

## 고정식 진동수주형 파력 발전장치의 챔버 유동 및 파에너지 변환효율 해석

구원철<sup>†\*</sup>, 김무현<sup>\*\*</sup>, 최윤락<sup>\*</sup>

울산대학교 조선해양공학부<sup>\*</sup>  
텍사스 A&M 대학교 토목공학과<sup>\*\*</sup>

### Numerical Analysis of Chamber Flow and Wave Energy Conversion Efficiency of a Bottom-mounted Oscillating Water Column Wave Power Device

Weon-Cheol Koo<sup>†\*</sup>, Moo-Hyun Kim<sup>\*\*</sup> and Yoon Rak Choi<sup>\*</sup>  
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan<sup>\*</sup>  
Dept. of Civil Engineering  
Texas A&M Univ., College Station, TX, USA<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

A two-dimensional time-domain, potential-theory-based fully nonlinear numerical wave tank (NWT) was developed by using boundary element method and the mixed Eulerian-Lagrangian (MEL) approach for free-surface node treatment. The NWT was applied to prediction of primary wave energy conversion efficiency of a bottom-mounted oscillating water column (OWC) wave power device. The nonlinear free-surface condition inside the chamber was specially devised to represent the pneumatic pressure due to airflow velocity and viscous energy loss at the chamber entrance due to wave column motion. The newly developed NWT technique was verified through comparison with given experimental results. The maximum energy extraction was estimated with various chamber-air duct volume ratios.

※Keywords: Oscillating water column(진동 수주), Chamber(챔버), Numerical wave tank(수치 파수조), Pneumatic pressure (공기압), Viscous energy loss(점성 에너지 손실), Wave energy extraction(파력 추출)

## 1. 서론

급속한 에너지원 고갈에 대비하여 새로운 에너지원의 창출이 시급한 현실에서, 해양 에너지의 이용은 그 규모나 환경 친화적인 면에서 가장 이상적이지만, 기술 개발의 어려움 등으로 아직까지 실용적, 경제적 규모의 에너지 생산을 하지 못하고 있다. 특히 해양 파력은 해양 에너지 중 가장 거대한 에너지원이지만, 해양파의 불규칙성과 불연속성으로 인해 에너지 효율 면에서 많은 제약을 가지고 있다. 따라서 이에 대한 다양하고 포괄적인 연구와 기술 개발이 필요하다.

본 연구에서는 해양 파력 발전 시스템 중 장비 유지 보수의 편의성이 좋고 현재 실용적 모델로 몇몇 지역에 이미 설치 운용되고 있는 고정식 진동 수주형(Oscillating water column) 구조물에 대한 해양공학적인 분석을 위해 수치 해석 모델을 개발하고, 기존 실험 결과와 비교하여 해의 정확성을 입증하였다. 또한 다양한 매개변수 계산을 통해 발전효율에 미치는 영향을 조사하였다.

진동수주형 파력 발전기는 공기 챔버가 설치된 구조물에 입사파로 인한 챔버의 자유표면 변위로 인해 발생하는 공기흐름을 공기유동식 터빈을 통해 에너지를 추출하는 방식이다. 이때 사용되는 터빈은 입사파에 의한 공기 유동의 방향에 관계없이 일정하게 작용할 수 있는 웰스(Wells) 터빈이나 임펄스(Impulse) 터빈 등이 사용된다. 이 같은 진동 수주 방식의 발전 모델은 Masuda and Miyazaki (1979)에 의해 처음 제안되었고 그 후 Washio et al. (2000) 등에 의해 실험적인 연구가 진행되었으며 최근 한국 해양 연구원등에서도 유사 실험이 실시 되었다(김상호 외, 2009). 현재 세계 여러 지역에 고정식 진동 수주형 발전 시스템이 설치되어 있는데, 그중 2000년 영국 스코틀랜드에 설치된 Land Installed Marine Powered Energy Transformer(LIMPET)은 세계 최초로 전력망(Grid)에 연결되어 운영되는 파력 발전 시스템

으로 알려져 있다 (Heath et al., 2000).

진동 수주형 파력 발전기는 구조물의 운동 성능에 따라 고정식과 부유식으로 분류할 수 있다. 부유식 발전기 모델은 최근 많은 연구자에 의해 수치적 (Hong et al., 2004; Suzuki et al., 2009) 또는 실험적 방법 (Nagata et al., 2008)으로 연구되어 왔다. 그 중 대표적인 부유식 구조물의 한 예로는 Backward Bent Duct Buoy(BBDB)가 있다.

고정식 구조물에 대한 최근 연구는 Alves and Sarmiento (2005), Wang et al. (2002)의 선형 자유 표면 그린 함수법과 Liu et al. (2008)의 VOF 법 (상용 계산 프로그램 사용) 등이 있으며 수치 계산 결과를 실험값과 비교하여 분석 하였다. Josset and Clement (2007)은 실제 해역에 설치된 파력 발전기(Pico)를 구조물 내부와 외부의 영역별로 나누어 계산을 수행 하였으며 연간 발전 효율등을 시간영역에서 계산하였다.

