

CFD를 이용한 부양식 파력발전 장치의 성능해석

최용석 · 임태우* · 김유택
(한국해양대학교)

Performance Analysis of Floating Wave Energy Converter by Using CFD

Yong-Seok CHOI · Tae-Woo LIM* · You-Taek KIM
(Korea Maritime and Ocean University)

Abstract

The behavior and flow characteristics of the floating wave energy converter were analyzed by using CFD in this study. The average significant wave height was confirmed as 0.5~2.0m from the Korean coastal sea area. This study was carried out by selecting a range of 1.0~1.6m in the wave height to simulate the operations of realistic wave energy converter system. The principle of a piston wave maker was applied in order to produce periodic wave. The behavior of the wave energy converter and the state of the wave overtopping according to the generated periodic wave were confirmed through the unsteady three-dimensional flow analysis. It was found that the wave overtopping rate according to the generated periodic wave was in range of the 11.6~30.0 kg/s.

Key words : CFD, Overtopping, Periodic wave, Wave energy converter, Wave maker

I. 서론

산업화의 진행과 더불어 크게 부각된 환경오염에 관한 문제는 온실가스 배출에 따른 지구 온난화를 야기하였으며, 이로 인해 1992년 기후변화협약 및 1997년 교토 의정서를 채택하기에 이르렀다. 교토 의정서에 의하면 감축 대상가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 이산화질소(N₂O), 불화탄소(PFC), 수소불화탄소(HFC), 불화유황(SF₆) 등 여섯 가지이다(Kim et al., 2012; Lee, 2009). 교토 의정서는 2012년에 1차 공약기간이 종료되었으며, 2020년 2차 공약기간이 종료될 예정이다. 교토 의정서의 후속 체제로 부각되는 신기후체제(Post-2020)는 선진국 위주의 교토 의정서와 달리 선진국과 개도국 모두 온실가스 감축의무를 부담

하는 기후변화협약으로 우리나라 또한 배출전망치 대비 37% 감축하는 것으로 최종 결정하였다.

온실가스 배출을 감축하기 위해서는 화석연료 사용의 절감과 더불어 이를 대체할 수 있는 새로운 에너지원의 개발이 요구된다. 이에 우리나라 또한 녹색성장 및 신재생에너지 산업 발전 전략을 구축하여 실천하고 있으며, 핵심 원천기술 및 국산화에 집중하고 있는 실정이다(KETEP 2013). Park(2009)은 녹색성장이란 “엔트로피의 증가를 낮추면서 인간의 삶의 양적 질적 수준을 향상시키는 지속 가능한 성장”이라고 정의하였으며, 녹색성장의 당위성과 교육과 사회자본의 역할에 대하여 기술하였다.

에너지 관리공단(2014)의 2014 에너지통계 핸드북에 따르면 1993년부터 2012년까지 신재생에

* Corresponding author : 051-410-4256, kyunlim@kmou.ac.kr

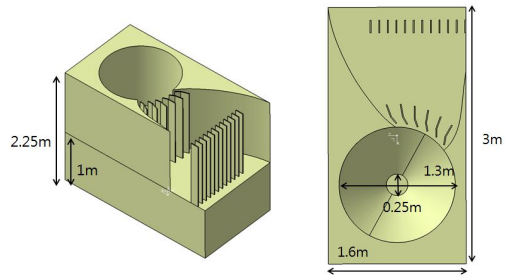
너지의 공급량은 74만 toe에서 800만 toe로 약 11배가 증가하였으며, 신재생에너지의 공급비중은 0.6%에서 2.9%로 증가하였다. 특히, 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 남서해의 큰 조차와 강한 조류, 그리고 동해안과 제주지역의 강한 파랑 등으로 미루어 볼 때 우리나라의 해양에너지의 개발 및 발전 가능성은 높게 평가받을 수 있다.

해양에너지를 이용한 발전 시스템 중에 파력발전은 파도의 운동 에너지와 위치 에너지를 이용하여 터빈을 구동하거나 기계장치나 유압장치를 사용하여 운동 에너지로 변화시켜 전기를 생산하는 발전 형태이다.

