 1절점의 값을 이용한다.

1) 모서리점의 취급

여기서, 선형요소를 이용하는 경우, 경계상 모서리점의 취급방법에 대해서 언급하고자 한다. 선형요소를 이용하면 모서리점도 절점의 하나가 되고, 그곳에서 $\partial\Phi/\partial n$ 이 정의된다. 그러나 Fig. 3에 나타내듯이, 일반적으로 모서리점에서는 2방향의 외향 법선 n_1, n_2 가 존재하고 $\partial\Phi/\partial n$ 의 값도 $\partial\Phi/\partial n_1, \partial\Phi/\partial n_2$ 의 2종류가 있다. 이 2개의 $\partial\Phi/\partial n$ 의 값을 하나의 절점에서 대표시키는 것은 무리이며, 큰 오차가 생긴다. 이러한 어려움을 극복하는 가장 간단한 해결책은 모서리점을 2절점으로 표현하고, 각각의 절점이 각각 $\partial\Phi/\partial n_1, \partial\Phi/\partial n_2$ 를 분담하는 근접 2절점법을 사용하는 것이며, 근접정도를 충분히 작게 하면, 양호한 계산값을 얻을 수 있다.

2) 투과층의 영역에 대한 정식화

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 영역 (II)의 경계선 위를 N^* 개 절점으로 N^* 개의 미소 요소로 분할하고, 각 요소의 절점을 $(x_p, y_p)(p=1, 2, \dots, N^*)$ 로 나타내고, 길이를 $e_j(1, 2, \dots, N^*)$ 로 한다. 법선의 방향은 외향이며, 적분은 반시계방향으로 취하며, 식 (14)의 전체영역의 조건만을 식 (19)에 대입하면, 다음식이 얻어진다.

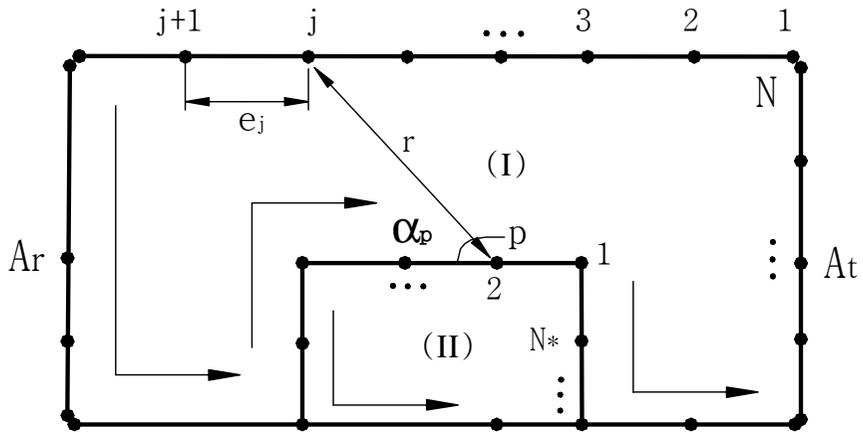


Fig. 2. Definition of notation.

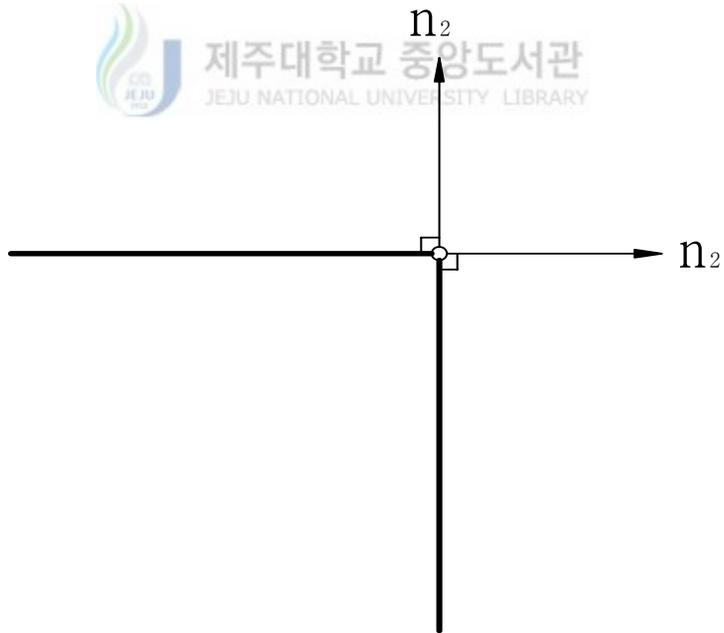


Fig. 3. Corner point and outwardly drawn normal.

$$\alpha_p \beta \cdot H_p + \int_{j=1}^N \beta \cdot H_p \frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{1}{r} \right) ds = 0 \quad (21)$$

식 (21)에서 식 (20)을 대입하여 이산화하면 다음과 같이 된다.

$$\beta \left(\alpha_p + \sum_{j=1}^N A_{p,j}^T \right) \cdot H_p = 0 \quad (22)$$

여기서,

$$A_{p,j}^T = \int_0^{e_j} N_j^T \frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{1}{r} \right) ds \quad (23)$$

일반적으로 경계요소법에 있어서 영향계수 $A_{p,j}^T$ 의 적분계산은 수치적분공식을 이용하는 경우가 많다. 그러나 높은 계산정도를 필요로 하는 경우에는 수치적분을 이용하지 않고, 해석적으로 적분할 수 있다.

여기에서는 선형요소를 이용하여 해석적으로 적분하면, 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\beta \left[\alpha_p + \sum_{j=1}^N (A_{p,j-1}^2 + A_{p,j}^1) \right] \cdot H_p = 0 \quad (24)$$

3) 투과층을 제외한 영역에 대한 정식화

Fig. 2에 나타낸 것과 같이, 투과층을 제외한 영역 (I)을 둘러싼 경계선을 N 개의 절점으로 N 개의 미소요소로 분할하고, 각 요소의 절점을 $(x_p, y_p)(p = 1, 2, \dots, N)$ 로 표시하고, 그 길이를 $e_j(j = 1, 2, \dots, N)$ 로 한다. 투과층에서 충분히 떨어진 입사

경계와 투과경계의 일정 수심 영역에 가상 경계 S_3 을 설정하고, 법선은 외향을 향하며, 적분 방향은 반시계방향으로 잡는다. 식 (17)과 (18)을 식 (14)에 대입하고, 식 (19)를 적용하면, 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \alpha_p \beta \cdot H_p + \int_S \beta \cdot H_p \frac{\partial}{\partial n} \left(\ln \frac{1}{r} \right) ds + \int_{S_1} i\sigma \cdot H_p \left(\ln \frac{1}{r} \right) ds \\ + \int_{S_{3-inp}} \beta \frac{\partial H_o}{\partial n} \left(\ln \frac{1}{r} \right) ds + \int_{S_{3-out}} \beta \frac{\partial H_o}{\partial n} \left(\ln \frac{1}{r} \right) ds = 0 \end{aligned} \quad (25)$$

여기서, $S = S_1 + S_2 + S_3$ 을 나타내며, S_{3-inp} , S_{3-out} 은 각각 입사 및 통과위치에서의 가상경계위의 임의의 점을 의미한다. 식 (25)에 나타낸 경계면위의 적분을 식 (20)을 이용하여 이산화하면, 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} \beta \alpha_p \cdot H_p + \sum_{S_1} (\beta A_{p,j}^T - i\sigma B_{p,j}^T) \cdot H_p + \sum_{S_2} \beta A_{p,j}^T \cdot H_p \\ + \sum_{S_{3-inp}} (-A_{p,j}^T C e^{ikx} + ik B_{p,j}^T C e^{ikx}) \cdot A_r \\ - \sum_{S_{3-out}} (A_{p,j}^T C e^{-ikx} + ik B_{p,j}^T C e^{-ikx}) \cdot A_t \\ = \sum_{S_{3-inp}} (A_{p,j}^T C e^{-ikx} + ik B_{p,j}^T C e^{-ikx}) \end{aligned} \quad (26)$$

여기서,

$$B_{p,j}^T = \int_0^{e_j} N_j^T \left(\ln \frac{1}{r} \right) ds \quad , \quad C = \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h + y_j)}{\cosh kh}$$

이다. 또, A_r 과 A_t 는 각각 반사파 및 투과파를 나타내는 미지의 계수이다. 영향계수 $B_{p,j}^T$ 도 똑같이 선형계수를 이용하여, 해석적으로 적분한다.

식 (24)과 (25)의 관계를 이용하여 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \beta\alpha_p \cdot H_p + \sum_{S_1} (\beta A - i\sigma B) \cdot H_p + \sum_{S_2} \beta A \cdot H_p \\
 & + \beta \left(\alpha_p + \sum_{S_2} A \right) \cdot H_p + \sum_{S_{3-inp}} (-ACe^{ikx} + ikBCe^{ikx}) \cdot A_r \\
 & - \sum_{S_{3-out}} (ACe^{-ikx} + ikBCe^{-ikx}) \cdot A_t \\
 & = \sum_{S_{3-inp}} (ACe^{-ikx} + ikBCe^{-ikx}) \tag{27}
 \end{aligned}$$

여기서,

$$A = (A_{p,j-1}^2 + A_{p,j}^1) \quad , \quad B = (B_{p,j-1}^2 + B_{p,j}^1)$$

여기서, $\sum_{S_{3-inp}}$, $\sum_{S_{3-out}}$ 는 각각 입사경계와 통과경계 위에서 절점 전체의 합을 의미한다.

단, 위 식에서 Control point가 영역 (I)과 영역 (II)이 접하는 경계 위에 있을 경우, 좌변의 4번째 항이 포함된다.

