

論 文

## 단열 잠제에 의한 파랑변형에 관한 연구

김 원 규\* · 강 인 식\*\* · 광 기 석\*\*\* · 김 도 삼\*\*\*\*

### Wave Transformation of Submerged Breakwater with One Ray

*W. K. Kim · I. S. Kang · K. S. Kwak · D. S. Kim*

**Key Words :** 단열잠제(Submerged Breakwater with One ray), 고유함수전개법의 엄밀해법(Strict Eigenfunction Expansion Method), 고유함수전개법의 간략법(Simplified Eigenfunction Expansion Method), 파랑변형(Wave Transformation)

#### Abstract

This study discusses the wave transformation(wave reflection and transmission) by a impermeable submerged breakwater with one ray, and integrated horizontal wave pressure acting on the structure. Numerical method in this study is based on the simplified eigenfunction expansion method and linear wave theory.

Although this method is very simple, the results give good agreement with the one of the strict eigenfunction expansion method, especially, in case that the crown width of the submerged breakwater becomes longer and its crown water depth shallower.

Therefore, it is concluded that this simplified method is one good method in planning coastal structures as like the submerged breakwater in this study, and computing their wave transformations.

#### I. 서 론

최근 해역의 자연환경의 보존, Water-Front 및 Resort의 개발의 중요성이 인식되고 있다. 그러나 해안·항만 구조물로서는 그 기능을 충분히 수행할 수 없기 때문에, 기존의 파랑제어기능을 구비함과 동시에 해역의 환경보존등의 기능까지도 수

행할 수 있는 새로운 해안·항만 구조물에 대한 연구·개발이 활발히 수행되어 왔다. 그의 대표적인 구조물의 하나로서, 해역의 지반상태가 양호한 경우에 대해서, 잠제구조물을 들 수있다. 잠제구조물의 경우는 구조물의 배후해역으로의 Energy Transport에 의해 평균수면이 상승된다는 단점이 지적되어 있지만, 수중에서 주어진 목적을

\* 부산대학교 생산기술연구소 특별연구원

\*\* 부산대학교 공과대학 강사

\*\*\* 부산대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 한국해양대학교 항만운송공학과 전임강사

수행하기 때문에 주변 해역의 자연경관을 그대로 살릴 수 있을 뿐만아니라, 잠제의 천단부분과 수면사이의 유수역을 통한 해수교환이 원활하다는 측면에서 종래의 해안·항만 구조물보다도 많은 장점을 갖는다.

일정 수심의 해역에 직사각형단면을 갖는 불투과잠제에 의한 파랑변형(파의 반사율과 전달률)의 해석은 대부분이 주어진 경계조건을 만족하도록 지배방정식을 수치적으로 풀어가는 경계치문제로 취급되어 왔다.

잠제에 관한 이론해석은 변분법을 사용하는 방법(Newman, 1955), 적분방정식을 이용하는 방법(Mei and Black, 1969) 및 고유함수 전개법(엄밀해, 진행파와 감쇠정상파를 고려)으로 해석하는 방법(井島·佐佐木; Steimer, 1977) 등이 제안되어 있다. 변분법과 적분방정식에 의한 해석은 수학적인 많은 기초지식이 필요하고, 고유함수 전개법의 엄밀해법에 의한 해석은 수심이 변하는 파동장이나 경사면을 갖는 구조물에 대해서는 적용이 제한되고 번잡한 계산을 수행해야 하는 단점이 있는 반면에, 반해석적인 방법이기 때문에 보다 정도 높은 해를 얻을 수 있다는 장점을 갖는다.

여기서 고유함수 전개법(혹은 영역분할법)의 엄밀해법은 수면 및 해저 경계조건을 만족하도록 Laplace방정식의 일반해로서 Velocity Potential을 유도하고 분할영역 경계면에서 속도, 압력, Velocity Potential, Energy Flux 혹은 선유량 등이 일치되도록 함과 동시에 진행파와 감쇠정상파의 직교성을 이용하여 Velocity Potential의 미정계수를 구해가는 해석법이다.

