

파력발전용 가변수주진동장치의 운동해석 Motion analysis of a VLCO for wave power generation

이승철* · 구자삼*

Seung-Chul Lee* and Ja-Sam Goo*

(접수일 : 2013년 10월 10일, 수정일 : 2014년 04월 04일, 채택확정 : 2014년 04월 06일)

Abstract: The structure of a variable liquid column oscillator(a VLCO) is analogous to that of the tuned liquid column damper used to suppress oscillatory motion in large structures like tall buildings and cargo ships. The VLCO is a system absorbing high kinetic energy of accelerated motions of the multiple floating bodies in the effect of air springs occurred by installation of inner air chambers. Thus, VLCO can improve the efficiency of energy than wave energy converters of the activating object type made in Pelamis Company. In this research, the experiment was performed in two models of same draft. The one is that weights were filled, and the other is that water was filled. The numerical results were estimated by assuming that do not exist internal flow, and the results were compared with the results of experiments.

Key Words : Variable liquid column oscillator, Wave power generation, Activating object type, Three dimensional source distribution method, Motion response

1. 서 론

파랑에너지를 이용한 발전시스템에서 파랑에너지를 다른 역학적 에너지로 변환시키기 위한 일차변환장치의 개발이 파랑에너지 이용에 있어서 가장 중요한 분야이기 때문에 파랑에너지 개발은 일차변환장치 개발의 역사와 함께 하고 있다. 현재 주로 적용되고 있는 일차변환장치를 에너지 변환 방법에 대하여 분류하면 크게 세가지로 분류할 수 있다. 파랑에너지 변환 방식 중 가장 에너지 효율이 높은 파랑의 에너지를 직접 흡수하여 발전에 이용하는 가동물체형, 장치 내에 들어

온 수주의 왕복운동을 이용하는 진동수주형, 그리고, 밀려오는 파를 수집관에 모아서 유로에 흐름을 만들어, 그 흐름을 이용하는 수류형 및 에너지를 직접 압력과 유량의 형태로 받는 수압면형 등이 있다. 여러 가지 파력발전 방식 중에서 가장 효율이 높은 발전방식인 가동물체형 파력발전시스템에 관한 연구는 현재 유럽국가 및 일본 등의 나라를 중심으로 활발히 진행되고 있다¹⁾. 가동물체형 파력발전시스템 중에서 상용화된 대표적인 시스템은 영국의 Pelamis 사가 개발한 시스템이다. 이 시스템은 가장 보편화된 가동물체형 발전시스템이며, 설치장소의 제약이 없는 장점과 유지 보

*† 구자삼(교신저자) : 부경대학교 조선해양시스템공학과
E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615

* 이승철 : 부경대학교 조선해양시스템공학과

*† Ja-Sam Goo(corresponding author) : Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University.

E-mail : jsgoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6615

* Seung-Chul Lee : Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University.

수 비용이 타 장치에 비해 저렴하다는 장점으로 인해 가동물체형 방식 중 가장 뛰어난 성능을 발휘하는 것으로 조사되었다²⁾. Pelamis사의 발전방식이 가장 보편화되어 있지만 이 방식의 효율은 10% 초반 정도에 불과한 실정이다. 따라서 이 방식의 장점을 살리면서 효율을 높이는 새로운 발전방식의 개발이 필요하다. 가동물체형 파력발전 시스템의 효율을 향상시킬 수 있는 새로운 발전방식으로 가변수주진동장치(VLCO, Variable Liquid Column Oscillator)를 적용한 발전시스템³⁾이 있다.

VLCO는 내부에 공기실을 설치하여 공기스프링 효과를 발생시켜 다수 부유체의 운동을 가속화시킴으로서 이에 따른 높은 운동에너지를 흡수하는 시스템이다. 따라서, VLCO를 적용할 경우 기존의 Pelamis사의 파력발전기(Pelamis Wave Power, 2009)⁴⁾의 에너지효율에 비해 향상된 효율의 에너지를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Fig. 1에 보여지는 가변수주진동 장치를 적용한 발전시스템에서 다수의 부유체 중 하나의 부유체를 대상으로 하여 내부유체의 유동이 없다는 가정에 의한 수치계산과 내부유체가 없는 모델과 내부유체가 있는 모델의 실험결과⁵⁾와 비교·검토하였다.

