



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



碩士學位論文

傾斜入射波를 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

禹 秀 珉

2012年 2月



# 傾斜入射波를 考慮한 潛堤의 境界要素解析

指導教授 金 南 亨

禹 秀 珉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 2月

禹秀珉의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

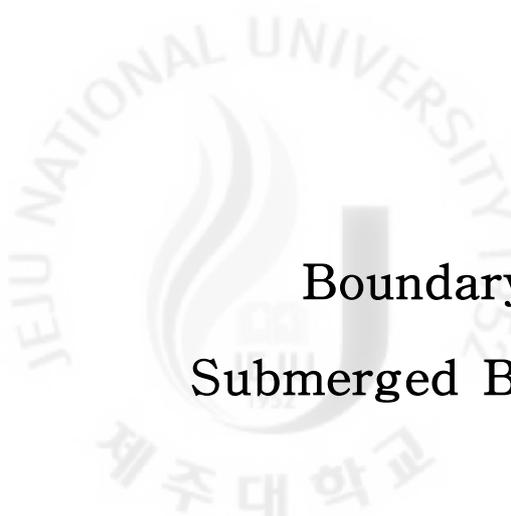
審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2012年 2月



Boundary Element Analysis on the  
Submerged Breakwater Considering Oblique  
Incident Wave

Su-Min Woo

(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
<b>I. 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구 목적 .....	2
3. 논문의 구성 .....	2
<b>II. 경계요소해석 .....</b>	<b>3</b>
1. 지배 방정식 .....	3
2. 경계처리 .....	5
2. Helmholtz 방정식 .....	8
4. 경계요소법에 의한 정식화 .....	10
1) 모서리점의 취급 .....	11
2) 잠제 영역에 대한 정식화 .....	11
3) 잠제를 제외한 영역에 대한 정식화 .....	13
<b>III. 경사입사파의 경계요소해석의 타당성 검토 .....</b>	<b>17</b>
1. 잠제의 형상에 대한 타당성 검토 .....	17
2. 입사각의 변화에 대한 타당성 검토 .....	20
<b>IV. 경사입사파의 경계요소해석과 고찰 .....</b>	<b>22</b>
1. 사각형 잠제에 대한 해석과 고찰 .....	22

2. 사다리꼴 잠제에 대한 해석과 고찰 ..... 22

V. 결 론 ..... 27

VI. 참고문헌 ..... 29

## List of Figures

Fig. 1 Analytical Region and Coordinate .....	4
Fig. 2 Definition of notation .....	12
Fig. 3 Corner point and outwardly drawn normal .....	12
Fig. 4 Sketch of impermeable submerged breakwater .....	18
Fig. 5 Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater( $d/h = 0.8$ ) ; — Other numerical solutions(Ijima et al) and ◦ ◦ ◦ , • • • Present solutions(BEM) .....	18
Fig. 6 Sketch of trapezoidal type impermeable submerged breakwater .....	19
Fig. 7 Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater of trapezoidal type( $d/h = 0.7$ ) ; — Other numerical solutions(Ijima et al) and ◦ ◦ ◦ Present solutions(BEM) .....	19
Fig. 8 Reflection coefficients for the change of angle ( $b/h = 2.0, d/h = 0.7$ ) .....	21
Fig. 9 Reflection coefficients for the change of angle ( $b/h = 2.0, d/h = 0.7, B/h = 1.9$ ) .....	21
Fig. 10. Comparison of reflection coefficients for the submerged breakwater with various width .....	23
Fig. 11. Comparison of reflection coefficients for the submerged breakwater with various height. ....	24
Fig. 12. Comparison of reflection coefficients for the submerged trapezoidal breakwater with various width .....	25
Fig. 13. Comparison of reflection coefficients for the submerged trapezoidal breakwater with various height .....	26



# I. 서 론

## 1. 연구 배경

경제적 발전과 다양한 국민생활의 증가로 최근 해양의 개발과 이용은 한층 더 기대되고 있다. 이러한 해양개발에 있어 안전한 해변을 책임지는 소파구조물은 파의 에너지를 감쇠시키는 기능을 가지고 있다. 그 중 방파제의 역사는 오래되었고, 전세계 도처에 있으며 산업의 발전, 사람들의 생활 향상, 문화의 진흥 등에 공헌하고 있다. 방파제는 배치 조건, 자연 조건, 이용 조건, 시공 조건, 공사비용, 공사기간, 중요성, 재료 입수난이, 유지 보수 난이를 고려하여 선정해야 한다. 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. 실해역에서의 파는 경사입사파를 가지고 입사하게 되며, 이러한 경사입사파의 경우에 있어서 파랑의 변화는 직각입사의 경우와 다른 특성을 가진다. 이러한 문제점을 고려하여 유리한 단면 및 위치를 사전에 예측하는 것은 상당히 중요하다.

과거의 경사입사파에 대한 이론해석의 예로, Garrison(1969)의 무한 수심중의 소홀수 부체에 대한 Diffraction과 Radiation문제를 Green함수를 사용한 해석기법이나, 직사각형의 반잠수부체에 의한 Diffraction문제를 유한요소법으로 해석한 Bai(1975)가 있지만, 경사입사파에 대한 잠제구조물의 특성은 충분히 해명되고 있다고 말할 수 없다.

본 연구는 Kim et al.,(2006)의 경계요소법 연구를 바탕으로 하여 파랑이 경사로

입사하는 잠제구조물의 반사율을 구했다. 이들의 해석결과는 井島 等(1982)의 연구 결과와 비교하였고, 이 비교를 통하여 본 해석기법의 타당성 및 유효성을 검증하였다.

## 2. 연구 목적

해역의 정온을 유지하는 기능을 가지고 있는 잠제는 그 위치선정 및 설계에 있어서 신중함이 필요하다. 따라서 직각입사만 고려한 기존의 연구는 잠제 주변의 수리 특성을 해석하기에 다소 한계가 있다.

경사입사파에 대한 잠제구조물 주변의 파랑 특성을 2차원 Green공식에 의한 경계요소법을 확장하여 해석한 井島 等(1982)의 해석결과와 결과 비교를 통하여, 경사 입사파에 의한 잠제의 반사율에 관한 해석기법의 타당성을 검증 하고자 한다.

향후 잠제구조물의 설계·시공에 있어서 수치해석이 중요한 수단으로 본 연구 또한 해안 개발의 주요한 역할을 할 것이라 생각한다.

## 3. 논문의 구성

본 논문의 구성은 우선 II장에서 경계요소해석을 위한 지배 방정식 전개와 경계 처리, Helmholtz 방정식, 경계요소법에 의한 정식화를 유도하였다.

III장에서는 사각형 잠제와 사다리꼴형상 잠제에 대한 타당성 검토와 입사각의 변화에 따른 타당성을 검토한다.

IV장에서는 잠제의 형상과 입사각의 변화에 따른 결과 값의 비교·분석을 한다. 마지막으로 V장에서는 결론으로서 본 논문에서 얻어진 결론들을 종합적으로 서술하고 있다.



## II. 경계요소해석

### 1. 지배방정식

좌표계는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 직교좌표계  $(x, y, z)$ 를 정의하고, 일정수심  $h$ 의 해역에 임의 형상의 잠체구조물이 있고, 이것에 파고  $H$ , 각진동수  $\sigma$ 의 미소진폭 파가  $x$ 축을 따라  $\theta$ 의 입사각을 이루어 진행하고 있는 것으로 한다. 잠체의 길이는  $y$ 축을 따라 충분히 길다고 가정한다.