본 연구에서는 번잡한 계산이 요구되지 않을 뿐만 아니라 계산시간이 매우 짧은 고유함수 전개법의 간략법(진행파는 고려하고 감쇠정상파는 고려하지 않음)을 사용하여 단열 잠제에 의한 파랑변형을 해석함과 동시에, 고유함수 전개법의 엄밀해에 의한 결과와 비교하여 해의 타당성을 검증한다. 이로부터 고유함수 전개법의 간략법의 유용성 및 입사파랑의 제원의 변화와 잠제의 폭과 잠수심의 변화에 따른 파랑변형의 특성을 논

한다.

이상으로부터, 고유함수전개법의 간략법으로 기술자등이 단열 잠제에 의한 파랑제어기능을 보다 간단히 판단 및 통찰할 수 있는 것으로 생각된다.

## 2. 이론적 고찰

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 잠수심  $qh$ , 폭  $2\ell$ 을 갖는 직사각형단면의 불투과잠제구조물이 설치된 2차원 파동장에 있어서 유체영역을 수심의 변화에 따라 그림과 같이 3개의 유체영역으로 분할한다. 이 때 입사파는 잠제에 의해 일부 반사되어 반사파(Reflected Wave)로 되고 나머지는 입사파 방향으로 전파되어 전달파(Transmitted Wave)로 된다.

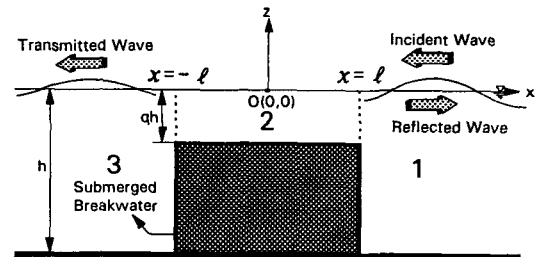


Fig. 1 Definition Sketch of Submerged Breakwater

유체운동을 비압축완전유체의 비회전운동으로 가정하여 다음식과 같은 Velocity Potential을 갖는 것으로 한다.

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

여기서,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $t$ 는 시간,  $\sigma = 2\pi/T$ ,  $T$ 는 파의 주기,  $x$ 와  $z$ 는 원점(정수면과 구조물의 연직중앙선과 교차하는 점)에 대해 파의 진행방향을  $x$ 의 부의 방향(-), 연직상방을  $z$ 의 정의 방향(+)로 하는 좌표이다. 그리고 식(1)에서  $e^{i\sigma t}$ 는 생략하여

기술하는 것으로 한다.

Fig. 1에 나타낸 각 유체영역에 있어서의 기초 방정식과 경계조건식은 다음과 같다.

· 기초방정식(Laplace방정식)

$$\frac{\partial^2 \phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_j}{\partial z^2} = 0 \quad j = 1 \sim 3 \quad (2)$$

여기서,  $j$ 는 분할된 유체영역의 번호이다.

· 자유수면 경계조건

자유수면에서 주어지는 운동학적 경계조건과 역학적 경계조건은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad z = \eta(x; t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right\} + g\eta = Q \quad z = \eta(x; t) \quad (4)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $\eta(x; t)$ 는 수면변동,  $Q$ 는 Bernoulli상수이다.

식(3)과 식(4)를 각각  $z=0$ 에 대해서 Taylor급 수전개하고, 또  $\eta(x; t)$ 가 매우 적다고 가정하면,  $z=0$ 에 대해 선형화된 운동학적 경계조건과 역학적 경계조건이 얻어진다. 이의 두 식으로부터  $\eta(x; t)$ 를 소거하고 식(1)을 고려하면 다음과 같은 수면경계조건식이 구해진다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \phi_j \quad z=0, j=1 \sim 3 \quad (5)$$

· 해저경계조건

해저에서 불투과조건을 고려하면 다음과 같은 해저경계조건식을 얻는다.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial z} = 0 \quad z = -h, j=1, 3 \text{ and } z = -qh, j=2 \quad (6)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $qh$ 는 잠제의 천단상의 잠수심을 나타낸다.

