



Original Article

방파제 연계형 30kW급 파력발전용 임펄스터빈의 설계와 성능평가

김길원¹ · 홍기용² · 김경환³ · 현범수^{4,†}

¹선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 시험연구원
²선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 책임연구원
³선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 선임연구원
⁴한국해양대학교 조선해양시스템공학부 교수

Design and Performance Analysis of Impulse Turbine for 30 kW-class OWC-type Wave Energy Converter Installed at Breakwater

Kilwon Kim¹, Keyyong Hong², Kyong-Hwan Kim³, and Beom-Soo Hyun^{4,†}

¹Staff, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea
²Principal Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea
³Senior Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea
⁴Professor, Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

진동수주형 파력발전장치는 간단한 에너지변환 구조와 유지보수의 용이성 때문에 타 파력발전장치에 비해 상용화에 가장 근접한 장치이다. 본 논문은 도서지역의 방파제에 연계할 파력발전장치의 2차 에너지변환장치로서 임펄스터빈을 설계하고 성능평가 함을 목적으로 한다. 먼저 적지해역과 방파제의 규모에 적합한 기당 30 kW급 발전장치용 임펄스터빈의 개념설계를 수행하고 용수파력발전장치 설계에서 사용한 Hong *et al.*[2016]의 연구방법론을 바탕으로 직경을 도출하였으며, 수치해석을 통하여 다양한 설계변수의 민감도 해석을 진행하였다. 이를 바탕으로 도출된 기본 임펄스터빈의 형상에 더하여 날개 스펠방향으로 뒤젓힘각을 적용한 로터형상과 그 끝에 링을 부착한 링형(Ring-type) 터빈 형상을 수치해석적 방법으로 제안하여 총 3개의 후보터빈을 도출하였다. 도출된 터빈들의 성능검증을 위하여 왕복유동이 재현 가능한 풍동에서 실험을 실시하여 각 터빈의 성능을 다양한 입력조건에서 평가하였고, 그중 링형 터빈이 설계점에서 최대 52.9%의 우수한 터빈 효율을 주는 것으로 확인하였다.

Abstract – The present study deals with the design and performance analysis of three different impulse turbines for 30 kW-class Oscillating Water Column (OWC) wave energy converter applicable to breakwater. Conceptual design was made by using the look-up table method of Hong *et al.*[2016] previously applied to Yongsoo Wave Power Plant. For the basic design, FLUENT-based numerical analysis tool was utilized to design a conventional-type impulse turbine by optimizing the design parameters such as number of blade, angle of guide vane, hub ratio and tip clearance. Two more models were designed by modifying the conventional-type to enhance the efficiency of turbines. Firstly, a ring-type turbine was proposed to minimize the vortex roll-up near the tip of rotor blade. The depth of penetration, thickness and length of ring were optimized numerically. Secondly, a sweep angle-type turbine designed by Yang *et al.*[2017] was considered as one of the candidates. Numerically designed three turbines were then validated experimentally using a specially-built reciprocating flow generator to simulate the wave movement inside OWC. It was found that while both ring-type and sweep angle-type turbines gave the better efficiency than the conventional-type, a ring-type turbine was finally selected as the best one which shows approximately 52.9% in peak efficiency.

Keywords: Breakwater(방파제), Wave energy converter(파력 변환), Oscillating water column(진동수주), Impulse turbine(임펄스 터빈), Ring-type(링형), Sweep angle-type(뒤젓힘각형), Wave simulator test rig(터빈 성능평가용 장치)

†Corresponding author: bshyun@kmou.ac.kr

1. 서 론

진동수주형 파력발전장치는 간단한 에너지변환장치의 구조와 유지보수의 용이성 때문에 타 파력발전에 비해 상용화에 근접한 장치이다. 진동수주형 파력발전장치는 3단계의 에너지변환을 거치게 되는데 그중에서 에너지변환효율을 결정하는 가장 핵심적인 단계는 운동에너지를 기계에너지로 변환하는 2차 에너지변환장치이다. 적용되고 있는 터빈 형태로는 크게 임펄스 터빈과 웰스 터빈으로 구분할 수 있고, 임펄스 터빈은 고속으로 분사되는 유체의 충격력에 의해 회전하는 방식이고, 웰스 터빈은 날개요소 이론에 의하여 받음각에 따라 생산되는 양력에 의해 회전하는 방식이다. 웰스 터빈은 구조가 간단한 장점이 있으며, 단점으로는 좁은 작동범위와 자기기동에 따른 문제, 빠른 회전속도 및 소음 발생 문제 등이 있다. 이에 비해 임펄스 터빈은 웰스터빈에 비해 다소 낮은 최대 효율과 상대적으로 복잡한 구조에도 불구하고, 작동범위가 넓고 자기기동특성이 우수하며, 낮은 회전속도 등의 장점을 가지고 경쟁력을 키우고 있다. 과거 웰스터빈을 적용하던 유럽 국가들도 최근에는 임펄스 터빈을 주로 채택하는 경향을 보이고 있다.

초기의 파력발전용 임펄스 터빈에 대한 연구는 Setoguchi *et al.*[1996, 2001]에 의하여 진행되었는데, 고정된 가이드베인을 적용한 임펄스터빈 날개단면 형상 등의 최적화 연구와 가변피치형 가이드베인을 적용한 임펄스 터빈을 제안하여 실험적으로 성능을 평가하여 웰스 터빈과 대등한 효율을 보이는 것을 확인하였다. 국내에서도 수치해석을 이용한 임펄스터빈의 날개수, 허브비, 날개끝단 간극, 가이드베인 각도에 따른 터빈의 성능을 고찰하였으며, 터빈의 효율향상을 위하여 날개끝단에 판과 링을 부착한 터빈을 고안하여 성능해석을 수행하였다. 이러한 시도는 날개끝에서 발생하는 유동박리와 와류를 줄이는 효과가 있어 각각 5%, 10%의 효율이 향상됨을 확인한 바 있다(Hyun and Moon[2004], Hyun *et al.*[2006]). 또한, 터빈 날개의 전단과 후단에 뒤젓힘각을 달리 적용하여 최적의 조합을 수치해석적으로 고찰하였으며, 약 8%의 효율향상도 얻은 바 있다(Yang *et al.*[2017]).