본 연구에서는 2 차원 완전 비선형 수치 파수조를 이용하여 해안 고정식 진동 수주형 발전 구조물을 시간 영역에서 재현하였다. 본 연구에서 고려된 구조물은 챔버폭이 상대적으로 작은 모델로, 국내 파랑 특성을 고려하여 소규모 발전에 유용하다고 판단되는 파력 발전기이다. 계산에 사용된 수치 파 수조 기법은 포텐셜 이론을 바탕으로 완전 비선형 자유 표면 경계식과 혼합 오일러-라그랑지안법 (Mixed Eulerian-Lagrangian) 을 이용한 자유표면의 비선형 변위를 4 차항의 룬지쿠타 (Runge-Kutta) 시간 적분법으로 계산하였다. 수치 파 수조 기법을 이용한 고정식, 부유식 구조물의 계산의 정확성은 기존 연구 결과(Koo and Kim, 2004) 등에서 검증하였다.

이번 연구에서는 이미 검증된 수치 파 수조에 진동수주형 파력 발전 모델을 재현하기 위해, 챔버의 자유표면 경계조건을 새롭게 개발 적용하여, 입사파로 인한 챔버내 자유표면의 변위를 매시간 스텝마다 계산하여 이를 챔버와 공기 유동관(덕트)의 부피비에 따른 챔버내 압력을 계산하는데 사용하고 터빈의 발전 효율을 계산할

수 있게 하였다. 이 같은 경계조건은 Gato and Falcao (1998) 가 실험적으로 입증한 챔버 압력과 공기 유속은 선형 관계라는 조건하에 유도되었다.

또한 입사파가 챔버로 진입할 때, 챔버 스킨트(skirt)에서 유체 점성에 의한 에너지 손실이 발생하는데, 이를 구현하기 위해 챔버 자유표면 경계조건에 자유표면 평균 수직 속도에 비례하는 감쇠 계수를 새롭게 대입하였다. 이는 비점성 유체를 가정한 포텐셜 이론의 수치 파 구조 기법에, 점성으로 인한 에너지 손실을 추가함으로써 보다 정확한 수치 계산 결과를 얻을 수 있다. 정확한 점성 감쇠 계수를 추정하기 위해 동일한 조건하에서 수행한 실험 결과 (Liu et al., 2008)와 비교하여 계수값을 선정하였고, 이를 통해 점성으로 인한 에너지 손실량을 정확하게 계산하였다.

점성계수의 유무 및 계수의 크기 변화에 따른 챔버 자유표면의 상대 변위를 비교하고, 다양한 입사파장에 따른 자유표면의 변위, 위상차, 그리고 가용 파력 에너지를 계산하였다.

## 2. 수학적 정식화

고정식 진동 수주형 파력 발전기를 재현하기 위해 포텐셜 유체 이론(비점성, 비압축성, 비회전성 유체를 가정)을 바탕으로 속도 포텐셜( $\phi$ )을 도입하여 라플라스(Laplace)

방정식( $\nabla\phi^2 = 0$ )을 계산 유체 영역의 지배 방정식으로 사용하였다. 라플라스 방정식은 그린 함수를 통해 식 (1)과 같이 경계적분 방정식으로 변환할 수 있다. 이 적분 방정식은 계산 영역의 각 경계조건을 대입하여 해를 구할 수 있다.

$$\alpha\phi_i = \iint_{\Omega} (G_{ij} \frac{\partial\phi_j}{\partial n} - \phi_j \frac{\partial G_{ij}}{\partial n}) ds \quad (1)$$

여기서, 이산화된 각 경계면에서의 그린함수  $G_{ij}$ 는  $G_{ij}(x_i, z_i, x_j, z_j) = -(1/2\pi)\ln R_1$ , 경계면에서의

Solid angle  $\alpha$ 는 0.5, 소스( $x_i, z_i$ )와

필드( $x_j, z_j$ ) 노드점 사이의 거리는  $R_1$ 이다. 본

논문에서는 기존의 연구에서 많이 언급된 경계적분 방정식의 수치 계산 과정을 간략하게 소개하고, 새롭게 개발된 챔버 자유표면의 경계조건과 점성으로 인한 에너지 손실에 대한 수치 모델링을 중심으로 설명하고자 한다.

