

파력발전용 임펄스터빈의 모형시험 기법연구

이영연* · 홍석원** · 현범수***

*한국해양연구원 해양운송시스템연구본부

**한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

***한국해양대학교 해양시스템공학부

파력발전용 임펄스터빈의 모형시험 기법연구

A Study on Experimental Method of Impulse turbine for OWC-type Wave Energy Conversion

YOUNG-YEON LEE*, SEOK-WON HONG** AND BEOM-SOO HYUN**

*Marine Transportation System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

**Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea

***Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Impulse Turbine 임펄스 터빈, Oscillating Water Column 진동수주, Wave energy 파력에너지, Model Test 모형시험, Wave Simulator 파도재현장치, Tip clearance 팁 간격

ABSTRACT: A study on experimental method of the model test for the impulse turbine is carried out. the wave simulator is used to reproduce the real wave condition. It controls two parameter correspond to wave height and wave frequency. The optimum design which is reported by T. Setoguchi is manufactured and tested for the validation of our test facilities. The comparison of model test show that our facilities produce little bit higher efficiency at maximum efficiency point. To increase the efficiency of turbine, the new rotor with negative tip clearance is designed and being tested

1. 서 론

화석연료의 고갈을 해결하기 위하여 새로운 대체에너지의 연구가 진행되고 있으며, 그 중 하나로 파력에너지가 유력하게 부각되고 있다. 파력 에너지를 유용한 에너지로 변환하기 위하여 3 단계의 과정이 필요하게 된다. 파력 에너지를 공기 에너지로 변환시키는 장치로서 진동수주(OWC, Oscillating Water Column)가 사용되고 있다. 공기 에너지는 터빈을 통하여 기계적 에너지로 바뀌고, 기계적 에너지는 발전기를 통하여 전기적 에너지로 변환되어 유용한 에너지원으로 변환되게 된다.

OWC를 이용한 파력발전은 왕복운동이기 때문에 정류작용을 하는 터빈을 필요로 한다. 이러한 용도로 지금까지 웰스터빈이 대부분 사용되어 왔다. 그러나 웰스터빈은 날개의 실속에 의하여 최대효율을 갖는 범위가 매우 좁다. 따라서 파도와 같은 불규칙한 상태에서는 효율이 많이 떨어진다. 이 외에도 초기 기동시 자력으로 운전 상태까지 도달하지 못하고, 운전 상태에서 회전수가 매우 높기 때문에 소음 문제를 발생시킨다(Setoguchi et al., 2001)

웰스 터빈의 단점을 해결하기 위하여 T. Setoguchi는 임펄스 터빈을 제안하였다. 고효율을 달성하기 위하여 안내깃을 바람의 방향에 따라서 최적화가 되도록 하는 Self-pitch-linked 형식을

고안하였고, 인도에 설치하였다(Santhakumar et al., 1996). 그러나 안내깃의 움직이는 특성은 잦은 고장과 수리를 필요하게 하여, 효율의 감소를 감안하더라도 더욱 안정적인 터빈으로 고정 안내깃을 채택하였다.

본 연구에서는 T. Setoguchi가 발표한 체적의 조합을 가지는 터빈에 대하여 본 연구소의 연구시설을 통하여 모형시험을 수행하고 두 시설간의 결과를 비교하여 본 연구소의 연구시설을 검증하였다.

본 검증 과정을 거친 후 모형시험 시설에서 터빈의 효율을 상승시키기 위한 새로운 설계에 대한 실험을 수행하고 있다. 팁 간격의 영향은 터빈의 연구에서는 매우 중요하다. 팁 간격은 제작상의 어려움으로 인하여 1mm로 고정되었다. 그러나 실제 크기에서는 축척비 만큼 커지기 때문에 실물과 모형에서의 팁 간격은 일치하지 않는다. 이런 문제를 해결하기 위하여 부(-)의 팁 간격을 가지는 터빈에 대하여 모형시험을 수행하고 효율의 비교를 수행중에 있다.