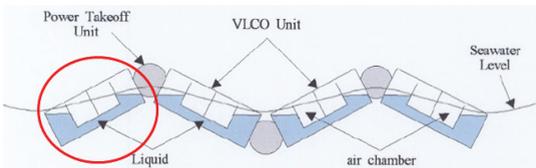


Fig. 1 Wave power generation system applied in the VLCO

2. 이론해석

2.1 기본 가정 및 좌표계

기본가정으로서 유체는 이상유체이고 유체의 운동은 비회전인 것으로 한다. 또, 부유체의 운동과 입사파의 유체운동은 미소진폭의 주기운동을 하는 것으로 하고, 각각의 정상상태를 논하기로 한다. 또한 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼

쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.

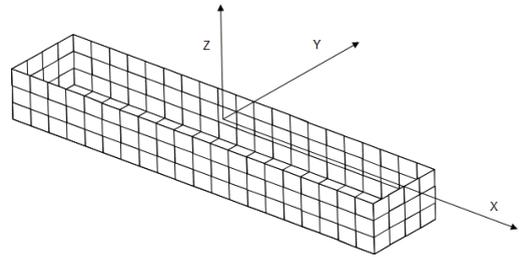


Fig. 2 Coordinate system

부유체는 자유표면에서 입사주파수 ω 로 운동하며, 좌표계로서는 Fig. 2에 보는 바와 같이 우수계의 기준좌표계 XYZ 를 취하고, XY 평면은 평균수면에 두고, Z 축은 연직상방으로 향하고 있는 것으로 한다.

2.2 운동응답

부유체의 운동이 입사파의 주파수로 미소진폭의 주기운동을 하는 것으로 가정하고 있으므로, 어떤 임의의 운동기준점의 좌표(x_m, y_m, z_m) 주위의 선형운동방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\sum_{k=1}^6 \left[-\omega^2 (M_{jk} + \mu_{jk}) - i\omega\nu_{jk} + K_{jk} \right] \eta_k e^{-i\omega t} = F_j^W$$

$$, (j = 1 \sim 6) \quad (1)$$

여기서, M_{jk} 는 선체의 관성력 계수, K_{jk} 는 정수압에 의한 복원력 계수, μ_{jk} 는 부가질량계수, ν_{jk} 는 감쇠계수, η_k 는 운동진폭이고, F_j 는 파강제력이다⁶⁾.

3. 실험 방법

3.1 실험장치 및 실험조건

Fig. 3는 수조에서 운동응답을 측정하기 위한 모션캡처시스템의 개략도를 나타낸 것이다.

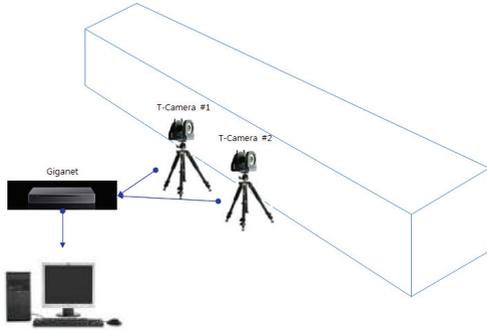


Fig. 3 Motion capture system

실험에서 사용한 파는 Table 1과 같이 파주기 0.6초에서 1.6초까지 0.05초 간격으로 21개의 파에 대해, 파고 2cm와 4cm를 갖도록 하였다.

Table 1 Wave conditions

Wave period	0.60~1.60 sec. (interval 0.05 sec.)
Wave height	2, 4 cm

실험은 모델에 적외선 카메라가 인식하도록 마크(mark)를 설치한다. 마크는 파상측과 파하측, 그리고 중앙부에 설치를 하였다. 모델에 설치된 마크들을 두 대의 카메라가 인식하도록 카메라의 위치를 잡고, 소프트웨어를 통해 카메라에서 인식된 마크를 확인하고, 해상도를 조절해서 모델이 거동시에도 마크들을 잘 인식하도록 한다. 카메라의 위치를 잡고 나면, 캘리브레이터를 사용해서, 소프트웨어 상에서 마크들을 캘리브레이션을 한다. 캘리브레이션이 제대로 완료되었으면, 원점을 지정하여서, 원점과 마크 사이의 거리를 소프트웨어 상에서 인식시킨다. 인식된 마크들은 각 마크들을 프레임으로 연결하여서, 하나의 세그먼트를 만든다.