식 (27)의 관계식을 정리하면, 다음과 같은 전체의 미지량 H_p , A_r 과 A_t 에 관한 연립방정식이 얻어진다.

$$[G_{11} \ G_{12} \ G_{13}] \begin{Bmatrix} H_p \\ A_r \\ A_t \end{Bmatrix} = \{R_{11}\} \tag{28}$$

여기서,

$$G_{11} = \left\{ \beta \alpha_p + \sum_{S_1} (\beta A - i\sigma B) + \sum_{S_2} \beta A + \beta \left(\alpha_p + \sum_{S_2} A \right) \right\}$$

$$G_{12} = \sum_{S_{3-inp}} (-ACe^{ikx} + ikBCe^{ikx})$$

$$G_{13} = - \sum_{S_{3-out}} (ACe^{-ikx} + ikBCe^{-ikx})$$

$$R_{11} = \sum_{S_{3-inp}} (ACe^{-ikx} + ikBCe^{-ikx})$$

이다. 식 (28)을 풀면, 미지수 H_p , A_r 및 A_t 가 동시에 결정되며, 반사율 $K_r = |A_r|$ 과 투과율 $K_t = |A_t|$ 도 쉽게 구할 수가 있다.

4. 저면에서의 에너지일산 방정식



해저면은 다공성의 매질로 특징지어질 수 있으며, 이러한 특성에 의해 수치해석이 가능하다. 1800년대 Darcy에 의한 실험 이래로, 연구가들은 흙을 모래와 자갈사이의 구불구불한 통로에서의 흐름에 대하여 고려하기 보다는 공간적으로 평균 유속으로 흐르는 연속체로서 다루어 왔다.

지배 방정식은 저면에서의 흐름에 대하여 전개된다. 그리고 이러한 흐름은 유체역에서 파랑에 의해 감소되어지는 흐름과 일치하며, 알갱이로 이루어진 매질에서의 흐름에 의한 파의 진폭의 감쇠가 계산된다.

유체에서와 같이 비압축이라고 가정되어지는 완전히 포화된 흙에 대하여, 질량 보존은 다음 식을 도출한다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (29)$$

여기서, $\nabla \equiv (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ 는 경사연산자이고, u 는 유출속도이다.

Darcy 법칙은 유속과 유체에서의 과압변화를 관계시킨다.

$$u = -\frac{K}{\mu} \nabla p_s \quad (30)$$

여기서, K 는 흙의 특성중의 하나인 투수계수이며, μ 는 유체의 역학적 점성계수, p_s 는 간극수압이다.

흙에서의 유체에 대한 지배 방정식은 식 (30)을 질량보존방정식 (29)에 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \left(-\frac{K}{\mu} \nabla p_s \right) = 0 \quad (31)$$

즉,



$$\nabla^2 p_s = 0$$

따라서 유체중의 속도포텐셜과 같이 간극수압은 Laplace 방정식을 만족한다.

p_s 와 Φ 을 풀기 위하여, 경계조건을 흙-물 경계면에서 압력 및 수직속도가 연속적이라고 가정한다.

가정된 p_s 와 ϕ 의 진행파의 형식 다음식과 같다.

$$p_s(x, t) = D e^{k(h+y)} e^{i(kx - \sigma t)} \quad (32)$$

$$\Phi(x, y) = [A \cosh k(h+y) + B \sinh k(h+y)] e^{i(kx - \sigma t)} \quad (33)$$

경계면상에서의 압력의 연속성은 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$p(x, -h) = p_s(x, -h) \quad (34)$$

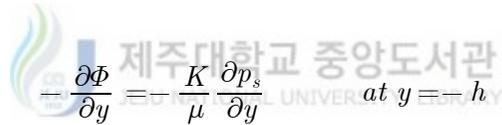
여기서, 첨자 s는 흙 영역의 압력을 나타낸다. 그리고 윗 식을 다시 쓰면, 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{y=-h} = p_s(x, -h) \quad (35)$$

즉,

$$-i\sigma\rho A = D$$

연속적인 수직속도에 대하여



$$-\frac{\partial \Phi}{\partial y} = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial p_s}{\partial y} \quad \text{at } y = -h$$

즉,

$$B = \frac{KD}{\mu} \quad (36)$$

미지수 A, B, D 에 대한 방정식을 진폭 a 에 연관시키고 분산관계식을 유도하기 위해 선형의 자유수면 경계조건을 사용한다. 선형인 동적 자유수면 경계조건은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{i\sigma}{g} (A \cosh kh + B \sinh kh) e^{i(kx - \sigma t)} = a e^{i(kx - \sigma t)} \quad (37)$$

위에서 산출된 A, B 를 대신하면,

$$D = \rho g a \left\{ \cosh kh \left[1 - \left(\frac{i\rho\sigma K}{\mu} \right) \tanh kh \right] \right\}^{-1} \quad (38)$$

선형의 운동학적인 자유수면 경계조건을 적용하면, 분산관계를 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad \text{on } y = 0 \quad (39)$$

$$i\sigma a = A k \sinh kh + B k \cosh kh$$

또는, D 항에서 a, A, B 를 대신하면, 다음식이 된다.

$$\sigma^2 \left[1 - i \left(\frac{\sigma K}{\nu} \right) \tanh kh \right] = gk \left(\tanh kh - \frac{i\sigma K}{\nu} \right) \quad (40)$$

여기서, $\nu = \mu/\rho$, 동점성계수이다. 이를 다시 정리하면,

$$\sigma^2 - gk \tanh kh = - i \frac{\sigma K}{\nu} (gk - \sigma^2 \tanh kh) \quad (41)$$

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 감소율을 결정한다.

자유수면파형은 다음식과 같다.

$$\eta(x, t) = a_0 e^{i(kx - \sigma t)} = a_0 e^{i(k_r + ik_i)x - \sigma t} = a_0 e^{-k_i x} e^{i(k_r x - \sigma t)} \quad (42)$$

따라서 0보다 큰 k_i 에 의한 파의 지수적인 진폭의 감소가 일어난다.

식 (41)의 $R(= \sigma K/\nu)$ 값은 일반적으로 작으며, 모래에 대하여 $10^{-6} - 10^{-2}$ 이고, 일반적인 범위의 자갈인 경우 10^{-1} 이다(Dean and Dalrymple, 1984; Cruz et al., 1997).



Ⅲ. 경계요소해석의 타당성 검토

1. 잠제의 형상에 대한 타당성 검토

파동장의 해석에 있어서, 구조물 주변의 흐름은 정상파와 산란파 등이 발생하기 때문에 가능한 경계면을 구조물에서 멀리 취하는 것이 바람직하다. 그러나 너무 멀리 잡으면 해석 영역이 가늘고 길어져, 적분 계산을 할 때, 미소항이 생겨 계산정도를 떨어뜨린다. 따라서 여기서는 앞에 있는 잠제의 선단에서 가상경계면까지 2과장분의 거리를 취했다. 그리고 파는 Fig. 4와 Fig. 5에서 보듯이 X 축의 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 진행한다.

Fig. 4에 나타낸 불투과 직사각형 잠제의 요소 분할은 수심방향으로 각각 10요소, 자유수면은 100요소, 잠제의 전·후 간격은 40요소, 잠제의 천단고는 20요소, 잠제의 측벽은 5요소이며, 전체 요소는 240개로 분할하였으며, Fig. 5에 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 230개로 분할하였다.

Fig. 6은 불투과 직사각형 잠제에 대한 해석기법의 검증을 위하여 수치계산 한 예로서, Fig. 1의 유체의 영역 (I)을 $\mu = 0$, 공극률 $\epsilon = 1$, 잠제의 영역 (II)를 $\mu = 0$, 공극률 $\epsilon = 0$ 으로 놓고, 입사파의 무차원주파수 $\sigma^2 h/g$ 에 대응하는 불투과 잠제의 반사율을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 실선은 井島와 佐佐木(1971)의 영역분할법에 의한 계산 결과이며, $\circ \circ \circ, \bullet \bullet \bullet$ 은 경계요소법으로 얻은 해석 결과이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 직사각형 잠제에 대한 양 해석기법의 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 사다리꼴 형상 잠제에 대한 해석기법의 검증을 위하여 수치계산 한 예로서, Fig. 1의 유체의 영역 (I)을 $\mu = 0$, 공극률 $\epsilon = 1$, 잠제의 영역 (II)를 $\mu = 0$, 공

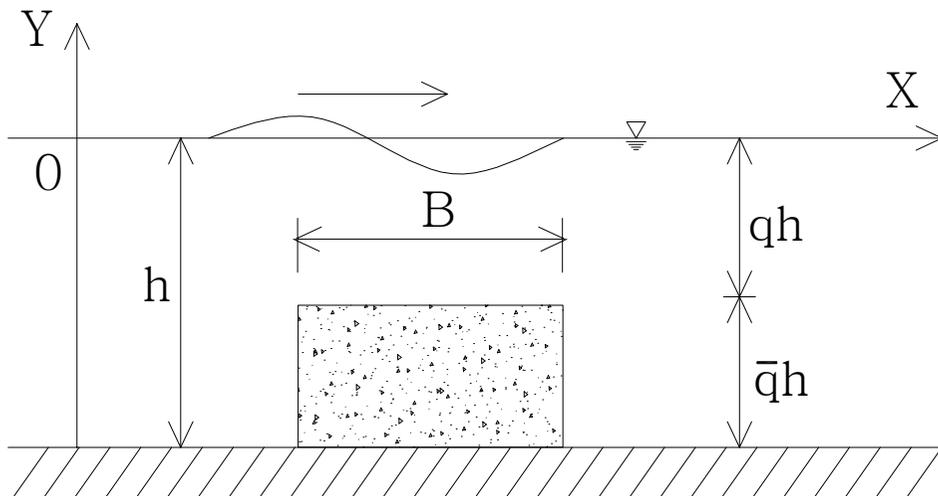


Fig. 4. Sketch of impermeable submerged breakwater.