Laplace방정식(2)와 각 유체영역에서 주어지는 경계조건식(5), (6)을 만족하는 Velocity Potential의 일반해  $\phi_j(x, z)$  ( $j=1 \sim 3$ ) (진행파만을 고

려)는 다음과 같이 가정할 수 있다. 이의 Velocity Potential은 Sommerfeld의 방사경계조건을 만족한다.

$$\phi_1(x, z) = \{Ae^{ik(x-\ell)} + Be^{-ik(x-\ell)}\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (7)$$

$$\phi_2(x, z) = \left( D \frac{\cos k'x}{\cos k'\ell} + E \frac{\sin k'x}{\sin k'\ell} \right) \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \quad (8)$$

$$\phi_3(x, z) = He^{ik(x+\ell)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad (9)$$

여기서  $A, B, D, E, H$ 는 Velocity Potential의 미정계수로  $A$ 는 입사파(Incident Wave)를,  $B$ 는 반사파를,  $H$ 는 전달파를 각각 나타낸다.  $k, k'$ 는 각 유체영역의 수면경계조건에 의해 다음 식으로 주어지는 고유함수의 고유치이다.

$$\frac{\sigma^2}{g} = k \tanh kh = k' \tanh k'qh \quad (10)$$

식(7)~(9)으로 나타내어지는 Velocity Potential(혹은 압력)은  $x = \pm \ell$ 에서 접속되어야 할 뿐만 아니라(운동학적 경계조건, 역학적 경계조건)으로서 수평방향의 유속(혹은 Mass Flux 혹은 Energy Flux)의 연속성이 성립되어야 한다. 그리고 체체 측면에서 수평유속은 0이 되어야 한다.

이상의 접속조건(유속과 압력에 대해)을 나타내면 다음 식들로 표현된다.

$$x = \ell ; \quad \frac{\partial \phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad (0)z) - qh) \\ = 0 \quad (-qh)z) - h) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \quad (0)z) - qh) \quad (12)$$

$$x = -\ell ; \quad \frac{\partial \phi_3}{\partial x} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \quad (0)z) - qh) \\ = 0 \quad (-qh)z) - h) \quad (13)$$

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \quad (0)z) - qh) \quad (14)$$

위의 식(11)~(14)에 식(7)~(9)를 대입한 결과식에 식(11) ± (13), 식(12) ± (14)를 수행하면 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & (A-B-H) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ &= 2i \frac{k'}{k} D \operatorname{tanh} k' \ell \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} (0)z - qh \\ &= 0 \quad (-qh)z - h \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (A+B+H) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ &= 2D \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} (0)z - qh \quad (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (A-B+H) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ &= -2i \frac{k'}{k} E \operatorname{coth} k' \ell \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} (0)z - qh \\ &= 0 \quad (-qh)z - h \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (A+B-H) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ &= 2E \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} (0)z - qh \quad (18) \end{aligned}$$

식(15), (17)의 양변에  $\cosh k(z+h)$ 를 식(16), (18)의 양변에  $\cosh k'(z+qh)$ 를 각각 곱하고 주어진  $z$ 의 영역에 대해 적분을 하면 다음 식을 얻는다.

$$A-B-H = ia_{\infty} \operatorname{tanh} k' \ell \cdot D \quad (19)$$

$$D = b_{\infty} (A+B+H) \quad (20)$$

$$A-B+H = -ia_{\infty} \operatorname{coth} k' \ell \cdot E \quad (21)$$

$$E = b_{\infty} (A+B-H) \quad (22)$$

여기서,

$$\lambda_0 = kh, \quad \lambda'_0 = k'qh, \quad \bar{q} = 1 - q$$

$$N_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2\lambda_0}{\sinh 2\lambda_0} \right),$$

$$N'_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2\lambda'_0}{\sinh 2\lambda'_0} \right)$$

$$a_{\infty} = \frac{2 \sinh \bar{q} \lambda_0}{N_0 \sinh \lambda_0 \cosh \lambda'_0} \cdot \frac{\lambda'_0 / q \lambda_0}{(\lambda'_0 / q \lambda_0)^2 - 1}$$

$$b_{\infty} = \frac{\sinh \bar{q} \lambda_0}{2N'_0 \sinh \lambda'_0 \cosh \lambda_0} \cdot \frac{\lambda'_0 / q \lambda_0}{(\lambda'_0 / q \lambda_0)^2 - 1}$$

여기서, 입사파로서  $ae^{ikx}$  ( $a$ 는 입사파의 진폭)로 두면 식(7)의 입사파와 다음의 관계를 갖는다.

$$ae^{ikx} = -\frac{i\sigma}{g} A e^{ik(x-\ell)} \quad (23)$$

식(23)을  $A$ 에 대해서 풀면 다음 식이 얻어진다.

$$A = i \frac{ag}{\sigma} e^{ik\ell} \quad (24)$$

이상으로부터 얻어진 방정식이 5개(식(19)~(22), 식(24))이고 결정해야 되는 미지수가 5개 ( $A, B, D, E, H$ )가 이므로 이의 방정식을 풀 수 있게 된다.

