

### 3. 不透過性, 複列潛堤의 反射 및 透過率에 關한 研究

釜山大學校 教授(工博) 梁嶺模

釜山大學校 大學院(博士課程) 李文贊

釜山大學校 大學院(碩士課程) 金鍾石



## 불투과성 복렬잠제의 반사 및 투과율에 관한 연구

( A Study on Reflection and Transmission Coefficient of Impermeable Submerged Breakwater )

부산대학교 공 과 대 학 교 수 양 윤 모

부산대학교 대학원(박사과정) 이 문 찬

부산대학교 대학원(석사과정) 김 종 석

### 1. 서 론

해안 방재 대책공법이나 하구 폐쇄 방지 공법으로는 지금까지 잉안제, 도류제, 돌제, 방파제 등의 구조물이 많이 설치되어 이용되어 왔다.

그런데 이러한 구조물은 모두 수면위로 돌출되어 있으므로 자연상태의 해수의 흐름에 지장을 주며 수평선을 훼손하여 자연경관을 해치는 경우가 있어 문제가 되고 있다.

이에 따라 해안 방재대책이나 하구 폐쇄 방지공법으로서의 역할을 하면서도 해수의 흐름에 지장을 덜주고 수평선을 보존하여 자연경관을 유지시키는 새로운 공법의 개발이 필요하게 되었는데 이러한 공법으로 검토, 개발중에 있는 것이 잠제공법이다. 그런데 해안 방재대책공법이나 하구 폐쇄방지공법으로 잠제를 사용하면 어초로서의 병용이 가능하다는 이점이 있고 잠제를 적당한 간격으로 복렬 배치할 경우 해수욕장과 같은 해안의 침식방지를 위한 reef 요과 까지도 얻을수 있게 된다.

그러므로, 여러가지 이점을 가지고 그 효용성이 날로 증대 되고 있는 잠제의 파랑제어 효과에 관한 연구는 매우 중요하다고 하겠다.

이러한 잠제에 대한 연구로는, 수심이 일정한 해역에 구형단면의 불투과 잠제가 있는 경우의 투과율에 관해 Newman<sup>1)</sup>, Mei - Black<sup>2)</sup> 등이 경계치 문제로 취급하여 변분법 또는 적분방정식의 해를 구한 것이 있고, 유한수심중의 수직벽은 폭을 무시한 잠제라고 생각하여 유한 진폭 파이론을 사용하고 운동량 보존법칙의 관점에서 투과율 및 반사율을 이론적으로 해석한 Kaneyama (金山)<sup>3),4)</sup> 등의 연구가 있다. 또한 미소진폭 파이론에 의해 투과제 및 불투과제 잠제의 효과에 관해 이론적으로 해석한 Izima (井島)<sup>5),6)</sup>의 연구가 있으며 그외에도 잠제에 관한 이론 및 실험적 연구가 많이 행해져 오고 있다.

본 연구는 잠제를 복렬로 설치하였을 때 이에 따른 파랑 제어 효과 (반사 및 투과)를 이론 및 실험적으로 비교 고찰한 것이며, 해안방제 대책공법이나 야구 폐쇄 방지공법에 잠제를 이용할 경우에 있어서의 수치해석 방법을 개발하는 기초적 연구라 하겠다.

## 2. 이론 식

복렬잠제의 이론 식은 단일잠제의 이론 식에서 유도한 반사율과 투과율을 그대로 이용하여 다음과 같이 구한다.

### 2-1. 단일 잠제의 이론 식

비압축성 완전 유체의 2차원 운동에 있어 각주파수  $\sigma = 2\pi/T$  ( $T$ : 주기)를 가진 미소진폭파에 의한 정상운동을 생각하고 좌표계를 Fig.1 과 같이 두면 속도 Potential  $\phi(x, z, t)$  는 시간항을 분리한 다음 식으로 표시된다.

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

Fig.1 에서와 같이 수심  $h$  에 잠제폭  $2l$ , 깊이  $w$  ( $0 < w < h$ ) 를 가진 구형 단면의 불투과 잠제가 있는 경우 유체영역을  $z = \pm l$  에서 구분할 수 있다.

