

<論 文>

有孔防波堤에 대한 研究

—A Study on a Perforated Breakwater—

李 庸 揆*
Lee, Yong kyu

片 宗 根**
Pyun, Chong keun

安 守 漢***
Ahn, Soo hahn

Abstract

Both hydraulic and dynamic characteristics of a single perforated wall are studied theoretically and experimentally. Theoretically, the effect of evanescent modes on wave force acting on a single perforated wall is studied by use of the Horiguchi theory. The wave force on the perforated wall is presented to be insensitive to evanescent modes.

According to experimental study, The larger perforation ratio(γ) grows, the weaker the wave force on the wall becomes sensitively.

And in the small value of l/D (ratio of wall thickness(l) to hole diameter(D)) where the holes on the wall are regarded as orifice, the wave force on the wall is insensitive to the variation of l/D .

Energy loss coefficient f is estimated at 1.0 in this small value of l/D by use of Horiguchi theory.

But in the large value of l/D where the holes are regarded as pipe, the wave force on the wall is relatively sensitive to the variation of l/D and f is estimated at 1.5 by use of Horiguchi theory.

要 旨

單一有孔壁의 水理學的 特性 및 動力學的 特性에 대해서 이론 및 실험적으로 연구하였다. 掘口의 理論式을 응용하여 연구한 바에 의하면 散亂波항은 波力에 거의 영향을 주지 못함을 알 수 있고 실험에 의한 연구에 의하면 유공벽의 변화에 따른 波力의 거동은 매우 민감한 것으로 나타났지만 구멍의 지름에 대한 벽두께의 비(l/D)는 좀 특이한 현상을 보인다.

l/D 의 값이 작은 범위에서는 유공벽의 구멍을 orifice라고 할 수 있으므로, 波力이 l/D 의 변화에 거의 영향을 받지 않고, 이 때의 에너지 손실계수는 掘口의 式을 이용하면 1.0으로 나타난다.

그러나 l/D 의 값이 큰 범위에서는 구멍내의 흐름을 관수로의 흐름이라고 볼 수 있으므로 波力이 l/D 에 민감하고 이 때의 f 는 1.5로 나타났다.

*서울대학교 공과대학 토목공학과 대학원

**명지대학교 공과대학 토목공학과 부교수

***서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 序 論

1961년 Canada의 Jarlan¹⁾이 처음으로 유공판에 있어서 음파의 반사이론을 방파제에 적용하여 진벽이 유공벽이고 후벽이 무공벽인 소위 Jarlan형 caisson식 유공방파제를 제안한 후에 유공방파제에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. Boivin²⁾은 Jarlan형 방파제 모형에서 반사율을 실험으로 측정하며 Jarlan형 방파제의 효율성을 입증하였고, Terrett, osorio와 Lean³⁾은 반사율이 입사파의 주기에 민감함을 지적하였다. Marks⁴⁾는 chamber의 폭에 비해서 파장이 긴 경우보다 짧은 경우에 유공벽식 방파제가 더 효과적이며, 유공방파제가 받는 파력은 종래의 무공방파제에 작용하는 파력의 절반 정도가 됨을 밝혔다. Hattori⁵⁾는 연속 방정식과 Bernoulli 방정식 및 운동량방정식을 이용하여 단일 유공벽의 수리특성을 밝혔으며 이 경우 반사율을 유공율·파형경사 및 상대수심의 함수로 표시하였다. 小川과 時川⁶⁾은 연적유공벽에서 반사율, 전달율은 구멍직경의 대소에는 관계가 없고 유공율의 영향을 많이 받으며 유공율이 0.5 이상이면 공학적으로 가치가 없음을 주장하였다. 堀口⁷⁾는 속도 포텐셜을 유공방파제에 도입하여 이론적으로 파력을 구하여 齊藤⁸⁾ 등이 구한 실험치와 비교하였다.

우리나라에서는 편종근⁹⁾이 3중 유공벽식 caisson의 각 벽별 파력의 특성과 분포상황을 실험적으로 규명하는 동시에 堀口¹⁰⁾의 연구결과에서 제안된 이론이 3중 유공벽식 caisson에서의 적용타당성 여부에 대해서 연구하였다.

