

論 文

장주기파의 효율적인 제어를 위한 이열잠제의 최적간격

윤 덕 영* · 허 동 수** · 김 도 삼*** · 강 주 복****

Optimum Inner Width of the Submerged Breakwater with Two Rows for the Controlling Long Period Waves

D. Y. Yun · D. S. Hur · D. S. Kim · J. B. Kang

Key Words : 이열잠제(Submerged Breakwater with Two Rows), 영역분할법의 엄밀해법(Strict Dividing Region Method), 파랑변형(Wave Transformation), 장주기파(Long Period Waves), 잠제폭(Width of Submerged Breakwater), 잠제사이의 간격(Inner Width of the Submerged Breakwater with Two Rows)

Abstract

Generally, it is pointed out that the submerged breakwater with one row can not regulate the long period waves efficiently, because the crown width is very shorter than the wave length of the long period waves. Therefore, the wide crown is needed to raise the controlling efficiency for the long period waves.

This study picks up the submerged breakwater with two rows which has smaller construction materials comparing to the one row and discusses the wave controlling function for the long period waves. Judging from the results obtained by using the strict dividing region method, the submerged breakwater with two rows can more regulate the long period waves than one row can, especially, in case that the crown width and inner width of its construction come to be wider.

1. 서 론

최근 경제활동의 확충에 따른 해안공간의 확보 및 그의 고도이용이 요청되고 해안역의 자연

환경의 보존, Water-Front 및 Resort의 개발의 중요성이 점점 더 인식되고 있다. 그러나, 기존 해안·항만구조물로서는 그 기능을 충분히 수행할 수 없기 때문에, 파랑제어 기능 뿐만 아니

* 부산대학교 대학원 토목공학과

** 부산대학교 대학원 토목공학과

*** 정회원, 한국해양대학교 해양토목공학과

**** 부산대학교 토목공학과

라 해역의 환경보존 등의 기능까지도 수행할 수 있는 새로운 해안·항만구조물에 대한 연구개발이 활발히 수행되어 왔다. 그의 대표적인 구조물의 하나로 잠제구조물을 들 수 있다. 잠제구조물의 경우는 구조물 배후해역으로의 파랑에너지의 수송(Wave Energy Transport)에 의해 평균수면이 상승된다는 단점이 지적되어 있지만, 수중에서 주어진 목적을 수행하기 때문에 주변해역의 자연경관을 그대로 살릴 수 있을 뿐만 아니라, 잠제의 천단부분과 수면사이의 유수역을 통한 해수교환이 우수하기 때문에 환경면에서 뛰어난 구조물로 평가되고 있다.

그러나, 일반적으로 잠제구조물은 일열로 설치하여 파랑제어를 기하지만 수중에 설치되기 때문에 결국 천단상 유수역을 통한 수송에너지가 탁월하므로 파랑제어기능, 특히 장주기파랑제어 기능이 저하되는 단점을 지닌다. 파랑제어기능을 향상시키기 위해서는 잠제를 광폭으로 하여 천단상에서 구조물과 파의 마찰효과를 이용한다든지, 천단을 정수면근처에 두어 천단상에서 전달파의 강제쇄파로 인한 에너지소실을 이용한다든지 하여 배후해역으로의 침입파를 저감시킬 필요가 있다.

이와 같은 경우에 잠제의 폭과 높이가 상대적으로 증가되므로 시공비가 막대하게 소요된다는 결점이 있다.

본연구는 일열잠제보다 적은 양의 재료로 구성되는 이열잠제를 상정하고, 이열잠제의 폭과 잠제사이의 간격을 조절함으로써 파랑제어, 특히 장주기파랑제어기능의 향상을 도모함과 동시에 시공비의 절약을 기하여 일열잠제가 갖는 단점을 보완하려고 한 것이다.

잠제에 관한 이론해석은 변분법을 사용하는 방법(Newman, 1955), 적분방정식을 이용하는 방법(Mei and Black, 1969 ; 강·곽·김·양, 1994) 및 영역분할법(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, 영역분할법의 엄밀해법에 의

한 해석은 수심이 변하는 파동장이나 경사면을 갖는 구조물에 대해서는 적용이 제한되고 번잡한 계산을 수행해야 하는 단점이 있는 반면에, 반해석적인 방법이기 때문에 보다 높은 정도의 해를 얻을 수 있고, 계산시간이 짧다는 장점을 갖는다.

여기서 영역분할법의 엄밀해법은 수면 및 해저 경계조건을 만족하도록 Laplace방정식의 일반해로서 Velocity Potential을 유도하고 분할된 영역의 경계면에서 속도, 압력, Velocity Potential, Energy Flux 혹은 선유량 등이 일치되도록 함과 동시에 진행파와 감쇠정상파의 직교성을 이용하여 Velocity Potential의 미정계수를 구해가는 해석법이다.

본 연구에서는 영역분할법의 엄밀해법을 사용하여 동일한 입사파랑의 제원에 대해 일열잠제와 이열잠제에 의한 파랑변형의 차이를 해석하여, 일열잠제보다 적은 양의 재료로 구성되는 이열잠제에 대해 장주기파에 대한 잠제간격과 폭의 영향과 그의 변화특성을 논한다.

이상으로부터 얻어진 결과는 일열 및 이열잠제의 파랑제어기능에 대한 최적설계의 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 이론적 고찰

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 일정수심 h 를 갖는 2차원파동장에 잠수심 qh , 폭 $l_2 - l_1$, 잠제사이의 간격 $2l_1$ 을 갖는 직사각형단면의 불투과이열잠제구조물에 대해 유체영역을 수심의 변화에 따라 Fig. 1과 같이 5개의 유체영역으로 분할한다. 이 때 입사파는 잠제에 의해 일부 반사되어 반사파(Reflected Wave)로 되고 나머지는 입사파방향으로 전파되어 전달파(Transmitted Wave)로 된다.