### 1) 파의 변형

파의 변형에서 입사파에 대한 반사율 ( $K_R$ )과 전달률 ( $K_T$ )은 각각 다음 식으로 정의된다.

$$K_R = \left| \frac{B}{A} \right| \quad K_T = \left| \frac{H}{A} \right| \quad (25)$$

그리고, Energy Flux의 Conservation으로부터 다음의 식이 성립되어야 한다.

$$K_R^2 + K_T^2 = 1 \quad (26)$$

### 2) 수면파형

각 유체영역에서 수면파형은  $\eta = -i\sigma\phi/g|_{z=0}$ 의 관계식을 사용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\eta_1}{a} = \operatorname{Real} \left\{ \left( e^{ik(x-\ell)} + \frac{B}{A} e^{-ik(x-\ell)} \right) e^{i(k\ell + \sigma t)} \right\} \quad (27)$$

$$\frac{\eta_2}{a} = \text{Real}\left\{\left(\frac{D}{A} \frac{\cos k'x}{\cos k'\ell} + \frac{E}{A} \frac{\sin k'x}{\sin k'\ell}\right) e^{i(k\ell + \sigma t)}\right\} \quad (28)$$

$$\frac{\eta_3}{a} = \text{Real}\left\{\left(\frac{H}{A} e^{ik(x+\ell)}\right) e^{i(k\ell + \sigma t)}\right\} \quad (29)$$

### 3) 잠제 측면에 작용하는 수평압력의 합

잠제 측면에 작용하는 압력은 Bernoulli방정식을 사용하면 다음 식으로 계산된다.

$$p = -i\rho\sigma\phi_j \quad j=1, 3 \quad (30)$$

위의 식에  $\phi_1$  및  $\phi_3$ 를 대입하고 잠제 측면의 잠제 높이에 대해 적분하여 수평합력  $P_1$ (잠제의 전면)과  $P_2$ (잠제의 후면)에 대해 다음 식을 얻는다.

$$\frac{P_1}{\rho g a \bar{q} h} = \left(1 + \frac{B}{A}\right) \frac{\sinh \bar{q} k h}{\bar{q} k h \cosh k h} e^{i(k\ell + \sigma t)} \quad (31)$$

$$\frac{P_3}{\rho g a \bar{q} h} = \frac{H}{A} \frac{\sinh \bar{q} k h}{\bar{q} k h \cosh k h} e^{i(k\ell + \sigma t)} \quad (32)$$

따라서, 잠제에 작용하는 전수평력  $P_H$ 는 다음과 같다.

$$\frac{P_H}{\rho g a \bar{q} h} = \left\{1 + \left(\frac{B}{A} - \frac{H}{A}\right) \frac{\sinh \bar{q} \lambda_0}{\bar{q} \lambda_0 \cosh \lambda_0}\right\} e^{i(k\ell + \sigma t)} \quad (33)$$

## 3. 해석 결과

### 1) 해석결과의 검증을 위한 엄밀해석의 결과와 비교

Fig. 2는  $q(=qh/h)=0.1$ ,  $\ell/h=1.0$ 의 경우에 고유향수전개법의 엄밀해에 의한 계산결과와 본 연구의 계산결과를 비교한 하나의 예로, 무차원 파라메타  $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른 입사파의 반사율을 나타낸 것이다. 그림을 보면,  $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른  $K_R$ 의 변화특성이 잘 일치하고  $\sigma^2 h/g$ 가 적어질수록

