

유량 조절 밸브가 탑재된 진동수주형 파력발전장치의 터빈 내 유동해석을 위한 수치해석 연구

A Numerical Study on Effects of Flow Analysis with Flow Control Valve on Turbine of OWC Type Wave Power Generator

노경철¹, 오재원², 김길원³, 이정희^{2*}

Kyoung-Chul Ro¹, Jae-Won Oh², Gil-won Kim³, Jung-Hee Lee^{2*}

〈Abstract〉

In this paper, a numerical analysis was conducted on the effect of the flow control valve of a oscillation water column(OWC) type wave power generator turbine. The OWC wave power turbine operates with compressed air in the air chamber according to the change of wave height. When the wave height changes rapidly, a flow control valve is required due to overload of the turbine and reduced efficiency. Therefore, in this paper, a flow control valve with an opening angle of 60 degrees was installed in the front of the turbine, and the pressure drop, torque, and overall performance were calculated according to the change of turbine RPM and flow rate of turbine inlet. In conclusion, the flow control valve with an opening angle of 60 degrees affects when the turbine rotates at low rotation and the inlet flow rate is large. But it does not have a significant effect on overall turbine performance and it is necessary to find the optimal angle in the future works.

Keywords : *Oscillation Water Column Type Wave Power Generator, Flow Control Valve, Computational Fluid Dynamics(CFD), Pressure Drop, Efficiency, Torque*

1 1저자, 동양대학교 철도기계시스템학과, 부교수
E-mail: kcro@dyu.ac.kr

2 2저자, 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터, 선임연구원 E-mail: herotaker@kriso.re.kr

3 3저자, 선박해양플랜트연구소 해양에너지연구본부, 시험연구원 E-mail: kimkilwon@kriso.re.kr

2* 교신저자, 선박해양플랜트연구소 해양플랜트산업지원센터, 책임연구원 E-mail: jhlee@kriso.re.kr

1 The Author, Railroad Mechanical Engineerin Dongyang University, Associated Professor

2 2 Author, Offshore Industries R&BD Center, Korea Reserch Institute Of Ships & Ocean Engineering(KRISO)

3 3 Author, Marine Renewable Energy Research Division, Korea Reserch Institute Of Ships & Ocean Engineering(KRISO)

2* Corresponding Aurtheror, Offshore Industries R&BD Center, Korea Reserch Institute Of Ships & Ocean Engineering(KRISO)

1. 서론

파력발전은 파도의 조수 변화 및 운동에너지를 이용하여 전기 에너지를 생산하며, 파고 및 파도 주기가 긴 해역이 적지로 평가되어 삼면이 바다인 한국연안은 좋은 입지를 가진 에너지원으로 평가되고 있다[1-2]. 파력발전 방식은 에너지 변환 방식에 따라 진동수주형(OWC), 월파형 및 가동물체형으로 분류되며[3-5], 그 중에서 진동수주형 파력발전은 파도에너지로 인해 압축 공기를 발생시켜, 발생된 공기의 흐름을 발전 터빈의 운동에너지로 변환시켜 전기를 얻는 방식이다. 또한 진동수주형 파력발전 방식은 직접 파랑에어지가 터빈에 가해지는 것이 아니라 공기실안의 공기가 압축, 팽창을 반복하게 되어 생기는 공기의 흐름을 통해 터빈을 운전하기 때문에 타 발전방식에 비해 구조적으로 안전하고 운용 시에도 관리가 편하다는 장점을 가지고 있다[6].

진동수주형 파력발전장치는 Fig. 1과 같이 외부 파도에 의해 진동수주실 내 수면 변화에 따라 압축 및 팽창 공기의 흐름을 이용하여 발전하기 때문에 설치위치 특성을 고려하여 구조물의 운동을

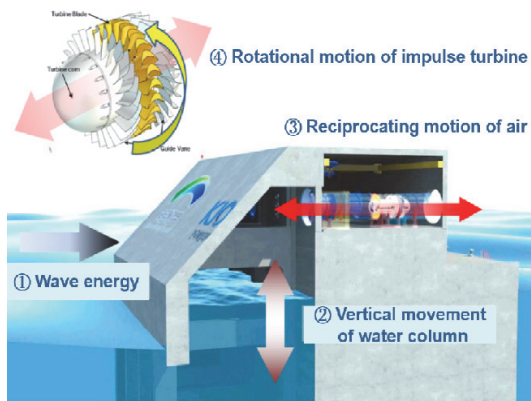


Fig. 1 Operating schematic of OWC type power generator[7]