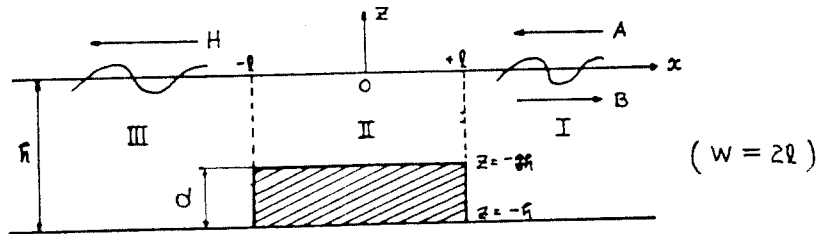


Fig. 1

영역 I, II, III 의 속도 Potential 을 각각  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  이라 하면 각 영역에서의 속도 Potential 은 자유수면 및 수저조건을 만족해야 하는데 다음과 같다.

$$\left. \begin{array}{l} \text{영역 I, III} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 = \sigma^2 \phi / g \quad ; \quad z = 0 \\ \quad \quad \quad = 0 \quad \quad \quad ; \quad z = -h \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{영역 II} \\ \frac{\partial \phi}{\partial z} = \sigma^2 \phi / g \quad ; \quad z = 0 \\ \quad \quad \quad = 0 \quad \quad \quad ; \quad z = -l+w \end{array} \right\} \quad (3)$$

따라서 속도 Potential 은 (2) 및 (3) 식을 만족하는 Laplace 방정식

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

의 해로서 각각 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Phi_1(x, z) = [A \cdot e^{ik(x-l)} + B e^{-ik(x-l)}] \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{-k_m(x-l)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \quad (5)$$

$$\Phi_2(x, z) = \left[ D \frac{\cos k'x}{\cos k'l} + E \frac{\sin k'x}{\sin k'l} \right] \frac{\cosh k'(z+zh)}{\cosh k'gh} + \sum_{m=1}^{\infty} \left( F_m \frac{\cosh k_m x}{\cosh k_m l} + G_m \frac{\sinh k_m x}{\sinh k_m l} \right) \frac{\cos k_m'(z+zh)}{\cos k_m' h} \quad (6)$$

$$\Phi_3(x, z) = H \cdot e^{ik(x+l)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{m=1}^{\infty} I_m e^{k_m(x+l)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \quad (7)$$

여기서 A: 입사파, B: 반사파, H: 투과파, D, E: 정상파

$C_m, F_m, G_m, I_m$ : 각영역에서의 산란파 (Scattering wave) 를 나타내는 상수이며

또한  $k, k_m (m=1, 2, \dots)$  및  $k', k'_m (m=1, 2, \dots)$  는 각영역의 자유 수면 조건에 의한 다음식으로 부터 결정되는 고유치이다.

$$v^2 h / g = k h \tan k h = -k_m h \tan k_m h \quad (8)$$

$$v^2 z h / g = k' z h \tan k' z h = -k'_m z h \tan k'_m z h \quad (9)$$

그런데, 경계조건을 달리하는 유체가 수평방향에 접촉하는 경우는 그 경계면에서 에너지속 (Energy Flux) 및 질량속 (Mass Flux) 의 연속이 성립되어야 하며 제체 측면에서는 수평유속이 0 이 되어야 하는데 이에 따라  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  는 다음조건을 만족해야 한다.

$$z=l : \left. \begin{aligned} \partial \phi_1 / \partial x &= \partial \phi_2 / \partial x & ( -zh < z < 0 ) \\ &= 0 & ( -h < z < -zh ) \\ \phi_1 &= \phi_2 & ( -zh < z < 0 ) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$z=-l : \left. \begin{aligned} \partial \phi_2 / \partial x &= \partial \phi_3 / \partial x & ( -zh < z < 0 ) \\ &= 0 & ( -h < z < -zh ) \\ \phi_2 &= \phi_3 & ( -zh < z < 0 ) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

위의 경계조건식에 식 (5) - (7)을 대입하여 정리하고 함수의 직교성을 이용하여 수저에서 수면까지 적분하면

$(B+H)/A$ ,  $(C_m + I_m)/A$  및  $(B-H)/A$ ,  $(C_m - I_m)/A$ 에 대한 2개의 연립방정식이 얻어진다.