경계  $S_1$ 는 자유수면, 경계  $S_2$ 는 해저 저면에 의한 경계이이고,  $S_3$ 는 잠체에서 잠체주변의 파의 영향을 받지않게 적당히 떨어진 곳에 설정한 가상경계이다. 또, 유체는 비압축성, 비점성, 비회전운동으로 가정한다. 유체운동을 속도 포텐셜에 의해 기술한다.

운동장전체의 속도 포텐셜  $\Phi(x, y, z, t)$ 은 다음과 같다.

$$\Phi(x, y, z; t) = \frac{gH}{2\sigma} \phi(x, y, z) e^{-i\sigma t} \quad (1)$$

여기서, 식 (1)에서 포텐셜함수  $\phi$ 는 다음의 라플라스(Laplace) 식을 만족한다.

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

3차원 포텐셜을 라플라스 방정식에 대입하면 다음의 Helmholtz 방정식을 얻을 수 있다.

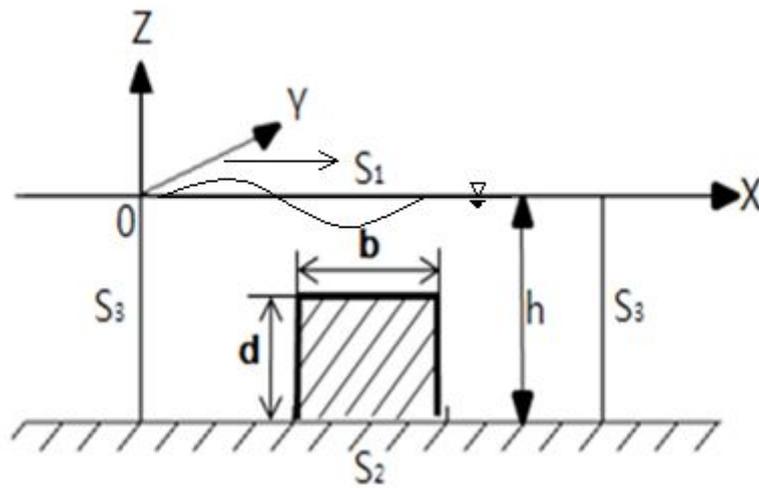
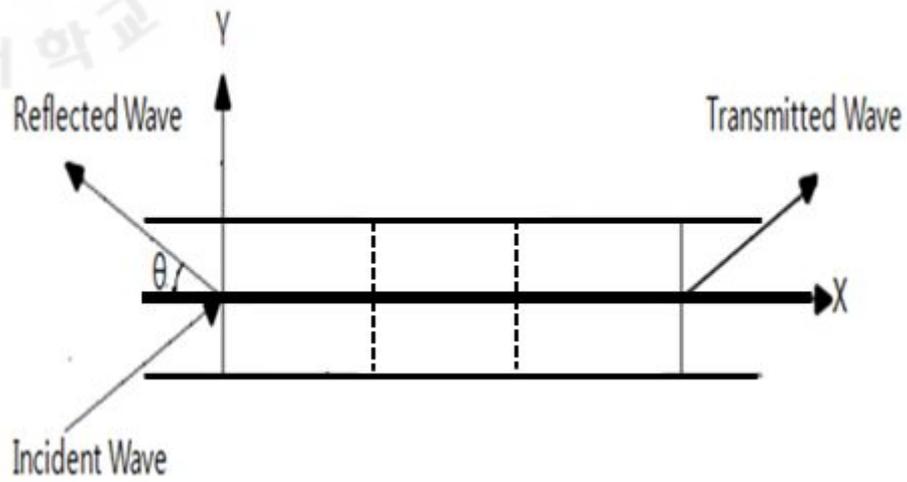


Fig. 1. Analytical region and coordinate.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + (ik \sin \theta)^2 \phi = 0 \quad (3)$$

Helmholtz 방정식에 대한 설명은 뒤에서 자세히 설명 하도록 하겠다.

## 2. 경계처리

경계처리는 Fig. 1에 표시한 것과 같이 자유수면  $s_1$ , 해저 저면에 의한 경계  $s_2$  그리고 해석상의 가상경계  $s_3$ 로 이 가상경계에서의 유체의 운동은 연속성을 만족해야 한다.  $s_1, s_2, s_3$ 으로 둘러싸인 해석 영역에서는 유체의 운동을 미소진폭운동으로 가정하여 선형해석을 한다.

유체의 연속방정식 및 운동방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{gV} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu V \Phi \right) + \frac{p}{\rho g} + z = 0 \quad (5)$$

여기서,  $\frac{1}{V} = \frac{1}{\epsilon} \{1 + (1 - \epsilon) C_m\}$ 이다.

자유표면 경계조건  $s_1$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_{z=0}, \quad \eta = \frac{1}{gV} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu V \Phi \right) \Big|_{z=0} \quad (6)$$

해저면 경계조건은 불투과성 저면의 연직방향 속도성분은 0로, 경계조건은 다음

과 같다.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \quad (n: \text{외향법선방향}) \quad (7)$$

마지막으로 가상 경계조건  $S_3$ 는 수치해석으로부터 영역을 유한영역으로 하기 위해 만들어진 가상경계이다. 이 경계가 개방되어있는 경우, 이 경계내외의 유체는 다음 식을 만족해야 한다.

$$\text{Mass-flux ; } \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} \quad (\Phi_o: \text{해석영역 외부의 속도포텐셜}) \quad (8)$$

$$\text{Energy-flux ; } \left( \frac{P}{\rho g} + z \right) = - \frac{1}{gV} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \mu \Phi V \right) \equiv H \quad (9)$$

여기서,  $H$ 는 과압함수로 입사파의 각주파수  $\sigma (= 2\pi/T, T=\text{주기})$ 에 의해 유체운동의 주기성을 고려하여,

$$H(x, y, z, t) = \text{Re} \{ h(x, y, z) e^{i\sigma t} \} \quad (10)$$

로 한다. 여기서,  $i = \sqrt{-1}$ 이다.

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 과압함수와 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 정상파, 산란파 등이 발생하지만, 경계  $S_3$ 를 구조물의 주변으로부터 충분히 떨어진 위치에 설정함으로써 이 파의 영향을 무시할 수 있으며, 입사파와 투과파의 각 위치에서의 속도포텐셜을 다음과 같이 취급할 수



있다.

$$\begin{aligned} \text{입사위치 ; } \bar{\Phi}_{inp} &= \bar{\Phi}_i + \bar{\Phi}_r \\ \text{투과위치 ; } \bar{\Phi}_{out} &= \bar{\Phi}_t \end{aligned} \quad (11)$$

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.

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_{inp} &= (e^{-ikx \cos \theta} + A_r e^{ikx \cos \theta}) \cdot \frac{g \cdot a}{\sigma} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \\ \bar{\Phi}_{out} &= A_t e^{-ikx \cos \theta} \cdot \frac{g \cdot a}{\sigma} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,  $a$ 는 파의 진폭이다. 식 (12)에서  $A_r$ 과  $A_t$ 는 각각 반사 및 투과파를 나타내는 미지(未知)의 계수이며,  $k$ 는 파수이다.