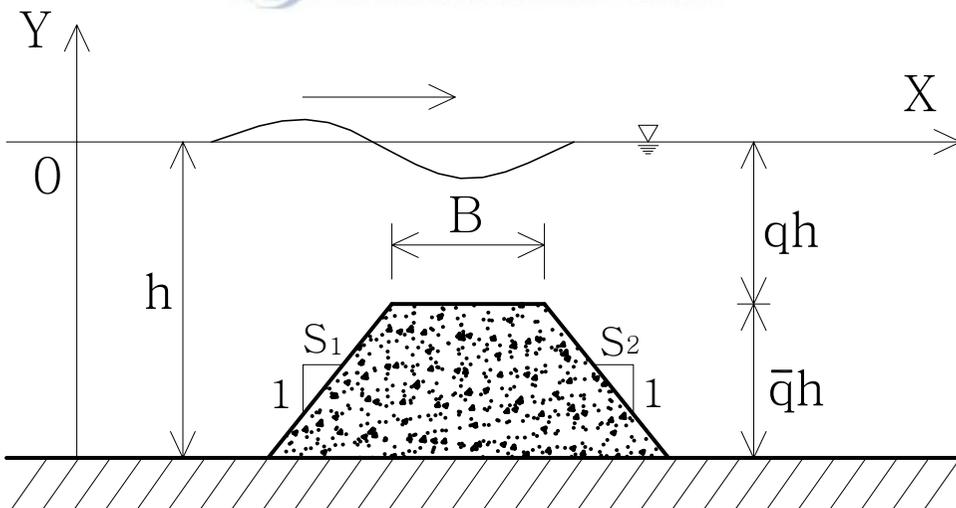


Fig. 5. Sketch of trapezoidal type impermeable submerged breakwater.

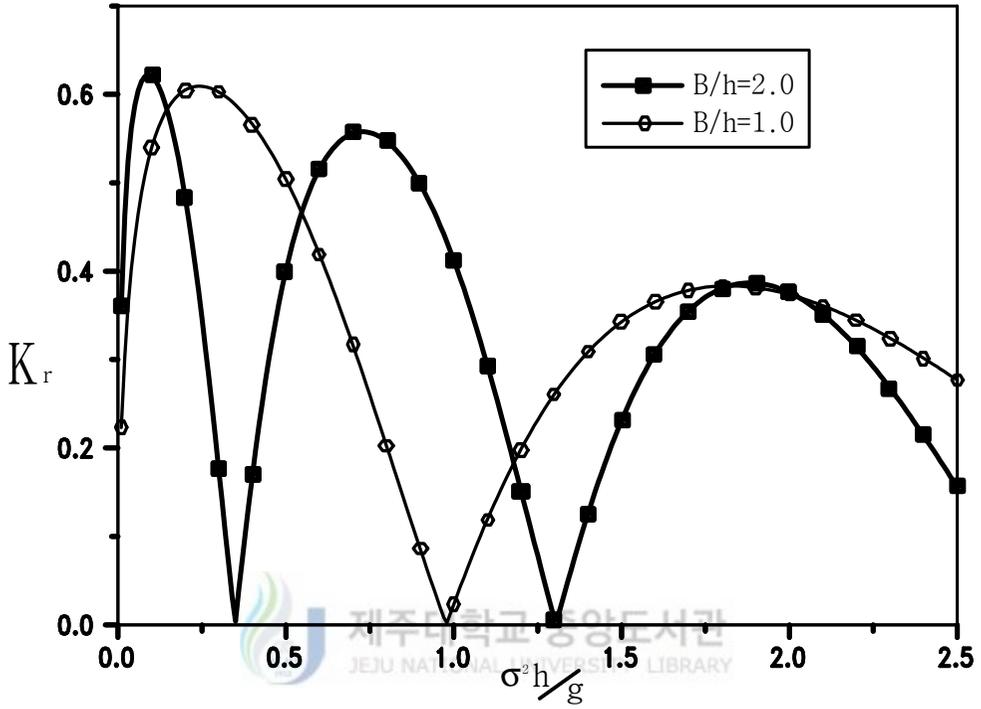


Fig. 6. Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater($q=0.2$) ; — Other numerical solutions(Ijima et al) and $\circ \circ \circ, \bullet \bullet \bullet$ Present solutions(BEM).

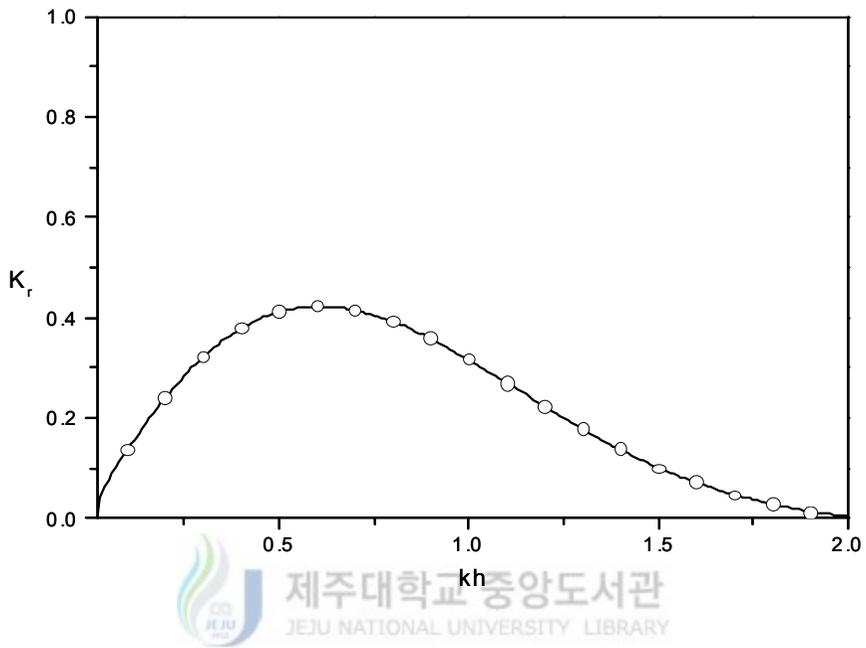


Fig. 7. Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater of trapezoidal type($q=0.3$) ; — Other numerical solutions(Ijima et al) and $\circ \circ \circ$ Present solutions(BEM)

극를 $\epsilon = 0$ 으로 놓고, 입사파의 kh 에 대응하는 불투과 잠제의 반사율을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 실선은 井島 등 (1982)의 영역분할법에 의한 계산 결과이며, $\circ \circ \circ$ 은 경계요소법으로 얻은 해석 결과이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 사다리꼴 형상 잠제에 대한 양 해석기법의 결과 또한 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 직사각형 잠제와 사다리꼴 형상 잠제에 대한 본 해석기법의 타당성과 유효성이 검증되었다.

2. 투과 저면 위의 파의 감쇠 검토

파와 해저면과의 상호작용은 파의 감쇠와 파의 운동학에 있어서 국부적 변화를 일으킨다. 그리고 해저면이 점성이 크거나, 파가 긴 거리를 진행할 때, 상당한 파의 감쇠가 일어날 수 있다.

투과 저면 위의 파의 감쇠에 관한 대략적인 결과는 식 (41)의 분산관계식으로부터 얻을 수 있으며, 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 실선은 Reid and Kajiura (1957)에 의한 계산결과이며, 점선은 본 연구에서 해석한 결과로서, 본 연구와 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 천해역에서의 불투과 수평 저면 위를 진행하는 파를 나타낸 것이며, 진폭의 감쇠 없이 진행된다는 것을 알 수 있다. Fig. 10, 11은 각각 천해역과 심해역에서 무한대의 일정한 투과 저면 위를 진행하는 파를 나타낸 것으로서, Fig. 10은 상대수심(h/L)이 0.1인 경우, 즉 천해역을 나타내며, Fig. 11은 상대수심(h/L)이 0.5인 경우, 즉 심해역을 나타낸 것이다. Fig. 10을 통하여 상대수심(h/L)이 0.1인 천해역인 경우 파의 진폭이 지수적으로 감쇠가 일어나는 것을 알 수 있으며, Fig. 11을 통하여 상대수심(h/L)이 0.5인 심해역인 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)

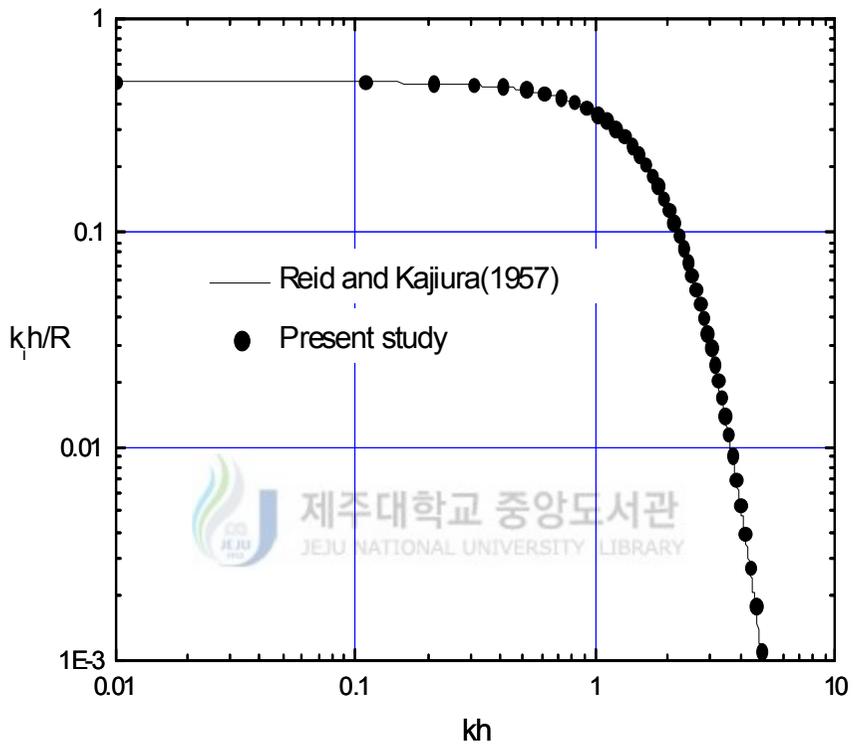


Fig. 8. Dimension damping coefficient versus depth.