위와 같은 연구들에 힘입어 유공벽식 방파제가 각국에서 건설되고 있는데 1964년 comeau 항에 Jarlan형 유공벽식 방파제를 약 300 m 건설하였음을 cote와 simard¹¹⁾가 보고한 바 있고, 일본에서는 堀口의 이론식을 근거로 廣島港에 유공방파제를 시공하였고,¹²⁾ 小川 등의 실험을 근거로 室蘭港에 유공방파제를 건설하였다.¹³⁾ 우리나라도 북평항에 1978년에 설치한 바 있다.¹⁴⁾ 최근 일본에선 경사식 유공 caisson 수리모형에 대한 실험보고서¹⁵⁾도 나온 바가 있다.

지금까지의 연구결과에 의하면 유공방파제가 받는 파력이 무공방파제의 50%를 밑도는 것으로 밝혀졌다. 이처럼 작용 파력이 작으면 체체중량의 감소뿐 아니라 공사비도 절감되므로 유공벽식 방파제는 공학적으로 그 가치가 대단하다.

또한 松本 輝寺¹⁶⁾ 등의 연구에서 알 수 있듯이 유공방파제는 파랑을 막아 줄 뿐만 아니라 해수교란도 적

당히 해줄 수 있으므로 요즘 대두되는 수질보전의 측면에서 그 연구가 더욱 활발해 질 것으로 보인다.

본 논문은 단일 유공벽의 파랑에 대한 거동을 연구하여 실제의 방파제에 가까운 caisson식 다벽유공 방파제를 해석하는데 있어서 기초적인 자료를 주기 위함이다.

먼저 堀口의 이론식을 응용하여 산란파항이 파력에 미치는 영향에 대해서 이론적으로 연구해 보았고, 다음에 실험에 의해서 유공율과 구멍의 지름에 대한 벽 두께의 비가 파력에 미치는 영향에 대해서 조사해 보았다.

2.1 이론식^{17,18,19)}

그림 1과 같은 모델에서 유체를 비압축 비점성의 완전유체라 하고 비회전류라고 가정하면 2차원에서 이 흐름은 속도 포텐셜 $\phi(x, z, t)$ 을 가지며

다음의 Laplace 방정식을 만족한다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

경계조건을 사용하여 (1)식을 풀면 I 영역의 속도포텐셜은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_I = & \frac{ga}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(kx - \sigma t) \\ & + \frac{gb}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \cos(kx + \sigma t + \theta_1) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g}{\sigma} c_n \frac{\cos k_n h(z+h)}{\cos k_n h} \cos(\sigma t + \theta_{1n}) e^{k_n x} \dots(2) \end{aligned}$$

여기서 첫째항은 입사파항, 둘째항은 반사파항, 셋째항은 x축의 음의 방향으로의 산란파항을 나타낸다. 또한 a는 입사파의 진폭, b는 반사파의 진폭, c_n은 산란파의 진폭, θ₁은 반사파의 위상각, θ_{1n}은 산란파의 위상각, k는 파장을 L이라고 할 때 k=2π/L인 파수이고, σ는 주기를 T라 할 때 σ=2π/T인 角周波數이며 g는 중력 가속도이다.

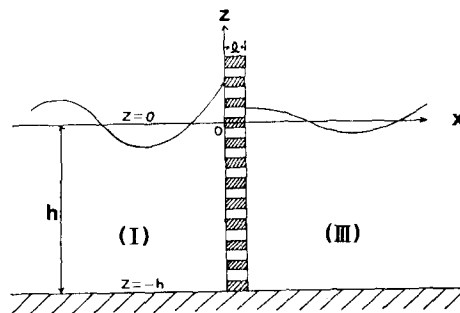


그림 1 Coordinate System

다음에 유공벽 후면(Ⅲ의 영역)의 속도 포텐셜은 전달파와 산란파항만 존재한다고 할 수 있으므로

$$\phi_{III} = \frac{g}{\sigma} d \cos(k(x-l) - (\sigma t + \theta_2)) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g}{\sigma} e_n \cos(\sigma t + \theta_{2n}) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} e^{-k_n(x-l)} \dots\dots(3)$$

이다. 여기서 d 는 전달파의 진폭이고 l 은 유공벽의 두께, e_n 은 산란파의 진폭, θ_2 는 전달파의 위상각, θ_{2n} 은 산란파의 위상각을 말한다.