현재까지 개발된 파력발전 시스템은 파랑 에너지의 변환 방법에 따라서 가동물체형, 진동수주형 그리고 월파형으로 구분된다(Lee & Choi 2007). 가동물체형과 진동수주형의 경우 파랑의 운동에너지나 위치에너지 중 한쪽만 동력으로 변환시키는 단점이 있다. 그리고 월파형의 경우 운동에너지와 위치에너지를 동시에 활용할 수 있지만, 대부분 고정형으로 설치되므로 파랑의 일부만을 이용하게 되는 단점이 있다. 파력발전 시스템의 상용화 및 보급을 위해서는 에너지 변환 효율, 즉 발전 효율을 향상시키는 것이 급선무라 판단된다. 본 연구에서는 파랑 에너지를 효과적으로 활용할 수 있는 새로운 형태의 부양식 파력발전 시스템의 개념설계 단계로서 활용성을 검토하였다.

Song et al.(2004)은 1979년부터 2002년까지 한반도 근해의 파랑 추산자료를 기초로 파랑에너지 분포를 분석하였다. 연구 결과에 따르면 대략 3kW/m 정도의 가용 파랑에너지가 한반도 근해에 분포하며, 남서쪽 해역, 특히 제주도의 남서쪽 해역이 상대적으로 큰 에너지 밀도를 가지고 있다고 추정하였다. 또한 우리나라 해역의 평균 유의 파고는 계절적인 변화가 큰 편이나 전체적으로 0.5-2.0m 정도로 추정할 수 있다. 파력발전의 관점에서 파고 1.0m 이하의 작은 파는 파력발전이

현실적으로 어려운 관계로 본 연구에서는 파고 1.0-1.6m를 대상으로 연구를 진행하였다.



[Fig. 1] Geometry of floating wave converter

본 연구에서는 부양식 방파제 겸용 파력발전 시스템(Korea Maritime and Ocean University R&D Foundation 2011)에 기초하여 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 통하여 새로운 방식의 파력발전 시스템의 적용가능성 및 유동특성을 분석하였다.

II. 형상 모델링

본 연구의 파력발전 시스템은 부양식 방파제 겸용 파력발전 시스템에 기초하여 진행되었으며, 본 시뮬레이션에 사용된 파력발전 시스템의 구조는 유입부 플랫폼, 보호창틀, 안내판, 전향판, 선회 유수조 등으로 구성되어 있으며, [Fig. 1]과 같이 모델링하였다.

유입되는 파랑의 상반부만을 선택적으로 유입되도록 하는 플랫폼이 하단에 위치하며, 유입부에 부피가 큰 부유물의 유입을 막는 보호창틀이 설치된다. 보호창틀을 지나 유입된 파랑은 안내판을 통해 선회 유수조의 접선방향으로 유입된다. 선회 유수조는 유입된 파랑의 운동 에너지를 선회운동으로 변환하기 위한 것으로 수직 원통형으로 제작되어지며, 선회 유수조 양측에는 선회 유수조 내부로 파랑의 진행 방향을 수렴시키기 위하여 전향판이 설치된다. 안내판은 힌지 결합되어 선회 유수조에 유입된 물이 역류하는 것을

차단하는 체크밸브판이 설치되어 있다. 본 연구에서는 계산의 간소화를 위하여 체크밸브의 거동은 생략하였다.

본 연구에서 사용하는 대상 파고(1-1.6m)를 감안하여 이를 적절하게 수용할 수 있는 크기로 모델링 하였으며, 유입부 플랫폼은 1.6×3.0×1.0m(가로×세로×높이)의 사이즈를 가지며, 보호창틀, 안내관, 선회 유수조 등의 높이는 1.25m이며, 선회 유수조의 유입측 내경은 1.3m, 하단 출구측 내경은 0.25m로 모델링 하였다.

Ⅲ. 수치해석

1. 주기파 생성

실제 해양파는 불규칙하기 때문에 시간 평균을 내어 파력을 계산하지만 본 연구에서는 계산의 간소화 및 정량적인 결과를 도출하기 위해서 규칙파에 대한 계산을 수행하였다.