고려한 고정식 및 부유식으로 분류하게 된다. 부유식 발전모델의 유동해석은 Hong 등[8] 및 Suzuki 등[9]에 의해 수치적으로 모사되었으며, Nagata 등[10]은 이를 실험적으로 연구를 수행하여 수치해석 모델과의 비교를 수행한바 있다. 또한 고정식에 대해서는 Liu 등[11]은 수치해석 기법 중 VOF (Volume of Fraction)기법을 이용하여 수치해석 결과의 신뢰성을 검증한바 있다. 또한 Wang 등[12] 및 Hong 등[13], Park 등[14]은 진동수주형 파력발전장치의 효율 및 운용특성에 영향을 주는 터빈 내 압축공기의 댄핑 특성을 실험 및 수치해석 연구를 통해 규명하였으며, 이러한 공기 댄핑 현상을 고려한 터빈 설계를 위해 Setoguchi 등[15] 및 Cui 등[16] 수치해석 연구를 통해 터빈의 최적 형상 구현을 위한 터빈 형상인자 연구를 수행하였다. 이를 통해 공기 댄핑 현상이 터빈 설계 및 아니라 운용 특성에 큰 영향을 주는 것으로 확인하였다.

이러한 연구들을 통해 Lee 등[7]은 진동수주형 파력 발전장치의 챔버 및 터빈 내 유동인자들을 실시간으로 계산할 수 있는 물리적 모델을 구현함으로써, 운용 시 발생할 수 있는 터빈의 과부하 및 기계적 특성을 미리 예측가능 하도록 연구하였으며, 이러한 실시간 모델을 통하여 특정 환경에서의 터빈의 과부하 및 과도한 공기 압축특성이 전체적인 효율저하 등을 가져올 수 있는 것으로 파악되었다. 따라서 이러한 터빈의 과부하를 막기 위한 터빈 유입부에 유량 조절 밸브를 적용하여 과부하시 대처하기 위한 장치 도입이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 진동파력 발전장치의 터빈 앞쪽에 유량조절밸브를 장착하여 유동 특성 및 터빈의 효율 등을 수치해석 연구를 통해 확인하였으며, 이를 통해 유량 조절 개폐각의 영향 및 이를 실시간 모델에 구현하기 위한 기초자료로 활용하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 수치해석 모델 및 조건

2.1 수치해석 모델링

Fig. 2는 진동파력 발전장치의 터빈해석을 위한 3차원 캐드모델링 및 경계조건, 지배방정식을 보여주고 있으며, 유량 조절밸브는 그림에서와 같이 터빈 앞쪽에 별도의 블레이드 형태로 장착되었으며, 기본적인 터빈의 형상 및 크기 등은 진동수주형 파력발전 실용화 기술 개발[3]에 사용된 500 kw급 터빈을 기반으로 60도의 개도각을 갖는 유량조절 밸브를 추가하여 모델링 하였다.

일반적으로 터빈형상은 각 스테이지 별 블레이드 개수가 동일하고 해석 시간의 단축을 위해 1개의 블레이드를 기준으로 주기적 경계조건 모델 (Periodic boundary)을 사용하여 계산하는 것이 일반적이며, 기존의 유량조절 밸브가 장착되지 않은 기본 터빈모델도 이와 동일하게 주기적 경계조건을 사용하여 해석하였다. 그러나 본 해석에 적용된 유량조절 밸브는 주 터빈 날개수와의 차이로 주기적 경계조건을 사용하기 불가능하여, 부득이하게 전체형상을 해석영역으로 설정하였다.