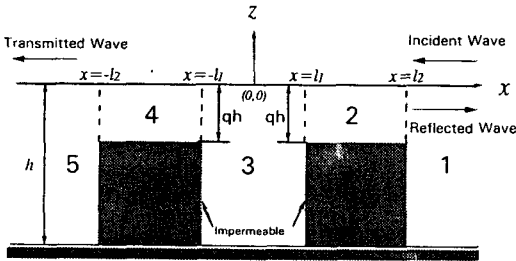


Fig. 1 Definition Sketch

이때, 유체운동을 비압축완전유체의 비회전운동으로 가정하고, 정상상태의 파를 고려하면 다음과 같은 Velocity Potential이 존재한다.

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

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

Fig. 1에 나타낸 각 유체영역에 있어서의 기초방정식과 경계조건식은 다음과 같다.

<기초방정식(Laplace방정식)>

$$\frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_j}{\partial z^2} = 0 ; j = 1 \sim 5 \dots\dots\dots (2)$$

여기서, j 는 분할된 유체영역의 번호이다.

<자유수면 경계조건>

자유수면에서 주어지는 운동학적 경계조건과 역학적인 경계조건은 각각 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = Q ; z = \eta(x; t) \dots\dots\dots (4)$$

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

식(3)과 식(4)를 각각 $z = 0$ 에 대해서 Taylor 급수전개하고, 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.

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = \frac{\sigma^2}{g} \Phi_j ; z = 0, j = 1 \sim 5 \dots\dots\dots (5)$$

<해저경계조건>

해저에서 불투과조건을 고려하여 다음과 같은 해저경계조건식을 얻는다.

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0 ; z = -h, j = 1, 3, 5 \text{ and } z = -qh, j = 2, 4 \dots\dots\dots (6)$$

여기서, h 는 수심, qh 는 잠제의 천단상의 잠수심을 나타낸다.

Laplace방정식(2)와 각 유체영역에서 주어지는 경계조건식(5), (6)을 만족하는 Velocity Potential의 일반해 $\Phi_j(x, z)$ ($j = 1 \sim 5$)는 다음과 같이 가정할 수 있다. 이의 각 Velocity Potential은 Sommerfeld의 방사경계조건을 만족한다.

$$\Phi_1 = [Ae^{ik(x-l_2)} + Be^{-ik(x-l_2)}] \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} B_m e^{-k_m(x-l_2)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \dots\dots\dots (7)$$

$$\Phi_2 = [Ce^{ik'(x-l_1)} + De^{-ik'(x-l_1)}] \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} + \sum_{n=1}^{\infty} [C_n e^{k_n(x-l_1)} + D_n e^{-k_n(x-l_1)}] \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \dots\dots\dots (8)$$

$$\Phi_3 = [Ee^{ik(x-l_1)} + Fe^{-ik(x+l_1)}] \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} [E_m e^{k_m(x-l_1)} + F_m e^{-k_m(x+l_1)}] \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Phi_4 = [Ge^{ik'(x+l_1)} + He^{-ik'(x+l_1)}] \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} + \sum_{n=1}^{\infty} [G_n e^{k_n'(x+l_1)} + H_n e^{-k_n'(x+l_1)}] \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \dots\dots\dots (10)$$

$$\Phi_5 = Ie^{ik(x+l_2)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} I_m e^{k_m(x+l_2)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \dots\dots\dots (11)$$

여기서, A, B, C, D, E, F, G, H, I, B_m, C_n, D_n, E_m, F_m, G_n, H_n, I_m은 Velocity Potential의 미정계수로 A는 입사파(Incident Wave), B는 반사파, I는 전달파에 해당하는 Velocity Potential의 미정계수이다. k, k', k_m, k_n'는 각

유체영역의 수면경계조건에 의해 다음 식으로 주어지는 고유함수의 고유치이다.

$$\frac{\sigma^2}{g} = k \tanh kh = k' \tanh k'qh = -k_m \tan k_m h = -k_n' \tan k_n'qh \dots\dots (12)$$

이상과 같은 Velocity Potential의 미정계수는 분할유체영역의 경계면에서 Velocity Potential (혹은 압력)이 연속되어야 하는 조건(역학적 경계조건)과 수평방향의 유속(혹은 Mass Flux 혹은 Energy Flux)이 연속되어야 하는 조건(운동학적 경계조건)을 사용함으로써 산정될 수 있다.

이상의 연속조건(수평유속과 압력에 대해)을 나타내면 다음과 같다.

$$x = l_2 ; \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \quad (0 > z > -qh) \dots\dots\dots (13)$$

$$= 0 \quad (-qh > z > -h)$$

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial t} = \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \quad (0 > z > -qh) \dots\dots\dots (14)$$

$$x = -l_2 ; \frac{\partial \Phi_3}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_4}{\partial x} \quad (0 > z > -qh) \dots\dots\dots (15)$$

$$= 0 \quad (-qh > z > -h)$$

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \frac{\partial \phi_4}{\partial t} \quad (0 > z > -qh) \dots\dots\dots (16)$$

$$x = l_1 ; \frac{\partial \Phi_5}{\partial x} = \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \quad (0 > z > -qh) \dots\dots\dots (17)$$

$$= 0 \quad (-qh > z > -h)$$

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \frac{\partial \phi_2}{\partial t} \quad (0 \rangle z \rangle -qh) \quad \dots\dots (18)$$

$$x = -l_1;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi_3}{\partial x} &= \frac{\partial \Phi_4}{\partial x} \quad (0 \rangle z \rangle -qh) \quad \dots\dots\dots (19) \\ &= 0 \quad (-qh \rangle z \rangle -h) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \frac{\partial \phi_4}{\partial t} \quad (0 \rangle z \rangle -qh) \quad \dots\dots\dots (20)$$