2.2 경계 조건에 의한 연립방정식^{7,9,20)}

(1) 유체의 연속성

유공벽 전면의 유량과 후면의 유량이 같다는 조건을 사용한다. 먼저 유공판의 전면적을 A_t , 구멍의 총면적을 A_p 라고 하여 유공률 γ 를 다음과 같이 정의한다,

$$\gamma = \frac{A_p}{A_t} \dots\dots\dots(4)$$

유공벽과 구멍사이의 연속방정식에서

$$A_t \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial x} \right)_{x=0} = A_p V$$

이다. $\beta = \frac{1}{\gamma}$ 을 도입하여 윗식을 정리하면

$$V = \beta \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial x} \right)_{x=0} \dots\dots\dots(5)$$

가 된다. 여기서 V 는 구멍속의 평균 유속을 표시하며 ϕ_I 으로 표현되었다. I, III 영역간의 연속방정식에서

$$A_t \left(\frac{\partial \phi_I}{\partial x} \right)_{x=0} = A_t \left(\frac{\partial \phi_{III}}{\partial x} \right)_{x=l}$$

이다. 이것은 다시

$$\left(\frac{\partial \phi_I}{\partial x} \right)_{x=0} = \left(\frac{\partial \phi_{III}}{\partial x} \right)_{x=l} \dots\dots\dots(6)$$

이 된다. (2)식과 (3)식을 (6)식에 대입하여 정리하면

$$\frac{g}{\sigma} k \{ a \sin \sigma t - b \sin(\sigma t + \theta_1) \} \frac{\cos h k(z+h)}{\cosh kh} = \frac{g}{\sigma} k d \sin(\sigma t + \beta_2) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g}{\sigma} k_n e_n \cos(\sigma t + \beta_{2n}) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots\dots(7)$$

와 같이 된다. 그런데 분산 방정식 $\sigma^2 = gk \tanh kh = -gk_n \tan k_n h$ 의 조건하에서 직교성(orthogonality)에 의해서

$$\int_{-h}^0 \cosh k(z+h) \cos k_n(z+h) dz = 0 \dots\dots(8)$$

가 성립된다. 이 (8)식을 이용하기 위해서 (7)식에 $\cos k(z+h)$ 를 곱하여 $z = -h$ 에서 $z = 0$ 까지 z 에 대해서 적분하여 정리하면 다음과 같은 식이 나온다.

$$a \sin \sigma t - b \sin(\sigma t + \theta_1) = d \sin(\sigma t + \beta_2) \dots\dots(9)$$

(9)식은 t 에 대한 항등식이므로 $\sin \sigma t$ 와 $\cos \sigma t$ 의 항으로 나눠 각각의 계수합이 0이 되도록 하면

$$a - b \cos \theta_1 - d \cos \beta_2 = 0 \dots\dots\dots(10)$$

$$b \sin \theta_1 + d \sin \beta_2 = 0 \dots\dots\dots(11)$$

와 같이 2개의 연립방정식이 나온다.

다음에 분산방정식 조건하에서

$$I = \int_{-h}^0 \cos k_m(z+h) \times \cos k_n(z+h) dz$$

i) $m=n$ 이면

$$I = 0 \dots\dots\dots(12)$$

ii) $m \neq n$ 이면

$$I = \frac{1}{2} \left[h + \frac{1}{2k_n} \sin 2k_n h \right] \dots\dots\dots(13)$$

으로 된다. (12)식을 이용하기 위해서 (7)식에 $\cos k_n(z+h)$ 를 곱하여 $z = -h$ 에서 $z = 0$ 까지 적분하여 정리하면 다음과 같다.

$$c_n \cos(\sigma t + \theta_{1n}) = -e_n \cos(\sigma t + \theta_{2n}) \dots\dots\dots(14)$$

앞에서와 같이 $\sin \sigma t$ 와 $\cos \sigma t$ 의 항으로 분리하여 정리하면

$$c_n \sin \theta_{1n} + e_n \sin \theta_{2n} = 0 (n=1, 2, \dots, i) \dots\dots(15)$$

$$c_n \cos \theta_{1n} + e_n \cos \theta_{2n} = 0 (n=1, 2, \dots, i) \dots\dots(16)$$

와 같이 $2i$ 개의 연립방정식을 얻는다.