Fig. 3은 60도 각도의 유량조절 밸브를 장착한 진동파력 터빈의 격자구성도이며, 사면체격자

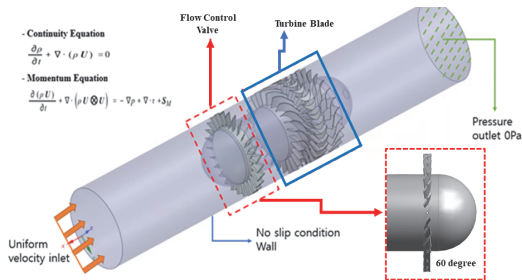


Fig. 2 3-D Modelling of OWC turbine and boundary condition

(Tetrahedron mesh)를 격자민감도 테스트를 통해 약 5,000,000개로 구성하였으며, 난류모델 해석을 위해 벽면 격자수인 y+값이 10을 넘지 않도록 조절하였다. 기존의 주기적 경계조건 모델과의 비교를 위해 Fig. 4와 같이 유량조절밸브가 없는 경우의 해석결과에서 압력강하 수치가 평균 5 % 이내로 만족하여 전체 해석 모델의 해석 신뢰성을 확인하였으며, 기존의 유량조절 밸브가 없는 경우의 해석 값과도 비교 사용이 가능한 것으로 판단된다.

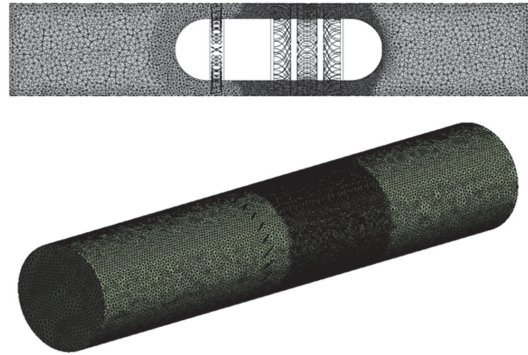


Fig. 3 Grid generation of OWC turbine with flow control valve (Angle = 60°)

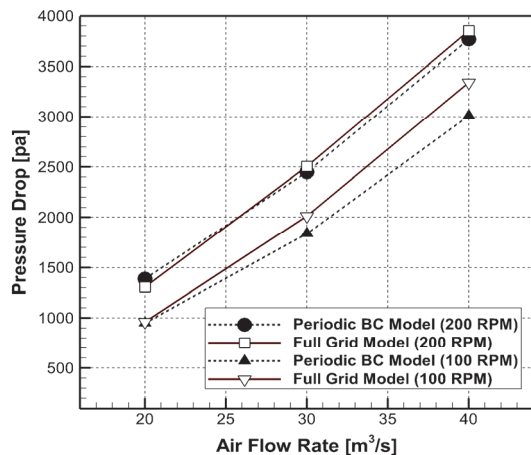


Fig. 4 Comparison of pressure drop (Periodic Boundary Model, Full Grid Model)

2.2 지배방정식 및 해석 조건

진동수주형 터빈해석을 위해서는 공기압축 및 팽창을 고려하여 압축성 질량보존방정식(Mass Conservation Equation)과 운동량보존방정식(Momentum Conservation Equation)을 사용하였으며, 압축성 유체 해석 및 회전체 유동에 주로 사용되는 SST 난류 모델(Shear Stress Transport Model)을 적용하였다. SST 난류 모델은 벽면에서는 Wilcox의 $k-\omega$ 모델을 사용하고, 주축 유동 해석에는 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하는 하이브리드 모델로서, 회전 및 주축(Principal Axis) 유동에 모두 적합한 모델로 평가되어 터빈해석 모델로는 합리적인 해석 결과 및 해석시간의 단축을 가져올 수 있는 장점이 있다. 터빈 및 유량조절밸브의 회전운동을 모사하기 위해 MRF(Multi Reference Frame)기법을 적용하였으며, 유한체적법(Finite Volume Method) 기반의 상용 열유체 해석 프로그램인 ANSYS 사의 CFX를 사용하였다.

해석 조건으로는 터빈회전수를 100 RPM에서 800 RPM까지 100 RPM 단위로 해석을 수행하였으며, 유입 유량변화에 따른 터빈 성능을 파악하기 위해, 공기 유입 유량을 20 m^3/s 에서 60 m^3/s 까지 10 m^3/s 씩 증가시키면서 해석하여, 기존 주기적 경계조건 모델과의 비교를 제외하고 총 40 개의 유량조절밸브 모델 해석을 수행하였다.

각 모델별 해석 시간은 CPU 32개와 GPGPU 2개를 탑재한 워크스테이션에서 약 4시간이 소요되었으며, 해석 케이스가 방대함에 따라 ANSYS Workbench를 이용하여 매크로 작업을 수행하여, 해석 결과의 일관성 및 데이터 오염을 사전에 방지하였다.