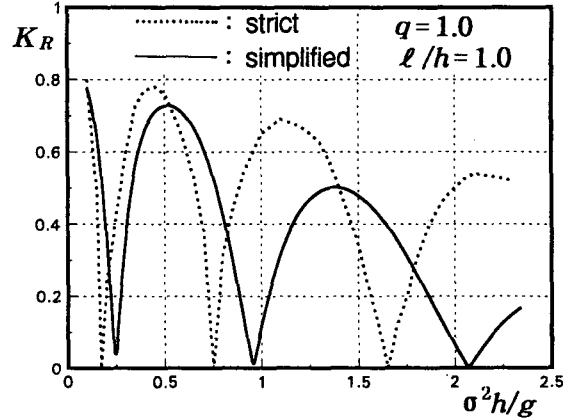


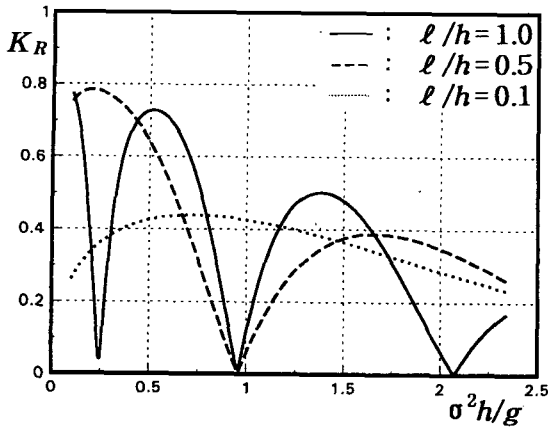
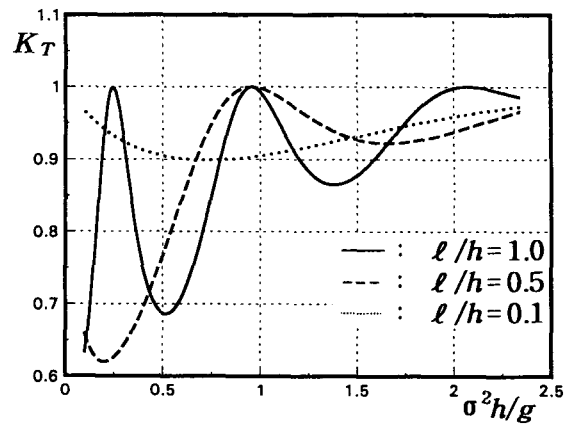
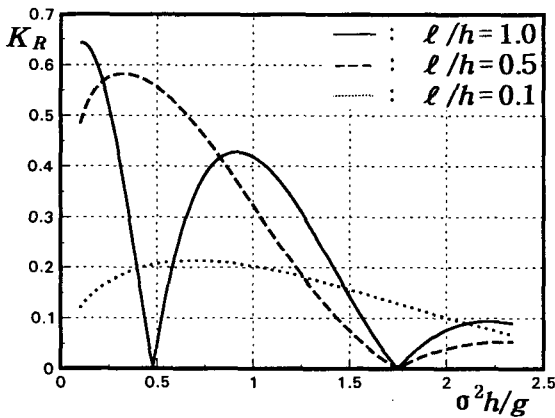
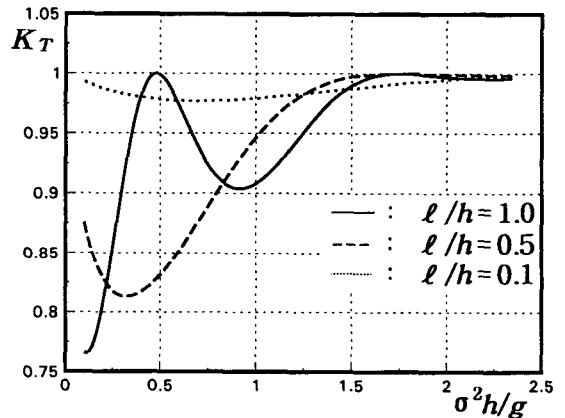
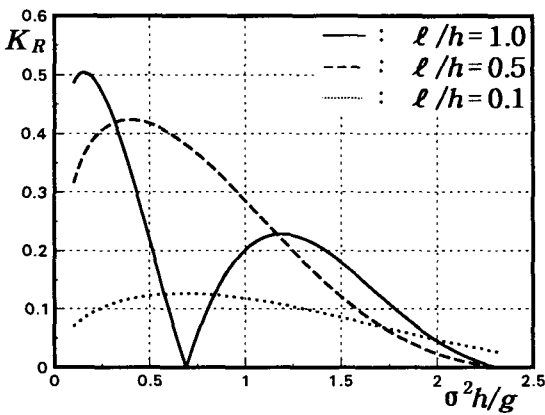
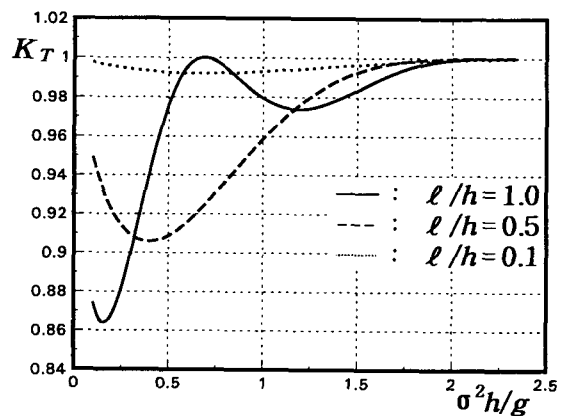
Fig. 2 Comparison of Results Obtained by Strict and Simplified Eigenfunction Expansion Method