이 방정식에서  $B/A$ ,  $H/A$ 를 구할수 있는데 반사율  $K_R$  과 투과율  $K_T$  는 각각 다음과 같이 구해진다.

$$\left. \begin{aligned} K_R &= |B/A| \\ K_T &= |H/A| \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

### 2-2. 복렬잠제의 이론식

단일잠제의 이론식에서 구한 복소수 형태의 반사율과 투과율을 사용하고 양 잠제간의 산란파 (Scattering wave) 영향이 없다고 가정하여 Fig.2 에서 보는 바와 같이 다중반사된 파의 선영중첩에서 복렬잠제의 반사율  $K'_R$  와 투과율  $K'_T$  를 구한다.

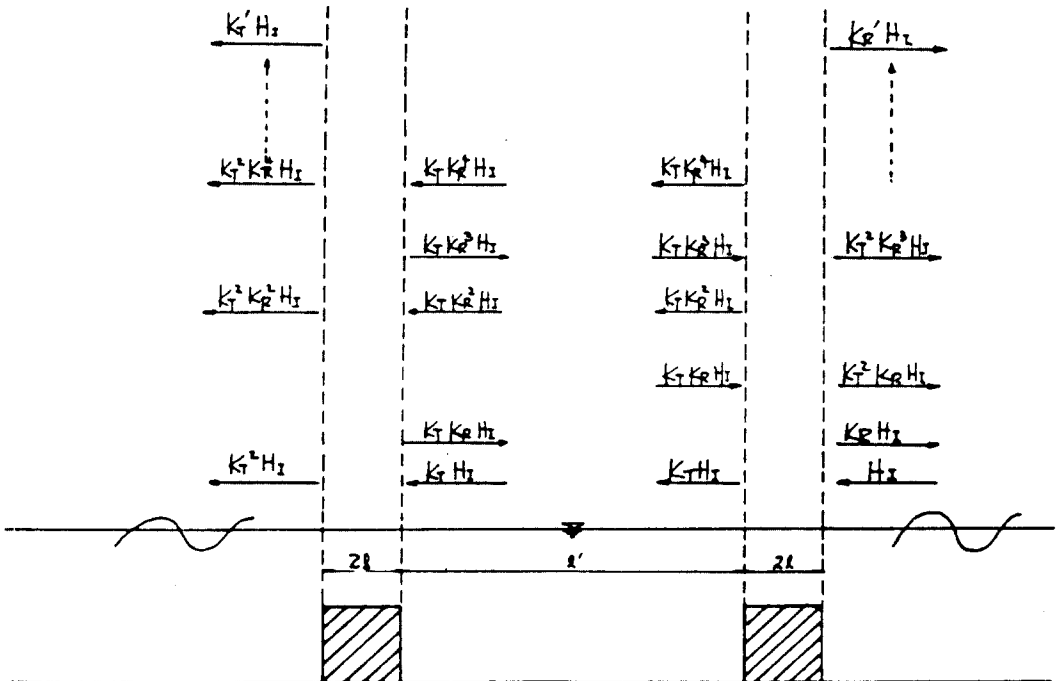


Fig 2.

$$\begin{aligned}
 K_R' &= K_R + K_T^2 \sum_{m=1}^{\infty} K_R^{2m-1} (e^{-iK_R l'})^{2m} \\
 \therefore K_R' &= K_R + K_T^2 \frac{K_R e^{-2iK_R l'}}{1 - K_R^2 e^{-2iK_R l'}} \\
 K_T' &= K_T^2 e^{-iK_R l'} + K_T^2 \sum_{m=1}^{\infty} K_R^{2m} (e^{-iK_R l'})^{2m+1} \\
 &= K_T^2 e^{-iK_R l'} + K_T^2 \frac{K_R^2 e^{-3iK_R l'}}{1 - K_R^2 e^{-2iK_R l'}} \\
 K_T' &= \frac{K_T^2 e^{-iK_R l'}}{1 - K_R^2 e^{-2iK_R l'}}
 \end{aligned} \tag{15}$$

(15)식의  $K_R'$ ,  $K_T'$  는 복소수 형태이므로 실제의 값은 그 절대치를 구하면 된다.