고정 구조물, 해저면, 그리고 계산 영역 오른쪽 끝에 위치한 수직벽은 불투과성 경계조건( $\partial\phi/\partial n = 0$ )을 대입하였다. 입사파 경계조건은 계산영역 왼쪽 끝에 입사파 성분(wave profile)을 대입하여 진행파를 발생시켰다. 완전 비선형 자유표면 경계조건은 운동학적 조건(kinematic)과 동역학적(dynamic) 조건으로 나뉘게 되는데 아래의 식 (2)와 (3)에 나타내었다.

$$\frac{\partial\eta}{\partial t} = -\nabla\phi \cdot \nabla\eta + \frac{\partial\phi}{\partial z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 - \frac{P_a}{\rho} \quad (3)$$

여기서  $\eta$ 는 자유표면 변위이고 공기압 ( $P_a$ )

은 챔버 밖은 0 이고 챔버 안은 덕트의 공기 유속을 통해 계산된다. 시간 영역에서 비선형 자유표면의 변위를 표현하기 위해 혼합 오일러-라그랑지안법 (Mixed Eulerian-Lagrangian)을 도입하여, 비선형 자유표면 경계식을 룬지쿠타(Runge-Kutta) 4 차항법을 이용하여 시간 적분을 수행하였다. 룬지쿠타 4 차항법은 비선형 자유표면 문제에서 그 해의 안정성이 보장되는 적분법으로 알려져 있다. 자유표면상에 위치한 노드점은 물 입자운동과

같이 움직인다는 가정( $\vec{v} = \nabla\phi$ )으로 식 (2)와 (3)의 자유표면 경계 조건을 전체미분( $\delta/\delta t = \partial/\partial t + \vec{v} \cdot \nabla$ )하여 라그랑지안 좌표계로 수정하였다. 아래 식에 수정된 자유표면 경계조건을 나타내었다.

$$\frac{\delta\phi}{\delta t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 + \nabla\phi \cdot \vec{v} - \frac{P_a}{\rho} \quad (4)$$

$$\frac{\delta\eta}{\delta t} = \frac{\partial\phi}{\partial z} - (\nabla\phi - \vec{v}) \cdot \nabla\eta \rightarrow \frac{\delta\vec{x}}{\delta t} = \nabla\phi \quad (5)$$

여기서  $\vec{x}$ 는 각 노드의 위치( $x, z$ )이다. 시간영역에서 비선형 자유표면을 장시간 재현하기 위해서는 재격자법(re-gridding)을 사용하여 자유표면 노드점을 일정 시간 후에 원래의 위치로 갱신해야 한다. 그렇지 않으면 파의 진행에 따라 노드점들이 국소적으로 밀집하여 수치적 불안정성이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 안정된 수치 결과값을 얻기 위해 매 시간스텝마다 재격자법을 사용하였다.

수치 파 구조의 다양한 수치적 방법을 통해 실험 구조와 동일한 감쇠 영역을 설치할 수 있다. 수치 파 구조의 계산 영역 우측 끝에 진행파의 감쇠를 위해 인공 감쇠 영역(대략 입사파장의 2 배)을 설치하여 파의 반사를 최소화 할 수 있다. 수면 돌출 구조물의 경우, 장시간의 해양파 발생과 진행을 위해서는 구조물 반사파로 인한 조파기에서의 재반사파를 제거하여 입사파가 일정하게 유지되도록 것이 중요하다. 실험 구조에서는 이 같은 조건을 구현하기 매우 어렵기 때문에, 재반사파가 도달하기 전까지의 결과를 사용하여 유효한 분석을 수행할 수 있다. 하지만, 수치 파 구조에서는 돌출 구조물에 반사되어 조파기로 전진하는 파를 선별적으로 감쇠할 수 있는 감쇠 영역을 조파기 근처에 설치할 수 있다. 이를 통해 공해상(Open sea) 조건하에서 수치 실험을 수행할 수 있다. 안정적인 조파를 위해

실험 구조의 조파 시스템과 동일하게 일정 시간 동안(약 2 입사파주기) 서서히 조파기 진폭을 높여야 한다. 또한 인공 감쇠지역에서 감쇠계수의 크기를 감쇠 지역 내에서 서서히 증가시켜 파의 반사를 최소화해야 감쇠효과를 높일 수 있다. 이를 위해 입사 경계 면과 자유표면 감쇠 영역에 램프(ramp) 함수를 도입하였다.

비선형 자유표면과 구조물 경계에서 발생하기 쉬운 톱니모양의 수치 불안정성 현상(saw-tooth numerical instability)을 방지하기 위해 자유표면에 평탄화(smoothing)법을 사용하였다. 본 연구에서는 Chebyshev 5 점 평탄화법을 매 시간스텝마다 자유표면에 적용하였다. 위에서 언급한 수치 파 구조의 여러 계산 기법들은 Koo and Kim (2004)에 보다 자세히 설명 되어 있다.