위의 식(13) ~ (20)에 식(7) ~ (11)을 대입하고 식(13) ± (15), 식(17) ± (19), 식(14) ± (16), 식(18) ± (20)을 수행하여 다음의 8개식을 얻는다.

$$\begin{aligned} ik(A-B+I) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ - \sum_{m=1}^{\infty} k_m(B_m-I_m) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\ = ik [(C-H)e^{ik(l_2-l_1)} - (D \\ - G)e^{-ik(l_2-l_1)}] \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \\ + \sum_{n=1}^{\infty} k_n' [(C_n-H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} - (D_n \\ - G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\ (0 \rangle z \rangle -qh) \\ = 0 \quad (-qh \rangle z \rangle -h) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\begin{aligned} ik(A-B-I) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ - \sum_{m=1}^{\infty} k_m(B_m+I_m) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\ = ik [(C+H)e^{ik(l_2-l_1)} \\ - (D+G)e^{-ik(l_2-l_1)}] \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + \sum_{n=1}^{\infty} k_n' [(C_n+H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} - (D_n \\ + G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\ (0 \rangle z \rangle -qh) \\ = 0 \quad (-qh \rangle z \rangle -h) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\begin{aligned} ik(E-F)(1+e^{-2ikl_1}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ + \sum_{m=1}^{\infty} k_m(E_m-F_m)(1+e^{-2k_m l_1}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\ = ik'(C-D+G-H) \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \\ + \sum_{n=1}^{\infty} k_n'(C_n-D_n+G_n-H_n) \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\ (0 \rangle z \rangle -qh) \\ = 0 \quad (-qh \rangle z \rangle -h) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$\begin{aligned} ik(E+F)(1-e^{-2ikl_1}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ + \sum_{m=1}^{\infty} k_m(E_m+F_m)(1-e^{-2k_m l_1}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\ = ik'(C-D-G+H) \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \\ + \sum_{n=1}^{\infty} k_n'(C_n-D_n-G_n+H_n) \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\ (0 \rangle z \rangle -qh) \\ = 0 \quad (-qh \rangle z \rangle -h) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\begin{aligned}
 & (A+B+I) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} k_m (B_m + I_m) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\
 = & ik' [(C+H)e^{ik'(l_2-l_1)} \\
 & - (D+G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} k_n' [(C_n + H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} \\
 & - (D_n + G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\
 & \dots\dots\dots (0 > z > -qh) \\
 \dots\dots\dots & \dots\dots\dots (25)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (A+B-I) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} k_m (B_m - I_m) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\
 = & ik' [(C-H)e^{ik'(l_2-l_1)} \\
 & - (D-G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} k_n' [(C_n - H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} \\
 & - (D_n - G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\
 & \dots\dots\dots (0 > z > -qh) \\
 \dots\dots\dots & \dots\dots\dots (26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (E+F)(1+e^{-2ikl_1}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} k_m (E_m + F_m)(1+e^{-2k_m l_1}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\
 = & (C+D+G+H) \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n + D_n + G_n + H_n) \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\
 & \dots\dots\dots (0 > z > -qh) \\
 \dots\dots\dots & \dots\dots\dots (27)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (E-F)(1-e^{-2ikl_1}) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} k_m (E_m - F_m)(1-e^{-2k_m l_1}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\
 = & (C+D-G-H) \frac{\cosh k'(z+qh)}{\cosh k'qh} \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n + D_n - G_n - H_n) \frac{\cos k_n'(z+qh)}{\cos k_n'qh} \\
 & \dots\dots\dots (0 > z > -qh) \\
 \dots\dots\dots & \dots\dots\dots (28)
 \end{aligned}$$