또한 터빈해석에서 가장 중요한 터빈 효율계산[3]을 위해서는 정상상태 입력계수(Input Coefficient) C_A 와 토크 계수(Torque Coefficient) C_T 를 정의해야 되며, 이는 다음 식과 같다.

$$C_A = \frac{\Delta p Q}{\frac{1}{2} \rho_a (v_a^2 + U_R^2) b l_r z v_a} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_a (v_a^2 + U_R^2) b l_r z r_R} \quad (2)$$

여기서, $\Delta p, Q, T$ 는 압력강하, 유량, 토크를 나타내며, v_a, U_R, b, l_r, z, r_R 은 각각 축 방향 평균유속, 회전방향유속, 날개의 스패ن(Span), 날개의 코드 길이, 날개 수, 평균반경($0.85R$)을 의미한다. 이를 활용한 터빈의 효율 식은 다음 식으로 정의된다.

$$\eta = \frac{T\omega}{\Delta p Q} = \frac{C_T}{C_A \phi} \quad (3)$$

여기서 ϕ 는 유동계수(Flow Coefficient)이며, 이는 $\phi = v_a / U_R$ 로 정의되어 날개 이론에서 받은 각(Angle of Attack)에 대응하는 물리량이다.

본 연구에서는 유량조절밸브의 영향을 알아보기 위하여 압력강하계산을 기반으로 터빈의 토크 및 출력, 효율을 계산함으로써 유동특성 변화를 파악하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 속도장 및 압력장 해석 결과

Fig. 5는 유입유량 20 m^3/s 에서 터빈회전수 변화에 따른 속도분포를 비교한 그림이다. 유입유량 고정 시에 터빈 회전수 증가에 따라 회전 운동량 증가로 인해 상대적으로 유로가 좁은 터빈블레이드 부근에서 유속증가가 높으면 후류에서는 스월(Swirl)유동형태의 일반적인 회전유체기기의 특성을 정확히 보여주고 있다.

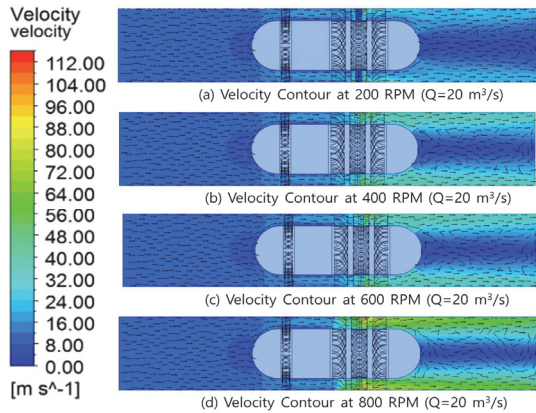


Fig. 5 Velocity contour of flow control valve and turbine blade at $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

유량조절 밸브의 개도 각이 터빈블레이드에 비해 상대적으로 크고 유로가 커서 유속의 증가 및 유로저항은 회전수 증가에서도 크게 증가하지 않는 것으로 보이며, 이는 유입유량을 증가하였을 경우에도 밸브를 통과하는 유량 증가로 인해 축방향 속도가 증가하기는 하지만 전체적으로 유사하게 해석되어 유량조절 밸브의 현재보다 작아야 직접적인 효과가 있을 것으로 확인되었다.

Fig. 6은 유입유량 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 터빈회전수 변화에 따른 압력변화를 나타낸 그림으로 유입유량이 동일한 경우에도 터빈 블레이드 회전에 의해 증가한 회전 유속이 터빈 압력강하를 급격히 증가시키는 것을 보여주고 있다.

입출구의 압력강하 값이 터빈의 토크 및 출력, 효율계산에 직접적인 영향을 미치는 중요한사이기 때문에 최소한의 압력강하 값을 유지하는 것이 매우 중요하다. 해석 결과에서도 유량조절밸브 보다는 터빈블레이드 부근에서 급격한 유로감소 및 단터빈의 특성으로 대부분의 압력강하가 발생되므로, 유량조절밸브가 압력강하에 기여하는 부분은 상대적으로 매우 적은 것으로 보이며, 유량조절을 위해서는 압력강하 값이 적정하게 유지되어야 되므로 속도분포 해석과 마찬가지로 유량조절밸브의