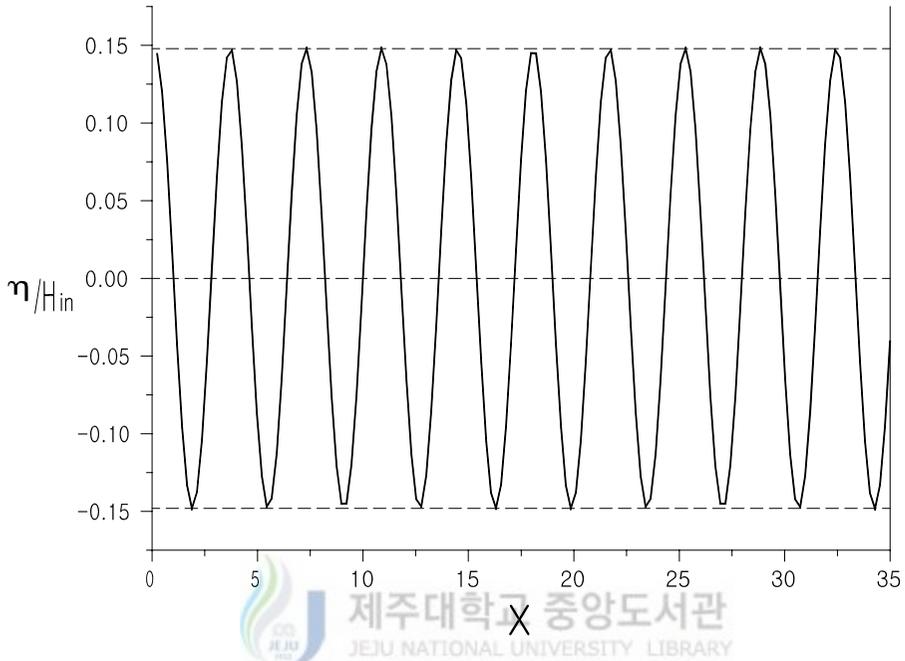


Fig. 9. Wave propagation on uniform impermeable bottom.
 ($h/L = 0.1$)

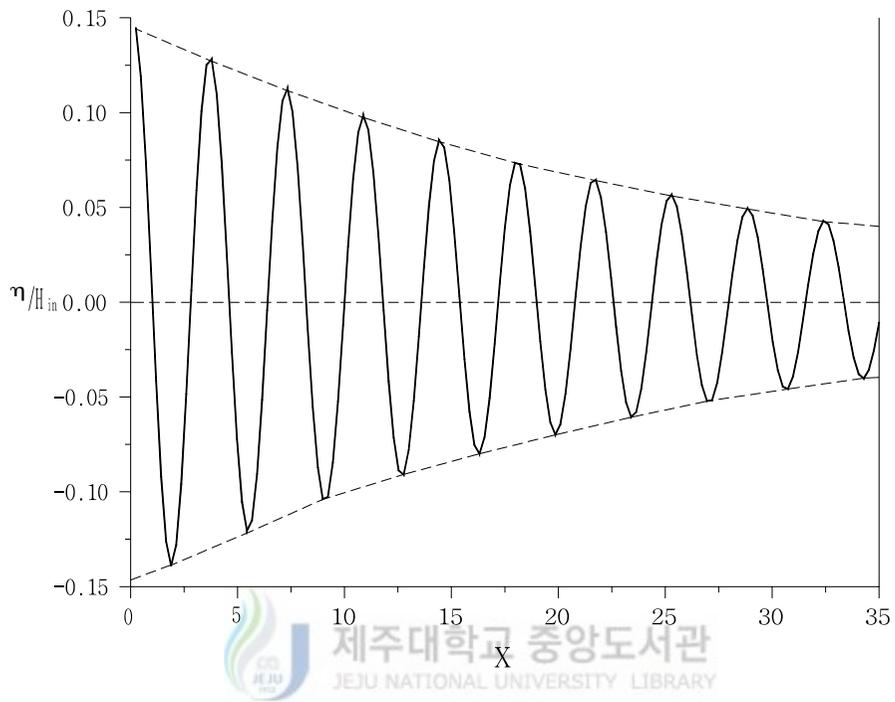
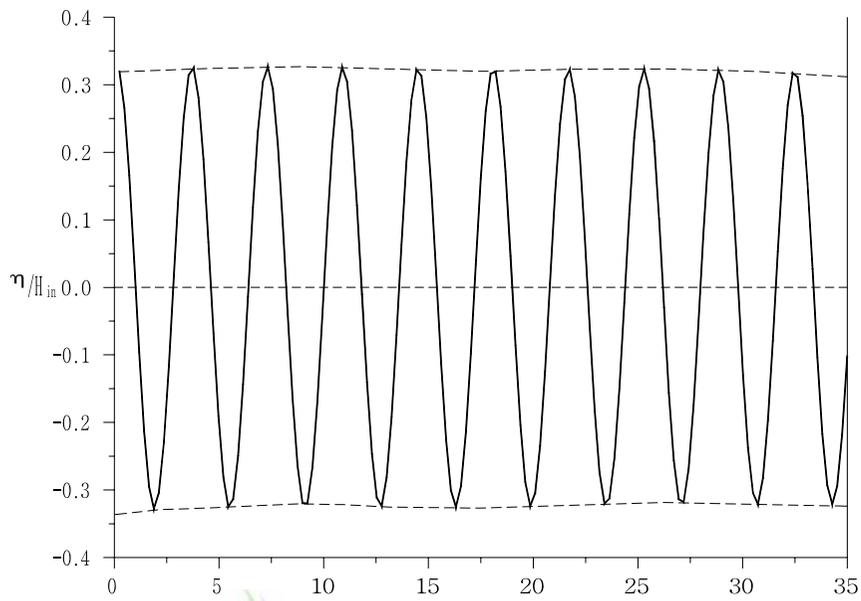


Fig. 10. Wave propagation on uniform porous bottom.
 ($R = 0.1, h/L = 0.1$)




 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 11. Wave propagation on uniform porous bottom.
 ($R = 0.1, h/L = 0.5$)

IV. 경계요소해석의 결과와 고찰

1. 불투과 저면 위의 파의 진행

Fig. 12는 천해역에서 불투과 저면을 진행하는 파의 파형 및 속도벡터를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 불투과 저면 위를 진행하는 파는 파의 진폭의 변화 없이 진행한다는 것을 확인할 수 있다.

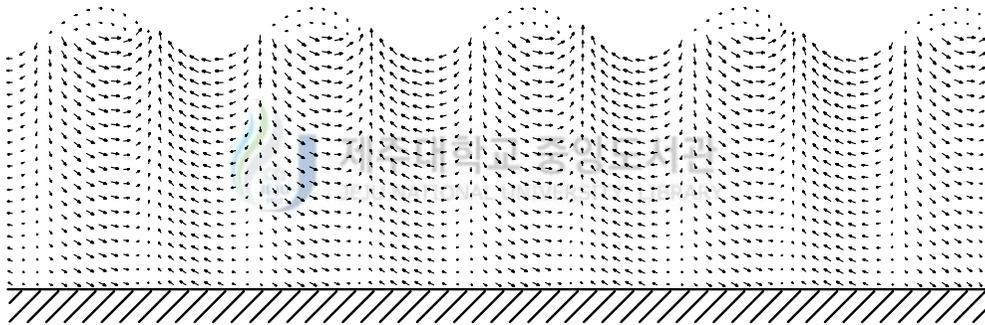


Fig. 12. Wave profile and velocity field on uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1$)

2. 투과 저면 위의 파의 진행

Fig. 13, 14는 각각 무한대의 일정한 투과 저면 위를 진행하는 파의 파형과 속도벡터를 나타낸 것이다. Fig. 13은 천해역에서의 파의 진행을 나타낸 것으로서, 자유표면 아래의 입자 속도가 투과층에 대하여 영향을 받기 때문에 파고가 감소하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 14는 심해역에서의 파의 진행을 나타낸 것으로서, 자유표면 아래

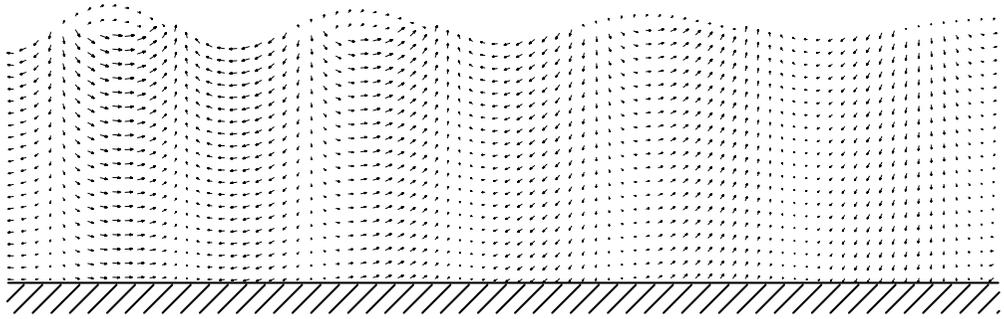


Fig. 13. Wave profile and velocity field on uniform porous bottom.
 ($R = 0.1, h/L_o = 0.1$)