여기서, $\cosh k(z+h)$, $\cos k_m(z+h)$ 는 $0 > z > -h$ 에서, 또 $\cosh k'(z+qh)$, $\cos k_n'(z+qh)$ 는 $0 > z > -qh$ 에서 직교함수이므로 이의 성질을 이용하여, 식(21) ~ (24)의 각 항에는 $\int_{-h}^0 () \cosh k(z+h) dz$, $\int_{-h}^0 () \cos k_m(z+h) dz$, 식(25) ~ (28)의 각 항에는 $\int_{-qh}^0 () \cosh k'(z+qh) dz$, $\int_{-qh}^0 () \cos k_n'(z+qh) dz$ 의 계산을 수행하여 다음의 16개식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 & (A-B+I) V1 = \\
 & [(C-H)e^{ik'(l_2-l_1)} - (D-G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] V2 \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} [(C_n - H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} \\
 & - (D_n - G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] V3 \dots\dots\dots (29)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -(B_m - I_m) V4 = \\
 & [(C-H)e^{ik'(l_2-l_1)} - (D-G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] V5 \\
 & + \sum_{n=1}^{\infty} [(C_n - H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} \\
 & - (D_n - G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] V6 \dots\dots\dots (30)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (A-B-I)V1 = & \\
 [(C+H)e^{ik'(l_2-l_1)} - (D+G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] V2 & \\
 + \sum_{n=1}^{\infty} [(C_n+H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} & \\
 - (D_n+G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] V3 & \dots\dots\dots (31)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -(B_m+I_m)V4 = & \\
 [(C+H)e^{ik'(l_2-l_1)} - (D+G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] V5 & \\
 + \sum_{n=1}^{\infty} [(C_n+H_n)e^{k_n'(l_2-l_1)} & \\
 - (D_n+G_n)e^{-k_n'(l_2-l_1)}] V6 & \dots\dots\dots (32)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (E-F)(1+e^{-2ikl_1})V1 = (C-D+G-H)V2 & \\
 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n-D_n+G_n-H_n)V3 & \dots\dots\dots (33)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (E_m-F_m)(1+e^{-2k_n l_1})V4 = & \\
 (C-D+G-H)V5 & \\
 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n-D_n+G_n-H_n)V6 & \dots\dots\dots (34)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (E+F)(1-e^{-2ikl_1})V1 = (C-D-G+H)V2 & \\
 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n-D_n-G_n+H_n)V3 & \dots\dots\dots (35)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (E_m+F_m)(1-e^{-2k_n l_1})V4 = & \\
 (C-D-G+H)V5 & \\
 + \sum_{n=1}^{\infty} k_n'(C_n-D_n-G_n+H_n)V6 & \dots\dots\dots (36)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (A+B+I)V7 + \sum_{m=1}^{\infty} (B_m+I_m)V8 & \\
 = [(C+H)e^{ik'(l_2-l_1)} & \\
 + (D+G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] V9 & \dots\dots\dots (37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (A+B+I)V10 + (B_m+I_m)V11 & \\
 = \sum_{n=1}^{\infty} [(C_n+H_n)e^{ik_n'(l_2-l_1)} & \\
 + (D_n+G_n)e^{-ik_n'(l_2-l_1)}] V12 & \dots\dots\dots (38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (A+B-I)V7 + \sum_{m=1}^{\infty} (B_m-I_m)V8 & \\
 = [(C-H)e^{ik'(l_2-l_1)} & \\
 + (D-G)e^{-ik'(l_2-l_1)}] V9 & \dots\dots\dots (39)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (A+B-I)V10 + (B_m-I_m)V11 & \\
 = \sum_{n=1}^{\infty} [(C_n-H_n)e^{ik_n'(l_2-l_1)} & \\
 + (D_n-G_n)e^{-ik_n'(l_2-l_1)}] V12 & \dots\dots\dots (40)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (E+F)(1+e^{-2ikl_1})V7 & \\
 + \sum_{m=1}^{\infty} [(E_m+F_m)(1+e^{-2k_n l_1})] V8 & \\
 = (C+D+G+H)V9 & \dots\dots\dots (41)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (E+F)(1+e^{-2ikl_1})V10 & \\
 + (E_m+F_m)(1+e^{-2k_n l_1})V11 & \\
 = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n+D_n+G_n+H_n)V12 & \dots\dots\dots (42)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (E-F)(1-e^{-2ikh}) V7 \\
 & + \sum_{m=1}^{\infty} [(E_m-F_m)(1-e^{-2k_m h})] V8 \\
 & = (C+D-G-H) V9 \dots\dots\dots (43)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V7 &= \frac{1}{\cosh kh} \frac{k \sinh \lambda \bar{q}}{k'^2 - k^2}, \\
 V8 &= \frac{-1}{\cos k_m h} \frac{k_m \sin \lambda_m \bar{q}}{k'^2 + k_m^2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (E-F)(1-e^{-2ikh}) V10 \\
 & + (E_m-F_m)(1-e^{-2k_m h}) V11 \\
 & = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n+D_n-G_n-H_n) V12 \dots\dots\dots (44)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V9 &= \frac{1}{2 \cosh k' q h} (q h + \frac{\sinh 2\lambda'}{2k'}), \\
 V10 &= \frac{-1}{\cosh kh} \frac{k \sinh \lambda \bar{q}}{k_n'^2 + k^2}
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \lambda &= kh, \quad \lambda_m = k_m h, \quad \lambda' = k' q h, \\
 \lambda_n' &= k_n' q h, \quad \bar{q} = 1 - q
 \end{aligned}$$

$$V11 = \frac{1}{\cos k_m h} \frac{k_m \sin \lambda_m \bar{q}}{k_n'^2 + k_m^2},$$

$$V12 = \frac{1}{2 \cos k_n' q h} (q h + \frac{\sin 2\lambda_n'}{2k_n'})$$

$$V1 = \frac{ik}{2 \cosh kh} (h + \frac{\sinh 2\lambda}{2k}),$$

$$V2 = \frac{ik'}{\cosh k' q h} \frac{k \sinh \lambda \bar{q}}{k'^2 - k^2}$$

$$V3 = \frac{-k_n'}{\cos k_n' q h} \frac{k \sinh \lambda \bar{q}}{k_n'^2 + k^2},$$

$$V4 = \frac{k_m}{2 \cos k_m} (h + \frac{\sinh 2\lambda_m}{2k_m})$$

$$V5 = \frac{-ik'}{\cosh k' q h} \frac{k_m \sin \lambda_m \bar{q}}{k'^2 + k_m^2},$$

$$V6 = \frac{k_n'}{\cos k_n' q h} \frac{k_m \sin \lambda_m \bar{q}}{k_n'^2 + k_m^2}$$

여기서, 입사파를 ae^{ikx} (a 는 입사파의 진폭)로 두면 식(7)의 입사파성분의 Velocity Potential로부터 A 는 다음식으로 주어진다.

$$A = i \frac{ag}{\sigma} e^{ikh} \dots\dots\dots (45)$$

이상으로부터 얻어진 방정식이 $9 + 4m + 4n$ ($m = n = 1 \sim \infty$)이고, 결정해야 되는 미지수가 $9 + 4m + 4n$ 이므로 이의 방정식을 풀 수 있게 된다.