본 논문은 진동수주형 파력발전방식을 채택하여 도서지역의 방파제에 연계하여 운용이 가능한 발전장치의 터빈 설계를 목적으로 한다. 주요 후보지의 하나인 추자도 목리항의 자원평가를 통하여 30 kW급 용량에 맞는 터빈의 개념설계와 직경선정에 대한 내용이 소개된다. 터빈의 설계변수를 최적화하기 위하여 민감도 해석을 실시하였고, 이를 통하여 얻어진 기본 터빈을 바탕으로, 보다 향상된 효율 향상을 위해 제안된 뒤젓힘각을 적용한 로터와 링형 터빈에 대한 결과를 소개한다. 수치해석 결과는 왕복유동 재현이 가능한 풍동에서 모형시험을 통하여 성능검증을 실시하였고, 수치해석결과와 비교되었다. 이를 바탕으로 후보 터빈을 도출하였으며, 링형 터빈의 경우 최대 52.9%의 터빈 최대 효율을 확인하였다.

2. 임펠스터빈의 설계

2.1 설계조건

설계조건 중 가장 중요한 요소는 개발된 파력발전장치의 설치 위치와 후보지의 파랑조건이다. 한국해양과학기술원의 전해역 심해 설계파랑자료를 바탕으로 국내 도서지역 중 20개 이상의 도서에 대한 파랑에너지 밀도를 도출하였다. 파랑에너지밀도가 높은 주요 5개의 후보도서에 대해서는 파랑해석프로그램인 SWAN을 이용하여 보다 정확한 파랑에너지 밀도 분포를 도출하였으며, 이로부터 최종적으로 추자도 목리항 주변해역을 설치위치로 선정하였다. Fig. 1은 추자도 부근의 파랑에너지 밀도분포의 예를 보여준다(Hong *et al.*[2017]).

2.2 초기설계

진동수주실 내 수위의 움직임에 의해 발생하는 수주는 챔버 내의 압축공기를 덕트로 배출 및 흡입을 반복하게 된다. 덕트 내에 발생되는 공기의 왕복흐름은 터빈과 발전기를 회전시켜 발전하게 된다. 임펠스터빈의 초기설계를 통하여 결정되어야 할 사항은 설계용량에 맞는 터빈의 형식과 직경 및 정격속도이다. Fig. 2는 진동수주형 파력발전용 터빈의 초기설계 흐름도이다. 적용후보지의 파랑에너지 자원평가를 통하여 단위시스템의 용량을 30kW로 결정하였으며, 계절적인 영향에 따라 입력에너지 변동이 큰 특성과 발전기의 특성을 고려하여 터빈형식을 임펠스터빈으로 선정하였다. 터빈의 직경선정을 위하여 현재 가동 중에 있는 제주 용수시험파력발전소에 설치된 터빈의 토크곡선(Hong *et al.*[2016])을 활용하여 다양한 직경과 회전속도에 대한 효율, 토크 및 출력을 Fig. 3과 같이 도출하였다. 직경입력유량은 후보지의 파랑에너지를 평가한 후, 진동수주실의 크기와 효율을 고려하여 그 범위를 도출하였고, 출력과 효율관점에서 직경과 정격 회전속도를 결정하였다.

Fig. 3에는 터빈이 설치되는 덕트의 직경이 0.6, 0.8, 1.0 m인 세 경우가 나타나 있다. 회전속도 증가에 따라 설계 토크는 다소 감소

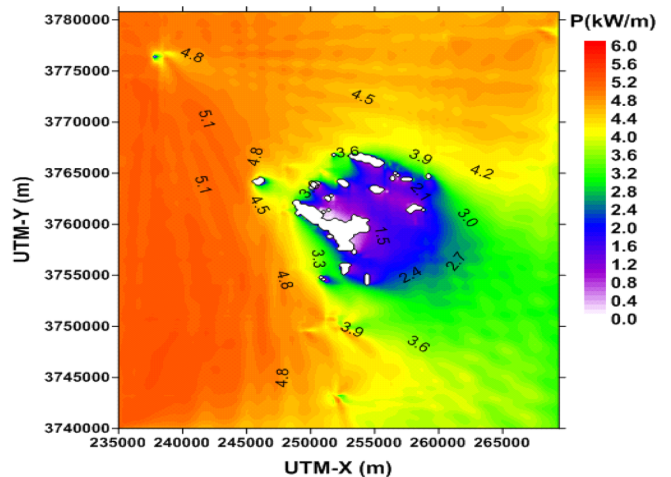


Fig. 1. Wave energy density of Chuja-do.

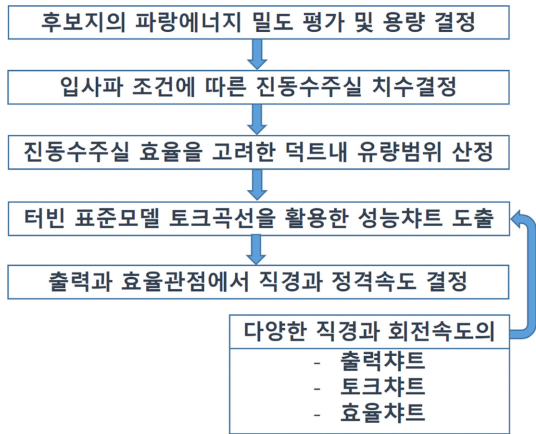


Fig. 2. Flow chart of conceptual design.

