

전면이 경사된 고정식 진동수주형 파력발전기의 수치해석 및 실험

김 성 근

제주대학교 해양연구소

An Experiment and Numerical Analysis of Wave Energy Conversion Device of Front-sloped Caisson Type

Seoung-gun Kim

Marine Research Institute, Cheju National University, Cheju-do 695-810, Korea

In this numerical analysis, the extracted efficiency is based on the thermodynamics and wave-kinematics method and the wave power per wave crest width. Model experiment is conducted for the two dimensional front-sloped caisson type. The experimental results are compared with the theoretical values. The extracted power is discussed in comparison with the oscillating water column and wind velocity at orifice.

Key Words : Wave Energy Conversion Device, Caisson, Thermody-namics and Wave-Kinematic Method, Orifice Ratio, Wind Velocity

서 론

고정식파력발전기에 관한 최초의 실험은 1983년 일본 북서연안에 위치한 유가다지역에서 이루어졌으며(前田, 1984), 1992년에는 노르웨이 수압면형에 대한 상업적인 실험을 수행하고 있다(Vadus, 1991). 이외에도 해양선진국가에 의하여 꾸준히 연구되어 지고 있으며, 특히, 세계 각국은 21세기의 대체에너지에 대한 관심 고조와 필요성으로 인하여 꾸준히 연구를 수행하고 있으며, 국내에서의 연구는 해양연구소의 파랑에너지에 관한 조사 결과(송원호 등, 1980), 울산대학교-현대중공업의 공동연구결과(박 등, 1993) 한국기계연구원의 실험역 실험준비 등이

있다.

본 논문에서는 열역학적인 측면과 파동 역학적인 측면을 고려함으로써 고정식 진동수주형 파력발전기의 흡수효율 추정에 정도가 높은 것으로 알려진 열역학법[5]에 의한 수치해석 프로그램을 자체 개발하여 이를 소개하고, 전면이 경사된 파의 에너지를 경제적으로 흡수할 수 있도록 설계된 모델에 대하여 적용한 결과를 보고자 한다. 또한, 전면이 경사된 2차원 모델을 설계·제작하여 실험을 수행한 결과를 수치해석한 결과와 비교하였다.

이상의 결과로부터 입사파의 변화에 따른 오리피스 개구율의 변화가 파력발전기의 흡수효율에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

열역파동법

열역파동법은 기체상태방정식으로부터 진동수 주내의 에너지 보존식을 유도하고 수주내 공기실의 체적, 온도, 압력의 변동을 고려하여 각 계수들을 추정하고 있다. 특히 임의로 정한 수주내 변위를 입사파, 반사파 그리고 수주내의 파(Standing)의 관계를 반복적인 방법으로 재결정하는 방법을 택하고 있다. 최종적으로 잘 알려져 있는 한 주기의 파에 따른 공기의 힘에 앞서 구한 계수들 대입하여 흡수파력을 추정하고 있다.

진동수주내 공기는 완전기체로 가정할 경우, 완전 기체의 상태방정식은 다음과 같다.

$$P_a V_a = R T_a \tag{1}$$

여기서 P_a 는 공기실내 공기압력

V_a 는 공기실내 공기의 비체적

R 는 공기실의 기체상수

T_a 는 공기실내 공기의 온도

공기실내 질량에 대한 연속방정식은 아래와 같다.

$$d(\rho_a V) + \dot{m} dt = 0 \tag{2}$$

식(2)의 \dot{m} 는 공기의 질량 변화율로서 공기속도 W_p 에 선형적인 값으로 표현된다.

$$\dot{m} = \rho_a C_d \epsilon A_w W_p \tag{3}$$

여기서 $W_p = \pm \phi \sqrt{2 C_p |T_a - T_0|}$

C_d 는 오리피스의 측류계수

ϵ 는 오리피스의 개구율(A_n/A_w)