주기파를 구현하기 위해서 피스톤 방식의 조파기의 파 생성 원리를 적용하였다. 피스톤 행정 S 변화에 따른 주기파는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{H}{2} \frac{\sinh 2kh + 2kh}{\cosh 2kh - 1} \quad (1)$$

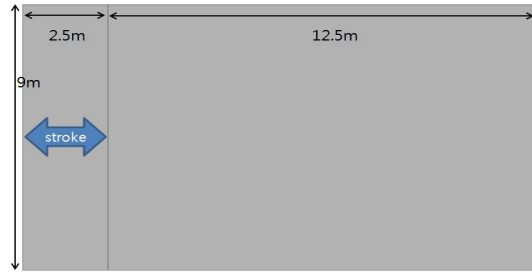
여기서 H 는 파고, $k = \frac{2\pi}{L}$ 은 파수, L 은 파장, h 는 수심을 의미한다. 또한 선형파 가정 이론 $H \ll L$ 에 의하여, 파고를 $H = \frac{L}{10}$ 으로 가정하여 최종적으로 식 (2)와 같이 원하는 파를 피스톤 행정에 의한 식으로 표현할 수 있다(Dean & Dalrymple 1991; Li et al. 2011).

$$S = \frac{1}{2} \frac{L}{10} (1 - \cos \omega t) \quad (2)$$

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)} = \sqrt{gk \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$$

효율적인 격자 생성 및 계산을 위해서 파를 생성하는 부분과 파고를 관찰하기 위한 도메인을 따로 나누어 Hexahedral 격자계를 생성하였다.

[Fig. 2]와 같이 왼쪽 벽면은 파를 생성하는 역할을 하는 피스톤 wall이며, 식 (2)에 의한 피스톤 행정에 따라 왕복 이동한다. 상부 벽면은 opening 조건을 부여하였으며, 오른쪽 출구면에는 깊이에 따른 정수압 조건을 부여하였다. 또한 하부 벽면은 점착 조건(no slip condition)을 부여하였으며, 양 측면은 symmetry 조건을 부여하였다. 식 (2)를 사용하여 파고 1.0-1.6m의 주기파를 생성하였다. 파장 L 에 따른 파고 H 를 계산하기 위해서 비정상 상태 계산을 수행하였다. time step은 0.1초 이며, total time 10에 대한 주기파를 계산하여 구현하였다.

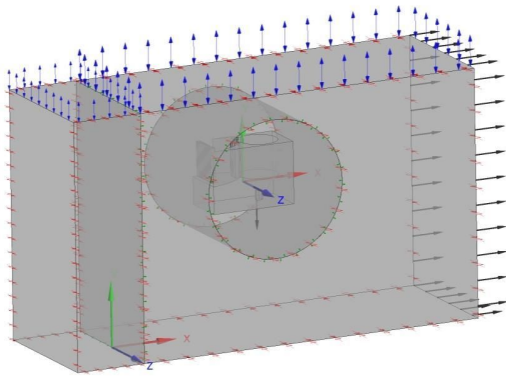


[Fig. 2] Domain for Generating Periodic Wave

2. 계산 격자 및 경계 조건

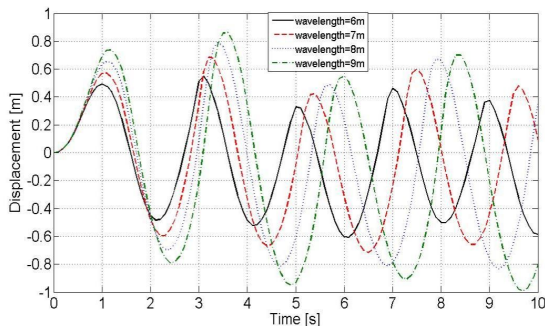
모델링한 파력발전 시스템의 유효 성능을 분석하기 위해서 [Fig. 3]과 같이 3차원 도메인을 생성하였다. 여기에는 주기파를 생성하는 영역과 파고를 관찰하기 위한 영역을 따로 구분하여 생성하였으며, 파고를 관찰하기 위한 영역의 내부에는 파력발전 시스템을 포함한 서브 도메인을 별도로 생성하였다.

격자 의존성 검토 과정을 거쳐 파고 생성 도메인은 tetra/mixed 격자계, 파고 관찰 도메인과 서브 도메인은 tetra 격자계로 구성되었으며, 총 80만개의 격자수로 이루어졌다.



[Fig. 3] Domain for Performance Analysis of the Floating Wave Converter

식 (2)에 의해 생성된 파고 1.0-1.6m 중 [Fig. 4]에 나타난 4가지 경우에 대해 계산을 수행하였으며, 기본적인 경계조건은 주기파 생성에서 사용한 조건과 동일하게 적용하였으며, 파력발전 시스템의 유동 배출구 측 경계조건에 선회 유수조의 높이에 따른 정수압 조건을 적용하여 물이 선회 유수조를 거쳐 출구측으로 배출되도록 하였다.