하는 경향을 보이지만 터빈의 출력은 증가하며, 동일한 유량에서 직경의 감소는 덕트내 유속의 증가를 유발하므로 출력이 상승된다. 덕트 직경 0.6 m에서 가장 큰 출력이 얻어지지만 유량의 변화에 가장 민감하며 저 회전속도에서는 운전범위를 벗어나 효율이 급격히 저하되는 단점이 눈에 띈다. 직경이 1.0 m에서는 넓은 작동범위와 적절한 효율이 확보되지만 전체적으로 가장 작은 출력이 얻어진다. 반면에 직경 0.8 m인 경우는 넓은 터빈 작동범위와 유량의 구간에서 전체적으로 40% 이상의 안정된 터빈 효율이 확보되면서도 원하는 출력을 충분히 얻을 수 있는 결과를 보여주고 있다. 이로부터 목표출력인 30 kW를 만족하면서도 입력유량의 변화에 따라 효율의 변동폭이 작은 구간을 확인하여 직경을 0.8 m, 정격회전수를 800 rpm으로 결정하게 되었다.

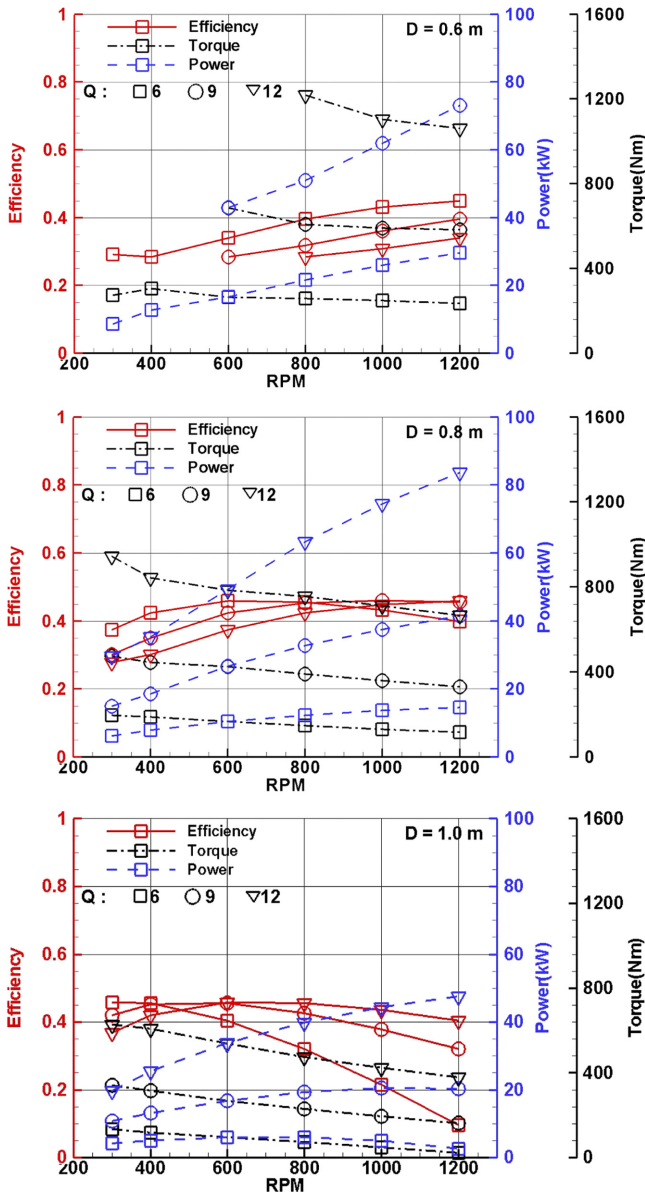


Fig. 3. Performance chart of impulse turbine ($D=0.6, 0.8, 1.0\text{ m}$).

2.3 기본설계와 민감도 해석

개념설계를 통해 도출된 터빈의 기본설계는 수치해석적인 방법으로 수행되었다. 본 연구에서는 과거 연구에서 검증된 상용 CFD 코드를 이용하여 계산을 수행하였으며, 계산의 효율을 향상시키기 위하여 날개에 주기조건을 부여하여 수치해석모델을 구축하였다. 정상유동 해석을 근간으로 하며 필요에 따라 준정상해석을 하도록 되어 있는데, 터빈의 초기기동을 제외한 대부분의 정상 작동범위에서 유동의 비정상성이 과력발전용 임펄스 터빈의 성능에 미치는 영향이 크지 않음을 과거 충분한 연구를 통하여 밝힌 바 있기 때문이다(Hyun *et al.*[2006] 등). 격자는 6×10^5 개까지 증가시키면서 격자의존도를 검토하였고, 2×10^5 개 이상이면 계산시간과 수렴도 측면에서 가장 만족할 만한 결과를 보여 주었다. 수치해석에 대한 검증은 여기에 더 소개하지 않으며, 추가적인 정보는 필요한 경우 저자들의 과거의 연구를 참고하면 된다(Liu *et al.*[2011, 2013] 등).

초기 도출된 기본 터빈은 덕트내 축방향 입력속도와 터빈의 회전속도의 비로 표시되는 입력계수의 설계점인 $\phi = 1$ 에서 터빈 날개수, 가이드베인 각도, 허브비, 날개끝단 간극, 로터와 가이드베인 간격 등 다양한 설계변수에 대하여 민감도 해석을 수행하였는데 그 중 대표적인 결과를 소개하면 Fig. 4와 같다.