(2) 유공벽 전후면의 압력조건

구멍을 통과하는 흐름을 관수로의 흐름으로 보고 유공벽 전면과 후면의 손실 수두는 구멍속의 평균 유속 V 의 속도 수두에 비례한다고 가정하면 손실수두를 고려한 Bernoulli 방정식에서 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{p}{\rho} \right)_{x=0} - \left(\frac{p}{\rho} \right)_{x=l} = l \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f|v|v}{2} \dots\dots\dots(17)$$

여기서 f 는 에너지 손실계수를 말하는데 $f=1.5$ 로 취하였다.⁷⁾

계산에 편의를 도모하기 위해서 (17)식의 우변 제 2항의 $|V|$ 를 반주기에 걸친 V 의 평균치 \bar{V} 의 절댓치로 근사화시켰다.

여기서 $|\bar{V}|$ 는

$$|\bar{V}| = \frac{\sigma}{\pi} \left| \int \frac{\theta^*}{\sigma} + \frac{\pi}{\sigma} V dt \right|$$

이고 θ^* 는 속도 $|\bar{V}|=0$ 가 되는 위상각을 말한다.

(5)식에 (2)식을 대입하여 V 를 구하면

$$V = \frac{\beta g}{\sigma} k \{ a \sin \sigma t - b \sin(\sigma t + \theta_1) \} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta g}{\sigma} k_n c_n \cos(\sigma t + \theta_{1n}) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots\dots(18)$$

이다. $|\bar{V}|$ 는

$$|\bar{V}| = \frac{2}{\pi} \beta \frac{gk}{\sigma} (a \cos \theta^* - b \cos(\theta^* + \theta_1)) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi} \beta \frac{g}{\sigma} k_n c_n \sin(\theta^* + \theta_{1n}) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \dots\dots (19)$$

이고 θ^* 는 $|\bar{V}|=0$ 가 되는 위상각이므로 $\theta^* = \tan^{-1} \left[\frac{b \sin \theta_1 t \operatorname{anh} kh - \sum c_n \cos \theta_{1n} \tan k_n h}{(a - b \cos \theta_1) t \operatorname{anh} kh - \sum c_n \sin \theta_{1n} \tan k_n h} \right] \dots\dots (20)$

으로 나타난다. 그런데 파동의 기본식에서 압력방정식이

$$\frac{p}{\rho} = -\frac{\partial \phi}{\partial t} - gz \dots\dots\dots (21)$$

이므로 (17)식에 (18)식, (19)식, (21)식을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \{ga \sin \sigma t + gb \sin(\sigma t + \theta_1)\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & + \sum_n g c_n \sin(\sigma t + \theta_{1n}) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\ & - gd \sin(\sigma t + \theta_2) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & - \sum g e_n \sin(\sigma t + \theta_{2n}) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\ & = l \{ \beta g k a \cos \sigma t - \beta g k b \cos(\sigma t - \theta_1) \} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & - l \sum_n \beta g k_n e_n \sin(\sigma t + \theta_{1n}) \frac{\cos k_n(z+h)}{\cos k_n h} \\ & + \frac{f \beta^2 g^2 k^2}{\pi \sigma^2} (a \cos \theta^* - b \cos(\theta^* + \theta_1)) \times \\ & \quad (a \sin \sigma t - b \sin(\sigma t + \theta_1)) \\ & \times \frac{1}{\cosh^2 kh} \cosh^2 k(z+h) \\ & + \frac{f \beta^2 g^2}{\pi \sigma^2} k (a \cos \theta^* - b \cos(\theta^* + \theta_1)) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & \times \sum_m k_m c_m \cos(\theta^* + \theta_{1m}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\ & - \frac{f \beta^2 g^2}{\pi \sigma^2} k (a \sin \sigma t - b \sin(\sigma t + \theta_1)) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & \times \sum_m k_m c_m \sin(\theta^* + \theta_{1m}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \\ & - \frac{f \beta^2 g^2}{\pi \sigma^2} \left\{ \sum_m k_m c_m \sin(\theta^* + \theta_{1m}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \right. \\ & \left. \times \left\{ \sum_m k_m c_m \cos(\sigma t + \theta_{1m}) \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \right\} \dots\dots (22) \right. \end{aligned}$$