<파의 변형>

입사파의 반사율 (K_R)과 전달율 (K_T)은 각각 다음 식으로 정의된다.

$$K_R = \left| \frac{B}{A} \right|, \quad K_T = \left| \frac{I}{A} \right| \dots\dots\dots (46)$$

그리고, Energy Flux의 Conservation으로부터 다음의 식이 성립되어야 한다.

$$K_R^2 + K_T^2 = 1 \dots\dots\dots (47)$$

3. 해석결과

1) 해석결과의 검증

<일열잠제의 검증>

Fig. 2는 $q=0.2, l/h=0.5$ 의 경우에 井島·佐佐木(1971)의 이론해석결과(●)와 본 연구의 해석결과(실선)를 비교한 하나의 예로, 무차원 파라메타 $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른 입사파의 반사율(K_R)과 전달율(K_T)을 나타낸 것이다.

Fig. 2를 보면 본 해석결과와 井島·佐佐木(1971)의 결과가 완전히 일치함을 알 수 있으므로 일열잠제에 대한 본해석의 타당성이 검증된다.

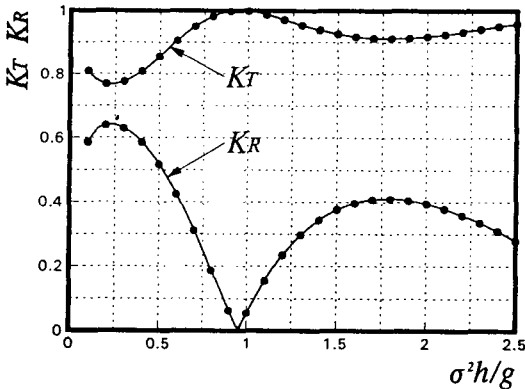


Fig. 2 Wave Transformations of Submerged Breakwater ($q=0.2, l/h=0.5$)

<이열잠제의 검증>

Fig. 3은 $(l_2-l_1)/(1-q)h=1.0, h/(1-q)h, =1.5, 2l_1/(1-q)h=4.0$ 의 경우에 입사파의

반사율(K_R)과 전달율(K_T)을 나타낸 것으로, 실선은 본해석의 결과를 나타내며 ●는 喜岡·松野·源川(1989)에 의한 이론해석의 결과로서, 이론해석은 wide-spacing 근사에 의한 고유함수 전개법을 사용하고 있다.

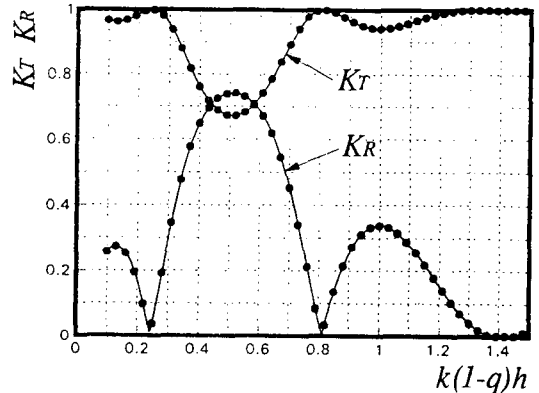


Fig. 3 Wave Transformations of Submerged Breakwater with Two Rows
($(l_2-l_1)/(1-q)h=1.0, h/(1-q)h=1.5, 2l_1/(1-q)h=4.0$)

Fig. 3을 보면 역시 본 해석결과와 喜岡·松野·源川(1989)의 해석결과가 완전히 일치함을 알 수 있다. 따라서, 이열잠제에 대한 본해석의 타당성도 검증된다.

2) 일열잠제의 파랑변형

Fig. 4는 무차원잠수심 $q=0.2, 0.3, 0.4$ 인 경우 수심에 대한 잠제폭의 비 l/h 를 파라메타로서 $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른 파의 전달율(K_T)의 변화를 각각 나타낸 예이다.

Fig. 4에서 일정한 h, l 에 대해 주기의 변화에 따른 전달율의 변화를 보면 $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따라 Peak치를 가지면서 진동하는 경향을 나타낸다. 이와 같은 Peak치는 l/h 값이 커질수록 장주기측으로 이동하며 결과적으로 단주기

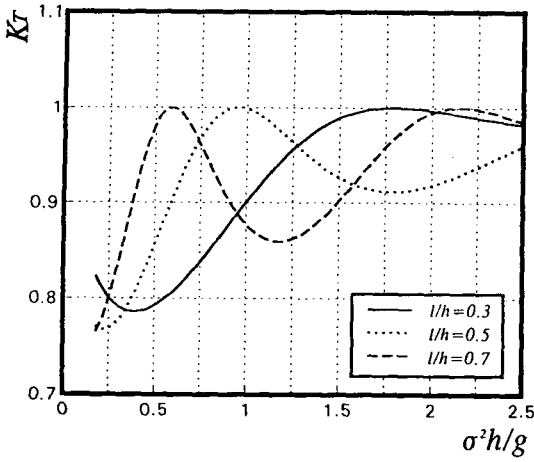
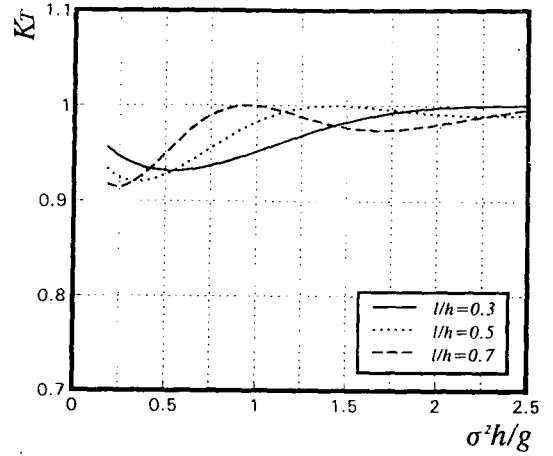
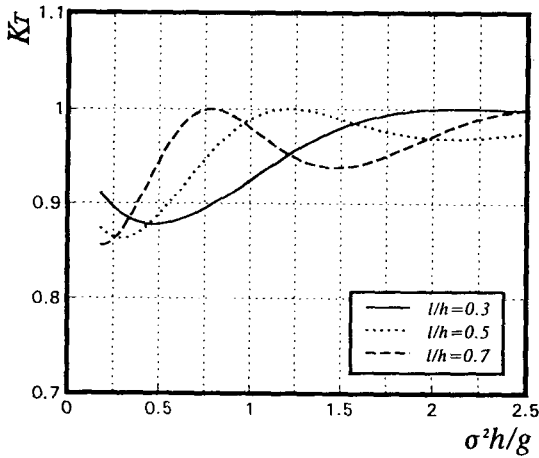
(a) $q=0.2$ (c) $q=0.4$ (b) $q=0.3$