[Fig. 4] Variation of Wave Height with Respect to Wave Length

부양식 파력발전 시스템의 월파성능을 예측하기 위해서 상용코드인 ANSYS CFX 13.0을 이용하였으며, CFX에서 제공하는 6자유도 강체 (6-DOF rigid body) 해석(ANSYS, 2010)을 사용하였다. 본 연구에서는 heaving과 pitching 만을 고려하여 계산하였다.

IV. 결과 및 고찰

[Fig. 4]는 파장 6-9m 일 때 파고를 나타낸 그래프이며, 이 때, 원하는 파고 약 1.0-1.6m를 얻을 수 있었다.

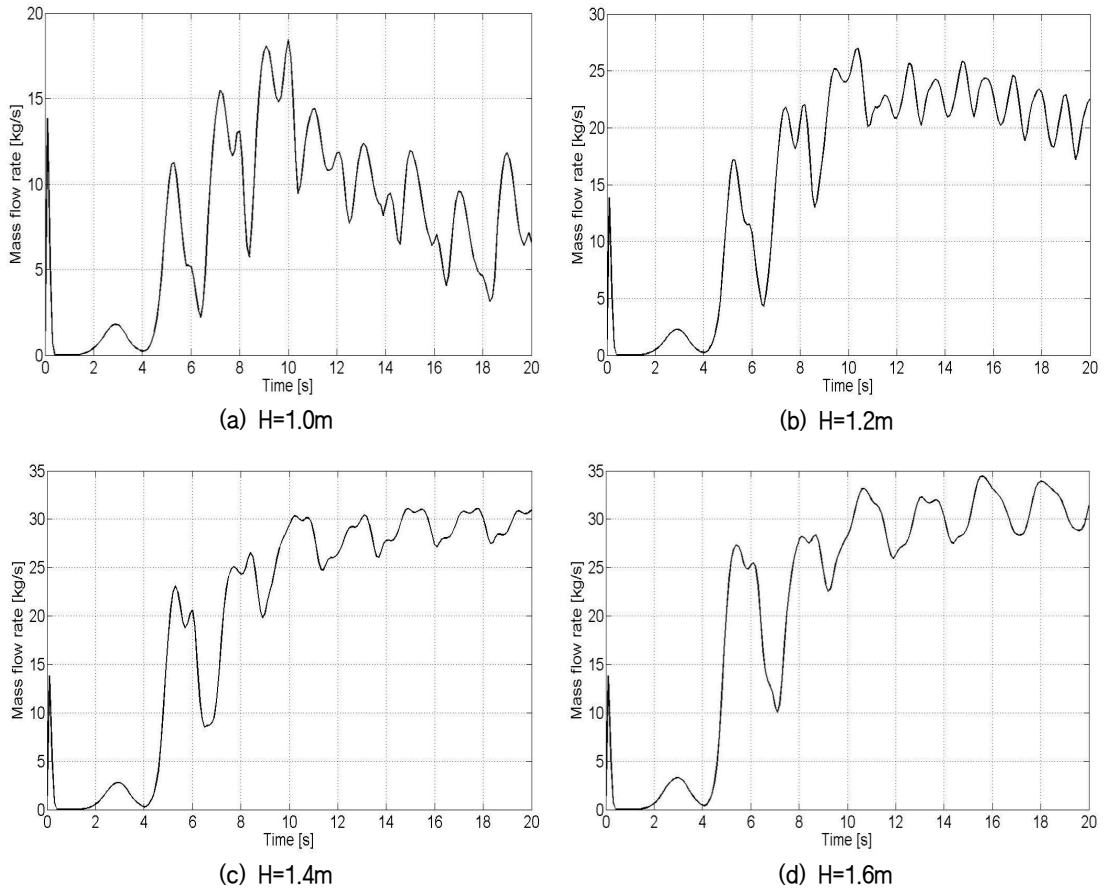
구현된 주기파에 대해서 파력발전 시스템을 포함한 3차원 비정상 해석을 수행하여 파고 변화에 따른 월파 성능을 비교하였다.