이로부터 기본 터빈 로터의 날개수와 가이드베인의 갯수는 30개 정도, 가이드베인의 설치각도 35도, 허브비 0.7 등이 적정함을 확인하였다.

설계된 기본 터빈에 추가하여 최대 효율을 도출하기 위하여 두 가지의 효율향상 방법에 대하여도 검토를 진행하였다. 날개의 끝단에 링(Ring-type)을 부착하는 방안(Hyun *et al.*[2006])과 날개에 뒤젓힘각(Sweep angle)을 적용하는 방안(Yang *et al.*[2017])이 그것인데 상세한 연구내용은 각각의 논문에서 다루고 있으므로 여기서는 대표적인 최종 비교모델 선정결과만 소개하도록 한다. 소개되는 유동조건은 공히 입력계수 $\phi = 1$ 에 대한 결과이다. 먼저 링형 터빈의 경우 링의 두께와 침투깊이를 Fig. 5와 같이 조사하여 각각 1 mm, 2 mm로 결정하는 등 링의 크기 최적화를 시도하였다(Kim *et al.*[2018]). 터빈 날개의 뒤젓힘각을 적용하는 방안은 뒤젓힘각을 전단각과 후단각으로 나누어 20개의 다양한 조합에 대하여 수치해

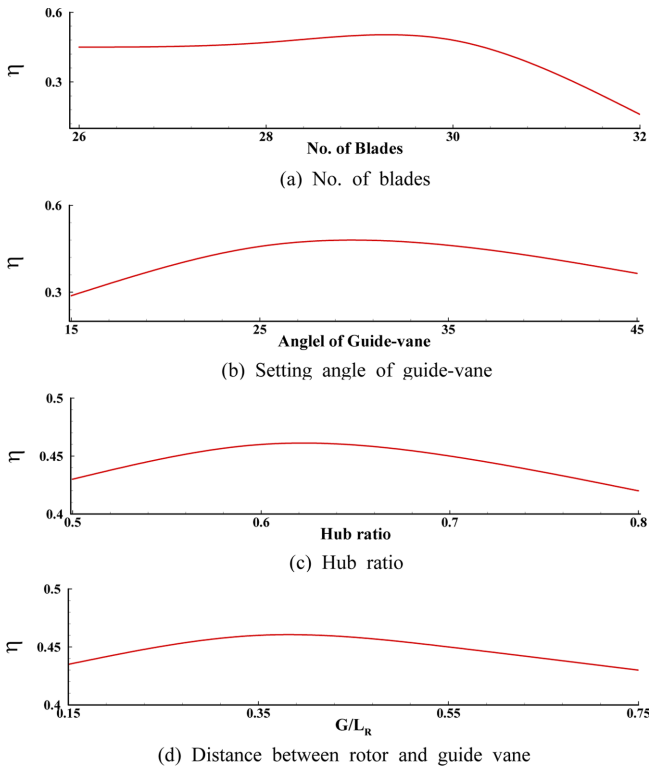


Fig. 4. Effects of various parameters for turbine efficiency.

석을 수행하였으며 각각 -5도, 6도로 정하였다. 뒤젓힘각의 정의와 형태 및 결과에 대한 상세한 설명은 지면관계상 Yang *et al.*[2017]을 참고하기 바란다.

이로부터 본 연구에서 검토할 대상 모델이 결정되었는데, 그 기본 모델은 Fig. 6과 같으며 날개수와 가이드베인수는 30매와 28매이며, 가이드베인 각도는 35도, 허브비는 0.7 등이다. 3개 모델의 주요 제원은 Table 1과 같으며, 터빈 효율향상을 도모하기 위하여 제안한 링형 터빈에서 링의 두께와 침투깊이는 1 mm와 2 mm이고 링의 코드길이는 날개 코드의 1.5배이다. 끝으로 뒤젓힘각 적용 터빈의 전단과 후단 뒤젓힘각은 -5도와 6도이다. 참고로 Table 1에는

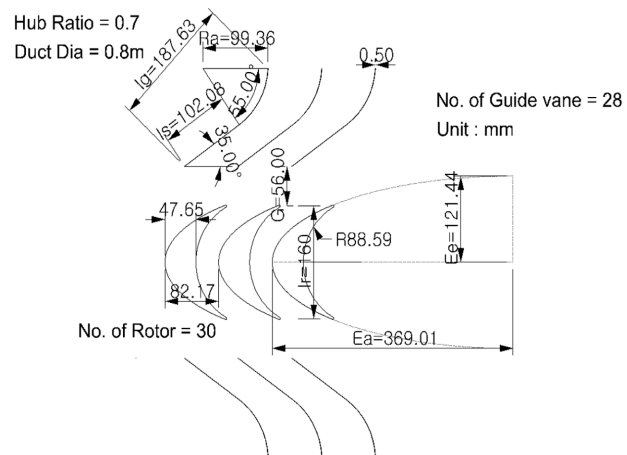
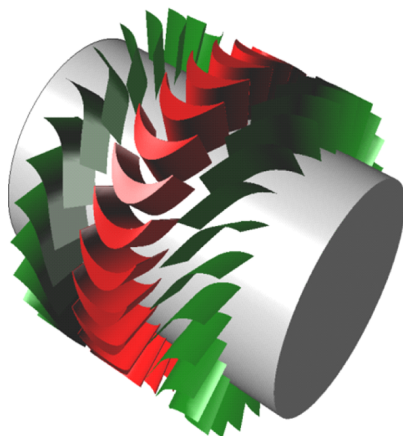


Fig. 6. Configuration and geometry of conventional-type impulse turbine.