### 3. 수리 실험

#### 3-1. 실험장치 및 방법

본 실험은 아래의 Fig. 3 에서와 같이, 2차원 조파수로 (길이: 22.5m, 높이: 1.0m, 폭: 0.6m) 에 나무로 만든 잠제를 복렬로 설치하고 잠제전후의 파고를 측정하여 반사 및 투과율을 산출하였는데 실험에 사용된 잠제 및 파랑조건은 Table 1 및 Table 2 와 같다. 실험종류에 있어 Case 1 은 잠제위 쇄파한 계에 관한 실험, Case 2 는 복렬 잠제간 거리를 1.8m 로 고정시키고 잠제 높이를 변화시키는 경우의 실험, Case 3 은 잠제 높이를 24cm 로 고정하고 잠제간 거리를 0.8m - 3.0m 사이에서 변화시키는 경우의 실험을 각각 나타낸다.

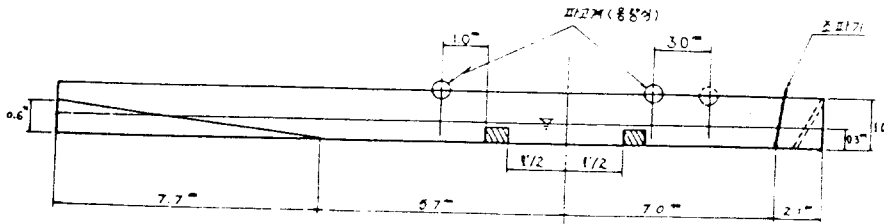


Fig. 3



Table 1. 모형 잠제의 제한

실험종류	잠제 폭 (W=2l) (cm)	잠제 높이(d) (cm)	비 고
Case 1	10, 15, 20, 25, 30	15, 18, 21, 24, 27	폭과 높이를 각각 조합 한 25종류.
Case 2	15, 30	15, 18, 21, 24, 27	폭과 높이를 각각 조합 한 10종류.
Case 3	15	24	
	30	24	

Table 2. 파 랑 조 건

실험종류	수심 (H) (cm)	주 기 (T) (sec)	파고 (H) (cm)	파형경사 (H/L)	잠제간거리(l')
Case 1	30	0.7 - 2.0	1.15 - 5.67	0.00353 - 0.0751	-
Case 2		1.0 , 1.5	1.37 - 5.67	0.0059 - 0.0413	1.8
Case 3		1.0 , 1.5	1.42 - 2.95	0.0061 - 0.0215	0.8 - 3.0 (0.2 간격)

3-2. 잠제위에서의 쇄파한계 (실험 Case 1.)

잠제위를 통과하는 파가 잠제위에서 쇄파하는 경우와 쇄파하지 않는 경우는 잠제의 파랑제어 효과에 큰 영향을 미치게 된다.

따라서 잠제위에서의 쇄파한계를 규명할 필요가 있는데 Goda (슈뵈)등은 "월파에 의한 방파제 배후의 파고전달율에 관한 실험적 연구"에서 상대 수심비와 파고수심비는 파고 전달율에 별 영향이 없고 잠제위수심과 파고 의미 및 잠제폭과 수심비가 파고 전달율에 영향이 있다는 것을 보였다. 특히 잠제위수심과 파고의 비가 거의 지배적으로 영향을 끼침을 확인하였다.

따라서 본 연구에서는 파고와 잠제위 수심비 (H/δ), 잠제폭과 파장의 비 (W/L)를 각각 증축과 뒹축으로 잡고 잠제위에서의 쇄파한계에 대한 실험을 행하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.

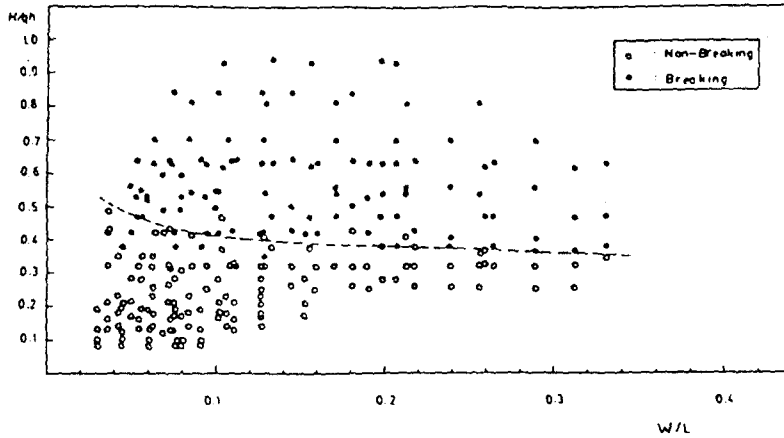


Fig. 4 잠제위에서의 쇄파 한계

이그림에 따르면  $W/L$ 의 범위가 0.03 - 0.33으로 좁아 명확한 경향을 나타낸다고는 말할수 없지만  $W/L$ 가 증대함에 따라  $H/2k$ 가 점점 감소하여 일정한 값 (0.35)에 접근함을 알수있다.