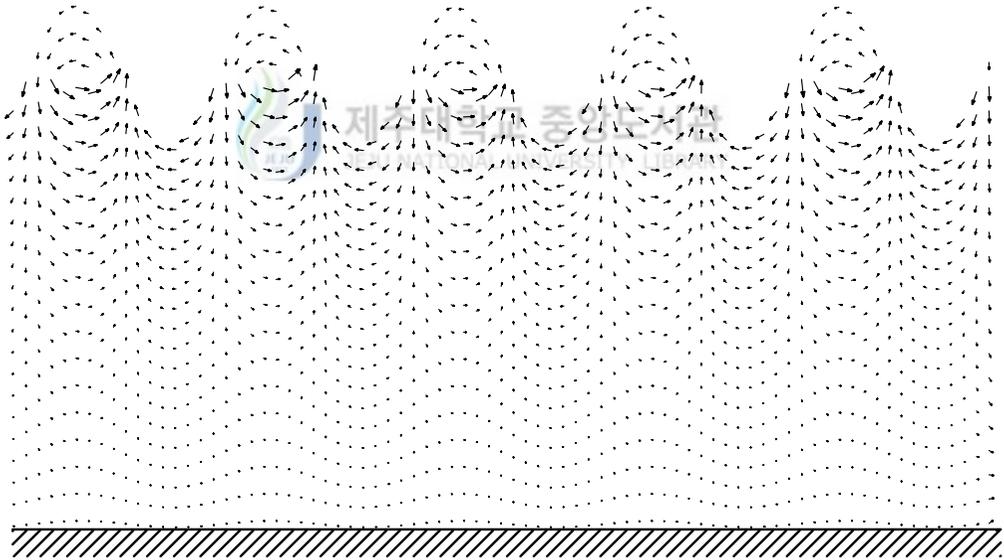


Fig. 14. Wave profile and velocity field on uniform porous bottom.
 ($R = 0.1, h/L = 0.5$)

의 입자 속도가 투과 저면의 영향을 받지 않아 파의 진폭이 변화 없이 진행되는 것을 확인할 수 있다.

3. 잠제 형상에 대한 적용

1) 직사각형 잠제를 설치하였을 때

Fig. 15, 17, 19는 각각 천해역에서 불투과 저면과 투과 저면 위를 진행하는 파를 불투과 직사각형 잠제에 대하여 적용한 것이며, Fig. 16, 18, 20은 각각 Fig. 15, 17, 19와 같은 조건에서 잠제가 없는 경우와 잠제가 있는 경우의 파형 분포를 비교한 것이다.

Fig. 15를 통하여, 일정한 불투과 저면 위의 불투과 직사각형 잠제 주변의 파형 및 속도포텐셜을 확인할 수 있으며, Fig. 16을 통하여, 일정한 불투과 저면 위를 진행하는 파는 잠제를 지나면서, 파고가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 잠제의 전면에서는 잠제에 의한 반사파로 인해 중복파가 형성되어 파고가 잠제가 없는 경우의 파고보다 높은 것을 확인할 수 있으며, 잠제의 뒷면에서는 파고가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 17, 18, 19, 20을 통하여, 일정한 투과 저면 위를 진행하는 파는 투과 저면의 에너지 소산(消散)과 잠제의 영향으로 파고가 현저히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 식 (41)의 $R(=\sigma K/\nu)$ 값이 커질수록 파의 진폭의 감쇠가 뚜렷해짐을 확인할 수 있으며, 투과 저면 위의 파의 속도는 투과 저면의 에너지 소산(消散)으로 인하여 불투과 저면 위의 속도에 비하여 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 27, 28은 불투과 저면과 투과저면에서의 직사각형 잠제에 의한 투과율을 나타낸 것이다.

Fig. 27은 불투과 저면에서의 잠제의 제체폭과 잠제의 제체고($\bar{q}h = (1 - q)h$)의 변화에 따른 투과율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 27의 (a)로부터 일정한 제체고($q = 0.3$)에 대한 제체폭의 변화에 의한 투과율에 대한 효과는 제체폭이 커져도 진동

주기만이 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 27의 (b)를 통하여 일정한 제체폭 ($B/h = 1.0$)에 대한 제체고의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 제체고가 낮아질수록 투과율이 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 28은 투과저면에서의 잠제의 제체폭과 잠제의 제체고의 변화에 따른 투과율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 28의 (a)로부터 일정한 제체고($q = 0.3$)에 대한 제체폭의 변화에 대한 투과율에 대한 효과는 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과율이 작아지는 것을 알 수 있으며, 불투과 저면에서와 같이 제체폭이 커져도 진동주기만이 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 28의 (b)를 통하여 일정한 제체폭($B/h = 1.0$)에 대한 제체고의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과율이 작아지는 것을 알 수 있으며, 제체고가 낮아질수록 투과율이 커지는 것을 알 수 있다.

2) 사다리꼴형상 잠제를 설치하였을 때

Fig. 21, 23, 25는 각각 천해역에서의 불투과 저면과 투과 저면 위를 진행하는 파를 불투과 사다리꼴 형상 잠제에 대하여 적용한 것이며, Fig. 22, 24, 26은 각각 Fig. 21, 23, 25와 같은 조건에서 잠제가 없는 경우와 잠제가 있는 경우의 파형 분포를 비교한 것이다.

Fig. 21을 통하여, 일정한 불투과 저면 위의 불투과 사다리꼴 형상 잠제 주변의 파형 및 속도 포텐셜을 확인할 수 있으며, Fig. 22를 통하여, 일정한 불투과 저면 위를 진행하는 파는 잠제를 지나면서, 파고가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 직사각형 잠제와 같이 잠제의 전면에서는 잠제에 의한 반사파로 인해 중복파가 형성되어 파고가 잠제가 없는 경우의 파고보다 높은 것을 확인할 수 있으며, 잠제의 뒷면에서는 파고가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 23, 24, 25, 26을 통하여, 일정한 투과 저면 위를 진행하는 파는 투과 저면의 에너지 소산(消散)과 잠제의 영향으로 파고가 현저히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 직사각형 잠제에 비하여 파고의 감소율이 작다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 식 (41)의 $R(= \sigma K/\nu)$ 값이 커질수록 파의 진폭의 감쇠가 뚜렷해짐을 확인할 수 있으

며, 투과 저면 위의 파의 속도는 투과 저면의 에너지 소산(消散)으로 인하여 불투과 저면 위의 속도에 비하여 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 29, 30은 불투과 저면과 투과저면에서의 사다리꼴 잠제에 의한 투과율을 나타낸 것이다.

Fig. 29는 불투과 저면에서의 잠제의 제체폭과 잠제의 제체고($\bar{q}h = (1 - q)h$)의 변화에 따른 투과율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 29의 (a)로부터 일정한 제체고($q = 0.3$)에 대한 제체폭의 변화에 의한 투과율에 대한 효과는 제체폭이 커져도 진동주기만이 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 29의 (b)를 통하여 일정한 제체폭($B/h = 1.0$)에 대한 제체고의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 제체고가 낮아질수록 투과율이 커지는 것을 알 수 있으며, 제체폭의 변화보다는 제체고의 변화에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

Fig. 30은 투과저면에서의 잠제의 제체폭과 잠제의 제체고의 변화에 따른 투과율의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 30의 (a)로부터 일정한 제체고($q = 0.3$)에 대한 제체폭의 변화에 대한 투과율에 대한 효과는 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과율이 작아지는 것을 알 수 있으며, 불투과 저면에서와 같이 제체폭이 커져도 진동주기만이 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 30의 (b)를 통하여 일정한 제체폭($B/h = 1.0$)에 대한 제체고의 변화에 따른 투과율에 대한 효과는 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과율이 작아지는 것을 알 수 있으며, 제체고가 낮아질수록 투과율이 커지는 것을 알 수 있다.

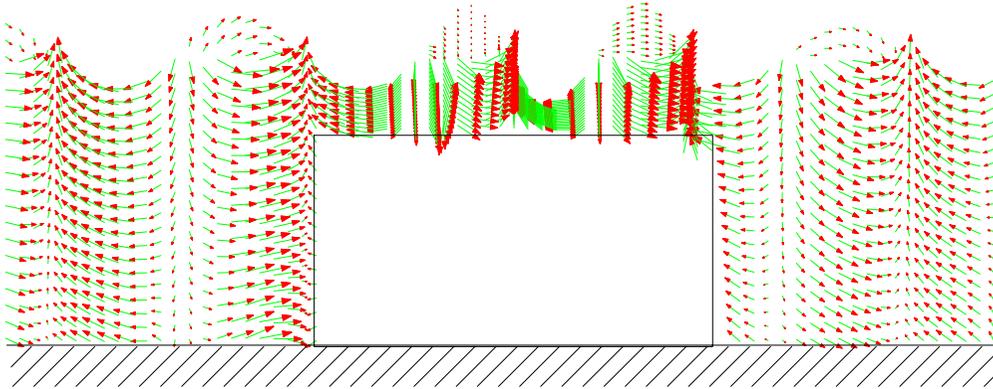


Fig. 15. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1$)