록 즉, 장주기파로 되면 될수록 엄밀해석결과와 본 연구의 해석결과는 잘 일치하는 것으로 판단된다. 반면에, 보다 단주기로 되면 두 해석의 결과에는 큰 차이를 나타낸다. 이와 같은 차이는, 감쇠정상파의 영향으로,  $\ell/h$ 가 적어질수록 그리고  $q$ 가 커질수록 감쇠정상파의 발생이 커지게 되므로, 커지는 경향을 갖는다. 그러나, 현실적으로 문제로 되는 장주기파의 경우를 고려하면,  $\sigma^2 h/g < 1.0$ 의 영역내의 장주기파에 대해서 본 연구의 유용성이 인정될 뿐만아니라,  $\sigma^2 h/g$ 의 전 영역에 걸쳐 전체적인 경향을 파악하는 데도 있어서도 본 연구의 유용성이 인정된다.

이하에서는 본 해석법에 의해 얻어진 결과의 특성을 논한다.

### 2) 파랑변형

Fig. 3과 4는 무차원잠수심  $q$ 를 파라메타로서  $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른 파의 반사율( $K_R$ )과 파의 전달률( $K_T$ )의 변화를 각각 나타낸 예이다. Fig. 3을 보면 동일한  $q$ 에 대해서  $\ell/h$ 의 값이 적어지면, 전체적으로 반사율은 적어지는 경향을 보이고, 반사율이 0으로 되는 지점의 수가 적어지는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 잠제의 폭을

(a)  $q=0.1$ (a)  $q=0.1$ (b)  $q=0.2$ (b)  $q=0.2$ (c)  $q=0.3$ (c)  $q=0.3$ Fig. 3 Relationship between Reflection Ratio( $K_R$ ) and  $\sigma^2 h/g$ Fig. 4 Relationship between Transmission Ratio( $K_T$ ) and  $\sigma^2 h/g$

길게하면 할수록 입사파의 반사율이 크게 되어 결국 파랑제어기능이 향상되는 것으로 판단된다. 따라서, Fig. 4에서 알 수 있듯이,  $l/h$ 의 값이 적어지면 전달률이 크게 된다. 무차원 잠수심 ( $q$ )의 변화에 따른 파랑변형을 살펴보면, 잠수심이 작아지면 반사율이 크게 되어 파의 전달이 적어지는 경향을 나타내고 있다. 이는 잠수심이 작아지면 파랑Energy의 통과수역이 좁아지므로 인해 파의 반사가 커지기 때문이다.

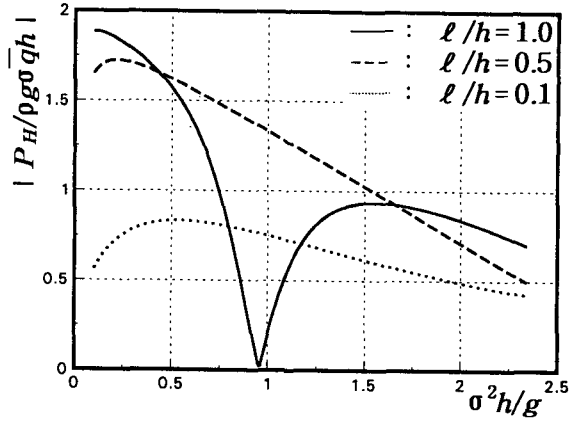
이상으로부터, 잠제를 사용하여 파랑제어를 하는 경우에는 잠수심을 되도록 적게하고 잠제의 폭을 길게 할 필요가 있다.