조파기를 통해 생성된 파에 의해 모델이 운동을 하게 되면, 모든 마크들의 운동이 카메라를 통해서, 소프트웨어로 인식이 된다. 이 때 마크들은 x, y, z축방향의 변위만 측정이 된다. 따라서, 회전 운동에 대한 값은 중앙부의 마크의 수직변위와 파상측의 마크의 수직변위를 통해 pitch 응답을

소프트웨어 상에서 계산되어 출력이 된다.

마크들은 카메라가 인식할 수 있도록 모델 상부의 파상측과 파하측에 각각 하나씩 설치하였고, 중앙부에는 정중앙에 하나, 중앙에서 왼쪽에 하나로 하여 두 개를 설치하였다.

운동의 캡처는 파가 모델을 통과하고 어느 정도 정상상태가 되었다고 판단이 되었을 때 시작하여 약 30~40초 정도 캡처를 하여서, 운동을 평가하였다.

3.2 실험모델

Table 2는 실험에 사용한 모델에 대한 제반사항을 나타내고 있다. 모델은 Pelamis 모델을 참고로 1/10의 크기로 제작을 하였다. Fig.4는 모델 제작에 사용한 삼면도를 보이고 있다. 모델은 두께 1cm의 아크릴판으로 제작을 하였으며, 파상측과 파하측에 직경 2cm의 밸브를 설치하여 내부유체의 유동을 제어 가능하도록 하였다.

실험은 부경대학교 조파수조에서 수행하였다. 수조 제원은 길이 40m, 폭 2.5m, 수심 1.2m이다. 실험은 두 가지 경우에 대해 행하였다. 첫 번째는 Fig.5(a)와 같이 내부에 물을 채우지 않은 상태에서 무게추만으로 흡수를 갖도록 한 뒤 실험을 행하였다. 이 때 밸브는 열어둔 상태이지만, 내부유체가 없으므로 그 영향은 없다. 그리고, 두 번째로는 Fig.5(b)와 같이 모델의 내부공간에 Fig.5(a)와 동일한 흡수를 갖도록 물을 채우고, 상부의 밸브를 잠근 뒤 내부유체의 유동을 최소화시켜 실험을 행하였다. 모델의 계류는 모델의 중앙부에 설치된 고리에 스프링강성이 아주 작은 스프링을 연결하여 모델의 운동을 방해하지 않으며 표류할 수 있도록 하였다.

Table 2 Model specifications

Length (cm)	100
Breadth (cm)	20
Depth (cm)	20
draft (cm)	12

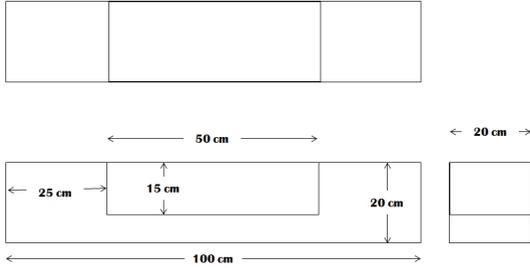


Fig. 4 Drawing of a simple floating body



(a) Opened Valves(w/o water)



(b) Closed valves (w/ water)

Fig. 5 Experiment models

4. 결과 및 고찰

4.1 수치계산

Fig.6은 수치계산을 하기 위해 모델의 침수표면을 224개의 요소로 분할한 것이다.