본 연구에서는 식(10)에 나타낸 파압함수  $H$ 가 전 해석영역을 통해서 연속적인 것에 대해 착안하여, 파압함수를 미지량으로 하는 해석수법을 이용한다. 식 (10)에서,

$$\begin{aligned} \Phi &= -\beta \cdot H, \\ \beta &= \frac{g \cdot V}{(i \cdot \sigma + \mu \cdot V)} \end{aligned} \quad (13)$$

가 얻어진다. 식 (13)을 이용하여, 식(4)~(10)와 식(12)로 나타내는 각 조건식을 대입하면, 다음 식으로 고쳐 쓸 수 있다.



$$\begin{aligned}
 \text{경계 } S_1 ; i\sigma H|_{z=0} &= -\beta \frac{\partial H}{\partial z}|_{z=0} \\
 \text{경계 } S_2 ; \beta \frac{\partial H}{\partial n} &= 0 \\
 \text{경계 } S_3 ; \beta \frac{\partial H}{\partial n} &= \beta \frac{\partial H_o}{\partial n} \quad \left( H_o = -\frac{1}{\beta} \Phi_o \right)
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

식, (14)의 각 조건식으로부터, 파압함수  $H$ 에 관한 경계값 문제로 되며, 각 영역의 구분없이 해석할 수 있다.

또한, 가상경계면에 있어서의 파압함수 및 외향법선유속  $-\beta \frac{\partial H_o}{\partial n} = \frac{\partial \phi_o}{\partial n}$ 는 다음 식으로 나타내어 진다.

$$\begin{aligned}
 \text{입사위치 ; } -\beta H_o = \Phi_o &= (e^{-ikx \cos \theta} + A_r e^{ikx \cos \theta}) \cdot C \\
 -\beta \frac{\partial H_o}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} &= -ik \cos \theta (e^{-ikx \cos \theta} - A_r e^{ikx \cos \theta}) \cdot C
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 \text{투과위치 ; } -\beta H_o = \Phi_o &= A_t e^{ikx \cos \theta} \cdot C \\
 -\beta \frac{\partial H_o}{\partial n} = \frac{\partial \Phi_o}{\partial n} &= -ik \cos \theta A_t e^{-ikx \cos \theta} \cdot C \\
 (C = \frac{ga}{\sigma} \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh})
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

### 3. Helmholtz 방정식

유체영역내에서 속도포텐셜은 3차원 라플라스 방정식을 만족하므로 속도포텐셜은 변형된 Helmholtz 방정식을 만족한다.

포텐셜문제에서 유용한 방정식으로 Helmholtz 방정식 또는 파동방정식으로 불리는, 시간에 독립적인 형태로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 u + \lambda^2 u = 0 \quad (17)$$

여기서,  $\nabla^2$ 는 2차원 또는 3차원 라플라시안이며,  $\lambda^2$ 의 정의는 이미 알고있는 변수 값이다. 다음과 같은 전형적인 경계조건의 경우를 고려해 보자.

$$\begin{aligned} \text{기본경계조건 } u &= \bar{u} \\ \text{자연경계조건 } q &= \bar{q} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (17)과 (18)에 대한 가중 잔차 식은 다음과 같이 된다.

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 u + \lambda^2 u) u^* d\Omega = \int_{\Gamma_2} (q + \bar{q}) u^* d\Gamma - \int_{\Gamma_1} (u + \bar{u}) q^* d\Gamma \quad (19)$$

부분적분을 두 번 수행하면 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (\nabla^2 u + \lambda^2 u) u^* d\Omega &= - \int_{\Gamma_2} \bar{q} u^* d\Gamma - \int_{\Gamma_1} q u^* d\Gamma \\ &+ \int_{\Gamma_1} \bar{u} q^* d\Gamma + \int_{\Gamma_2} u q^* d\Gamma \end{aligned} \quad (20)$$

또는 더 간략히 하면,

$$\int_{\Omega} (\nabla^2 u + \lambda^2 u) u^* d\Omega = - \int_{\Gamma} q u^* d\Gamma + \int_{\Gamma} u q^* d\Gamma \quad (21)$$

여기서,  $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ 이다.

그러나, Helmholtz 방정식에 대한 기본해  $u^*$ 는 다음 식을 만족한다.

$$\nabla^2 u + \lambda^2 u + \Delta_i = 0 \quad (22)$$

2차원 문제에 대한 기본해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{1}{2\pi} K_0(\lambda r) \\ q^* &= \frac{\partial u^*}{\partial n} = -\frac{1}{2\pi} \lambda K_1(\lambda r) \frac{\partial r}{\partial n} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서,  $K_0$ 는 0차수의 제 2종 변형 Bessel함수,  $K_1$ 는 0차수의 제 2종 변형 베셀함수이다.

#### 4. 경계요소법에 의한 정식화

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

$$\begin{aligned} \alpha_p \Phi_p &= \int_s \left( \Phi \frac{\partial G}{\partial n} - \frac{\partial \Phi}{\partial n} G \right) ds \\ G &= K_0(kr \sin \theta) \\ H &= \frac{\partial G}{\partial n} = -k \sin \theta K_1(kr \sin \theta) \frac{\partial r}{\partial n} \\ r &= \sqrt{(x - \epsilon)^2 + (z - \zeta)^2} \end{aligned} \quad (24)$$

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 구성

된 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, 과압함수  $H$ 의 분포를 다음과 같은 1차함수로 근사시킨다.

$$\begin{aligned}
 H &= N_j^T H_j \\
 H_j^T &= (H_j, H_{j+1}) \\
 N_j^T &= \left( 1 - \frac{s}{e_j}, \frac{s}{e_j} \right)
 \end{aligned} \tag{25}$$

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 외향법선  $n_1, n_2$ 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 2점점법을 사용하는 것이며, 근접 정도를 충분히 작게 하면, 양호한 계산값을 얻을 수 있다.

#### 2) 잠제 영역에 대한 정식화

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 영역 (II)의 경계선 위를  $N^*$ 개 절점으로  $N^*$ 개의 미소요소로 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 (24)에 대입하면, 다음식이 얻어진다.

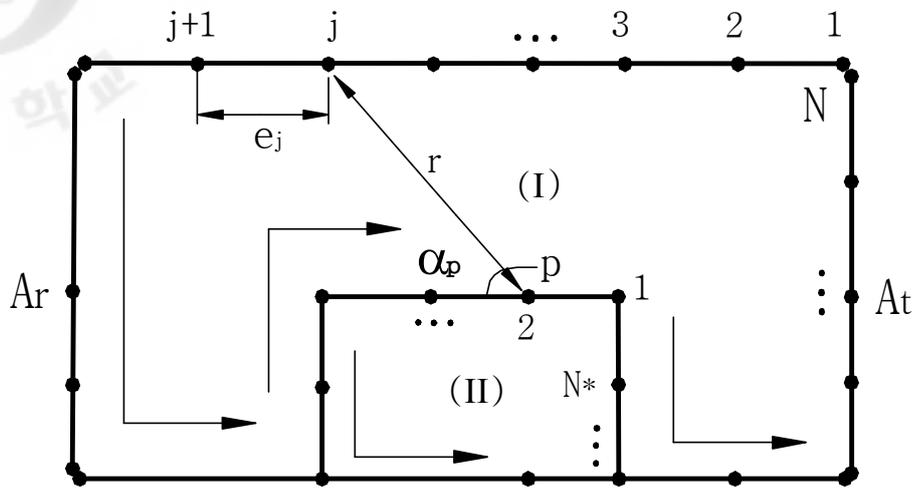


Fig. 2. Definition of notation

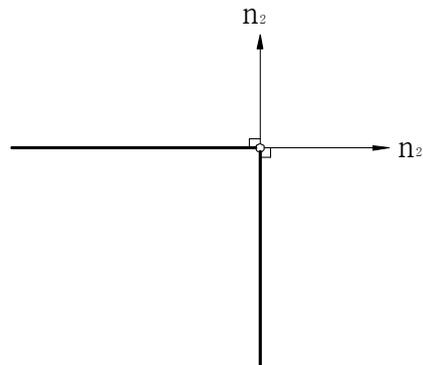


Fig. 3. Corner point and outwardly drawn normal.