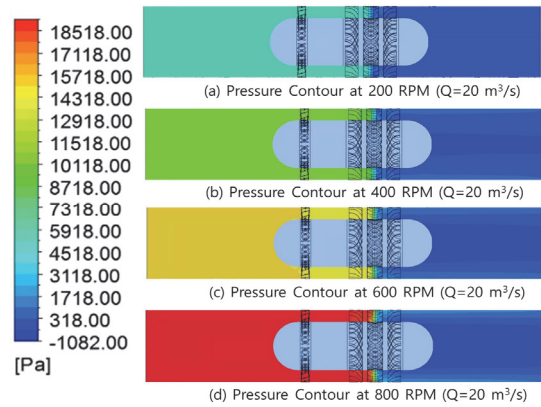


Fig. 6 Pressure contour of flow control valve and turbine blade at $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

역할이 부족한 것으로 보여, 이를 기존 유량조절 밸브가 없는 경우와 비교하여 정량적인 효과를 검토가 필요한 것으로 판단되었다.

3.2 유량조절밸브의 효과 검토

Fig. 7은 유량조절밸브 유무에 따른 압력강하를 비교한 그래프로 앞선 속도장 및 압력장 해석에서 유량조절밸브가 전반적인 유동장에 영향을 미치지 못한 것으로 판단되어, 기존에 주기경계조건으로 계산되었던 결과와 비교하였다. 압력강하는 기본적으로 유량 혹은 속도의 제곱으로 증가하게 되며, 이는 입구 유속의 증가 및 터빈회전속도 증가와 비례하여 계산되었다. 유량조절밸브는 회전속도가 낮은 100, 200 RPM에서 최대 10 % 정도 압력강하를 증가시키는 것으로 보이며 유입유량 증가분에 비례하여 그 차이도 커지는 것으로 해석되었다. 이는 터빈의 고회전시에는 유입유량 보다는 블레이드의 회전에 따른 회전유동에 대한 압력강하가 주요인이라 터빈 앞단에 위치한 유량조절밸브의 역할이 상대적으로 적은 것으로 보이며, 효과 또한 미미한 것으로 파악되었다. 현재 OWC 발전기의 실증실험을 수행하고 있으며, 해석 및 실증실험 결과

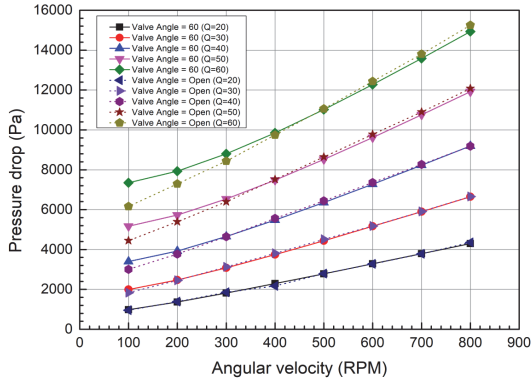


Fig. 7 Comparison of pressure drop with/without flow control valve (Variation of RPM and Flow Rate)

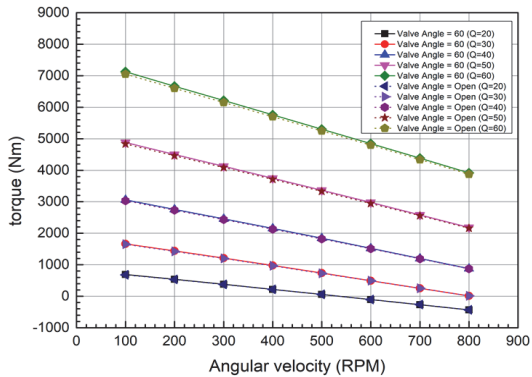


Fig. 8 Comparison of torque with/without flow control valve (Variation of RPM and Flow Rate)

를 고려하여 유량조절 밸브의 최적 개도값을 선정하는 추가 연구가 필요한 것으로 보인다.