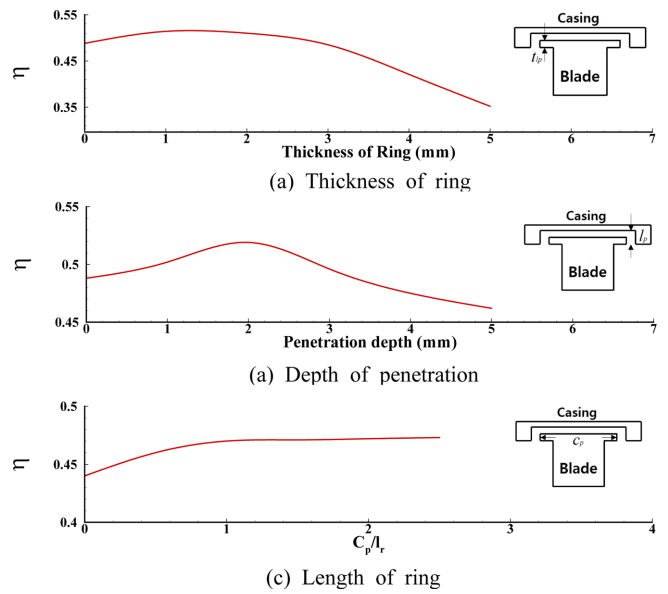


Fig. 5. Summary on effects of ring parameters for the efficiency of ring-type turbine.

다음 절에서 소개할 모형시험에서 사용한 모형 터빈의 주요수치들도 함께 나타나 있다.

3. 모형시험을 통한 성능평가

3.1 실험장비

모형시험을 통한 터빈의 성능평가 수행을 위하여 왕복운동 발생용 풍동은 Fig. 7과 같으며, Fig. 8의 사진에서 보는 것처럼 좌측의 원판이 챔버 내에서 왕복운동을 하면서 생성된 왕복운동이 우측의 덕트를 통하여 외부로 배출 및 흡입을 반복하게 된다. 아크릴로 제작된 덕트 내에 터빈을 설치하고 축계에 토크미터와 터빈 로터에 부하를 주기 위한 파워드 브레이크가 연결되어 있다(Lee *et al.*[2004]). 유량발생용 피스톤의 제어를 위해서는 교류 서보모터(RSMH-50)를 사용하였는데 드라이버 모델은 CSDP-50BX2이다.

Table 1. Specification of Impulse turbine

Turbine Type	Designation	Unit	Symbol	Prototype	Model ($\lambda=2.1$)
Conventional turbine	Duct diameter	mm	D	800	380
	No. of blades		z		30
	Blade chord length	mm	l_r	160	76
	Blade thickness	mm	S_r	47.68	22.7
	No. of guide vane		z_g		28
	Hub ratio				0.7
	Angle of guide-vane	deg	θ		35
	Tip clearance	mm	t_c		1
Only for ring-type	Length of ring	mm	C_p	240	114
	Thickness of ring	mm	t_{lp}		1
	Penetration depth	mm	l_p		2
Only for sweep angle-type	Leading-edge sweep angle	deg	λ_m		-5
	Trailing-edge sweep angle	deg	λ_t		+6

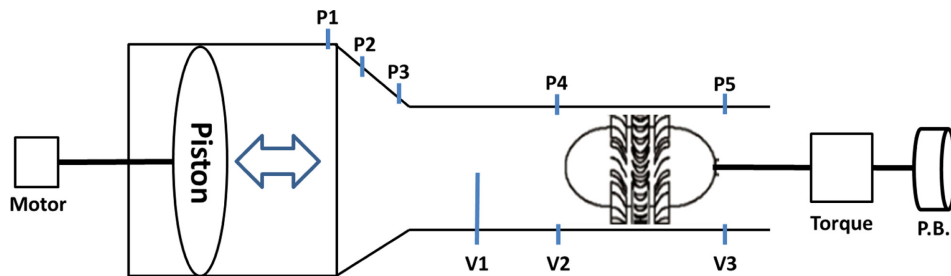


Fig. 7. Schematic of wave simulator test rig.

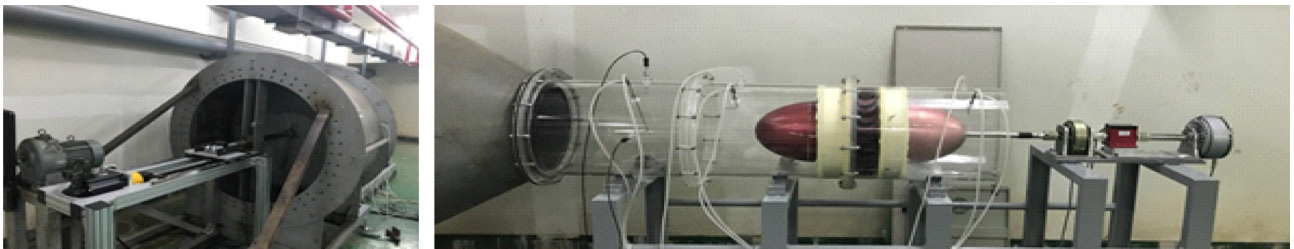


Fig. 8. Photos of wave simulator test rig.