### 3. 진동수주 챔버의 모델링

챔버내 자유 표면의 변위로 인한 공기압력은 식(6)처럼 공기 유속에 선형적으로 비례한다고 표현할 수 있다.

$$P_{ac}(t) = C_{dm}U_d(t) \quad (6)$$

여기서,  $C_{dm}$ 는 챔버와 덕트간 부피비 계수이고,  $U_d(t) = U_0 \sin \omega t$ 는 공기 유속을 나타낸다. 입사파로 인한 챔버 자유표면의 상대 변위에 따라, 공기 유동이 발생하고 이 유동이 챔버와 덕트간 부피비에 따라 속도가 결정된다. 이때 공기 유동은 덕트가 너무 작지 않다는 가정하에 비압축 유동을 가정 하였다. 진동 수주에 의한 공기압은 입사파주기에 따라 변화하며 챔버 자유표면의 공간 평균 수직 변위에 직접적인 영향을 받는다 (Kim and Iwata, 1991). 따라서 챔버 압력은 매 시간 스텝마다 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{ac}(t) = \frac{C_{dm}\Delta V}{A_d\Delta t} \quad (7)$$

여기서  $\Delta V = V_t - V_{t-\Delta t}$  는 챔버내 공기 부피의

시간 변화량이며,  $A_d$  는 덕트의 면적을 나타낸다. 매시간 변하는 공기 압력은 진동수주에 영향을 주고 또한 방사파(radiation wave)를 발생 시킨다. 챔버의 공기압력을 추출 계수( $C_{dm}$ )를 적용하여 계산하는 것은, 덕트에

설치된 공기터빈에 의한 에너지 추출을 의미한다. 이 같은 챔버 모델링은 공기 감쇠식 부유식 방파제 (Koo et al., 2006)와 유사한 개념으로 방파제의 경우에는 입사파 에너지를 챔버내에서 감쇠 (에너지 소모) 시켜 투과파를 최소화할 수 있다.

입사파의 챔버 진입시 점성에 의한 에너지 손실이 발생한다. 따라서 진동수주 챔버의 정확한 계산을 위해서는 이를 포함하는 적절한 경계 조건을 적용해야 한다. 점성에 의한 에너지의 손실은 챔버내 자유표면의 수직 속도의 제곱에 비례하기 때문에, 급격한 수직 속도가 발생하는 공진주기에 가장 큰 에너지 손실이 발생한다. 일반적으로 유동에서 압력 감소는 식(8)과 같이 계산된다.

$$\Delta P = K_L \frac{1}{2} \rho \tilde{V}^2 \quad (8)$$

여기서,  $K_L$  은 손실 계수이고,  $\tilde{V}$  는

유속이다. 위 식을 Gato and Falcao (1988) 과 Liang and Wang (1996) 의 실험 관측과 같이 유속이 수주의 수직 속도에 비례한다는

(  $\tilde{V} \approx \partial\eta/\partial t = \dot{\eta}$  ) 가정하에, 선형화하여

운동학적 자유표면 경계

조건(  $\partial\eta/\partial t = \partial\phi/\partial z$  )을 사용하면 압력

감쇠는 식 (9)과 같이 정리할 수 있다.

$$P_v(t) = K_L^* \bar{\eta}(t) = \nu \frac{\partial\phi(t)}{\partial n} \quad (9)$$

여기서,  $K_L^*$  과  $\bar{\eta}$  는 각각 수정된 손실 계수와

자유표면의 공간 평균 수직 속도를 나타낸다.

그리고  $\nu$  는 점성 감쇠 계수이다. 따라서

점성에 의한 에너지 손실은 공기 유동에 의한

에너지 추출과 마찬가지로 자유표면의 평균

수직 속도에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

따라서, 챔버내의 자유표면 경계조건을 식

(10)와 같이 적용할 수 있다.

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = -g\eta - \frac{1}{2}|\nabla\phi|^2 + \nabla\phi \cdot \bar{\nu} - \frac{1}{\rho} \left( C_{dm}U_d + \nu \frac{\partial\phi}{\partial n} \right) \quad (10)$$

#### 4. 진동 수주 시스템의 에너지 보존

파력 발전 시스템의 수치 해석 결과의

유효성을 확인하기 위해 앞장에서 설명한

새로운 경계 조건들을 가지고 계산을 수행하고,

그 결과의 분석을 통해 파력 발전 시스템

전체의 에너지가 보존됨을 확인하였다. 유입된

에너지의 양은 입사파 에너지와 그 전달속도,

즉 그룹속도와 의 곱으로 표현된다. 고정식

진동수주형 파력 발전 시스템은 크게 4 가지

에너지 요소로 구분될 수 있는데, 입사파

에너지, 반사파 에너지, 점성에 의한 에너지

손실, 그리고 공기 압력에 의한 터빈의 에너지

추출이다. 위 4 가지 에너지 요소를 아래

식들로 표현할 수 있다.