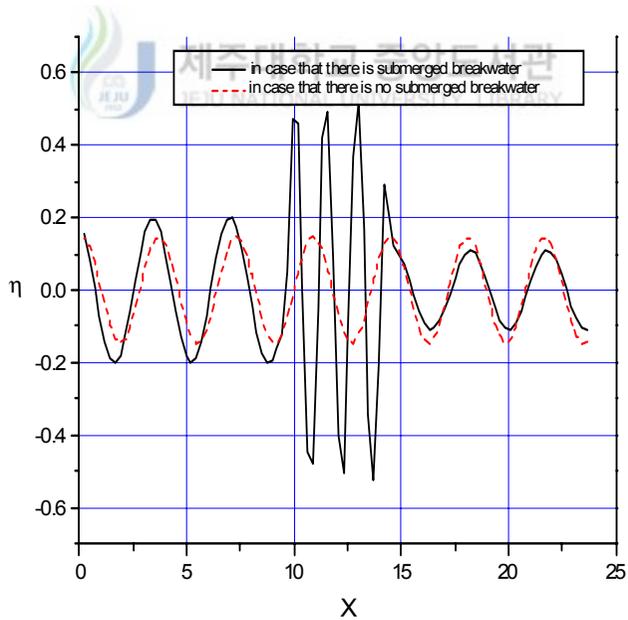


Fig. 16. Comparison of wave profile on uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1, q = 0.1$)

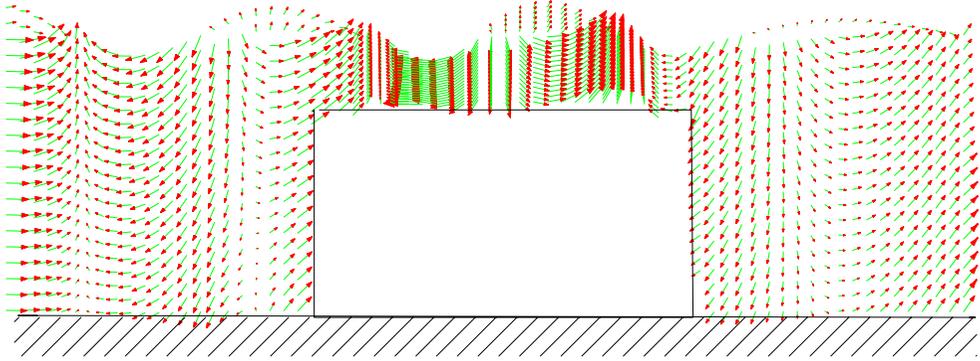


Fig. 17. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform porous bottom. ($R = 0.05, h/L = 0.1$)

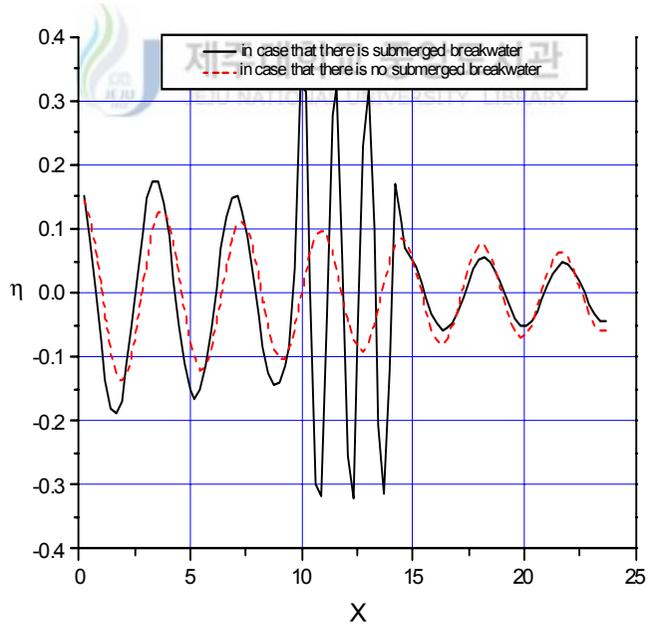


Fig. 18. Comparison of wave profile on uniform porous bottom. ($R = 0.05, h/L = 0.1, q = 0.1$)

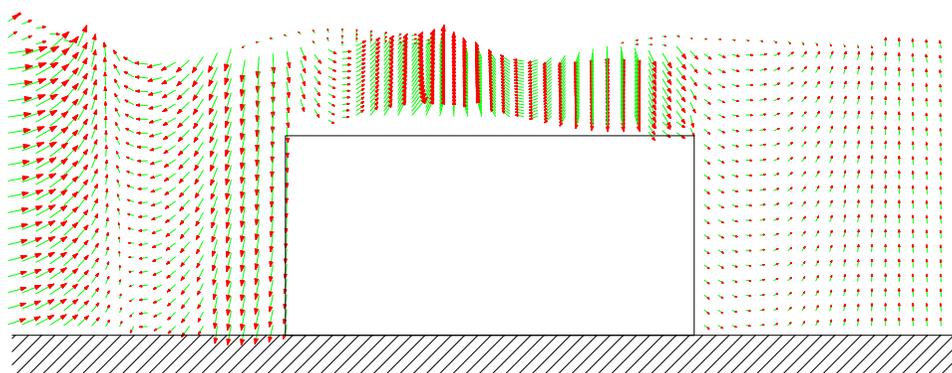


Fig. 19. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged breakwater on uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1$)

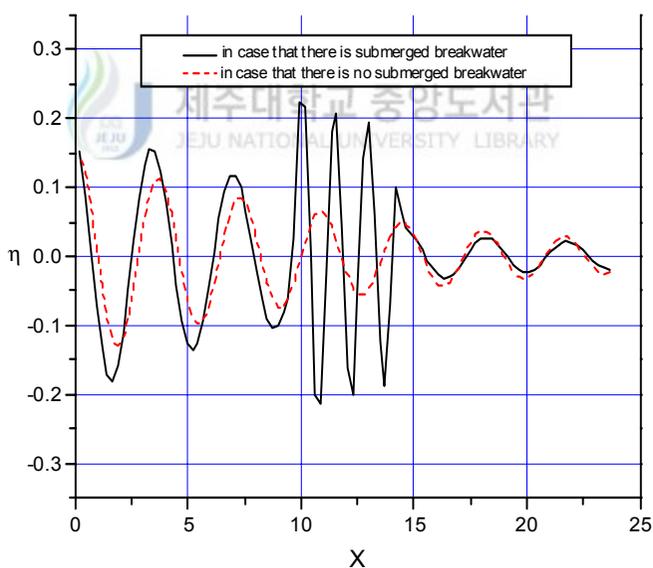


Fig. 20. Comparison of wave profile on uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1, q = 0.1$)

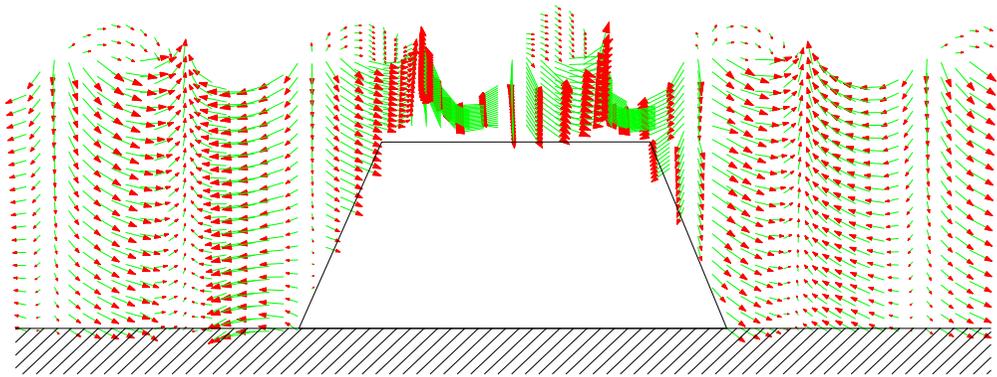


Fig. 21. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged trapezoidal breakwater on uniform porous bottom. ($h/L = 0.1$)

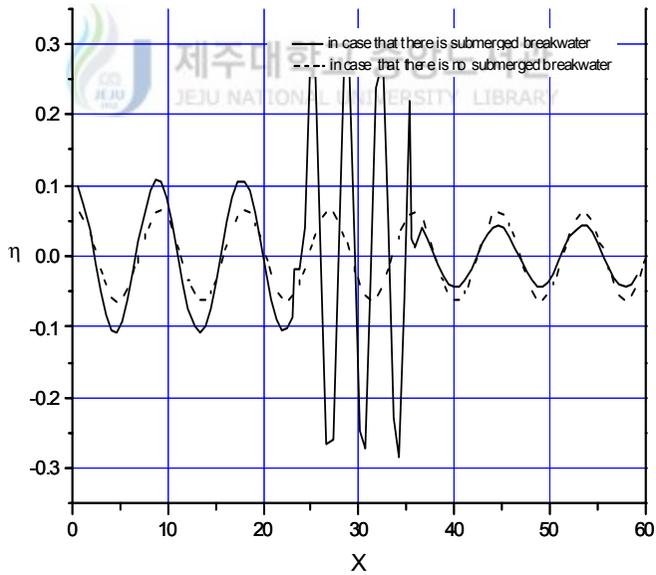


Fig. 22. Comparison of wave profile on uniform impermeable bottom. ($h/L = 0.1, q = 0.1$)

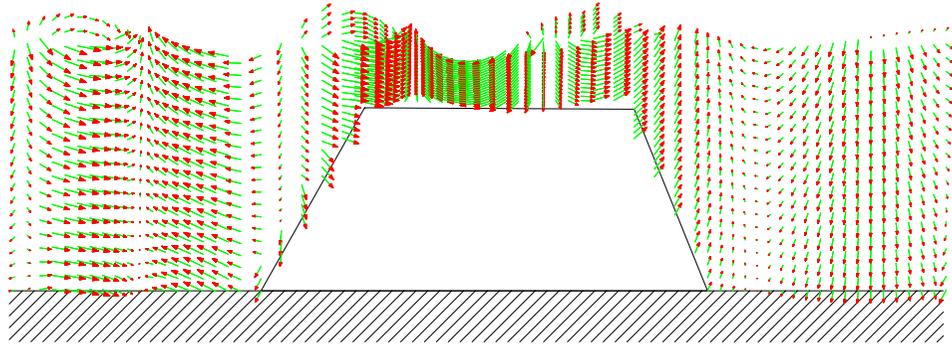


Fig. 23. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged trapezoidal breakwater on uniform porous bottom.
 ($R = 0.05, h/L_o = 0.1$)