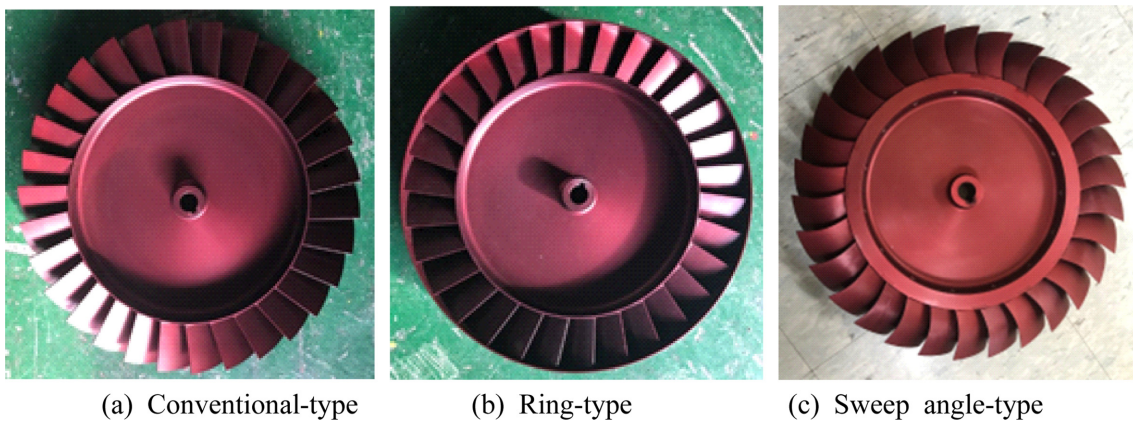


Fig. 9. Three model turbines.

피스톤의 변위 계측에는 E60H20-1003N 변위센서를 사용하였고, 터빈의 토크와 회전속도 계측을 위하여 측정범위가 10Nm, 2000 rpm

인 TCS100-MP981-CT130 토크메터를 사용하였다. 파우더 브레이크 모델은 전압 조절방식의 PRB2.5Y-PRB-MA로서 최대 제동 토

크는 25 Nm이다. 압력계측과 유속계측을 위해서는 CP213X 차압 센서와 SQR-TPL 피토투브를 사용하였다.

3.2 모형터빈

방파제 연계형 파력발전용 터빈 기본설계를 통하여 도출된 3종류의 임펠스터빈의 모형은 실험장비의 제원을 고려하여 축척비가 2.1인 직경 0.38 m로 제작되었다. 실험용 기본 터빈과 링형 및 뒤젓 힘각 적용형 터빈의 모형은 Fig. 9와 같이 AL6061 재질로 제작되었으며, 주요제원은 Table 1에 실물터빈과 함께 소개되어 있다.

3.3 모형실험을 통한 터빈 성능평가

실험은 동일한 입력계수 ϕ 에서 파워더 브레이크를 이용하여 부과되는 토크를 0Nm에서 2.5Nm 까지 0.25Nm간격으로 조절하면서 피스톤 변위, 터빈 회전수, 토크 및 덕트내 압력과 유속을 계측하였다.

Fig. 10은 모형실험시 계측한 데이터의 시계열 자료의 예를 보여주고 있다. 토크를 1.0Nm만큼 부과한 경우를 나타내고 있는데, 제어시스템이 토크와 터빈의 회전수를 비교적 일정하게 잘 유지하고 있음을 확인 할 수 있다. 터빈으로 인해 발생하는 압력강하를 계측하기 위하여 덕트에서 2포인트, 실린더에서 2포인트를 계측하였는데 피스톤과 터빈 사이의 압력(P1~P3)은 계측위치에 따른 차이가 없는 것으로 확인 되었고, 대기압 측의 압력(P4) 변화는 매우 작은 것으로 확인 되었다. 성능평가시에는 P3에서 P4를 뺀 값을 사용하였다.

터빈 로터의 허브로 인해 발생하는 유동의 변화를 확인하기 위하여 덕트 단면에서 반경방향으로 1/2D, 1/4D 그리고 1/8D 지점의 유속을 계측하였다. 계측위치의 영향에 더하여 피토투브의 특성상 피스톤의 흡기시과 배기시에 서로 유속이 다르게 계측되는 것을 볼 수 있으며, 특히 배기시에는 덕트 단면 위치에 따라서도 유속 분포가 균일하지 않음을 알 수 있었다. 이는 상대적으로 짧은 덕트 내에서 완전 발달된 유동이 형성되지 않기 때문이며, 유동장내 대표 유량을 결정하기 위하여 이렇게 계측된 유속을 적분하여 사용하는 것이 큰 불확실성 요인이 될 것으로 판단하였다. 따라서 유입유량은 챔버내 피스톤의 변위와 주기를 이용하여 대표유량으로 삼았으며, 계측된 유속분포는 피스톤과 덕트내 유량 간의 캘리브레이션 및 상세한 덕트내 유동장의 검증용으로 이용되었다.

계측된 물리량들은 다음과 같은 무차원계수로 정의되었다. C_A 는 입력계수로서 유입되는 파워의 무차원계수이고 C_T 는 토크계수로서 토크 형태로 얻어지는 터빈의 무차원 출력, 그리고 η 는 터빈의 효율이다.