$$E_i C_g = \frac{1}{8} \rho g H_i^2 C_g \quad (11)$$

$$E_R C_g = \frac{1}{8} \rho g H_R^2 C_g \quad (12)$$

$$A^P = \frac{1}{2} C_{dm} A_d U_0^2 \quad (13)$$

$$EL = \frac{1}{2} \nu B V_0^2 \quad (14)$$

여기서,  $C_g$  는 그룹속도,  $H_i, H_R$  는 각각 입사파, 반사 파고(height)이다. 평균 에너지 추출율( $AP$ )은 챔버 넓이와 입사파 주기당 계산한 값이며, 결국 유동 속도의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 또한 점성에 의한 에너지 손실( $EL$ )도 동일한 방법으로 계산하여, 자유표면의 평균 수직 속도 ( $V_0$ )의 제곱에 비례함을 확인 하였다. 따라서, 반사파, 파력 에너지 추출 그리고 에너지 손실의 합은 입사파 에너지와 같다( $E_R C_g + AP + EL = E_i C_g$ ).

### 5. 계산 결과 및 토의

고정식 진동 수주형 파력 발전기의 전체적인 계산 영역을 Fig. 1 에서 도식화 하였다. 여기서  $d$  와  $B$  는 각각 챔버 스커트(skirt)의 흘수(draft)와 두께(thickness)를 나타낸다.

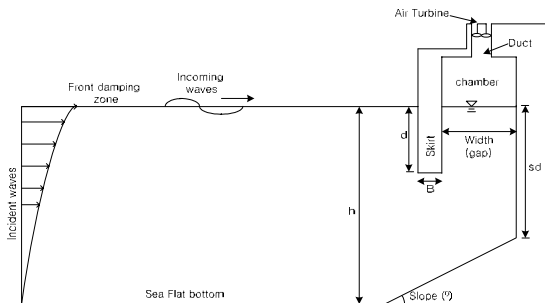


Fig. 1 Overview of the computational domain for a bottom-mounted OWC system

또한 구조물의 크기와 제원은 Table 1 에 나타내었다. Case 1 은 Liu et al. (2008)의 실험과 동일한 조건으로 챔버 내의 공기압이 대기압 상태로 유지되도록 챔버가 개방되어 있다. Liu et al. (2008)는 또한 점성 유체를 기반으로 개발된 상용 프로그램인 Fluent 를 사용하여 VOF 방법으로 수치 결과를 계산하여 실험 결과와 비교 하였다. 따라서 비점성

유체를 기반으로 한 본 연구 결과를 위의 실험과 비교한다면, 점성감쇠계수  $\nu=0$  인 포텐셜 유동 계산으로 예측할 수 없는 점성에 의한 에너지 손실을 차이를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 Case 1 에서 구한 점성 에너지 손실을 고려하여, 챔버가 닫혀있어 공기의 유동 압력이 발생하는 Case 2 계산을 통해 추출 가능한 파력 에너지를 예측하였다. 그리고 다양한 입사파장과 챔버 덕트간 부피비에 따른 자유표면의 수직 변위와 에너지 추출율을 비교 하였다.

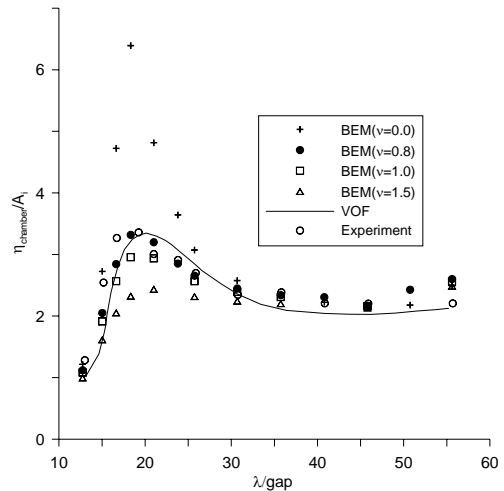


Fig. 2 Comparison of surface elevations inside chamber in Case 1: BEM represents the present calculation; VOF is the results of volume-of-fluid,  $\lambda$  is incident wavelength

챔버의 공기압이 대기압과 같은 Case 1 의 각 점성 계수에 따른 자유표면의 변위를 실험과 비교하여 Fig. 2 에 나타내었다. 점성에 의한 에너지 손실을 예측하기 위해 다양한 점성 감쇠계수 대입하여 실험결과와 가장 근접한 계수를 구하였다. 본 결과에서는  $\nu=0.8$  에서 실험과 가장 근접하였다. 점성이 고려되지 않는 포텐셜 이론( $\nu=0$ ) 은  $\lambda/gap > 26$  또는  $< 15$  의

경우에는 비교적 잘 일치함을 알 수 있지만, 공진주기 ( $\lambda / \text{gap} \sim 20$ ) 에서 매우 큰 오차를 나타냄을 확인하였다. 이는 공진 주기에서 수주의 급격한 수직 속도로 인해 큰 에너지 손실이 발생하는 것으로 판단 된다. 따라서 점성에 의한 에너지 손실을 줄이기 위해서는 챔버 스킨트의 형상 변화를 통해 에너지 손실이 최소화할 수 있는 최적의 조건을 찾아야 할 것이다.