계산은 실험에 사용한 데이터들을 수치적으로 계산하여 입력데이터로써 사용하였다. 파 조건도

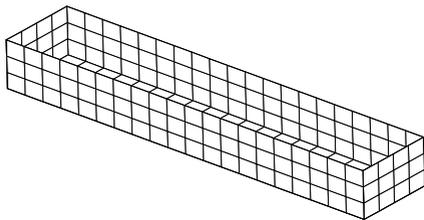


Fig. 6 Submerged surface of a model represented 224 panels

동일하게 하였다. 내부유체를 갖는 모델에 대한 계산은 내부유체의 유동이 없다고 가정하여, 관성 모멘트를 일정한 것으로 하여 계산을 수행하였다. 따라서, 내부유체 유동의 부유체운동에 대한 영향을 고려하지 못하고 있다.

4.2 내부유체가 없는 모델과의 비교

Fig. 7, 8은 모델의 내부에 물을 채우지 않고, 무게추로써 흡수를 갖도록 한 모델에 대해 측정된 결과를 나타내고 있다. 실선은 계산결과와 무차원값을 나타내고 있고, ○는 파고 2cm에 대한

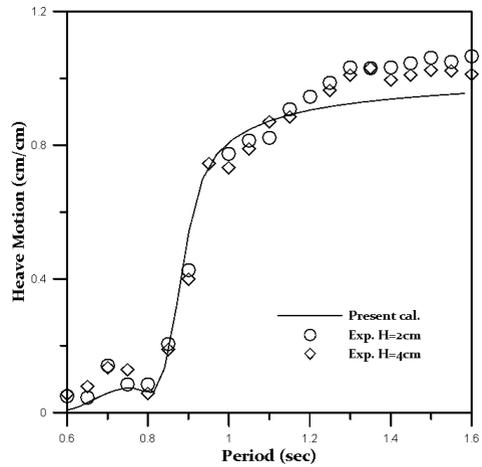


Fig. 7 Heave motion without internal fluid

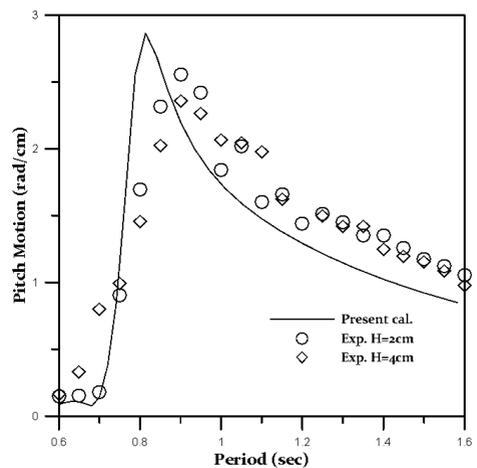


Fig. 8 Pitch motion without internal fluid

실험결과의 무차원화된 값이고, ◇는 파고 4cm에 대한 실험결과의 무차원화된 값을 나타내고 있다. 전체적으로 실험값과 계산값이 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있지만, 상하동요(heave)의 경우 1.2sec 이상의 장주기에서 계산결과가 실험결과보다 작게 나타나고 있다. 종동요(pitch)의 경우 피크치가 나타나는 주기의 차이는 실험모델의 관성모멘트와 계산모델의 관성모멘트의 오차에 의한 것으로 사료된다.

4.3 내부유체를 가지고 밸브를 잠근 모델과의 비교

Fig. 9, 10은 모델의 내부에 물을 채우고 밸브를 잠근 모델에 대해 측정된 결과를 보여주고 있다. 상하동요의 계산값은 실험값과 양호한 상관관계를 보여주고 있으나, 종동요의 계산값은 피크치부분에서 실험값보다 크게 평가하고 있다. 이것은 수치계산에서 내부유체의 유동이 없는 것으로 하여 관성모멘트가 일정한 것으로 간주하여 계산하였지만, 실험에서는 파상측과 파하측간에 내부유체의 유동이 발생하여 종동요 관성모멘트가 변화된 것에 따른 것으로 사료된다.