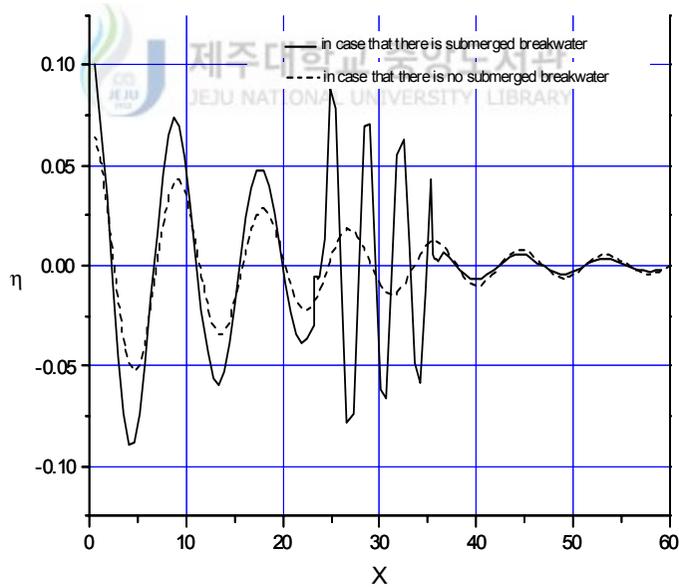


Fig. 24. Comparison of wave profile on uniform porous bottom. ($R = 0.05, h/L = 0.1, q = 0.1$)

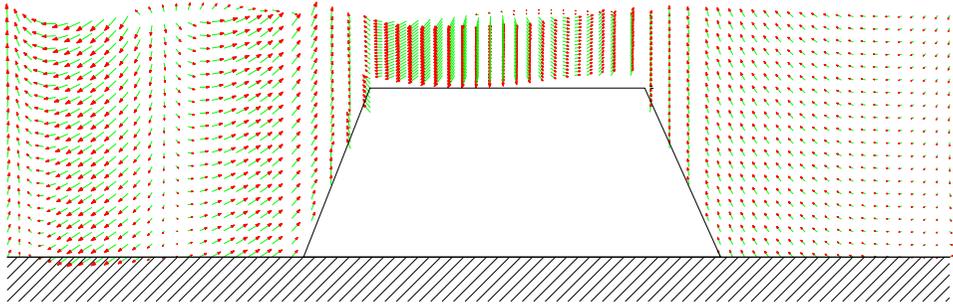


Fig. 25. Wave profile and velocity field in the vicinity of submerged trapezoidal breakwater on uniform porous bottom.
 ($R = 0.1, h/L = 0.1$)

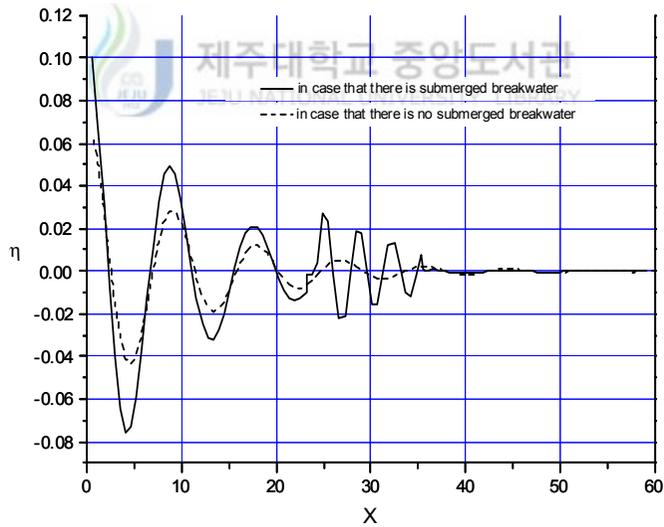
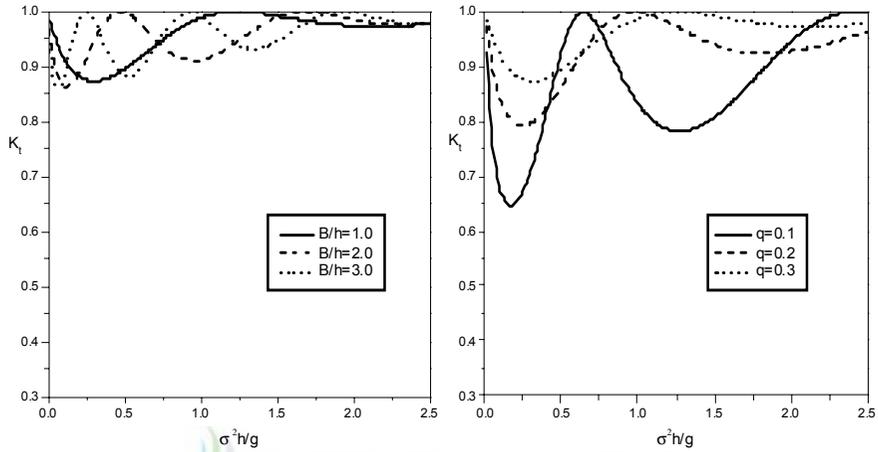
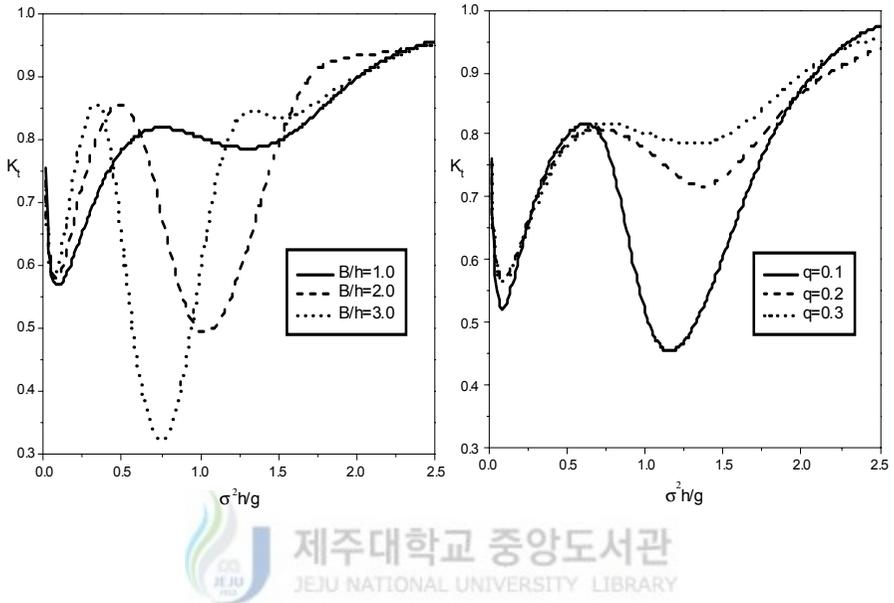


Fig. 26. Comparison of wave profile on uniform porous bottom. ($R = 0.1, h/L = 0.1, q = 0.1$)



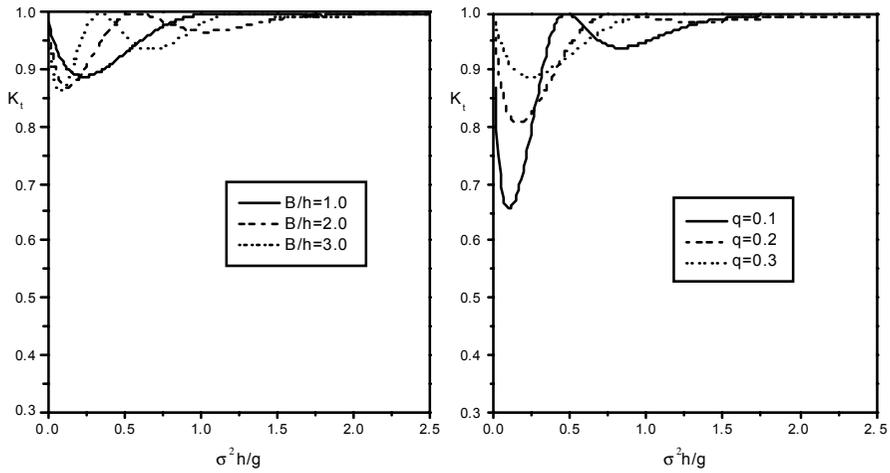
(a) Effect of width($q=0.3$) (b) Effect of height($B/h=1.0$)

Fig. 27. Comparison of transmission coefficients for the submerged breakwater on impermeable bottom.