$$\alpha_p \beta \cdot H_p + \int_{j=1}^{N^*} \beta \cdot H_p \frac{\partial}{\partial n} K_o(k \sin \theta r) ds = 0 \quad (26)$$

식 (26)에서 식 (24)을 대입하여 이산화하면 다음과 같이 된다.

$$\beta \left( \alpha_p + \sum_{j=1}^{N^*} A_{p,j}^T \right) \cdot H_p = 0 \quad (27)$$

여기서,

$$A_{p,j}^T = \int_0^{e_j} N_j^T \frac{\partial}{\partial n} K_o(k \sin \theta r) ds \quad (28)$$

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.

$$\beta \left[ \alpha_p + \sum_{j=1}^{N^*} (A_{p,j-1}^2 + A_{p,j}^1) \right] \cdot H_p = 0 \quad (29)$$

### 3) 잠제를 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  $(x_p, y_p)$ 로 표시하고, 그 길이를  $e_j (j=1, 2, \dots, N)$ 로 한다. 투과층에서 충분히 떨어진 입사경계와 투과경계의 일정 수심 영역에 가상 경계  $S_3$ 을 설정하고, 법선은 외향을 향하며, 적분 방향은 반

시계방향으로 잡는다. 식 (15)과 (16)을 식 (14)에 대입하고, 식 (24)를 적용하면, 다음식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 & \alpha_p \beta \cdot H_p + \int_S \beta \cdot H_p \frac{\partial G}{\partial n} ds \\
 & + \int_{S_1} i\sigma \cdot H_p G ds \\
 & + \int_{S_{3-inp}} \beta \frac{\partial H_p}{\partial n} G ds \\
 & + \int_{S_{3-out}} \beta \frac{\partial H_p}{\partial n} G ds = 0
 \end{aligned} \tag{30}$$

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 (30)에 나타낸 경계면위의 적분을 식 (24)을 이용하여 이산화하면, 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned}
 & \beta \alpha_p \cdot H_p + \sum_{S_1} (\beta A_{p,j}^T - i\sigma B_{p,j}^T) \cdot H_p + \sum_{S_2} \beta A_{p,j}^T \cdot H_p \\
 & + \sum_{S_{3-inp}} e^{ikx \cos \theta} (A_{p,j}^T + ik \cos \theta B_{p,j}^T) C \cdot A_r \\
 & + \sum_{S_{3-out}} e^{-ikx \cos \theta} (A_{p,j}^T + ik \cos \theta B_{p,j}^T) C \cdot A_t \\
 & = \sum_{S_{3-inp}} e^{-ikx \cos \theta} (A_{p,j}^T + ik \cos \theta B_{p,j}^T) C
 \end{aligned} \tag{31}$$

여기서,

$$B_{p,j}^T = \int_0^{e_j} N_j^T G ds, \quad C = \frac{g \cdot a}{\sigma} \frac{\cosh k(h+z_i)}{\cosh kh}$$

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 (29)과 (30)의 관계를 이용하여 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & \beta\alpha_p \cdot H_p + \sum_{S_1} (\beta A - i\sigma B) \cdot H_p \\
 & + \sum_{S_2} \beta A \cdot H_p \\
 & + \beta \left( \alpha_p + \sum_{j=1}^{N^*} A \right) \cdot H_p \\
 & + \sum_{S_{3-inp}} e^{ikx \cos \theta} (A + ik \cos \theta B) C \cdot A_r \\
 & + \sum_{S_{3-out}} e^{-ikx \cos \theta} (A + ik \cos \theta B) C \cdot A_t \\
 & = \sum_{S_{3-inp}} e^{-ikx \cos \theta} (A + ik \cos \theta B) C
 \end{aligned} \tag{32}$$

여기서,

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

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

$$[G_{11} \ G_{12} \ G_{13}] \begin{Bmatrix} H_p \\ A_r \\ A_t \end{Bmatrix} = \{R_{11}\} \tag{33}$$

여기서,

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

$$G_{12} = \sum_{S_3 - i p} (-A + ik \cos \theta B) C e^{ikx \cos \theta}$$

$$G_{13} = - \sum_{S_3 - i p} (A + ik \cos \theta B) C e^{-ikx \cos \theta}$$

$$R_{11} = \sum_{S_3 - i p} (A + ik \cos \theta B) C e^{-ikx \cos \theta}$$

이다. 식 (33)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.

### Ⅲ. 경사입사파의 경계요소해석의 타당성 검토

#### 1. 잠제의 형상에 대한 타당성 검토

과동장의 해석에 있어서, 구조물에 의한 정상파와 산란파 등의 흐름이 발생하기 때문에 가상경계면을 구조물에서 충분히 멀리 취할 필요가 있다. 그러나 너무 멀리 잡게 되면 해석 영역이 길어지고, 적분 계산을 할 때, 미소항이 생겨 계산정도를 떨어뜨린다. 따라서 여기서는 앞에 있는 잠제의 선단에서 가상경계면까지 2과장분 ( $= 2L$ )의 거리를 취했다. 그리고 파는 Fig. 4와 Fig. 6에서 보듯이  $x$ 축의 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 진행한다.

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

Fig. 5은 불투과 사각형 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. 5에서 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. 6에 나타난 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. 7은 불투과 사다리꼴 잠제에 대한 해석기법의 검증을 위하여 수치계산 한 예는 앞에서의 같이 영역 (I)은  $\mu = 0$ ,  $\epsilon = 1$ , 영역 (II)를  $\mu = 0$ ,  $\epsilon = 0$  놓고, 입사파의  $kh$ 에 대응하는 불투과 잠제의 반사율을 나타낸 것이다. 실선은 井島 등 (1982)의 영역분할법에 의한 계산 결과이며,  $\circ \circ \circ$ 은 경계요소법으로 얻은 해석 결과이다.

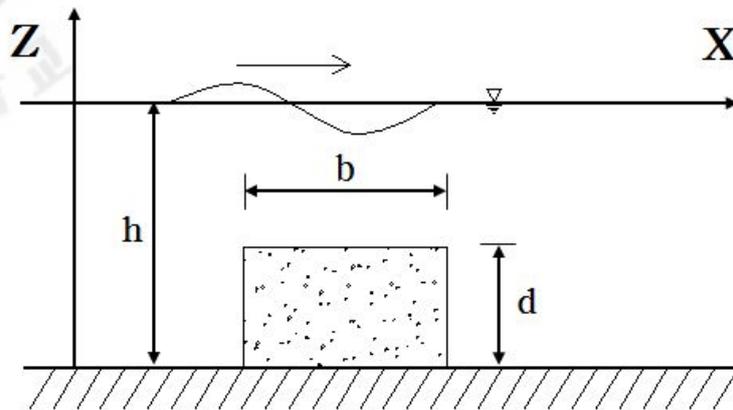


Fig. 4. Sketch of impermeable submerged breakwater.