Fig. 4 Transmission Ratio of Submerged Breakwater

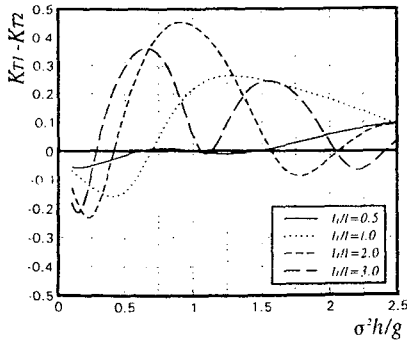
려는 장주기파의 전달율이 가장 적어지는 주파수대에 올 수 있도록 조절할 필요가 있다.

이상의 결과들은 천단상에서의 쇄파와 마찰에 의한 파의 감쇠효과를 고려하지 않은 것으로 실제로는 잠제폭이 넓어질수록 그리고 잠수심이 얕아질수록 구조물과 파의 마찰효과와 강제쇄파로 인한 에너지손실때문에 파랑제어효과가 커지는 것이 일반적이므로 잠제를 사용하여 파랑제어를 하는 경우에는 잠제폭을 넓게 할 필요가 있다.

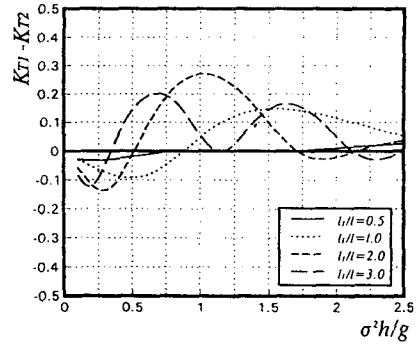
3) 일열잠제와 이열잠제의 파랑변형비교

Fig. 5, 6, 7는 각각 $q=0.2, 0.3, 0.4$ 의 경우 잠제폭 $((l_2-l_1)/h)$ 이 0.2, 0.3, 0.4일때 이열잠제사이의 간격을 $l_1/l=0.5, 1, 2, 3$ 으로 변화시켜 $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른 일열잠제와 이열잠제의 전달율의 차($K_{T1}-K_{T2}$, 일열잠제: K_{T1} , 이열잠제: K_{T2})의 변화를 나타낸 예이다.

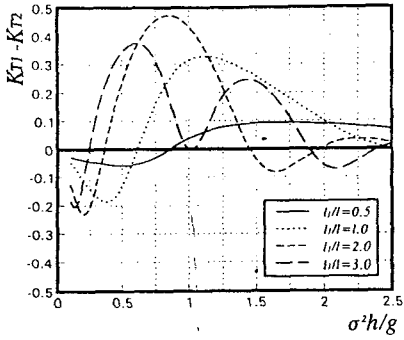
측에서 전달율이 보다 적어지는 경향을 보인다. q 값의 변화에 따른 전달율의 변화를 보면 q 값이 적어지면 파의 전달이 적어지는 경향을 나타내고 있다. 잠제폭의 영향을 보면 잠제폭이 넓어질수록 주기영역에 따라 전달율이 보다 커지는 영역과 적어지는 영역이 서로 교차하고 있으나 잠제폭이 넓어질수록 전달율이 적은 영역이 장주기측으로 이동하고 있는 경향을 나타내며 무차원잠수심이 적을수록 이러한 경향은 보다 현저하게 나타난다. 따라서, 잠제폭은 제어할



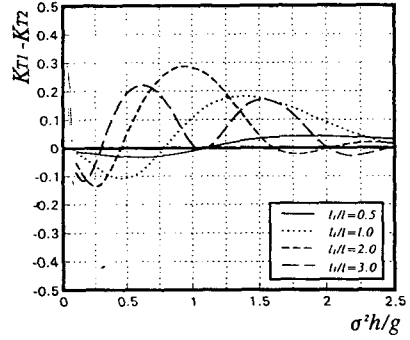
(a) $(l_2 - l_1)/h = 0.2$



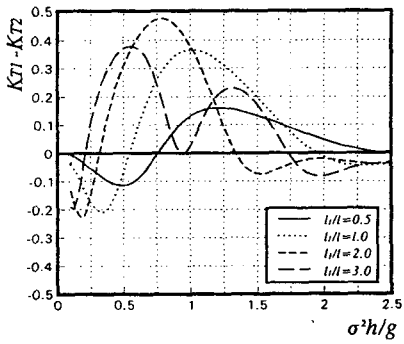
(a) $(l_2 - l_1)/h = 0.2$



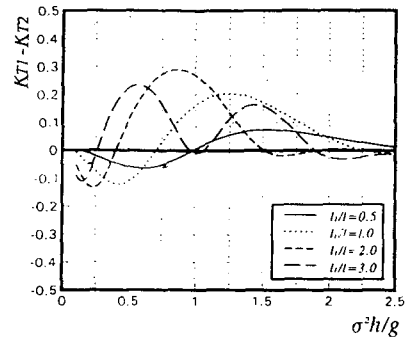
(b) $(l_2 - l_1)/h = 0.3$



(b) $(l_2 - l_1)/h = 0.3$



(c) $(l_2 - l_1)/h = 0.4$



(c) $(l_2 - l_1)/h = 0.4$

Fig. 5 Transmission Ratio Difference between Submerged Breakwater with One and Two Rows ($l/h=0.5$, $q=0.2$)