Table 1: Main particulars of the OWC system

| Dimension               | Case 1 | Case 2 |
|-------------------------|--------|--------|
| Air chamber open        | Yes    | No     |
| Chamber-duct area Ratio | 1      | 11.5   |
| d (draft)(m)            | 2.5    | 2.5    |
| B(m)                    | 1.0    | 1.0    |
| Width(gap) (m)          | 1.5    | 1.5    |
| Sd(m)                   | 4.78   | 4.78   |
| Slope( $^{\circ}$ )     | 26     | 26     |
| h(m)                    | 16     | 16     |
| Ai (m)                  | 0.38   | 0.38   |

주: 챔버가 열려있다(Air chamber open)는 것은 챔버내 압력이 대기압과 동일하다는 의미이다. 또한, 챔버-덕트 면적비는 추출계수  $C_{dm}=32$  일때 11.5 이다. Ai=입사파 진폭(incident wave amplitude)

Fig. 3 에서는 챔버 내외부 자유표면 변위의 위상차를 각 점성 계수에 따라 비교하였다. 공진주기에서 위상차가 최대임을 알 수 있고 점성 계수가 증가할수록 위상차가 감소하였다. 이는 계수가 증가함에 따라 에너지 손실이 커짐으로써 챔버 주위 자유표면의 변위에 영향을 주기 때문이라고 파악된다. 입사파가 공진 주기보다 큰 경우에는 챔버쪽에 대한 입사파의 상대 크기가 크기 때문에 스킨트의 영향이 작아져서 자유표면 변위의 위상차는 작아진다

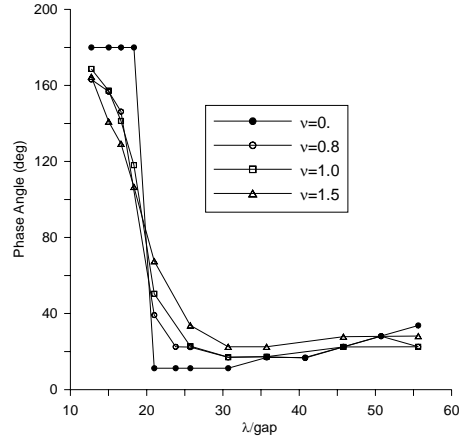


Fig. 3 Comparison of phase angles for various viscous damping coefficients (Case 1)

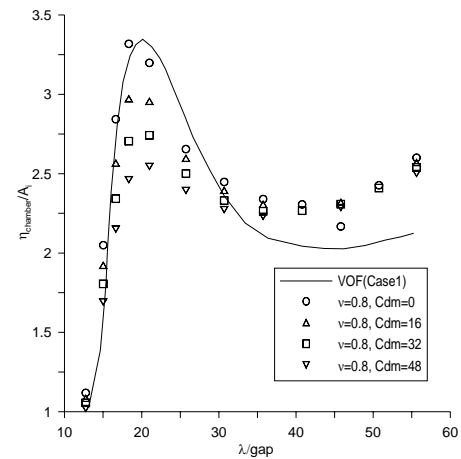


Fig. 4 Comparison of surface elevation inside chamber in Case 2 for various ratios of chamber-duct size ( $C_{dm}=0$  for Case 1)

챔버와 덕트간 부피비에 따른 챔버내 자유표면의 변위를 Fig. 2 에서 구한 점성 계수를 적용하여 Fig. 4 에 나타내었다. 추출 계수( $C_{dm}$ )의 증가는 챔버-덕트의 부피비의 증가를 나타낸다. 추출 계수 32 ( $C_{dm}=32$ )는 Table 1 에서 제시한 부피비 11.5 이다. 부피비가 증가할 수록, 덕트내 공기 유속은

빨라지고, 압력이 증가하기 때문에 자유표면의 변위가 감소함을 알 수 있다. 이는 챔버안의 자유표면 경계조건에 대기압보다 높은 압력이 적용되기 때문이다.

Fig. 4의 결과를 통해 자유표면 변위에 대한 공기압의 영향은 공진 주기에서 최대가 되며, 입사파가 공진 주기보다 큰 경우 ( $\lambda / gap > 35$ )는 영향이 매우 작음을 알 수 있다. 이는 장파의 경우, 구조물의 크기에 비해 챔버내에서 추출되는 에너지의 양이 상대적으로 작고, 많은 에너지가 반사되기 때문이다.