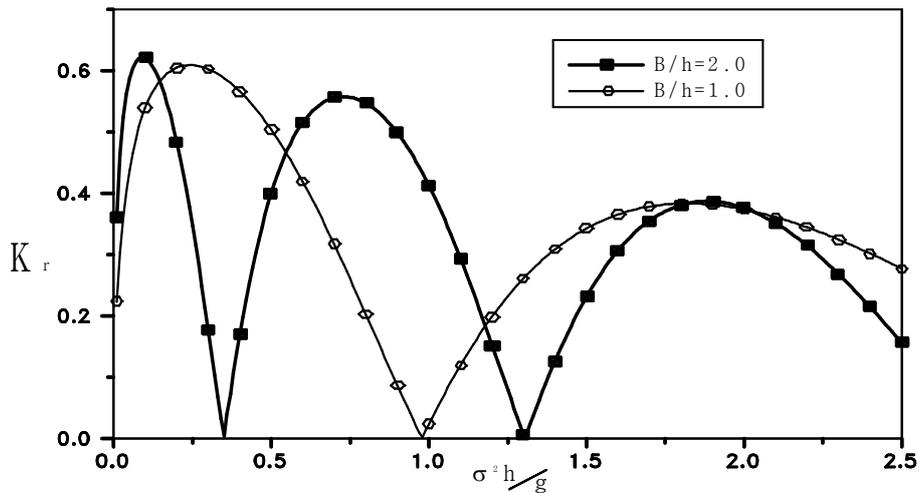


Fig. 5. Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater ( $d/h=0.8$ ) ; — Other numerical solutions (Ijima et al) and symbol ( $\circ \circ \circ$ ,  $\blacksquare \blacksquare \blacksquare$ ) Present solutions (BEM).

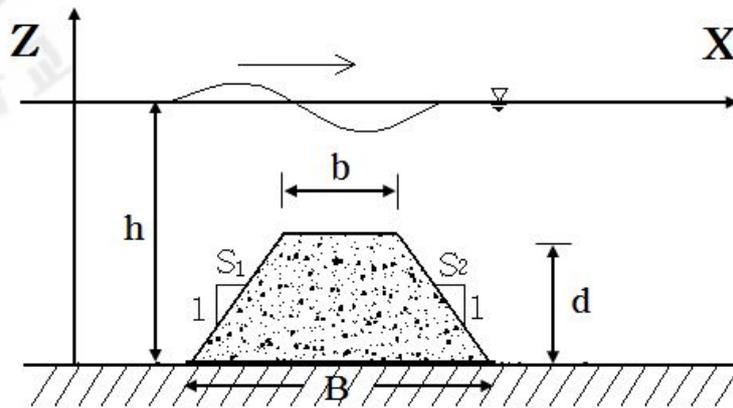


Fig. 6. Sketch of trapezoidal type impermeable submerged breakwater.

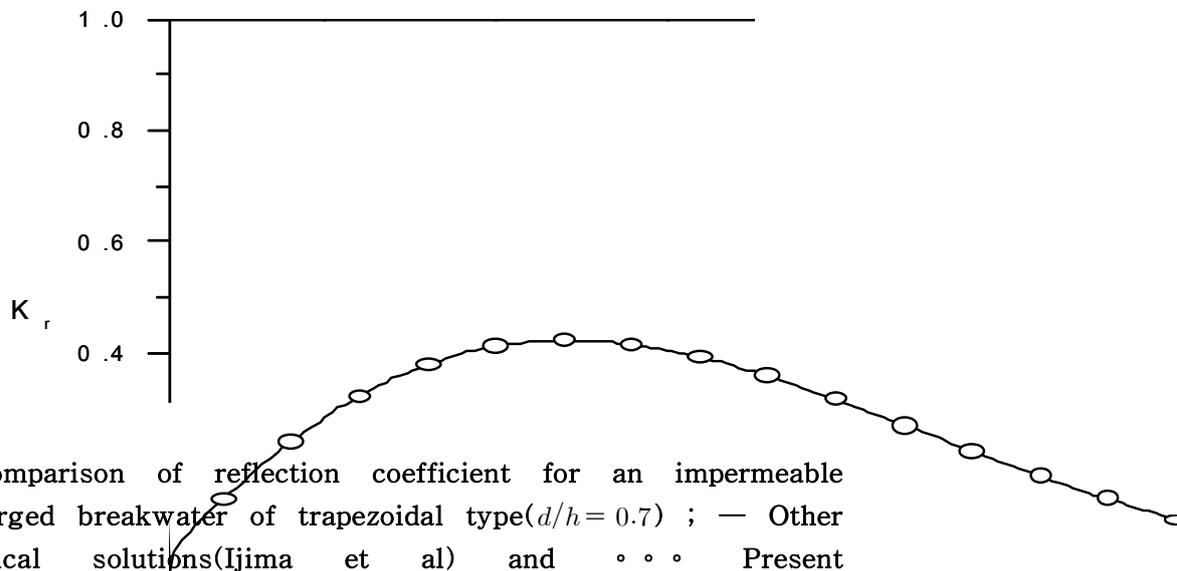


Fig. 7. Comparison of reflection coefficient for an impermeable submerged breakwater of trapezoidal type( $d/h = 0.7$ ) ; — Other numerical solutions(Ijima et al) and  $\circ \circ \circ$  Present solutions(BEM).

결과값의 비교를 통해 알 수 있듯이 사각형 잠제와 사다리꼴 잠제에 대한 해석기법의 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 잠제의 형상에 대한 본 해석기법의 타당성과 유효성이 검증되었다.

## 2. 입사각의 변화에 대한 타당성 검토

경사입사파에 대한 잠제의 타당성을 검토하기 위해 2차원 Green공식에 의한 경계요소법을 이용하여 경사입사파에 대한 잠제의 반사효과를 해석한 井島 等(1982)의 연구결과와 비교를 실시 하였다. 여기서, Fig. 8과 9는 경사입사파( $\theta = 0^\circ, 30^\circ$ )가 입사했을 때 각각 불투과 사각형잠제와 사다리꼴잠제의 수심에 대한 무차원과장의 변화에 따른 반사율의 변화를 나타내고 있다. 실선은 井島 等(1982)의 계산 결과이며, ○○○, □□□은 이 연구로 부터 얻은 해석결과이다. 이 결과를 통해 알 수 있듯이 양 해석의 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 해석기법의 타당성과 유효성이 검증되었음을 알 수 있겠다.