3) 전 수평력

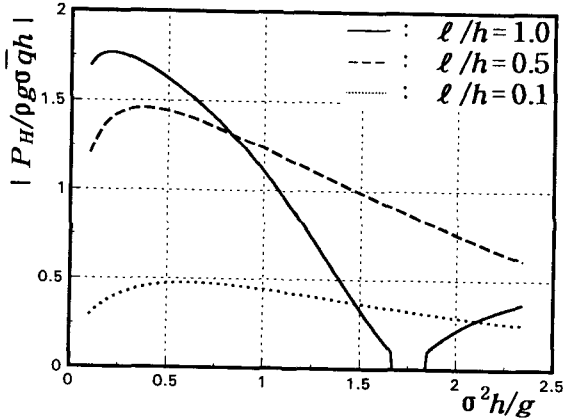
Fig. 5는  $q$ 를 파라메타로 해서 무차원 전 수평력  $|P_H/\rho g a \bar{q} h|$ 와  $\sigma^2 h/g$ 의 관계를 나타낸 것이다. 전체적으로  $q$ 가 적어지면 잠제의 천단이 높아지므로 잠제에 작용하는 동압력이 커지기 때문에 무차원 전 수평력이 증가하는 경향을 나타낸다. 그리고,  $l/h$ 의 값이 적어짐과 동시에 단주기 측으로 감에 따라 무차원 전 수평력은 감소하는 것을 알 수 있다. 파의 변형과 무차원 전 수평력의 관계를 살펴보면 파의 반사율이 0이 되는 지점에서 무차원 전 수평력이 항상 0으로 되지는 않는다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 입사파에 대해 파의 반사율이 크게 되고 잠제에 작용하는 전 수평력이 적어지는 최적의  $l/h$ 를 선택할 필요가 있다.

4. 맺음 말

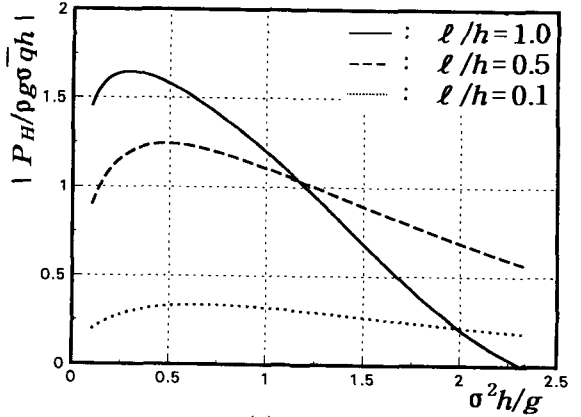
본 연구에서는 고유함수전개법의 간략법을 사용하여 잠제구조물에 의한 파랑변형 및 잠제에 작용하는 전 수평력의 변화특성을 살펴보았다. 본 연구의 해석법은 보다 장주기파로 되는 경우 그리고 잠수심이 보다 적어지는 경우에 대해서는 고유함수전개법의 엄밀해의 결과와 잘 일치하는 경향이 있을 뿐만 아니라, 전체적인 변화특성이



(a)  $q=0.1$



(b)  $q=0.2$



(c)  $q=0.3$

Fig. 5 Relationship between Total Horizontal Force ( $|P_H/\rho g a \bar{q} h|$ ) Acting on Submerged Breakwater and  $\sigma^2 h/g$

잘 일치하므로 잠재구조물에 의한 파랑제어기능을 검토·판단하는 단계에서 이의 유용성이 인정된다.

### 참 고 문 헌

- 1) Newman, J. N.(1965) : Propagation of Water Waves over an Infinite Step, J. F. M., Vol. 23, part 2.
- 2) Mei, C. C. and J. L. Black(1969) : Scattering of Surface Waves by Rectangular Obstacles in Water of Finite Depth, J. F. M., Vol. 38, part 3.
- 3) 井島武士·佐佐木富雄(1971) : 潜堤の效果に關する理論的研究, 18回日本海岸工學講演會論文集, pp. 141~147.
- 4) Steimer, R. B.(1977) : An Eigenvalue Wave Analysis of a Fixed Semi-Immersed Rectangular Structure, Thesis of Master Degree, OSU.