Fig. 8은 유량조절밸브 유무에 따른 터빈 블레이드의 토크(Torque)값을 나타낸 그래프로 터빈을 비롯한 유체기계의 토크는 기본적으로 유입되는 축방향 유량 및 회전체 회전속도의 조합으로 계산되며, 복잡한 터빈 블레이드 형상 및 다단 터빈임을 감안하여 CFX 프로그램 내에서 회전유동을 모사하기 위한 MRF 영역의 토크값을 표기하였다. 그림에서와 같이 유입유량이 높을수록 선형적으로

토크가 증가하였으며, 터빈의 회전 각속도가 클수록 터빈 블레이드 외측과 내측 허브부분의 속도 차이가 상대적으로 줄어들어 같은 유량에서는 터빈회전수가 높을수록 토크가 감소하는 결과를 보여주고 있다. 터빈의 토크계산은 실제 터빈의 출력에 직접적인 영향을 주는 중요인자이며, 압력강하 결과와 같이 유량조절 밸브의 영향은 유입유량이 크고 회전 각속도가 작을수록 미세한 차이는 보이지만 전반적으로 유의미한 차이는 보이지 않는 것으로 보아 실제 유량 및 토크 조절을 위해서는 밸브의 개도각이 60도 이하의 값을 가져야 함을 추가적으로 확인하였다.

3.3 진동파력발전 터빈 종합성능 차트(Chart)

Fig. 9은 진동수주형 파력발전 터빈의 압력강하 및 출력, 효율을 나타내는 성능차트로서 발전 터빈 운용 시 필요한 최적의 효율 구간 및 발전량을 유추해 볼 수 있다. 터빈의 출력은 유입유량에 따라 최대 출력 회전수가 결정되며 최적 회전수 이상일 경우에는 효율이 급격히 떨어지는 것을 확인하였다. 이는 터빈효율 계산식인 식(3)과 같이 유입유량 및 토크, 회전수, 압력강하 값이 복합적으로

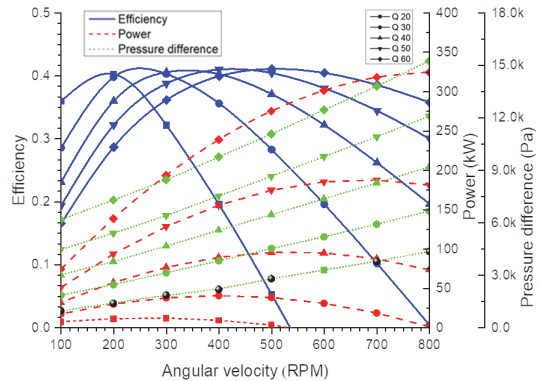


Fig. 9 Total performance chart of OWC turbine with 60° flow control valve

로 적용되기 때문이며, 특히 유입유량이 작을 경우에는 저회전에서 최적의 효율 및 출력이 나오는 것으로 해석되었다. 특히 유입유량이 50 m³/s 이상의 고유량에서는 최대 회전수에서도 출력은 유지되지만, 터빈 회전수 500 RPM 이상에서는 효율이 감소되는 것으로 해석되어 유입유량 변화인 실제 조수변화 정도에 따라 적절한 운전조건을 설정하는 것이 효율적 운용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

진동수주형 파력발전 터빈의 효율적인 운용 및 과부하 방지를 위해 60도의 개도각을 갖는 유량 밸브를 설치하여 이에 대한 유동특성을 수치해석을 이용하여 확인하였다. 진동수주실의 압축공기의 특성상 액상의 유체에 비해 개도각이 영향이 크지 않을 것으로 예상은 되었으나, 실제 해석 시에는 유입유량이 작을 경우에만 압력강하에 영향을 미치는 것으로 해석되어 실제 유량 조절 효과도 저유량시에만 영향을 미칠 것으로 판단된다. 다양한 운전 조건하에서 유량조절밸브의 효과를 확인하기 위해서는 60도 이하의 다양한 개도각을 추가 해석하여 운전조건별 최적 개도각을 찾는 것이 필요하다. 특히 본 연구를 통해 파고가 작은 상황인 저유량에서는 터빈회전수 변화에 효율이 급격히 변해지기 때문에 유량조절 효과보다는 압력강하가 작은 밸브가 필요하며, 고유량시에는 실제 유량 및 압력조절이 가능한 밸브가 필요하기 때문에 운전상태를 고려한 맞춤형 밸브의 선정이 중요함을 확인하였다. 실제 실증실험이 진행 중이기 때문에 수치해석 결과에 대한 검증 및 운용방안이 나오게 되면 다양한 유동 특성 인자가 도출될 것으로 예상되며, 본 연구결과를 바탕으로 다양한 조건에 부합할 수 있는 최적의 유량조절 밸