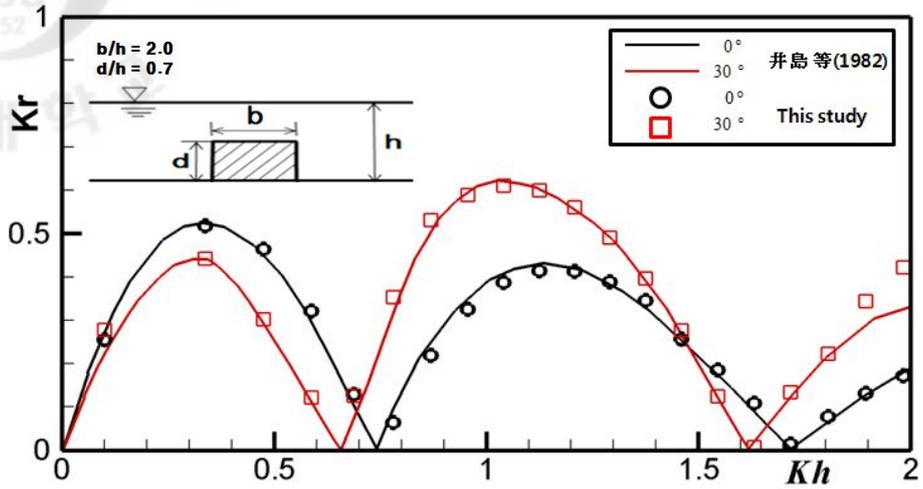


Fig. 8. Reflection coefficients for the change of angle. ( $b/h = 2.0$ ,  $d/h = 0.7$ )

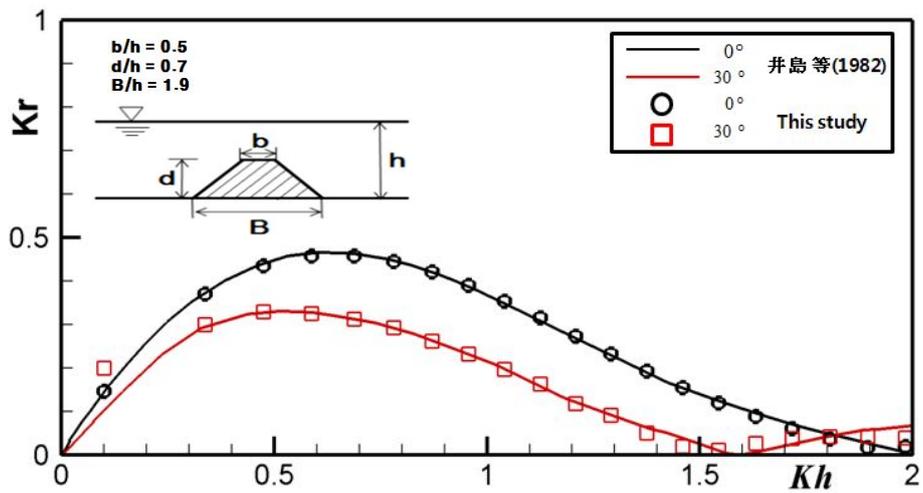


Fig. 9. Reflection coefficients for the change of angle. ( $b/h = 0.5$ ,  $d/h = 0.7$ ,  $B/h = 1.9$ )

## IV. 경사입사파의 경계요소해석과 고찰

### 1. 사각형 잠제에 대한 해석과 고찰

Fig. 10은 직각입사파( $\theta = 0^\circ$ )와 경사입사파( $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ )가 입사할 때, 잠제폭 변화에 따른 반사율 이다. 일정한 잠제높이  $d/h = 0.7$ 일 때, 잠제폭이 증가 할수록 반사율의 진동폭이 좁아 지는 것을 알 수 있다. 또한 경사입사파의 영향은 경사각이 커질수록 반사율이 대체로 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 잠제높이 변화에 따른 반사율 이다. 일정한 잠제폭  $b/h = 2.0$ 일 때, 잠제높이가 감소 할수록 반사율의 진동폭이 커지는 것을 알 수 있다. 잠제의 높이가 높을 경우 반사율이 더 높은 것을 알 수 있으며, 잠제 높이 변화에 따른 반사율 감소는 Fig.10과 비교했을 때 더 크게 나타남을 알 수 있다. 여기서, 잠제높이의 변화가 반사율에 더욱 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### 2. 사다리꼴 잠제에 대한 해석과 고찰

Fig. 12은 직각입사파( $\theta = 0^\circ$ )와 경사입사파( $\theta = 30^\circ, 45^\circ$ )가 입사할 때, 잠제폭 변화에 따른 반사율 이다. 반사율의 경향은 사각형잠제일 때와 비슷한 양상을 띄고 있지만, 전체적으로 반사율이 감소를 하였으며, 진동폭이 넓어 진 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 13은 잠제높이 변화에 따른 반사율 이다. 입사각이  $\theta = 45^\circ$  일 때, 반사율의 진동폭의 변화가 큰 점을 확인 할 수 있었고, 잠제높이가 낮은 경우 잠제의 역할중쇠파에 대해서 효율성은 크게 떨어지는 것을 확인 할 수 있다.

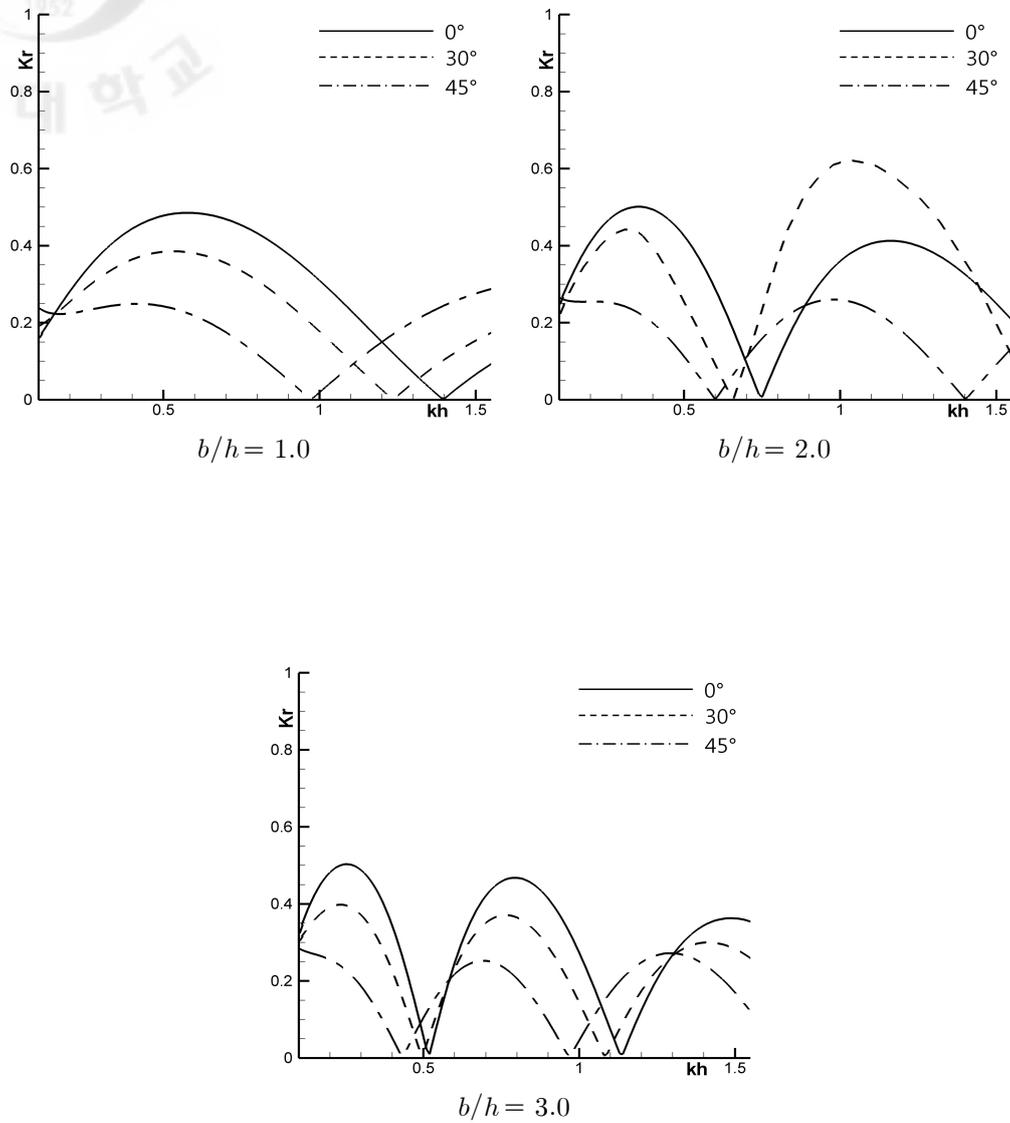


Fig. 10. Comparison of reflection coefficients for the submerged breakwater with various width. ( $d/h = 0.7$ )