앞의 경우와 마찬가지로 (22)식에 $\cosh k(z+h)$ 를 곱하여 $z=-h$ 에서 $z=0$ 까지 적분하여 $\sin \sigma t$ 와 $\cos \sigma t$ 이 항으로 각각 나뉘어서 2개의 연립방정식을 얻고, (22)식에 $\cos k_n(z+h)$ 를 곱하여 $z=-h$ 에서 $z=0$ 까지

적분하여 같은 방법으로 2개의 연립 방정식을 얻는다.

따라서 식이 $4(i+1)$ 개가 된다. 그런데 미지수도 $b, d, \theta_1, \theta_2, c_n, e_n, \theta_{1n}, \theta_{2n} (n=1, 2, 3, \dots, i)$ 으로 $4(i+1)$ 개이므로, 미지수들은 모두 구해질 수 있다.

먼저 θ^* 를 가정하고 다음에 연립방정식의 계수에 있는 미지수를 가정하여 축차근사법으로 연립방정식을 푼다.

2.3 파력 (Wave Force)

유공벽 전면에서 작용하는 파력 F_I 은 (21)식을 이용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_x &= \int_{-D}^{\eta} P_I dz \\ &= \rho g (a \sin \sigma t + b \sin(\sigma t + \theta_1)) \\ & \quad \times \frac{\sinh k(\eta_1 + h) - \sinh k(h-D)}{k \cosh kh} \\ & \quad + \sum \rho g c_n \sin(\sigma t + \theta_{1n}) \\ & \quad \times \frac{\sin k_n(\eta_1 + h) - \sin k_n(h-D)}{k_n \cos k_n h} \\ & \quad - \frac{1}{2} \rho g \eta_1^2 + \frac{1}{2} \rho g D^2 \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

여기서 η_1 는 자유수면의 식이며

$$\eta_1 = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi_I}{\partial t} : z=0, x=0$$

이다. 같은 방법으로 후면의 파력 F_{III} 는

$$\begin{aligned} F_{III} &= \rho g d \sin(\sigma t + \theta_2) \frac{\sinh k(\eta_{III} + h) - \sinh k(h-D)}{k \cosh kh} \\ & \quad + \sum \rho g e_n \sin(\sigma t + \theta_{2n}) \\ & \quad \times \frac{\sin k_n(\eta_{III} + h) - \sin k_n(h-D)}{k_n \cos k_n h} \\ & \quad - \frac{1}{2} \rho g \eta_{III}^2 + \frac{1}{2} \rho g D^2 \end{aligned}$$

이다. 여기서 D 는 물에 잠긴 유공판의 길이이다. 유공벽이 실제로 받는 힘 F_t 는

$$F_t = (1 - \gamma) \times (F_{II} - F_{III}) \dots\dots\dots (24)$$

로 구할 수 있다.

2.4 산란파의 영향

수심 $h=47$ cm, 수면에서 mound까지의 수심 $h_D=35$ cm, 주기 $T=1.7$ sec, 파고 $H=10, 15, 17.5, 20$ cm, 유공율 0.2인 모델에서 산란파향이 증가함에 따라 파력이 표 1과 같이 변한다.

이 표에서 알 수 있듯이 산란파고려시가 비교려시보다 큰 파력치를 가지며 산란파향을 3개 이상 고려하면 그 값의 변화는 거의 없다. 하지만 산란파향 고려시의 파력증가분이 비산란파향의 2% 이내의 아주 작은 값이므로 대개의 경우는 무시해도 좋을 것 같다.