Fig. 6 Transmission Ratio Difference between Submerged Breakwater with One and Two Rows ($l/h=0.5$, $q=0.3$)

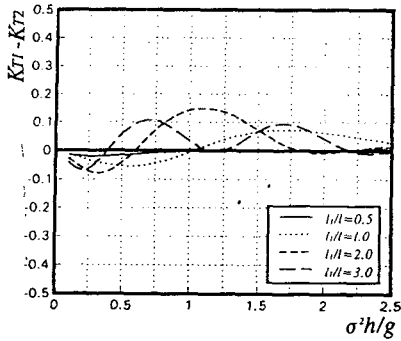
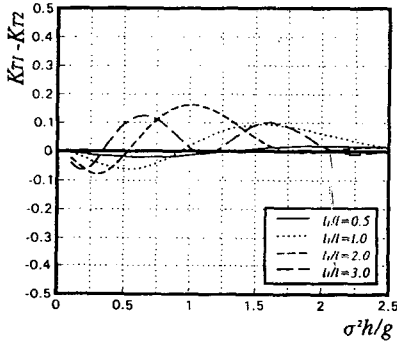
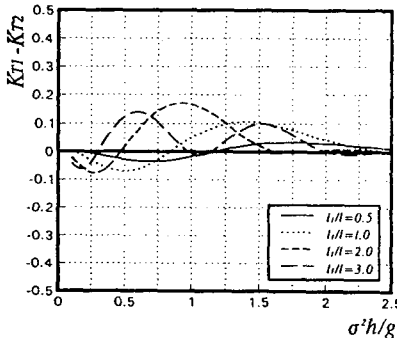
(a) $(l_2 - l_1)/h = 0.2$ (b) $(l_2 - l_1)/h = 0.3$ (c) $(l_2 - l_1)/h = 0.4$

Fig. 7 Transmission Ratio Difference between Submerged Breakwater with One and Two Rows ($l/h = 0.5$, $q = 0.4$)

Fig. 5의 (a)에서 주기의 변화에 따른 $K_{T1} - K_{T2}$ 의 변화를 살펴보면 이열잠제의 간격이 일열잠제의 폭의 0.5($l_1/l = 0.5$)일때는 단주기측($1.5 < \sigma^2 h/g < 2.5$)에서 파랑제어에 대해 일열보다 이열의 효과가 나타나지만, 장주기측($0.1 < \sigma^2 h/g < 0.6$)에서는 그 효과가 기대되지 않는 결과를 주고 있다. 그러나, $(l_2 - l_1)/h$ 의 값이 커질수록 즉 이열잠제의 폭이 넓어질수록 이열잠제의 효과는 보다 커지고 점점 장주기측으로 이동하는 경향을 나타낸다. 이열잠제의 설치간격이 보다 넓어지면($l_1/l = 1.0, 2.0$), 이열잠제의 일정한 q 와 $(l_2 - l_1)/h$ 에 대해서 전달율이 일열보다 더 적어지고, Fig. 5의 (c)에 있어서 $l_1/l = 2.0$ 의 경우는 전달율이 최대 0.48정도 적어지는 결과를 나타낸다.

여기서 $l_1/l = 3.0$ 의 경우는 $l_1/l = 0.5$, $l_1/l = 1.0$ 및 $l_1/l = 2.0$ 의 경우보다 넓은 주기대에 걸쳐서 이열잠제의 효과가 기대되고 $(l_2 - l_1)/h$ 의 값이 증가될수록 보다 장주기측으로 이동됨을 알 수 있다. 그러나 최대 Peak치는 $l_1/l_2 = 2.0$ 보다 적어진다.

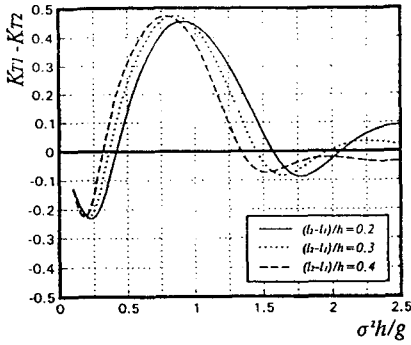
상술한 결과들은 잠수심이 깊어지면 그 기대 효과가 적어짐을 알 수 있다. 이것은 전술한 바와 같이 잠제천단상 유수역을 통한 수송에너지가 잠수심이 깊어지면 보다 커지기 때문이다.

Fig. 8은 이열잠제사이의 간격을 고정($l_1/h = 1.0$)하고 $q = 0.2, 0.3, 0.4$ 일때 잠제폭($(l_2 - l_1)/h$)을 변화시킴으로서 $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른 일열잠제와 이열잠제의 전달율의 차($K_{T1} - K_{T2}$)를 나타낸 예이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 일정한 q 에 대해 이열잠제폭이 커짐에 따라 Peak치가 장주기측으로 이동함과 동시에 그 값이 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 경향은, 전술한 바와 같이 q 의 값이 적을수록 현저히 나타나고 전체적으로 보다 장주기측으로 이동된다.