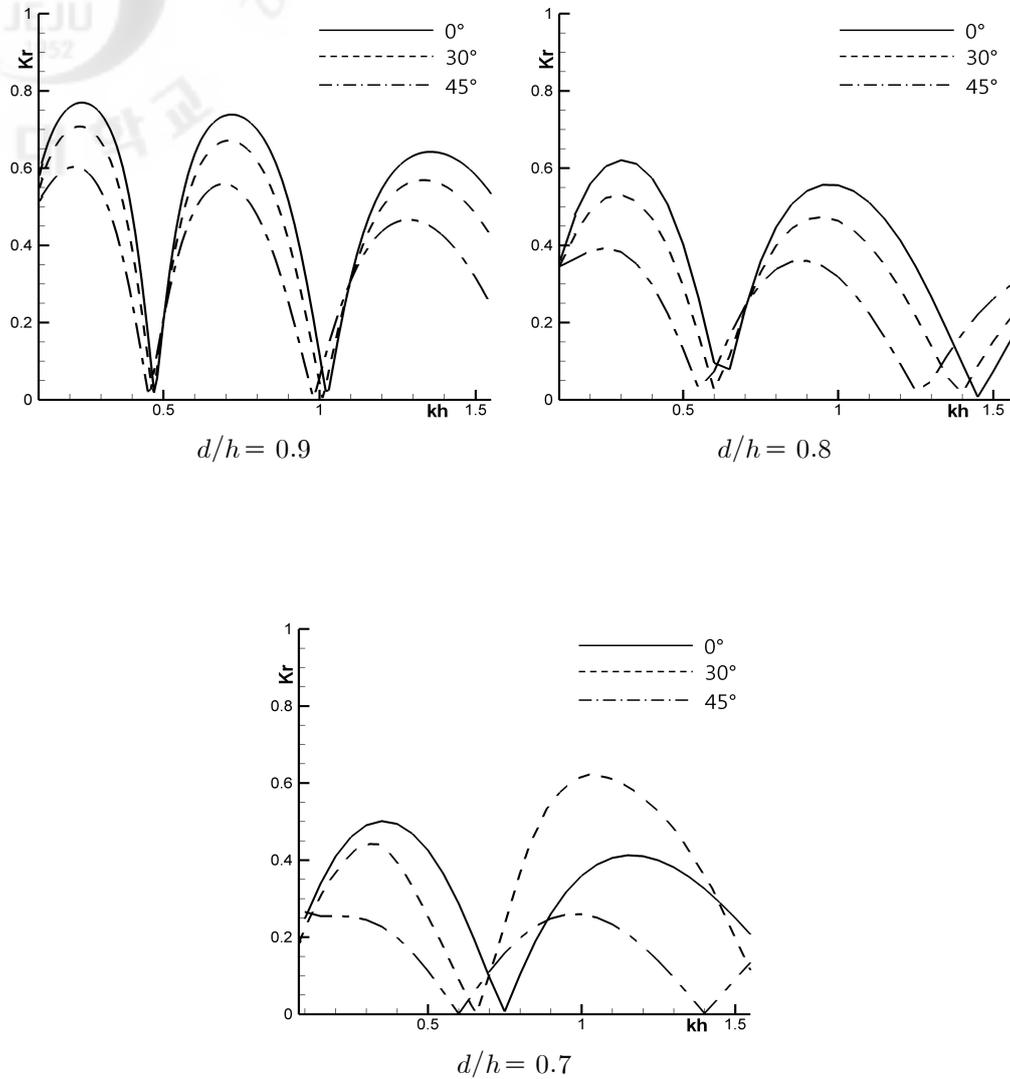


Fig. 11. Comparison of reflection coefficients for the submerged breakwater with various height. ( $b/h = 2.0$ )

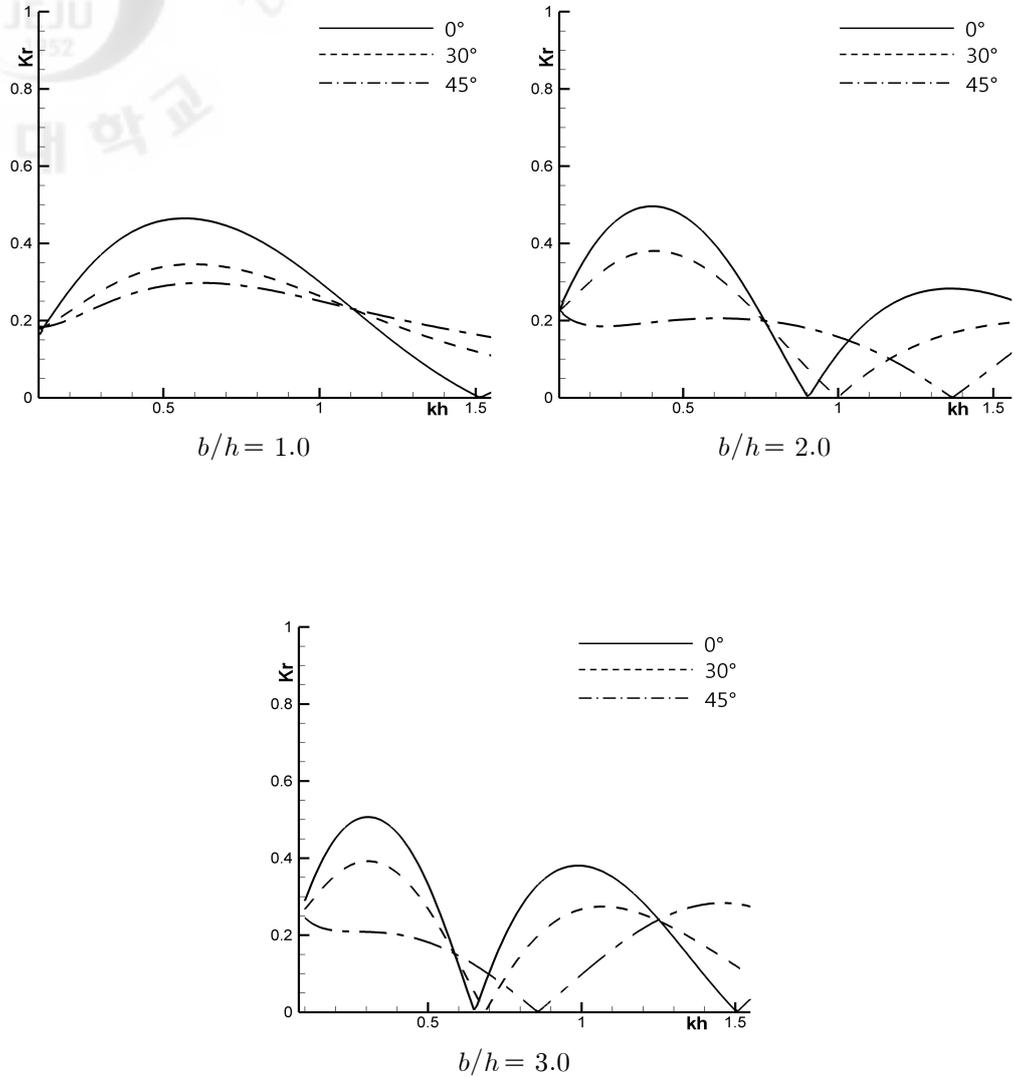


Fig. 12. Comparison of reflection coefficients for the submerged trapezoidal breakwater with various width. ( $d/h = 0.7$ )