Fig. 10의 종동요의 피크치 부분에서 내부유동이 없다고 가정한 계산값보다 2cm파고에 대한 실험값이 더 작고, 2cm파고보다 4cm파고에 대한 실험값이 더 작게 나타났다. Fig. 8에서 피크치부분

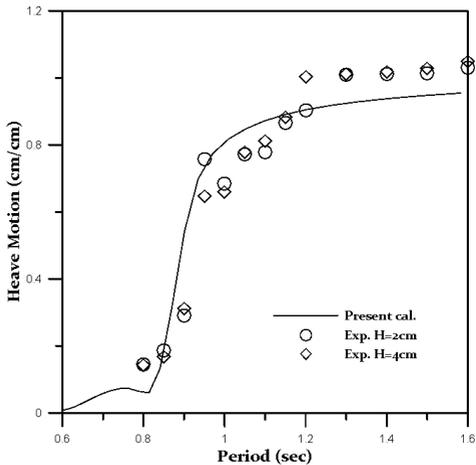


Fig. 9 Heave motion with internal fluid

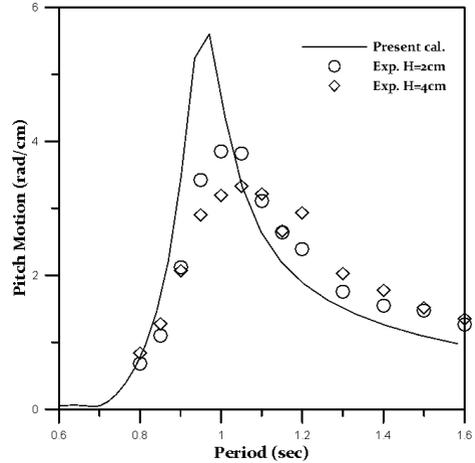


Fig. 10 Pitch motion with internal fluid

에서 본 계산결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하고 있는데 반해 Fig.10에서 피크치 부근에서 큰 차이를 보이는 것은 파상측과 파하측 간의 내부유체의 유동이 anti-pitch 방향으로 작용하여 종동요 응답을 감쇠시키고 있기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

진동수주형 파력발전 시스템은 다수 부유체로 연결되어 있고, 각 부유체의 상대운동을 극대화시킴에 의해 높은 에너지 효율을 가지도록 설계된다. 본 연구에서는 선행연구로써 단일 부유체에 대한 운동특성을 목적으로 이론계산 및 실험을 행하였다. 계산결과와 실험결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 모델에 대한 실험결과와 계산결과를 서로 비교·검토하여 본 계산기법의 적용 가능성을 검토하였다.
- (2) 상하동요 응답 계산결과를 보면 내부유체의 유무에 관계없이 실험결과와의 상관관계가 양호한 것으로 나타났다.
- (3) 종동요 응답 계산결과는 내부유체가 없는 모델에 대한 실험값과 잘 일치하지만, 내부유체를 가지고 있는 모델에 대해서는 피크치 부분에서 많은 차이를 보이고 있다. 이것은 본 계산모델이

내부유체의 유동에 따른 pitch 관성모멘트의 변화를 고려하지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

(4) 내부유체가 있는 모델의 중동요의 피크치 부분에서 파상측과 파하측간의 내부유체의 유동이 크게 발생할수록 응답값이 작게 나타났다. 이것은 내부유체의 유동이 피크치 부분에서 anti-pitch 방향으로 작용하여 중동요 응답을 감소시키고 있음을 보이고 있다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구 되었음.

Reference

1. J.S. Oh, 2007, "Development Tendency of Wave Energy Conversion System", Journal of the Korean Society for Marine Engineering, Vo. 1.31, No. 8, pp. 893-898
2. R.P.M. Parker, G.P. Harrison and J.P. Chick, 2007, "Energy and Carbon Audit of an Offshore Wave Energy Converter", Proc. IMechE, Vol.221, part A:J. Power and Energy, pp. 1119-1130.
3. D.S. Yang, B.H. Cho, 2009, "Studies on Variable Liquid-Column Oscillator for High Efficiency Floating Wave Energy Conversion System". Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 23, No. 5, pp. 15-24.
4. Pelamis Wave Power, Pelamis Brochure, 2009, <http://www.pelamiswave.com>
5. S.C. Lee and J.S. Goo, 2013, "An experimental study on motions of a VLCO for wave power generation(1. Simple floating body)", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 103-107
6. S.C. Lee, D.H. Doh and J.S. Goo, 2010, "Analysis of Wave Loads of Ships with Advancing Speed in Regular Waves", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 53-58.