A_n 는 오리피스의 면적

A_w 는 수주내 면적

ϕ 는 오리피스의 속도계수

C_p 는 정압비열

T_0 는 공기실의 공기의 온도

식(1)을 식(2)에 대입하면 다음과 같이 비선형 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{P_a V_a}{R T_a} \right) + \dot{m} = 0 \tag{4}$$

공기실내의 에너지 보존에 대하여는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_a \frac{dV}{dt} + C_v \frac{d}{dt} \left(\frac{P_a V}{R} \right) + \dot{m} C_p T_a = 0 \tag{5}$$

여기서 C_v 는 정적비열

비선형방정식인 식(4)와 식(5)을 풀기 위해서는 시간에 따라 체적(V), 온도(T_a), 그리고 압력(P_a)의 변화가 아주 작다고 가정한다면, 수주내 진폭(a_0)에 의하여 다음과 같이 선형적인 함수로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} V^* &= V - V_0 \\ &= -A_w a_0 \sin(\omega t) \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} T^* &= T_a - T_0 \\ &= \alpha T_0 \sin(\omega(t+\tau)) \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} P^* &= P_a - P_0 \\ &= \beta P_0 \sin(\omega(t+\tau)) \end{aligned} \tag{8}$$

식(6),(7),(8)를 식(4),(5)에 대입하고 $\omega(t+\tau)=0$ 혹은 $\pi/2$ 라 하면 다음과 같이 $\alpha, \lambda, \omega\tau$ 를 결정할 수 있다.

$$\alpha = (\gamma - 1) \frac{a_0}{D_0} \cos(\omega\tau) \tag{9}$$

$$\beta = \gamma \frac{a_0}{D_0} \cos(\omega\tau) \tag{10}$$

$$\cos(\omega\tau) = \pm \sqrt{1 + K^2} - K \tag{11}$$

여기서 $K = (C_d \phi \epsilon)^2 (\gamma - 1) \frac{C_p T_0}{(\omega D_0)^2} \frac{D_0}{a_0}$

D_0 는 공기실의 높이

a_0 는 수주내 진폭

γ 는 비열비

입사파, 반사파 그리고 투과파의 관계와 공기의 압축반응을 고려하고 식(9),(10),(11)을 사용하여 입사파와 공기의 반응에 관련된 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$a_1 = 0.5a_0[(A_0 f(kh, kd_c) \sin \omega r \cos \omega r + kB)^2 + (A_0 f(kh, kd_c) \cos^2 \omega r + KB / \tan kB)^2]^{1/2} \quad (12)$$

여기서

$$f(kh, kd_c) = \frac{2 \cosh kh \sinh k(h-d_c)}{\cosh k(h-d_c) \sinh kh + k(h-d_c)}$$

$$A_0 = \frac{\gamma P_0}{\rho_w g D_0}$$

d_c 는 앞벽면 높이
 h 는 수심
 B 는 공기실내의 폭

한편, 한 파장당 공기의 에너지는 다음과 같다.

$$W_a = \frac{-1}{T} \int_0^T P dV \quad (13)$$

식(6),(7),(8),(11) 등으로부터 (13)식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_a = \frac{1}{2} \frac{\gamma P_0 \omega A_w}{D_0} a_0^2 \sin \omega r \cos \omega r \quad (14)$$

그리고 폭이 l_B 인 파의 초당 에너지는 아래와 같다.

$$W_l = \frac{1}{8} \rho_w g H^2 C_g l_B \quad (15)$$

여기서 C_g 는 Group Velocity

이 방법에서의 효율(EFF_a)은 다음과 같이 정의한다.

$$EFF_a = W_a / W_l \quad (16)$$

전면이 경사된 2차원수주 모델의 수치해석 결과 및 실험

본 실험에서 사용한 모델은 Takahashi가 실험역 실험을 행한 모델의 공기실 형상을 다소 변경, 응용한 것이며, 전면이 경사된 모델의 실험목적은 실험역 실험에 필요한 자료와 개념설계 자료를 얻는데 있다.