브의 설계 및 해석이 가능할 것으로 예상되며, 향후 구축될 진동수주형 파력발전장치의 실시간 예측 및 대응, 스마트 운영에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업인 “스마트 운용/유지보수 체계 구축을 위한 진동수주형 파력발전 시스템의 Digital Twin 기술 개발 (3/5)(PES4020)”과제로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] KRISCO, “Research on based-technology of wave overtopping power generating system”, Geoje-si: KOREA RESEARCH INSTITUTE OF SHIPS & OCEAN ENGINEERING, (2006).
- [2] H. J. Ryu, “study on optimal sites of wave power generation based on numerical wave model”, Doctoral dissertation. Hongik University, Seoul, (2006).
- [3] KRISCO, “Development of OWC wave energy utilization system”, Geoje-si: KOREA RESEARCH INSTITUTE OF SHIPS & OCEAN ENGINEERING, (2016).
- [4] KRISCO, “Development of Wave Energy Utilization System using Wave Overtopping Reef with Spiral Guide Vanes”, Geoje-si: KOREA RESEARCH INSTITUTE OF SHIPS & OCEAN ENGINEERING, (2010).
- [5] J. B. Park, “Development of AWS wave generator system based on 4-axis linear generator”, Seoul-si: Yonsei University, (2013).
- [6] W. C. Koo, M. H. Kim and Y. R. Choi, “Numerical Analysis of Chamber Flow and wave Energy

- Conversion Efficiency of a Bottom-mounted Oscillating Water Column Wave Power Device”, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, vol. 47, no. 3, pp. 388-397, (2010).
- [7] J. H. Lee, K. Y. Sung, J. Oh, K. Kim, J. S. Choi and S. G. Choi, “A Study on The Real-Time Physical Model Implementation for The Flow Analysis in The Chamber and Turbine of OWC Type Wave Power Generator”, *J. Comput. Fluids Eng.*, vol. 25, no. 3, pp. 50-58, (2020).
- [8] D. C. Hong and S. W. Hong, “Numerical Study of the Motions and Drift Force of Floating OWC Device”, *Ocean Engineering*, vol. 31, pp. 139-164, (2004).
- [9] M. Suzuki, T. Kuboki, S. Nagata and T. Setoguchi, “Numerical investigation of 2D optimal profile of backward-bent duct type wave energy converter” *J. Offshore Mech. Arct. Eng.*, vol. 133, no. 4, pp. 041602-1-041602-8, (2011).
- [10] S. Nagata, K. Toyota, Y. Imai and T. Setoguchi, “Experimental Study on Hydrodynamic Forces Acting on a Floating Wave Energy Converter Backward Bent Duct Buoy”, *Proceeding of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 366-373, 2008.
- [11] Z. Hyun and K. Y. Hong, “Experimental Research on Performance of a BBDB Wave-Activated Generation Device Model”, *Proceedings 2nd European Wave Power Conference*, pp. 8-10, (2008).
- [12] D. J. Wang and K. Mahmoud, “Analysis of Shoreline OWC Type Wave Energy Converters”, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 1, pp. 8-15, (2002).
- [13] K. Y. Hong, S. H. Shin, D. C. Hong, H. S. Choi and S. W. Hong, “Effects of shape parameters of OWC chamber in wave energy absorption. Proc”, *17th Int. Offshore and Polar Eng Conf*, pp. 428-433, (2007).
- [14] S. W. Park, B. W. Nam, K. H. Kim and K. Y. Hong, “Parametric Study for an Oscillating Water Column Wave Energy Converter Applicable to Breakwater”, *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 66-77, (2018).
- [15] T. Setoguchi, S. Santhakumar, H. Maeda, M. Takao and K. Kaneko, “A review of impulse turbines for wave energy conversion”, *Renewable Energy*, vol. 23, no. 2, pp. 261-292, (2001).
- [16] Y. Cui, B. S. Hyun and K. W. Kim, “Numerical Study on Air Turbines with Enhanced Techniques for OWC Wave Energy Conversion”, *China Ocean Eng*, vol. 31, no. 5, pp. 517-527, (2017).
- [17] K. W. Kim, K. H. Kim, J. Y. Park and S. W. Park, “Selection of Standard Model for OWC Type Turbine and Drawn of Performance Chart”, *The Korean Society for Marine Environment & Energy*, pp. 86-86, (2019).