월파 성능은 선회 유수조를 거쳐 배출되는 출구측의 질량유량을 전 time step에 걸쳐 계산하여 산출하였으며, [Fig. 5]에 나타내었다. 전반적으로 약 10초 이후에 월파량이 안정적으로 변동되는 것으로 나타났다. 이것은 초기에 파랑이 존재하지 않은 상태에서 해석이 진행되었기 때문이다. 따라서 파고 1.0m의 경우 시간 10.4초에서 12.5초의 한 주기를 선별하여 평균 내었으며, 파고 1.2m의 경우 시간 12.0초에서 14.3초, 파고 1.4m의 경우 13.7초에서 16.1초, 파고 1.6m의 경우 14.4초에서 17.1초의 한 주기를 선별하여 평균 내었다. 그 결과 평균 질량유량은 각 파고 별로 각각 11.6, 22.9, 29.3, 30.0 kg/s 로 확인되었다.

본 연구에서는 월파된 물은 선회 유수조를 거쳐 바로 배출 되는 것으로 모사하였지만, 실제로는 선회 유수조를 거치면서 수차를 가동하여 발전하게 된다. 파고의 변화에 따라서 월파량은 많은 차이를 보이므로 추후 수차 설계 시 다소 효율이 낮더라도 운전 영역이 넓게 확보되도록 설계되어야 할 것으로 사료된다.

[Fig. 6]은 파고 1.6m 일 때 시간에 따른 파력발전 시스템의 거동 및 월파 상태를 나타내었다. a)는 월파되기 직전의 상태이며, b)는 월파된 물이 보호 창틀을 지나 전향판과 안내판까지 유동하는 모습이다. c)는 안내판을 지나 선회 유수조를 거치는 과정이며, d)는 선회 유수조를 거쳐 배출되는 상황을 나타내었다.

보호 창틀을 지난 물은 전향판과 안내판을 거쳐 선회 유수조를 지나 배출된다. 전향판은 유동



[Fig. 5] Variation of Wave Overtopping Rate with Respect to Time Step

진행 방향에 따라서 폭이 줄어들는데 이때 유체는 속도가 증가하며 안내판을 거치면서 접선 방향의 속도 성분을 얻어 회전하면서 선회 유수조를 지나 배출되는 것을 확인 할 수 있다. 높은 파고(1.4-1.6m)의 경우 유입된 물이 다시 안내판과 보호 창틀을 통해 다시 역류하여 외부로 배출되는 것으로 나타났는데 이것은 체크밸브의 작동을 고려한다면 보다 정확한 계산치를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