또한 잠제위에서의 쇄파한계는  $H/2k$  및  $W/L$ 에 영향을 받으며 특히  $H/2k$ 의 영향이 크다고 판단된다.

### 3-3. 실험결과

수심 (h)이 30cm로 일정할때 파형경사 (H/L), 파고와 잠제위수심비 (H/9h), 잠제높이 (d), 잠제폭 (W) 및 잠제간거리 (l')의 변화에 따른 반사 및 투과율의 실험결과를 미소진폭 파이론에 의한 계산치와 함께 나타내면 Fig.5~Fig.6 과 같다.

#### 3-3-1. 잠제간거리 (l')를 고정시키고 잠제높이를 변화시킨 경우의 반사율 과 투과율 (실험 Case 2.)

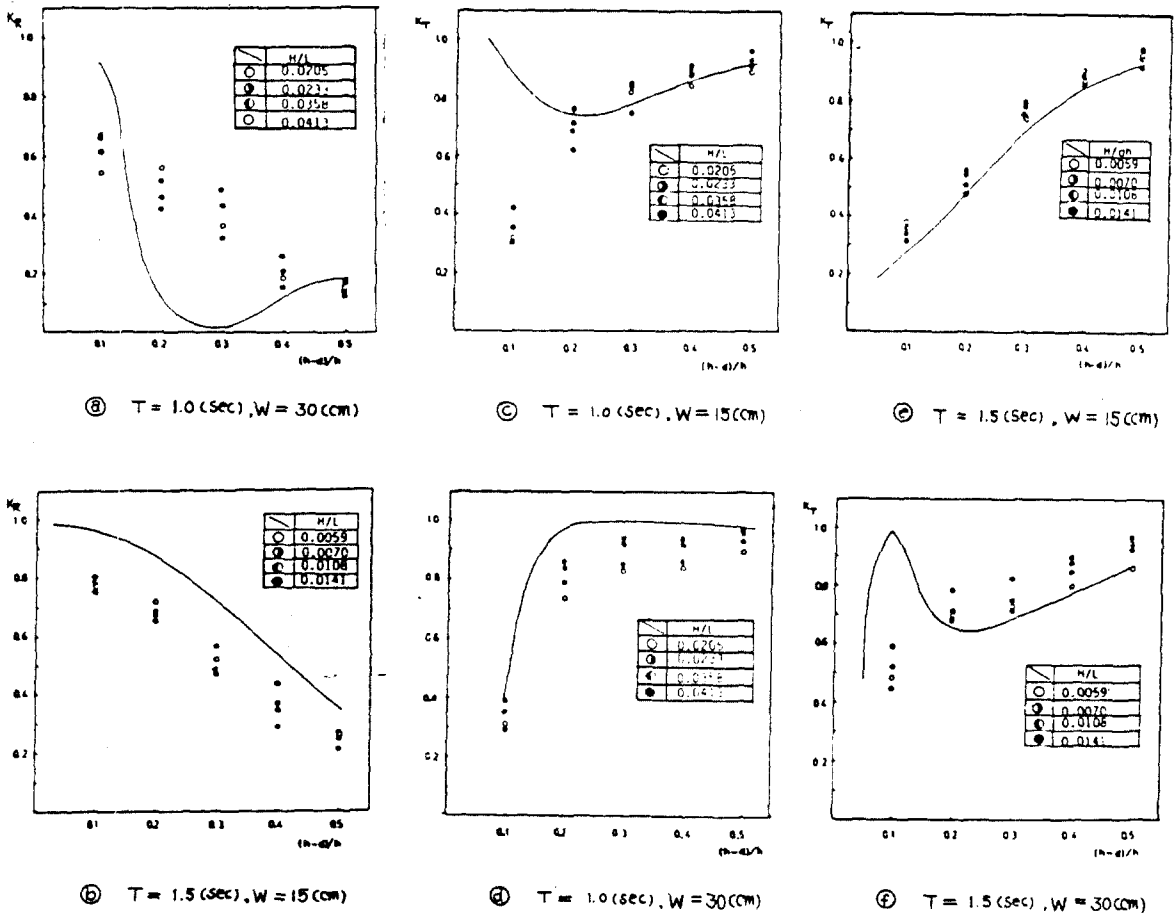
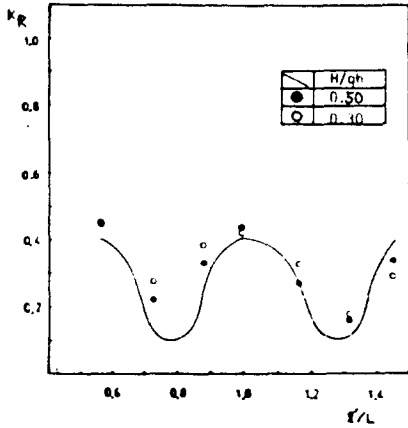