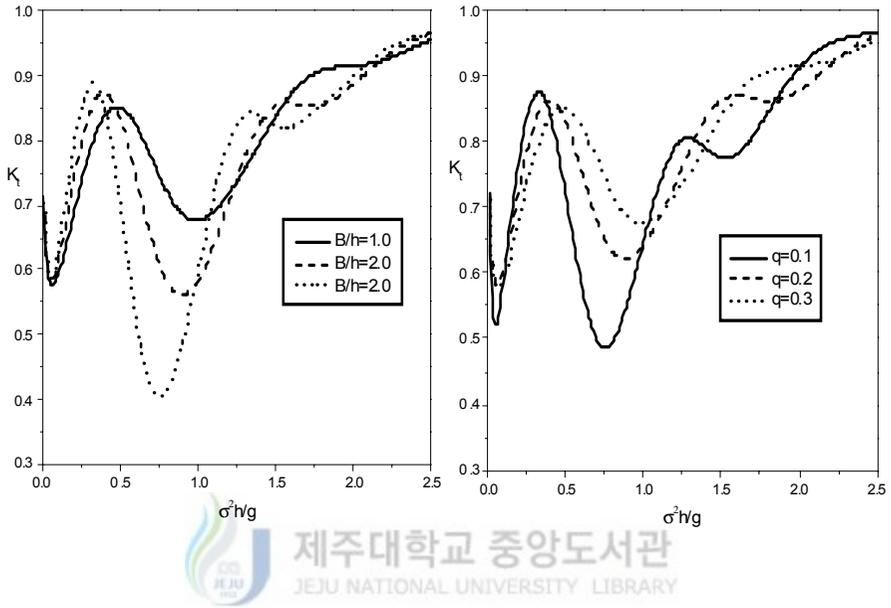
(a) Effect of width($q = 0.3$) (b) Effect of height($B/h = 1.0$)

Fig. 28. Comparison of transmission coefficients for the submerged breakwater on porous bottom($R = 0.1$).



(a) Effect of width ($q = 0.3$) (b) Effect of height ($B/h = 1.0$)

Fig. 29. Comparison of transmission coefficients for the submerged trapezoidal breakwater on impermeable bottom.



(a) Effect of width($q = 0.3$) (b) Effect of height($B/h = 1.0$)

Fig. 30. Comparison of transmission coefficients for the submerged trapezoidal breakwater on porous bottom($R = 0.1$).

V. 결 론

본 연구에서는 투과성 영역을 포함한 천해파 운동의 해석에 대하여, 선형과동이론의 적용으로 인한 투과층의 저항계수를 선형화한 등가선형계수를 사용하였으며, 더욱이 파압이 유체 및 투과층의 전영역을 통과하는 연속함수로서 주목하여, 파압으로 표현된 경계값 문제에 대한 경계요소법을 적용하였다. 그리고 이 경계요소법을 이용하여, 불투과 저면과 투과 저면 위를 진행하는 파의 파형과 속도벡터를 이론적으로 해석하여 비교해 보았다. 그리고 이를 직사각형 잠제와 사다리꼴 형상 잠제에 대하여 적용하여, 잠제 전·후의 파고를 비교함으로써 잠제의 파랑제어의 기능을 나타내었다. 각각의 수치해석 결과를 요약 정리하면, 다음과 같다.

- (1) 본 논문의 불투과 직사각형 잠제와 사다리꼴 형상 잠제의 타당성과 유효성을 검증하기 위하여 井島와 佐佐木(1971), 井島 등(1882)이 실시한 영역분할법에 의한 계산 결과와 비교, 분석하였으며, 양 해석기법의 결과가 잘 일치하는 것을 보였다.
- (2) 투과 저면 위를 진행하는 파의 진폭감쇠의 타당성을 검증하기 위하여, Reid and Kajiura(1957)에 의한 계산 결과와 비교하였다. 그 결과 본 수치모의의 타당성이 검증되었다.
- (3) 불투과 저면 위를 진행하는 파는 파의 진폭이 변화 없이 진행하는 것을 알 수 있으며, 천해역의 투과 저면 위를 진행하는 파는 진폭이 감쇠하면서 진행하는 것을 알 수 있었다.
- (4) 심해역에서 투과 저면 위를 진행하는 파는 자유표면 아래의 입자속도가 투과 저면의 영향을 거의 받지 않기 때문에, 파의 진폭이 변화 없이 진행하는 것을 알 수 있다.
- (5) 불투과 직사각형 잠제에 대한 적용으로부터, 불투과 저면 위를 진행하는 파보다 투과 저면 위를 진행하는 파가 잠제에 의한 영향과 파의 감쇠로 인하여 파고의 감쇠가 현저하다는 것을 알 수 있다.
- (6) 불투과 사다리꼴 형상 잠제에 대한 적용으로부터, 잠제에 의한 영향과 파의 감쇠

로 인한 파고의 감쇠를 확인할 수 있으나, 불투과 직사각형 잠제에 비하여 파고 감쇠의 변화가 작다는 것을 알 수 있다.

(7) 불투과 잠제에 대한 적용으로부터, 투과율은 전체적으로 불투과 저면에 비해 투과저면에서 작아지는 것을 알 수 있으며, 제체폭의 변화와 제체고의 변화에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.



VI. 참고문헌

- 김남형 · 서일교역. 1995, 경계요소법기초, 원창출판사.
- 김남형 · 김영수역. 1998, 해양구조물과 기초, 원기술.
- 김남형역. 1999, 소파구조물. 과학기술.
- 김남형역. 2002, 수치유체역학. 원기술.
- 김남형. 1995, 경계요소법에 의한 복수투과잠제의 파랑특성해석, 대한토목학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 425-431.
- 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, 한국해안 · 해양공학회지, 제3권, 제3호, pp. 176-183.
- 김남형, 양순보. 2003. 사다리꼴형상 잠제의 수리특성에 관한 경계요소해석, 한국해양환경공학회, Vol. 6, No. 4, pp. 45-51.
- E.C. Cruz. M. Isobe. and A. Watanabe. 1997. Boussinesq equation for wave transformation on porous beds. Coastal Engineering., 30: 125-156.
- Kioka, W., 1989, Reflection surface water waves by parallel submerged breakwater, JSCE, No. 411(II-2), pp. 263-266.
- Reid, R.O. and Kajiuura, K. 1957. On the damping of gravity waves over a permeable sea bed. Trans. AGU., 38(5): 662-666.
- Robert G. Dean. and Robert A. Dalrymple. 1984. WATER WAVE MECHANICS for Engineers and Scientists, Prentice-Hall Inc., New Jersey, pp. 261-283.
- 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.
- 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.

- 井島武士・佐佐木富雄, 1971, 潜堤の効果に関する理論的研究, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 141-147.
- 井島武士・吉田明德・北山 齊. 1982, 斜め入射坡対する潜堤の反射効果に関する数値解析, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 418-422.
- 泉宮尊司・遠藤雅人, 1989, 潜堤および透過性構造物のある海浜における波動場解析, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 638-642.
- 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数および局所的反射率, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 544-548.
- Somchai・磯部雅彦・渡辺 晃, 1989, 透過潜堤による波浪変形の解析モデル, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 643-647.
- 金南亨. 1991, 浅海波浪と波動底面亂流境界層の特性に関する基礎的研究, 日本 熊本大 學校大學院, 博士學位論文.



감사의 글

부족한 점이 많았던 저에게 학문적 기본소양과, 연구자세에 대해 가르침을 주시고, 논문을 끝까지 마칠 수 있도록 끊임없는 격려와 조언을 주신 지도교수 김남형 교수님에게 진심으로 깊은 감사를 드립니다. 그리고, 바쁘신 와중에도 논문을 심사를 맡아 세심하게 검토하고 지적하여 주신 남정만 교수님, 조일형 교수님께도 진심으로 감사드립니다. 학부에서부터 대학원을 마치는 동안 많은 가르침을 수신 양성기 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 김상진 교수님, 김성근 교수님, 고호성 교수님께도 감사드립니다.

논문이 완성되기까지 항상 같이하면서 격려와 힘을 주었던 영택형, 지훈형, 현우형 학과 조교를 하면서 많은 도움을 주었던 영웅형 건형에게도 고마운 마음을 드립니다. 그리고 대학원 생활을 같이 하면서 격려를 해주었던 창훈형, 태우형, 현수형, 동일형, 용철형, 승희형, 영범형, 덕철, 성욱, 그리고 현, 혁준, 광일에게도 앞으로 좋은 미래가 펼쳐지길 기원 합니다.

논문을 쓰면서 많은 배려를 해주고 이해해 주었던 대학선배들, 동기들, 후배들, 친구들 - 두석, 봉호, 석훈, 재언, 경택, 두혁, 마야, 성임, 용철, 필성, 경보, 민수, 상민, 덕건, 강일, 성관, 동국, 윤호, 진산, 현숙, 희숙 -을 포함한 모두에게 감사드립니다.

끝으로 공부를 끝까지 할 수 있도록 항상 나를 믿고, 묵묵히 지켜보시면서 많은 용기를 주셨던 아버지, 그리고 많은 뒷바라지를 해주신 어머니, 동생 모두에게 이 논문으로써나마 고마운 마음을 전합니다.

2003 년 12월

양승보

발표논문 리스트

(1) 학회지 발표논문

- ① “사다리꼴형상 잠제의 수리특성에 관한 경계요소해석”, 한국해양환경공학회, 한국해양환경공학회지, Vol. 6, No. 4, pp. 45~51, 2003.
- ② “투과 저면을 고려한 잠제 주변의 파형에 관한 수치해석”, 제주대학교 해양과환경연구소, 2003년(인쇄중).
- ③ “해저면의 에너지 일산을 고려한 불투과잠제의 파랑특성해석”, 한국해양환경공학회(심사중).

(2) 학술 발표회 발표논문



- ① “Numerical Analysis on the Hydraulic Characteristics of Submerged Breakwater of Trapezoidal Type on Porous beds”, 대한토목학회, 2003년도 정기 학술대회, 2003년 10월.
- ② “해저면의 에너지 일산을 고려한 잠제의 파랑특성해석”, 한국해양환경공학회, 2003년도 추계 학술대회 논문집, pp. 153~158, 2003.
- ③ “해저면의 에너지 일산을 고려한 잠제의 파랑특성해석”, 제2회 대학원생 학술발표회 논문집, 제주대학교, pp. 125~128, 2003.
- ④ “해저면의 에너지 소산을 고려한 불투과 잠제의 경계요소해석”, 제4회 제주대학교 대학원 학술발표대회, 2003년.