표 1 산란파의 영향

파 고 H(cm)	파 력 : F (kg)				
	고려한 산란파의 갯수				
	0	1	3	5	10
10	4.71	4.74	4.74	4.74	4.74
15	9.42	9.46	9.45	9.45	9.45
17.5	12.31	12.35	12.34	12.34	12.34
20	15.58	15.61	15.61	15.60	15.60

(T=1.7 sec, $\gamma=0.2$)

3. 실험에 의한 연구

3.1 실험 장치²¹⁾

서울 대학교 공과대학 토목공학과 수리실험실에 있는 총길이 21 m, 폭 0.6 m, 깊이 1.0 m의 피스톤형 2차원 조파수로에서 실험을 하였다.

파고는 용량식 피고계를 사용하여 측정하였고, 파력은 strain gage를 이용하였다. 실험은 규칙파를 대상으로 하고 조파기에서 발생한 파랑이 방파제에서 반사되어 조파기에 되돌아오기 이전의 파랑을 사용하여 반사파의 영향을 배제하였다. 사용한 실험의 제원은 다음과 같다.

- 수심(h) : 0.5 m
- 파고(H) : 15 cm, 17.5 cm, 20 cm
- 주기(T) : 1.7 sec, 1.9 sec, 2.0 sec
- 유공율(γ) : 0.2, 0.25, 0.3
- 벽두께(l) : 0.8 cm, 1.5 cm, 3 cm, 6 cm

3.2 파력 계산 방법^{8,22)}

그림 2와 같이 하부 gage(D-gage)와 상부 gage(U

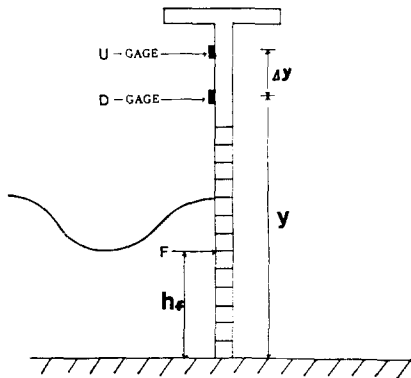


그림 2 Definition about Wave Force

-gage)를 Δy 의 간격을 두고 부착하여 두 지점의 변형율(strain)을 측정하며 외관보 구조물 해석에 의해서 작용 파력 F는 다음과 같이 된다.

$$F = \frac{EZ}{\Delta y} (\epsilon_U - \epsilon_D) \dots\dots\dots(26)$$

여기서 E는 Young 윌, z는 강봉의 단면 제수, ϵ_U 와 ϵ_D 는 각각 상하부 gage 지점의 strain을 말한다.

3.3 실험 결과 분석

3.3.1 유공율(γ)의 영향

파고와 주기를 앞의 실험제원과 같이 여러가지로 변화시켜서 나온 파력을 유공율이 받는 파력의 몇 %가 되는지 백분율로 환산하여 평균하면 $\gamma=0.2$ 이면 39%, $\gamma=0.25$ 이면 31%, $\gamma=0.3$ 이면 23%로 나타났다. 여기서 알 수 있는 것은 유공율이 클수록 작용파력(F)이 현저히 작아진다는 것이다. 그런데 그림 3에서 알 수 있듯이 유공율이 클수록 전달율(K_t)도 커지므로 유공율을 크게 하는데도 어느 정도의 한계가 있다. 요구되는 전달율과 파력의 조건에서 적절한 유공율을 선정할 수 있겠다.

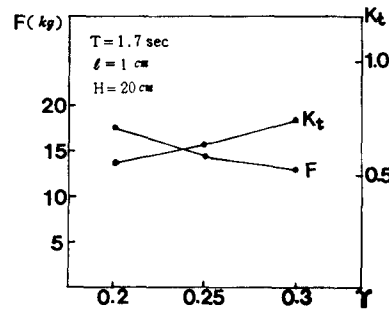


그림 3

3.3.2 유공벽 두께의 영향

유공율을 $\gamma=0.25$ 로 고정시키고 파고와 주기를 변화시켜서 나온 파력을 평균하여 유공벽에 대한 비로 환산하면 다음과 같다.

$$l/D = \frac{1}{4} \text{이면 } 0.27, \quad l/D = \frac{1}{2} \text{이면 } 0.26,$$

$$l/D = 1 \text{ 이면 } 0.27, \quad l/D = 2 \text{ 이면 } 0.37$$

이 값들과 그림 4에서 알 수 있듯이 $l/D=1$ 이 될 때까지 파력은 l/D 에 거의 무관하다가 $l/D=1$ 을 넘으면 파력이 l/D 의 값에 민감한 반응을 보인다.