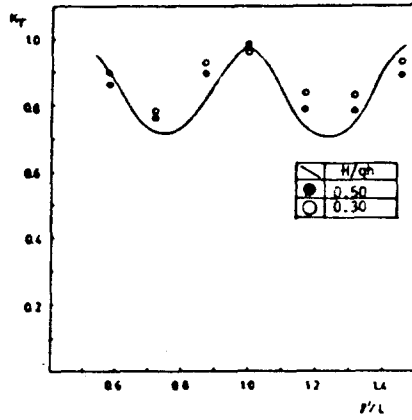
Fig. 5 반사율과 투과율에 대한 계산치와 실험치의 비교 ( $l' = 1.8$ ,  $d = 15 - 27$ cm)

————— : 복원 잠제의 계산치, ○○○○ : 실험치)

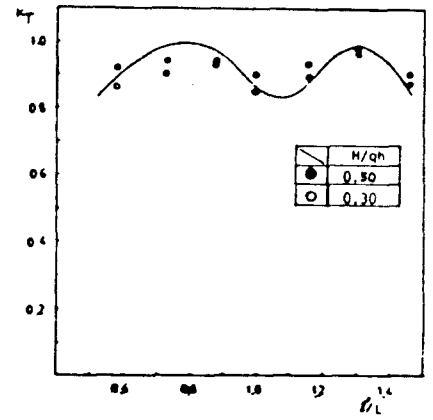
3-3-2. 잠제높이 (  $d$  ) 를 고정시키고 잠제간거리를 변화시킨 경우의 반사율  
과 투과율 ( 실험 case 3. )



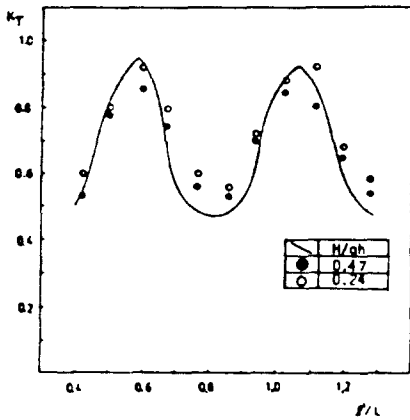
㉑  $T = 1.0(\text{sec}), W = 30(\text{cm})$



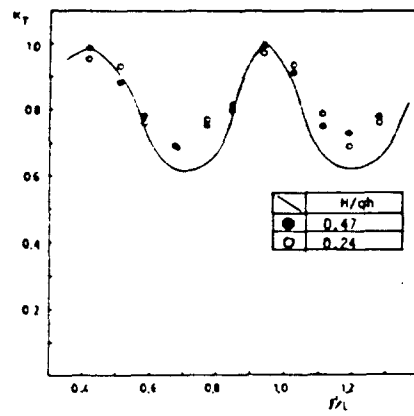
㉒  $T = 1.0(\text{sec}), W = 15(\text{cm})$



㉓  $T = 1.0(\text{sec}), W = 30(\text{cm})$



㉔  $T = 1.5(\text{sec}), W = 15(\text{cm})$



㉕  $T = 1.5(\text{sec}), W = 30(\text{cm})$

Fig. 6 반사율과 투과율에 대한 계산치와 실험치와 비교

(  $d = 24\text{cm}, l' = 0.8 - 3.0^m$ , — : 복렬잠제의 계산치, ○○○○ : 실험치 )

#### 4. 고 찰

##### ○ 잠제위에서의 쇄파한 계에 대한 실험 ( 실험 case 1 )

- (1) 잠제위에서의 쇄파한 계는 파고와 잠제위 수심비( $H/\delta$ ) 및 잠제폭과 파장비( $w/L$ )에 의해 거의 결정되며  $H/\delta$  가 크고  $w/L$  이 커질수록 쇄파가 잘되고 쇄파한 계는  $H/\delta = 0.35$ 로 나타났다.