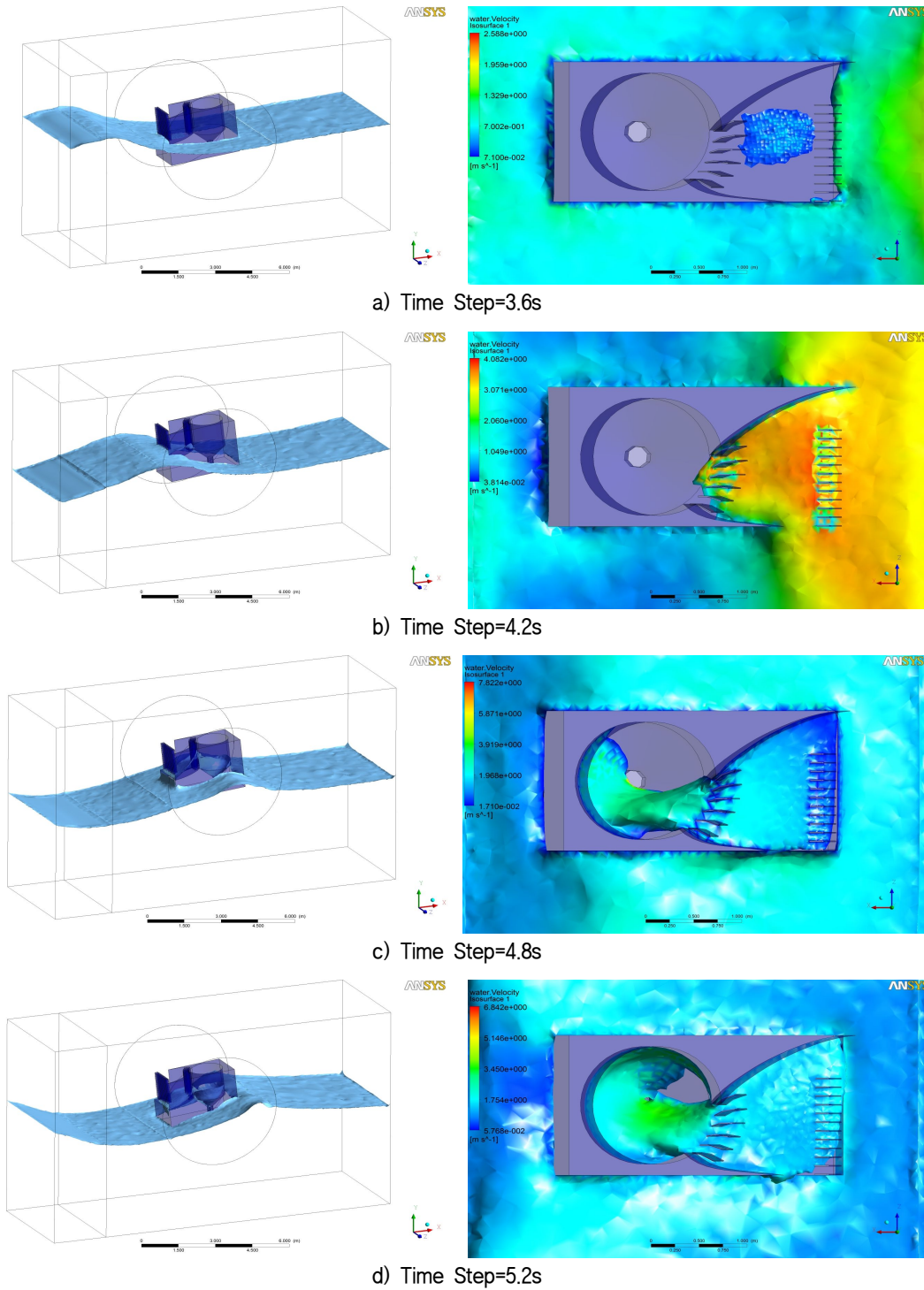
본 연구에서는 CFD를 이용하여 주기파를 구현

하여 부양식 파력발전 시스템의 거동 및 유동특성에 대한 수치해석을 수행하였다.

우리나라 해역의 평균 유의파고를 조사하여 파력발전의 관점에서 이용 가능한 파고의 범위 1.0-1.6m로 선정하였다. 주기파 생성을 위해서 피스톤식 조파기의 파 생성원리를 적용하였다.

생성된 주기파에 따라서 3차원 비정상 유동해석을 통해서 파력발전 시스템의 거동 및 월파 상태를 확인하였다. 파고의 변화에 따른 월파량은 11.6-30.0 kg/s 범위에 있었다.

본 연구를 통해서 얻은 수치해석 결과는 추후 파력발전 시스템의 상세 설계를 위한 기초 자료로 활용될 것으로 사료된다.



[Fig. 6] Behavior of Floating Wave Converter with Respect to Time Step (H=1.6m)

References

- ANSYS(2010). ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, ANSYS, Inc.
- Dean, Robert G. & Dalrymple, Robert A.(1991). Water wave mechanics for engineers and scientists, World Scientific.
- Kim, Jeong Hyop · Kim, Gwang Tae · Park, Se Hun · Oh, Wee Yeong & Kim, Hyeon Ju(2012). A feasibility study on thermal energy resource in deep ocean water, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering 15(1), 9~18.
- Korea Energy Agency(2014). Energy statics handbook.
- Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(2013). Energy part · material · equipment R&D master plan.
- Korea Maritime and Ocean University R&D Foundation(2011), Wave power generation system as a floating water break, Korea, Patent 1010391240000.
- Lee, Jong Soo(2009). Preliminary study for optimum shape of caisson structure embedding wave power generation, Ph.D. Dissertation, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University.
- Lee, Young Ho & Choi, Young Do(2007). The state and forecast of wave power technologies, Proceedings of the KINPR Spring Conference 31(1), 615~620.
- Li, Kui Ming · Parthasarathy, Nanjundan · Park, Young Kyu · Jung, Ho Yun · Choi, Yoon Hwan & Lee, Yeon Won(2011). Study on the motion of floater structure for design of wave energy generation in ocean, Journal of the Korean Society of Marine Engineering 35(5), 632~639.
- Park, Seong Kawe(2009). A study on complementarity of green growth, JFMSE 21(2), 306~324.
- Song, Mu Seok · Kim, Do Young · Kim, Min · Hong, Key Yong & Jun, Ki Chun(2004). Analysis of wave energy density for Korean coastal sea area based on long-term simulated wave data, Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering 7(3), 152~157.

-
- Received : 22 July, 2015
 - Revised : 17 August, 2015
 - Accepted : 24 August, 2015