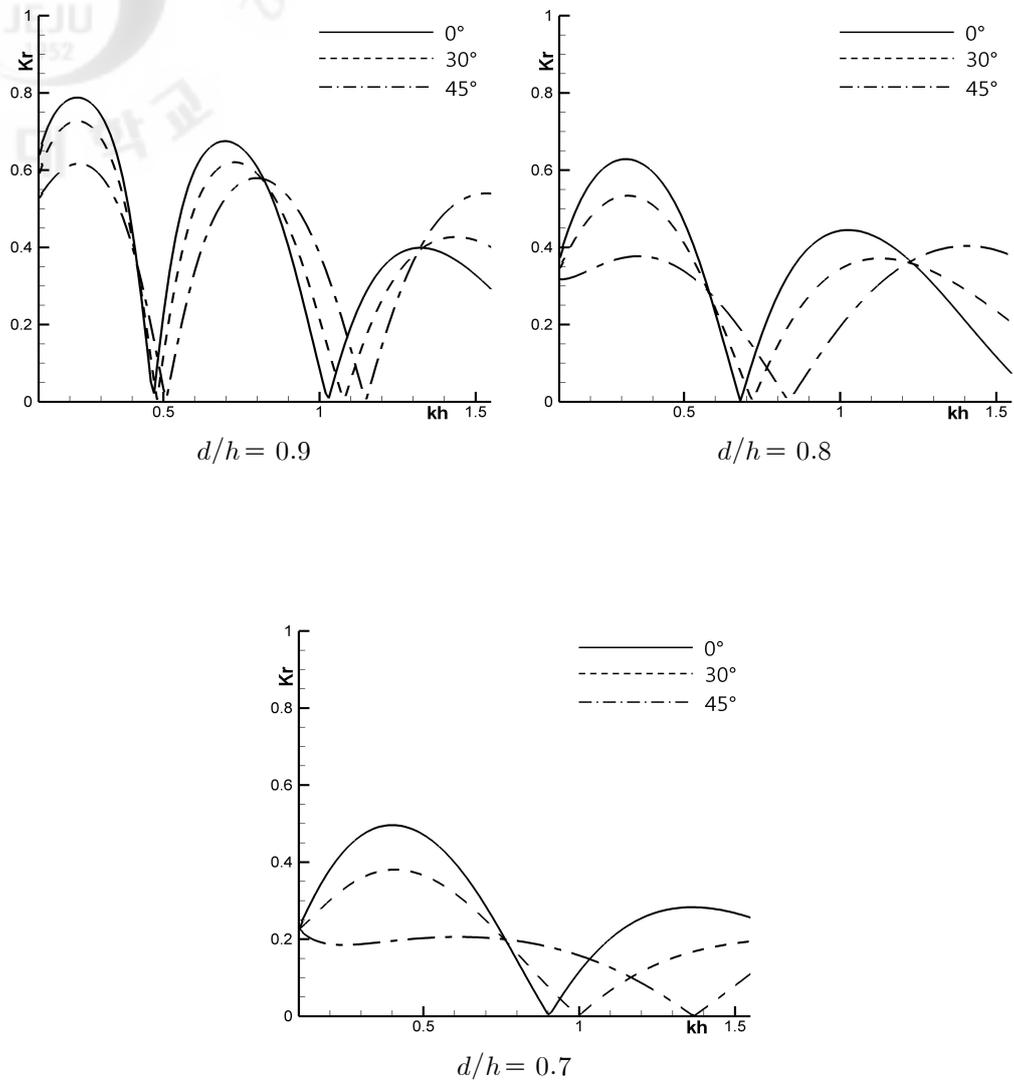


Fig. 13. Comparison of reflection coefficients for the submerged trapezoidal breakwater with various height. ( $b/h = 2.0$ )

## V. 결 론

기존 구조물 주변 수치해석은 파가 직각으로 입사하는 경우를 대하여 연구가 진행 되었다. 그러나 경사를 가지고 입사하는 실제 해역에서의 이러한 해석방법은 결과 값을 도출함에 있어 제한적이다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 각 영역에 대하여 Helmholtz 방정식과 Green 함수를 적용한 경계요소법을 이용하여 경사입사파에 대한 잠제의 효과를 알아보았다. 그리고 이를 사각형 잠제와 사다리꼴 형상 잠제에 대하여 수치해석을 진행 하였고, 잠제 주변의 반사율 비교함으로써 잠제의 파랑제어의 기능과 효과를 알아 보았다. 각각의 수치해석 결과를 요약 정리하면, 다음과 같다.

(1) 본 논문의 불투과 사각형 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) 경사입사파에 대한 잠제의 타당성을 검토하기 위해 2차원 Green공식에 의한 경계요소법을 이용하여 경사입사파에 대한 잠제의 반사효과를 해석한 井島 等(1982)의 수치모의 연구결과와 비교를 실시 하으며, 양 해석기법의 결과가 잘 일치하는 것을 보였다.

(3) 잠제폭비( $=b/h$ )가 커질수록 반사율의 극대치 및 극소치가 출현하는  $kh$ 의 간격이 좁아지고, 장주기 쪽으로 갈수록 ( $kh$ 의 값이 작을 때) 반사율의 극대치가 커짐.

(4) 잠제높이비( $=d/h$ )에 따른 반사율의 크기 차이는 두드러 지게 나타났지만, 극대치 및 극소치가 출현하는 주기에는 영향이 적음.

(5) 경사입사파가 입사할 경우, 전반적으로 반사율 값이 저하 되는 것을 알 수 있었

고, 반사율의 최대치와 최소치의 출현  $kh$ 가 직각입사파일때와 다르게 나타남을 알 수 있음. 따라서 실제해역에서 잠제를 설치함에 있어, 해역의 특징을 반영한 잠제 주변의 수치해석 결과값을 활용하여 잠제위치 및 잠제 형상을 결정한다면, 보다 경제적이며 우월한 성능을 기대할 수 있음.

## 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, 한국해양 · 해양공학회지, 제3권, 제3호, pp. 176-183.
- 김남형, 양순보. 2003. 사다리꼴형상 잠제의 수리특성에 관한 경계요소해석, 한국해양 환경공학회, Vol. 6, No. 4, pp. 45-51.
- J. T. Kirby and A. Dalrymple. 1983. Propagation of obliquely incident water waves over a trench.
- 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 Kajiura, 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 學校大学院, 博士學位論文.



## 발표논문 리스트

### ◆ 학술 발표회 발표논문

- ① “경사입사파랑에 의한 복수 원기둥의 파력 해석”, 대한토목학회, 2010년도 정기 학술대회 발표논문집, pp.2323~2326, 2010년 10월.
- ② “경사입사 파랑에 의한 잠제의 반사율 해석기법”, 대한토목학회, 2011년도 정기 학술대회 발표논문집, pp.2837~2840, 2011년 11월.