##### ○ 잠제간 거리를 고정 ( $\delta' = 1.8 \text{ m}$ )시키고, 잠제높이를 변화시킨 실험 ( 실험 case 2 )

- (1) 파의 쇄파, 비쇄파에 관계없이 반사율과 투과율에 대한 계산치와 실험치는 잘 일치한다.
- (2) Fig. 5-①, ② 와 같이,  $(\delta-d)/\delta \leq 0.1$  인 영역의 투과율에 있어서 계산치와 실험치가 다소 큰차를 보이는 경우가 있으나, 투과율과 반사율 모두 파형경사 ( $H/L$ )의 크기에 관계없이 계산치와 실험치가 잘 일치한다.
- (3) 잠제폭이 같은 경우, 주기가 클수록 투과율이 작아진다.
- (4) 파형경사 ( $H/L$ )가 같은 경우, 잠제폭이 작을수록 투과율이 작아진다.

##### ○ 잠제높이를 고정 ( $d = 24 \text{ cm}$ )시키고, 잠제간 거리를 변화시킨 실험 ( 실험 case 3 )

- (1) 파의 쇄파, 비쇄파에 관계없이 반사율과 투과율에 대한 계산치와 실험치는 잘 일치한다.
- (2) 잠제폭이 같고 파고와 잠제위 수심비 ( $H/\delta$ ) 가 같은 경우, 주기가 클수록 투과율이 작아진다.
- (3) 파고와 잠제위 수심비 ( $H/\delta$ ) 가 같은 경우, 잠제폭이 작을수록 투과율이 작아진다.

## 5. 결 론

물두과성 복렬 잠제의 반사 및 투과효과에 대한 계산 및 실험결과를 검토하고 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 수심이 일정할때 미소진폭파 이론에 의한 반사율과 투과율의 계산치와 실험치는 파의 쇄파·비쇄파에 관계없이 잘 일치하며 비쇄파일때 보다 쇄파일때의 투과율이 작아짐을 확인하였다.
- 2) 잠제폭이 같은 경우, 주기가 클수록 투과율이 작아지고, 파영경사가 같은 경우 잠제폭이 작을수록 투과율이 작아짐을 확인하였다.
- 3) 복렬 잠제간거리를 1.8m 로 고정시키고 잠제높이를 변화시킨 실험에서  $(\kappa-d)/\kappa \leq 0.1$  인 영역의 투과율에 있어 계산치와 실험치가 다소 큰 차를 보이는 경우가 있는데 이는 미소진폭파 이론의 적용안개와 관계하는 어떤 요인이 있다고 생각한다.

## 참 고 문 헌

- 1) Newman, J. N., "Propagation of water waves over on infinite step", J. of Fluid Mech., Vol. 23, Part 2, pp. 399 ~ 415, 1965
- 2) Mei, C. C. and Black, J. L., "Scattering of surface wave by rectangular obstacles in water of finite depth", J. of Fluid Mech., Vol. 38, Part 3, pp. 499 ~ 511, 1969
- 3) 金山和雄·藤原輝男·田中宏平·戸原義男, "鉛直壁背後域への波の透過に関する研究", 第21回 海岸工学講演会 論文集, pp. 393 ~ 399, 1974
- 4) 金山和雄·田中宏平·藤原輝男·戸原義男, "薄鉛直壁背後域への波の透過に関する研究(2)", 第23回 海岸工学講演会 論文集, pp. 146 ~ 151, 1976
- 5) 井島武士·佐々木富雄, "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. 142 ~ 147, 1971
- 6) 井島武士·田淵幹修·湯村やす, "潜堤の効果に関する理論的研究(2)", 第19回 海岸工学講演会 論文集, pp. 177 ~ 183, 1972
- 7) 合田良実·竹田英章, "越波による防波堤背後への波高伝達率", 第13回 海岸工学講演会 論文集, pp. 87 ~ 92, 1966