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

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

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

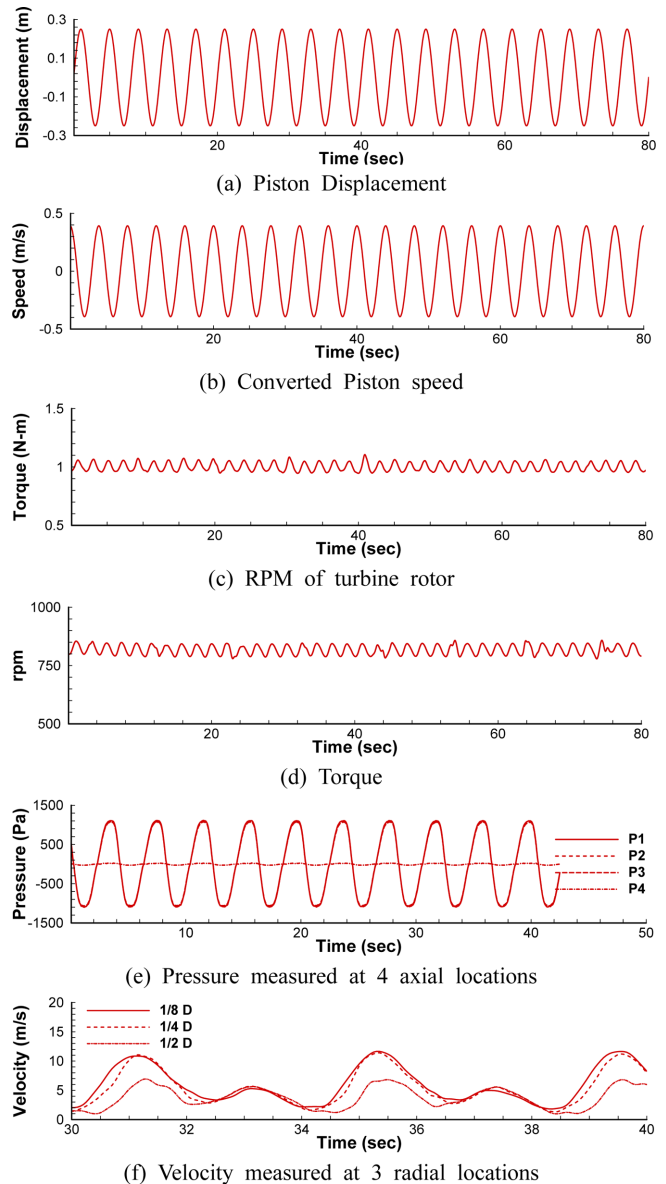


Fig. 10. Typical example of measured time-series data.

여기서 Δp , Q , T 는 각각 압력강하, 유량, 토크를 나타내며, v_a , U_R , b , l_r , z , r_R 은 각각 축방향 평균유속, $r = r_R$ 에서의 회전방향유속, 로터 날개의 스펠과 코드길이, 날개수 및 날개의 평균반경이다.

터빈의 정상상태 성능평가를 위하여 입력값인 터빈 상류의 압력은 상류와 하류의 압력을 뺀 값을 사용하고 한 주기 동안 얻어진 절대값의 평균을 취하였다. 유량은 전술한 바와 같이 피스톤의 변위를 미분하여 평균속도를 구한 후 피스톤의 단면적을 곱하여 도출하였다. 출력값인 회전속도와 토크는 그 변동폭이 작고 파워더 브레이크로 정밀한 제어가 가능하였기 때문에 실시간으로 계측되는 신호들의 단순 평균값을 사용하였다.

이상의 실험을 통하여 도출한 3종류의 터빈의 성능은 Fig. 11과 같다. 기본 터빈의 최고효율은 45.6%이고, 링형 터빈은 52.9%, 뒤젓힘각 적용형 터빈은 47.3%로 얻어졌다. 설계점의 최대효율과 더

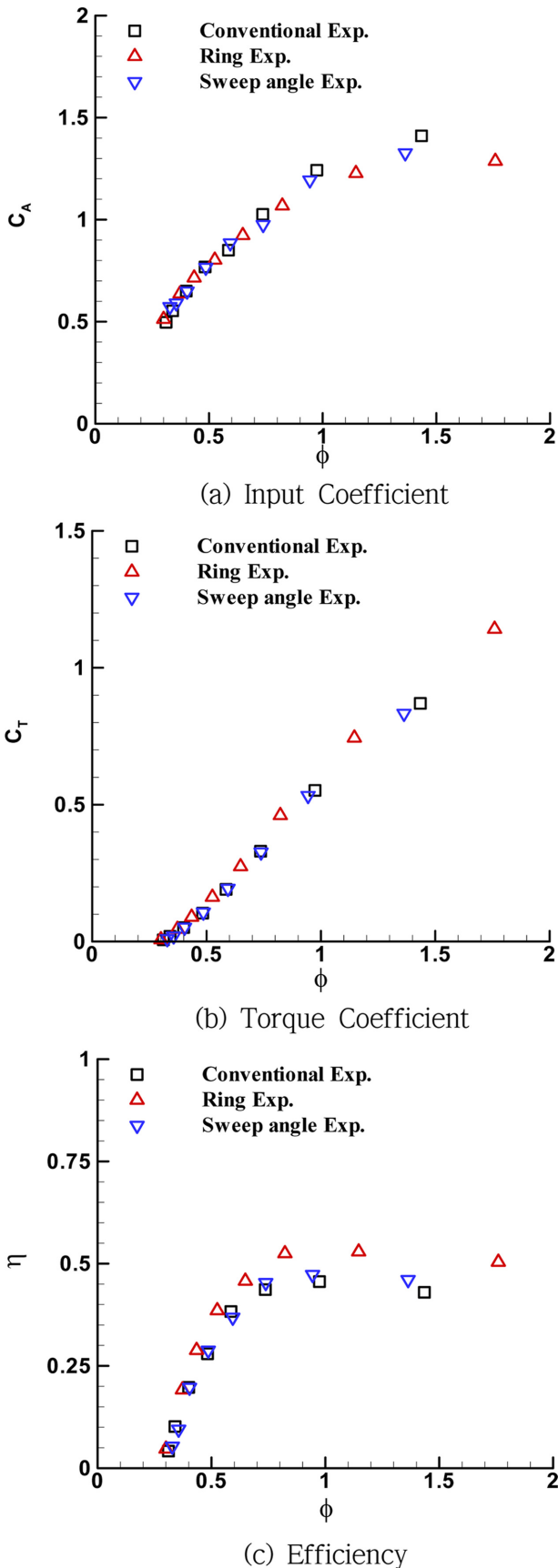


Fig. 11. Measured performance of turbines.