Hattori는 유공벽의 파력이 구멍지름에 대한 벽두께비(l/D)의 함수라고 했지만 본 실험의 결과에 의하면 벽두께의 비가 작은 경우에는 구멍내의 흐름을

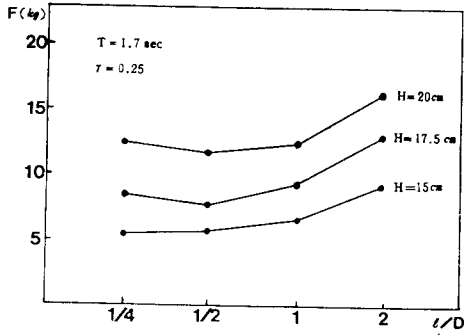


그림 4 l/D에 대한 파력

orifice를 통한 흐름으로 볼 수 있으므로 파력이 l/D의 영향을 거의 받지 않고 l/D의 값이 어느 정도 이상 커지면 구멍내의 흐름을 관수로의 흐름이라고 볼 수 있으므로 파력이 l/D의 변화에 매우 민감한 반응을 보여서 l/D의 값이 클수록 파력이 증가되는 것으로 해석된다.

堀口의 이론식에서 에너지 손실계수 $f=1.0$ 으로 가정하면 l/D의 값이 작은 orifice 영역에서 이론 파력치

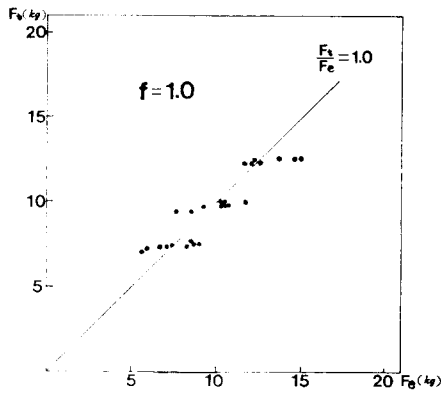


그림 5 orifice 영역의 파력비

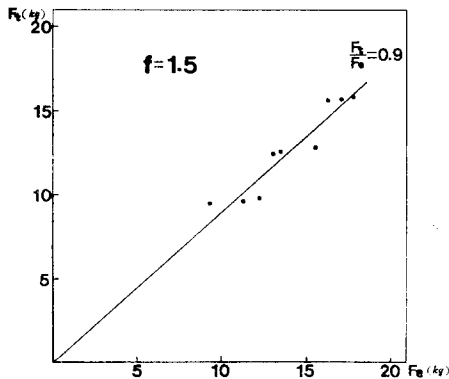


그림 6 관수로 영역의 파력비

(F_v)와 실험파력치(F_e)는 <그림 5>에서와 같이 거의 같은 값을 가진다.

반면에 l/D의 값이 큰 관수로의 영역에서는 $f=1.5$ 로 증가되었을 때 비로소 F_v 와 F_e 가 거의 일치한다. (그림 6 참조)

이론적으로 orifice에서의 에너지 손실계수는²³⁾

$$f = \left(\frac{1}{c_v^2} - 1 \right) \quad (c_v : \text{coefficient of viscous resistance})$$

이다. short tube인 경우에 $c_v=0.8$ 로 제안되었지만 여기서는 $c_v=0.7$ 로 가정하면

$$f \approx 1.0 \text{으로 위에 구한 } f \text{와 같이 된다.}$$

따라서 본 연구에 의하면 orifice 영역에서는 $f=1.0$ 이고 관수로 영역에서는 $f=1.5$ 임을 알 수 있다.

4. 結 論

본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 단일 유공벽 모델에서는 산란파향이 파력에 거의 영향을 미치지 못한다.
2. 유공율이 클수록 유공벽에 작용하는 파력은 현저히 감소한다.
3. 구멍속의 흐름을 orifice의 흐름이라고 가정할 수 있는 범위인 l/D가 작은 값일 때 파력은 l/D에 무관하고 작은 값을 가지며, l/D의 값이 커져서 관수로의 흐름으로 볼 수 있는 영역에서는 파력이 l/D에 민감하여 그때의 파력치는 커진다.