방파제 겸용으로 이용할 수 있는 파력발전기 실험모델의 치수와 형상을 Table 1과 Fig. 1에 나타내었으며, 실험은 다음과 같은 내용에 대하여 수행되었다.

- 오리피스스의 개구율 변화
- 파고 및 파주기의 변화
- 수주내의 파형
- 오리피스를 통과하는 풍속의 계측

Table 1. Dimension of Sloped Front Wall Caisson and Experiment Condition

LENGTH (L ₀)	0.28 m		
BREADTH (B)	0.08 m (0.18)		
HEIGHT (D)	0.2 m	$\epsilon = h_p/h_w$	0.01, 0.0667, 0.005
DRAFT (d)	0.15 m	h/λ	0.01, 0.02, 0.03
FRONT WALL DEPTH (L ₁)	0.02 m	h/λ	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.31, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5
WATER DEPTH (h)	0.15 m	PROGRAM	C110.FOR
ORIFICE RATIO (e)	0.01 ~ 0.005	DATA	C11
WAVE HEIGHT (H)	0.01 ~ 0.03m	OUTPUT	C01, C02=> $\epsilon = 1 / 100$ C03, C04=> $\epsilon = 1 / 150$ C05, C06=> $\epsilon = 1 / 200$
WAVE LENGTH (L)	0.5 ~ 1.3 m		

오리피스스의 변화는 $\epsilon = 0.01, 0.0667, 0.005$, 파형의 변화는 $h/\lambda = 0.1 \sim 0.5$ 인 경우에 대하여 실험되었으며, 수주내의 파형 및 오리피스를 통과하는 풍속을 계측하였다. 이때 얻어지는 수주내의 파형을 이용하여 흡수효율의 실험치를 산정한다.

전면이 경사된 모델의 흡수파력 추정결과는 수치해석을 통한 이론치와 실험 산정치를 비교하여

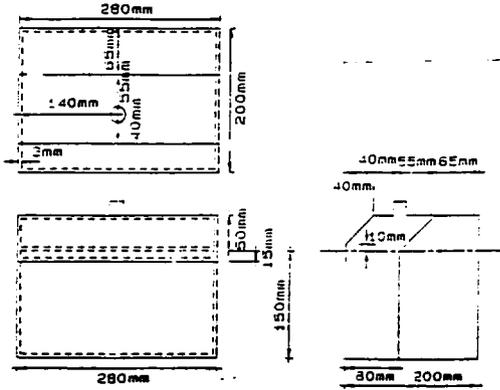


Fig. 1. Configuration of Sloped Front Wall Efficiency

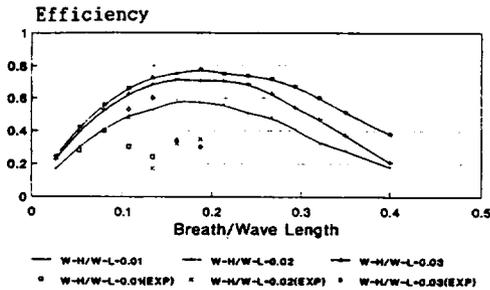


Fig. 2. Extracted Efficiency for Sloped Front Wall Caisson Model in case of $\epsilon=1/100$ Efficiency

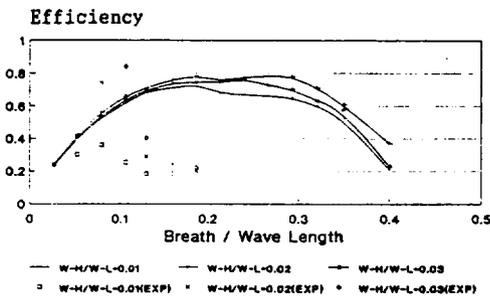


Fig. 3. Extracted Efficiency for Sloped Front Wall Caisson Model in case of $\epsilon=1/150$ Efficiency