불어 $\phi=0.8$ 이상의 전체 작동범위에서도 3종류 터빈 공히 만족할 만한 성능을 보여주었다. 본 계측결과는 민감도분석 시에 예측하였던 수치해석 결과와도 상당히 유사한 것으로 평가되었다. 세 종류 터빈 공히 토크계수의 변화는 거의 없으며 입력계수의 변화가 전체 효율상의 차이를 주도하는 것이 확인되었다. 링형 터빈의 경우 터빈 날개의 끝단에서 흡입면으로 밀려 올라가는 유동을 억제할 수 있어 입력계수가 감소되는 현상을 보였고, 뒤젓힘각 터빈의 경우에도 날개의 스펠방향 곡면이 날개 끝단에서 발생하는 와류를 억제시키는 역할을 하였기 때문에 동일하게 입력계수를 감소시키는 것으로 예측되었다. 이는 날개끝 와류유동을 제어함으로 날개의 효율을 향상시키고자 하는 추진분야의 연구결과와도 일맥상통하는 결과이며, 과거 다른 임펄스 터빈에 대한 연구에서도 동일하게 검증된바 있다 (Hyun *et al.*[2006], Yang *et al.*[2017]).

4. 결 론

방과제 연계형 파력발전 설치 후보지의 에너지밀도를 고려하여 터빈의 용량을 결정하고, 기 도출된 터빈의 계열자료를 이용하여 직경을 도출하였다. 수치해석을 통하여 설계변수를 최적화 하여 도출한 기본 터빈에 더하여, 효율향상을 위한 링형터빈과 뒤젓힘각 적용형 터빈을 제안하여 총 3개의 후보 터빈에 대한 성능검증을 실시하였다. 실험은 왕복유동을 생성시킬 수 있는 파력발전 터빈 전용 실험장치에서 수행하였다. 챔버 내에서 왕복운동 하는 유량발생용 피스톤은 선형 서보모터를 이용하여 구동 및 제어되었고, 터빈의 부하는 파우더 브레이크로 부과하였다. 계측된 덕트내 유속과 압력, 터빈 로터 회전수와 토크의 시계열 데이터를 처리하여 얻어진 터빈의 성능은 기본 터빈의 경우 최대 45.6%의 비교적 우수한 효율을 보여 주었으며, 링형(52.9%)과 뒤젓힘각 적용형(47.3%) 공히 효율향상 효과가 있음을 확인하였다. 이는 민감도분석이 파악한 수치해석결과와 유사한 결과였으며, 이상을 종합하여 링형 터빈을 최종 후보로 결정하였다.

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 “방과제 연계형 파력발전 융복합 기술개발”에 의해 수행되었으며(PMS4030), 연구비 지원에 감사드립니다.

References

[1] Hong, K.Y. *et al.*, 2016, Development of OWC Wave Energy Utilization System, Final Report of Korea Research Institute of Ships and Oceans Engineering, Oceans & Fisheries R&D Report, Ministry of Oceans and Fisheries.
 [2] Hong, K.Y. *et al.*, 2017, Development of Wave Energy Converters Applicable to Beakwater and Connected to Micro-grid with Energy Storage System, Interim Report of Korea Research

Institute of Ships and Oceans Engineering, Ministry of Oceans and Fisheries.

- [3] Hyun, B.S. and Moon, J.S., 2004, Practical Numerical Analysis of Impulse Turbine for OWC-type Wave Energy Conversion Using a Commercial CFD Code, Proceedings of the 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France.
- [4] Hyun, B.S., Moon, J.S., Hong, S.W. and Kim, K.S., 2006, A Study on the Performance of the Ring-type Impulse Turbine for Wave Energy Conversion, Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, 20(1), 20-25.
- [5] Kim, K.W., Yang, S.K., Hong, K.Y. and Hyun B.S., 2018, Numerical and Experimental Study on 30kW-class Impulse Turbine for Wave Energy Conversion, Proceedings of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, Sapporo, Japan, June 10-15.
- [6] Lee, Y.Y., Hong, S.W. and Hyun, B.S., 2004, A Study on Experimental Method of Impulse turbine for OWC-type Wave Energy Conversion, Journal of Advanced Research in Ocean Engineering, 268-273.
- [7] Liu, Z., Jin, J.Y., Cui, Y. and Fan H.W., 2013, Numerical Analysis of Impulse Turbine for Isolated Pilot OWC System, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 2013, ID 416109
- [8] Liu, Z., Hyun, B.S., Jin, J.Y. and Hong, K.Y., 2011, Practical Evaluation Method on the Performance of Pilot OWC System in Korea, Proceedings of 21th International Offshore and Polar Engineering Conference. Maui, Hawaii, USA, June 19-24.
- [9] Setoguchi, T., Kaneko, K., Taniyama, H., Maeda H., Inoue M., 1996, Impulse Turbine with Self Pitch-controlled Guide Vanes for Wave Power Conversion: guide vanes connected by links, International Journal of Offshore and Polar Engineering, 6(1), 76-80
- [10] Setoguchi, T., Santhakumar, S., Maeda, H., Takao, M. and Kaneko, K., 2001, A Review of Impulse Turbines for Wave Energy Conversion, Renewable Energy, 23, 261-292.
- [11] Yang, S.K., Kim, K.W., Lee, J.K. and Hyun, B.S., 2017, A Numerical Study on the Effect of Blade Sweep Angle of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion, J. Korean Soc. Mar. Environ. & Energy, 20(3), 145-151.

Received 8 July 2019

Revised 16 July 2019

Accepted 22 July 2019