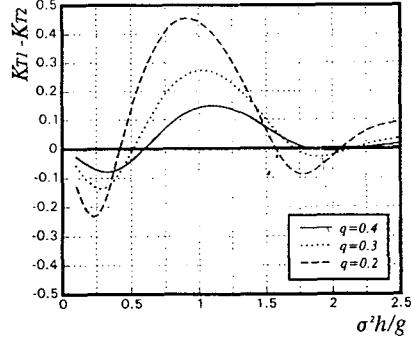
Fig. 9는 일정한 잠제간격($l_1/h = 1.0$)에 대해 $(l_2 - l_1)/h = 0.2, 0.3, 0.4$ 일때 무차원잠수심 q 를 변화시킴으로서 $\sigma^2 h/g$ 의 변화에 따른 일

열잠제와 이열잠제의 전달율의 차 ($K_{T1} - K_{T2}$) 를 나타낸 예이다. 이 Fig. 9 역시 무차원잠수심 q 가 적어짐에 따라 Peak치가 장주기쪽으로 커

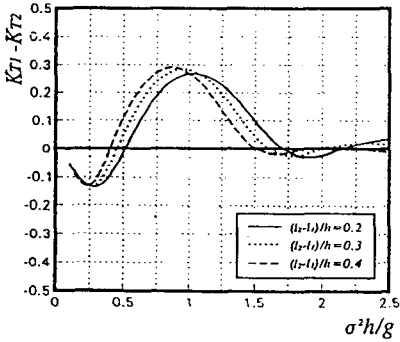
지면서 이동함과 동시에 이열잠제폭이 넓어지면 보다 장주기측으로 이동된다.



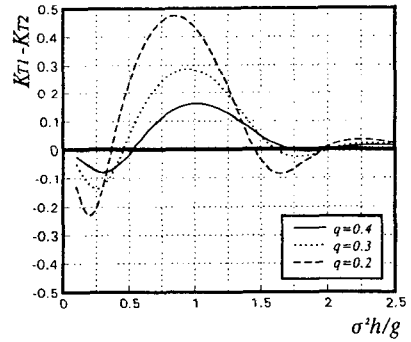
(a) $q=0.2$



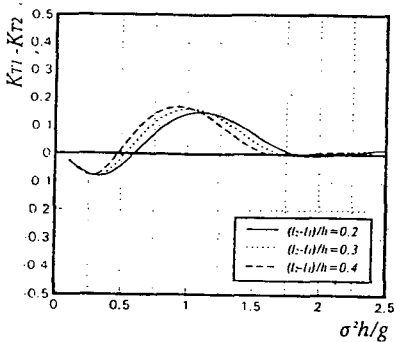
(a) $(l_2 - l_1)/h = 0.2$



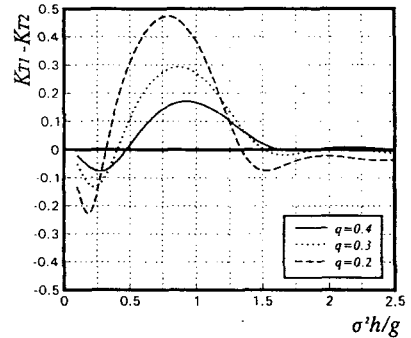
(b) $q=0.3$



(b) $(l_2 - l_1)/h = 0.3$



(c) $q=0.4$



(c) $(l_2 - l_1)/h = 0.4$

Fig. 8 Transmissiob Ratio Difference between Summerged Breakwater with One and Two Rows($l/h=0.5$, $l_1/h=1.0$)

Fig. 9 Transmissiob Ratio Difference between Summerged Breakwater with One and Two Rows($l/h=0.5$, $l_1/h=1.0$)

4. 맺음말

이열잠제에서 제어하기 어려운 장주기파를 보다 효과적으로 그리고 보다 경제적으로 제어할 수 있도록 이열잠제를 상정하여 영역분할법에 의해 수치해석을 수행하였다. 본연구에서 얻어진 결과들은 한정된 계산에 기초한 것이지만 장주기파에 대한 이열잠제의 파랑제어효과가 매우 크고, 특히 이러한 경향은 잠수심이 얕을수록, 이열잠제의 간격이 넓을수록 그리고 이열잠제폭이 넓을수록 현저히 나타나고 보다 장주기측으로 이동한다는 것을 알 수 있었다. 그러나, 잠수심을 얕게 하면 할수록 천단상에 작용하는 파력이 증대되어 구조물의 안정성에 영향을 미치게 되는 점을 유의하여야 하며, 잠제간격을 너무 넓게 하면 어떤 주기의 파랑에 대해서 그 효과가 적어질 수 있기 때문에 제어하려는 장주기파의 주기에 따라 잠수심과 이열잠제의 간격을 적절히 조절할 필요가 있는 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

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. Steimer, R. B.(1977) : "An Eigenvalue Wave Analysis of a Fixed Semi-Immersed Rectangular Structure", Thesis of Master Degree, OSU.
4. 井島武士 · 佐佐木富雄(1971) : "潛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. 142 ~ 147.
5. 喜岡 涉 · 松野忠幸 · 源川秀樹(1989) : "複數列配置した潛堤による波浪制御", 海岸工學論文集, 第 36卷, pp. 549 ~ 553.
6. 김원규 · 강인식 · 광기석 · 김도삼(1994) : "단열 잠제에 의한 파랑변형에 관한 연구", 한국항만학회지 제 8권 제 1호 pp. 23 ~ 30.
7. 강인식 · 광기석 · 김도삼 · 양윤모(1994) : "사석방파제에 의한 파랑변형에 관한 연구", 한국항만학회지 제 8권 제 2호 pp. 57 ~ 66.