Fig. 2, Fig. 3 그리고 Fig. 4에 나타내었다. 전반적으로 이론의 결과는 BI/λ 가 0.2~0.25에서 좋은 효율을 나타내고 있으나, 실험에서는 2차원 조파

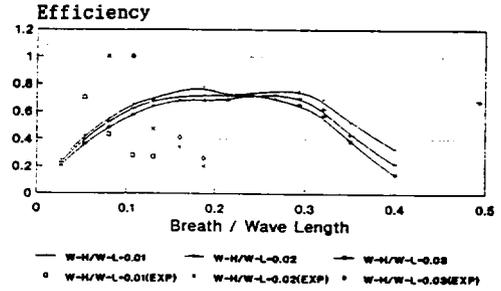


Fig. 4. Extracted Efficiency for Sloped Front Wall Caisson Model in case of $\epsilon=1/200$

수조의 성능 제약으로 $BI/\lambda=0.2$ 이후에 대한 실험을 수행하지 못한 이유도 있지만, $BI/\lambda=0.15$ 근방에서 상대적으로 높은 효율을 보이고 있다. 이러한 결과와 더불어 수주내의 체적, 온도 그리고 압력의 변화가 선형적이며, 작다고 가정된 식(6), (7), (8)에 의하여 열역과동법이 특정한 파장의 범위에서 정도가 높은 결과를 나타낼 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 이론치와 실험치의 정량적인 오차는 계측의 정확성과 결과 해석방법에 대한 개선 혹은 수치계산시 Iteration방법의 개선이 필요한 것으로 생각된다.

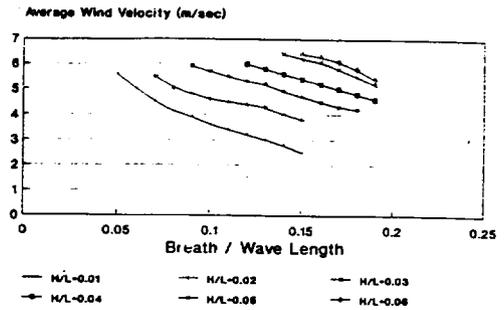


Fig. 5. Wind Velocity for Sloped Front Wall Caisson Model in case of $\epsilon=1/100$

이론적인 결과들을 살펴보면 오리피스 개구율이 큰 경우는 파형기울기의 증가에 따라 순서대로 효율이 증가하고 있으나, 오리피스 개구율이 작아지면 파형기울기의 증가에도 불구하고 효율은 전반적으로 역순으로 되고 있다. 그러나 실험 결과는 오리피스 개구율에 관계없이 파형기울기

의 증가에 따라 효율이 극단적인 부분(오리피스 개구율이 크고, 파형기울기는 작은 경우 그리고 반대되는 경우)에서 조금은 반대되는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

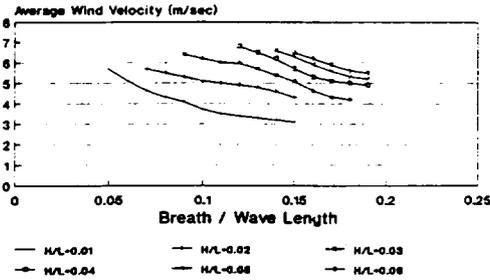


Fig. 6. Wind Velocity for Sloped Front Wall Caisson Model in case of $\epsilon=1/150$

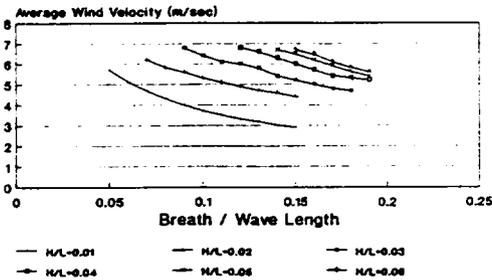


Fig. 7. Wind Velocity for Sloped Front Wall Caisson Model in case of $\epsilon=1/200$