Steimer¹⁷⁾의 이론을 응용하여 무공방파제에서 산란파향의 영향에 대한 연구가 계속되기를 바라고, 다공벽식 다벽 방파제에서의 본 연구의 타당성에 대한 연구가 계속되기를 바란다.

謝 辭

本 研究는 1985年度 一部 文教部の 學術研究 造成費에 의하여 이루어진 것이며, 文教部 當局에 感謝의 말씀을 드리는 바이다.

參考文獻

1. Jarlan, G.E., *A Perforated Vertical Wall Breakwater*, The Dock and Harbour Authority, No. 486, April, 1961, pp.394—398.
2. Boivin, R., *Comments on Vertical Breakwaters with Low Coefficients of Reflection*, The Dock and Harbour Authority, June, 1964, pp.56—61.

3. Terrett, F.L., Osorio, J.D.C. and Lean, G.H., *Model Studies of a Perforated Breakwater*, Proc. of 11th Conference on Coastal Eng., A.S.C.E., Vol. III, 1968, pp.1104—1120.
4. Marks, W., *A Perforated Mobile Breakwater for Fixed and Floating Application*, Proc. of 10th Conference on Coastal Eng., A.S.C.E., Vol. 3, 1966, pp.1079—1129.
5. Hattori, M., *Transmission of Waves through Perforated Wall*, Coastal Eng. in Japan, Vol. 15, 1972, pp.69—79.
6. 小川達彦, 時川和夫, 多孔型 Caisson Type 消波防波堤の特性, 第23回 海岸工学講演會 論文集 1976, pp.106—111.
7. 堀口孝男, 他, 多孔壁式防波堤に消波構造と波力, 第23回 海岸工学講演會論文集, 1976, pp.89—94.
8. 齊藤晃, 小菅晋, 多孔 Caisson 堤に作用する波力とその透過波に関する實驗研究, 國土綜合開發株式會社, 1974.
9. 片宗根, 유공 Caisson 식 방파제에 작용하는 파력에 관한 研究, 博士論文, 서울大學校, 1980.
10. 堀口孝男, 他, 兩面多孔壁消波構造の水利解析 第24回 海岸工学 講演會論文集, 1977, pp.276—287.
11. Cote, G.J. and Simard, G.R., *The Breakwater Quay at the Bay of Comeau*, The Dock and Harbour Authority, April, 1964, pp.372—376.
12. 日本運輸省 第三港灣建設局, 廣島港設計 計算書, 昭和 53年 3月(1978)
13. 岩田邦彦, 他, 特殊防波堤の開発, 北海道 開發局 土木試驗所報告, 第67號, 1977.
14. 安守漢, 유공 Caisson 식 방파제에 관한 調査研究, 建設部, 1978.
15. 日本テトラド株式會社, 傾斜式有孔ケーソン水理模型實驗報告書, 1985.
16. 松本輝壽, 他, 直立消波透過型防波堤の波浪ねよび通水特性に関する 實驗的 研究, 第23回 海岸工学講演會論文集, 1976, pp.112—116.
17. Steimer, R.B., *An Eigenvalue Wave Analysis of a Fixed Semi-immersed Rectangular Structure*, a Master's Thesis, Oregon State University, 1977, pp.16—54.
18. Sollitt, C.K., *Lecture Note of Coastal Hydraulics*, Oregon State University, 1981, Chapter V.
19. Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, 1984, pp.170—186.
20. 堀孝孝男, 他, 多孔壁消波構造の水利, 第25回 海岸工学 講演會論文集, 1978, pp.347—351.
21. 한진, 고리 원자력발전소의 호안·방파제 단면에 대한 수리 실험보고서, 한진, 1985, pp.18—21.
22. Timoshenko, S.P. and Gere, J.M., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, 1972, pp.113—122.
23. Vennard, J.K. and Street, R.L., *Elementary Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, 1976, pp.557—563.