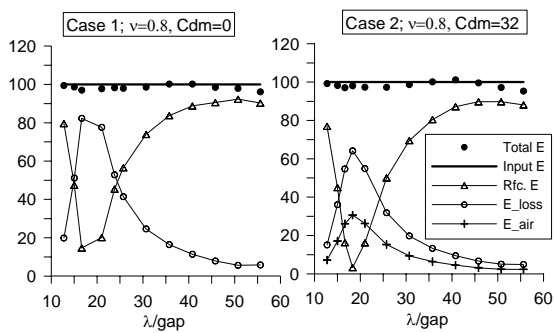


Fig. 5 Comparison of the energy components in Case 1 and Case 2

입사파장에 따른 파력 발전 시스템의 각 에너지 요소별 크기와 전체 합을 Fig. 5에 나타내었다. Case 1의 경우 챔버가 완전히 열려 있기 때문에, 에너지 추출은 발생하지 않고, 점성에 의한 에너지 손실과 반사파 에너지만 존재 한다. 공진 주기에서 점성에 의한 에너지 손실이 가장 큼을 알 수 있고, 이때 반사 에너지가 가장 작다. 하지만, 입사파장이 길어 질수록, 반사에너지는 급격히 증가한다. Case 2의 에너지 요소별 비교에서는 챔버의 공기압력으로 인한 파력 에너지가 존재한다. 공진 주기에서 최대 에너지 손실과 최대 에너지 추출이 일어나는 것을 확인할 수 있고 입사파장이 증가할 수록 에너지 추출량은 감소함을 알 수 있다. Fig. 5의 계산에서 (챔버 덕트간 부피비 11.5), 공진 주기에서 최대

에너지 추출량은 전체 입사파 에너지의 30%정도이다. 입사파장에 따른 에너지 손실과 추출량은 모든 파장 영역에서 유사한 경향을 보이는데, 이는 에너지 추출과 손실이 챔버 자유표면의 평균 수직 속도 제곱에 비례하기 때문이다(식 (13)와 (14) 참조). Case 1과 2의 전체 에너지 합은 일정하게 보존됨을 알 수 있다.

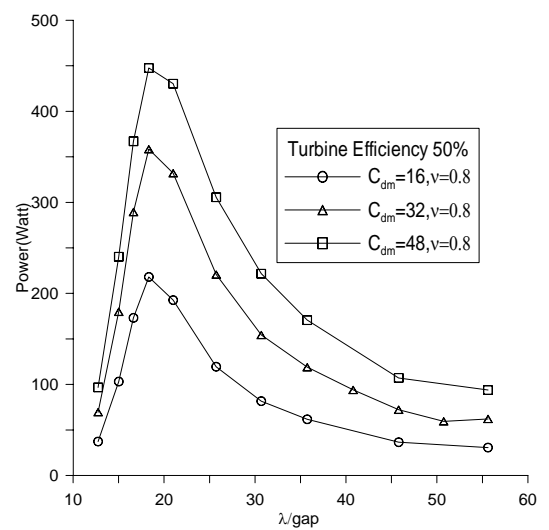


Fig. 6 Comparison of the available wave power for various ratios of chamber-duct size

챔버 덕트간 부피비의 차이에 의한 가용 파력 에너지 추출량을 Fig. 6에서 비교하였다. 여기서  $C_{dm}=16$ 은 부피비 5.75이며,  $C_{dm}=48$ 은 부피비 17.25이다. 부피비가 증가할 수록, 즉 챔버 부피에 대한 덕트 크기가 작을수록 에너지 추출량은 늘어 나는데, 이는 덕트 크기 감소로 인한 공기 유속의 증가 때문이다. 위의 결과는 챔버내의 공기가 압축되지 않고 덕트로 배출된다는 가정에 기반을 둔 계산으로, 만약 덕트의 크기가 너무 작아서 공기 압축이 과도하게 발생하는 경우는 본 연구 조건에 해당되지 않는다. 실제로 공기 터빈을 설치하기 위해서는 적당한 크기의



덕트가 필요하다. Fig. 6 는 공기 터빈과 주변 기계장치의 효율을 50%라고 가정하여 계산한 결과이며, 차후에 보다 정확한 에너지 추출량을 예측하기 위해서는 터빈과 주변 장치의 에너지 효율을 고려해야 한다.

## 6. 결론

진동 수주형 고정식 파력 발전기를 2 차원 완전 비선형 수치 파 수조를 이용하여 시간 영역에서 해석하였다. 챔버 자유표면에 작용하는 공기압을 덕트내 공기유동 속도를 이용하여 경계조건을 유도하였고, 자유표면의 평균 수직 속도를 이용하여 점성에 의한 챔버내 에너지 손실을 경계 조건에 새롭게 적용하였다. 또한 수치 계산 결과의 유효성을 확인하기 위해 파력 발전 시스템의 전체 에너지가 보존됨을 증명하였다. 개발된 수치 파 수조를 이용하여 계산한 수치 결과를 Liu et al. (2008)의 실험값과 비교하여 점성으로 인한 에너지 손실을 추정하였고, 이를 통해 챔버와 덕트간 부피비에 따른 가용 파력 에너지를 계산하였다. 본 연구 조건 (Table 1)에서 최대 추출 가능 에너지는 입사파 에너지의 약 30%정도였다.