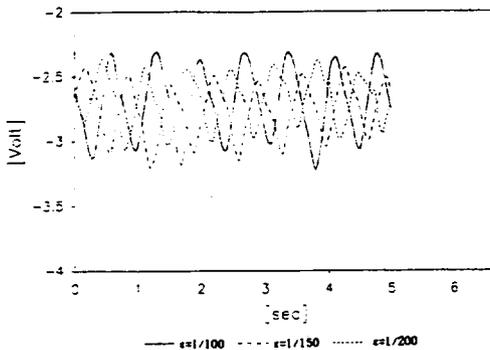


Fig. 8. Comparison of Wave Pattern in Water Column according to Orifice Ratio ($H=20.60\text{mm}$, $\lambda=628.6\text{mm}$)

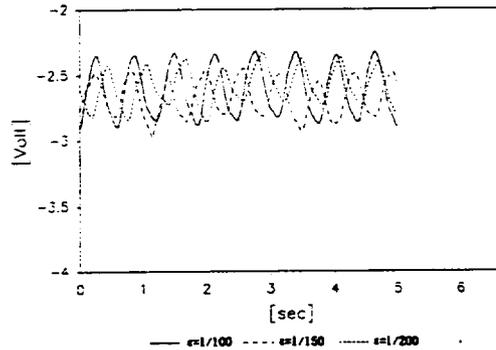


Fig. 9. Comparison of Wave Pattern in Water Column according to Orifice Ratio ($H=17.75\text{mm}$, $\lambda=530.9\text{mm}$)

Fig. 5, 6, 7에는 오리피스 단면을 통과하는 파장에 따른 풍속의 변화를 나타내었으며, 파형기울기가 증가됨에 따라서는 상대적으로 바람직한 결과를 보여주지 못하는 것으로 보아 오리피스 단면은 파형기울기와 상당히 밀접한 관계에 있음을 알 수 있다.

전면이 경사된 2차원 모델실험에서 샘플링된 결과들 중 오리피스 단면의 변화에 따른 수주내부 파형을 비교할 수 있도록 Fig. 8, 9에 나타내었으며, 오리피스 단면의 영향으로 인한 파형의 변화를 볼 수 있다.

결론

일정한 입사파에서 오리피스의 변화에 따른 내부수주의 파형 변화와 일정한 오리피스 개구율에서 입사파의 변화에 따른 흡수효율의 변화 형태는 입사파에 따른 오리피스 개구율의 제어가 고정식 진동수주형 파력발전기의 흡수효율의 향상에 기여할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 참고문헌(김성근 등, 1996)과 비교하여 볼 때 전면이 경사됨으로써 효율이 증가되고 있음을 알 수 있으며 이는 수직벽에 의하여 반사되는 에너지를 감소시키고 있는 것으로 생각된다.

참고문헌

김 성 근

- 前田久明, 1984. 波浪エネルギー利用技術, 第 1回
波浪エネルギー 利用 シンポジウム , G-3,
pp. 49~61.
- J.R.Vadus, 1991. Global Environment and
Engineering (特別講演), 第10回海洋工学シン
ポジウム, 日本造船學會, pp1~15.
- 송원호외, 1980. 파력발전에 관한 기초조사, 한국
과학기술원 해양연구소 보고서.
- 박노식·김성근·박인규외, 1993. 파력발전시스템
개발에 관한 연구", 울산대학교·현대중공업

공동연구수행 최종보고서.

- Shigeo Takahahi, 1988. A STUDY ON DESIGN
OF A WAVE POWER EXTRACTING
CAISSON BREAKWATER, JAPAN. Wave
Power Laboratory, Port and Harbour
Research Institute.
- 김성근·박노식·박인규, 1996. 고정식 진동수주
형 파력발전기에 관한 실험적 연구", 한국해
양공학회지, 10(2), 136~145.