파력 에너지 추출에 직접적인 영향을 주는 챔버내 자유표면의 수직 변위를 다양한 입사파장을 대입하여 계산하였다. 최대 파력 에너지는 공진 주기에서 발생하며, 공진주기보다 큰 경우에는 그 크기가 감소하였다. 또한 챔버 덕트간 부피비가 증가함에 따라 덕트내 공기 유속이 증가하고 챔버 압력이 커지면서 추출 가능한 파력 에너지양이 증가하였다.

본 연구를 통해 개발된 챔버내 자유표면 경계 조건을 이용한 수치 파 수조 기법은, 향후 다양한 고정식 및 부유식 파력 발전 구조물의 발전 효율을 해석하는데 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 세계 수준의 연구중심대학 육성사업(WCU) 으로 지원받아 수행 되었습니다(R33-2008-000-10098-0).

## 참 고 문 헌

- Alves, M. and Sarmiento, A., 2005, " Non-linear and viscous diffraction response of OWC wave power plants" , In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conf., Glasgow, UK, pp. 11-17.
- Gato, L. M. C. and Falcão, A. F. de O., 1988, " Aerodynamics of the Wells turbine" , International Journal of Mechanical Science 30, 383-395.
- Heath, T., Whittaker, T.J.T. and Boake, C.B., 2000, " The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter" , In: Proceeding of the 4<sup>th</sup> European Wave Energy Conference, Aalborg, Denmark, pp.49-55.
- Hong, D. C., Hong, S. Y. and Hong, S. W., 2004, " Numerical study of the motions and drift force of a floating OWC device," Ocean Engineering 31, 139-164.
- Josset, C. and Clement, A.H., 2007, " A time-domain numerical simulator for oscillating water column wave power plants," Renewable Energy 32, 1379-1402.
- Kim, D. and Iwata, K., 1991, " Dynamic behavior of tautly moored semi-submerged structure with pressurized air-chamber and resulting wave transformation," Coastal Engineering in Japan 34 (2), 223-242.
- Koo, W.C. and Kim, M.H., 2004, " Freely floating-body simulation by a 2D fully non-linear numerical wave tank," Ocean Engin-

eering 31 (16), 2011–2046.

- Koo, W.C. and Kim, M.H., Lee, D.H., Hong, S.A., 2006, “ Nonlinear time-domain simulation of pneumatic floating breakwater,” International Journal of Offshore and Polar Engineering 16 (1), 25–32.
- Liang, X. and Wang, W., 1996, “ Experimental research on performance of a BBDB wave-activated generation device model,” In Proc. 2<sup>nd</sup> European wave power conference, Lisbon, pp.8–10.
- Liu, Z., Hyun, B.S. and Hong, K.Y., 2008, “ Application of numerical wave tank to OWC air chamber for wave energy conversion,” In: Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, vol. 1. ISOPE, Vancouver, BC, Canada, pp. 350–356.
- Masuda, Y. and Miyazaki, T., 1979, “ Wave power electric generation study in Japan,” In: Proceedings of Wave and Tidal Energy Symposium, British Hydromechanics Research Associates, Paper C.
- Nagata, S., Toyota, K., Imai, Y. and Setoguchi, T., 2008, “ Experimental study on hydrodynamic forces acting on a floating wave energy converter Backward Bent Duct Buoy,” In: Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, vol. 1. ISOPE, Vancouver, BC, Canada, pp. 366–373.
- Suzuki, M., Kuboki, T., Nagata, S. and Setoguchi, T., 2009, “ Numerical investigation of 2D optimal profile of backward-bent duct type wave energy converter,” In: Proceedings of 28<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE-79719, Honolulu, USA.
- Wang, D.J., Katory, M. and Li, Y.S., 2002, “ Analytical and experimental investigation on the hydrodynamic performance of onshore wave-power devices,” Ocean Engineering 29, 871–885.
- Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Furuyama, H. and Fujita, T., 2000, “ The offshore floating type wave power device ‘ Mighty Whale’ open sea tests,” In: Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, vol. 1. ISOPE, Seattle, USA, pp. 373–380.
- Kim, S., Ryu, W., Shin, S. and Hong, K., 2009, “ The efficiency of the OWC Wave Energy Converter based on Experiments,” In: Proceedings of the Korean Society of Ocean Engineers, Geoje, pp. 143–146.



< 구원철 > < 김무현 > < 최윤락 >