2. 모형시험장치

2.1 Wave simulator

파랑특성은 파고 및 파주기에 의해 정의되며, 모형 축척비를 λ 라고 할 때, 파고의 축척비는 λ , 파주기의 축척비는 $\sqrt{\lambda}$ 가 된다. wave simulator는 이런 파도의 특성을 재현하기 위한 장치

로서 Fig. 1과 같과 진폭과 주기를 조절하도록 만들어져 있다. 여기에 사용된 메커니즘은 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다. 회전축 A를 기준으로 r을 변화시키면 파고가 변하게 되고 파고 2r에 대응한다. 또한 θ 를 변화시켜서 이에 상응하는 파주기를 생성할 수 있다.

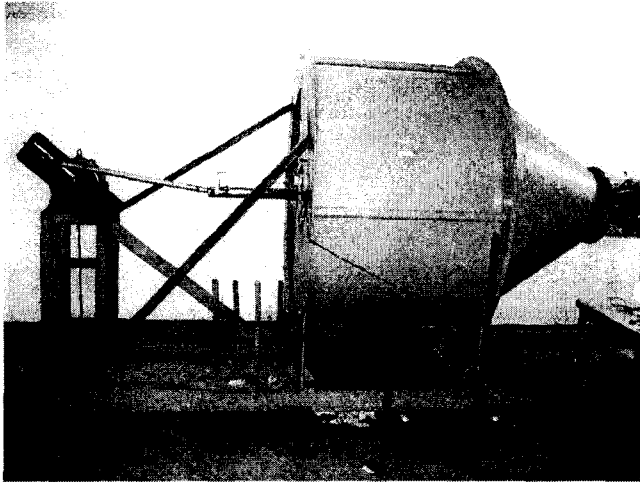


Fig. 1 wave simulator

Table. 1 Dimensions of wave simulator (mm)

Size	1,750W x 1,500I.D. x 3,900L x 1970H	
Air Drum (Cylinder)	Inner Dia	1,500
	Length	1,000
Air Cone	Dia	1,500~400
	Length	800
Air Board (Piston)	I.D	1,500
	Guide Bar	3points(No sliding friction)
	Air Gap	<0.5
Control System	Speed	0~50RPM Max
	Crank Stroke	200~500

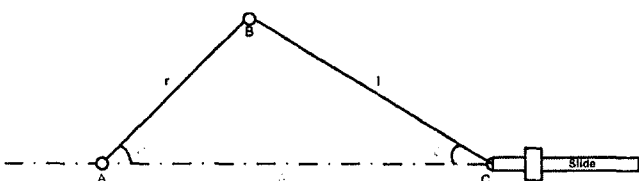


Fig. 2 Schematic of wave simulator

기구학적으로 Fig. 2는 Slide-Crank 메커니즘이다. 점 B는 두 개의 r과 l에서 같은 높이이므로 다음과 같은 구속조건을 갖는다.

$$r \sin \theta = l \sin \psi \quad (1)$$

또한 피스톤의 변위는 A와 C의 거리인 δ 로서 다음과 같이 표시된다

$$\delta = r \cos \theta + l \cos \psi \quad (2)$$

피스톤의 속도는 식 2에 식 1을 대입한 후 시간에 대하여 미분하면 다음과 같은 속도 식을 구할 수 있다.

$$\frac{d\delta}{dt} = -r \sin \theta \left(1 + \frac{\cos \theta}{\sqrt{\left(\frac{l}{r}\right)^2 - \sin^2 \theta}} \right) \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

식 3에서 보는 바와 같이 길이 l이 매우 크면 피스톤의 속도는 사인곡선을 보이지만 현재의 크기정도에서는 l과 r의 조합에 의하여 사인곡선에서 다소간의 변형이 이루어진다. 그러나 그 차이가 매우 적고 형태는 사인형태와 유사하기 때문에 사용된 wave simulator는 사인곡선을 잘 모사하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 모터의 각속도가 일정하면 이를 이용하여 규칙파의 응답특성을 알아 볼 수 있다. Table 1에 wave simulator의 주요 재원을 나타내었다.

2.2 임펠스터빈 제작

모형실험시설의 검증을 위하여 임펠스터빈을 제작하였다. 선택된 디자인은 Setoguchi(2001)가 발표한 디자인에 준하여 직경을 380 mm로 키운 디자인을 택하였다. 설계에 사용된 파라미터들을 다음과 같다. 로터 날개의 형상은 압력면은 원형이고 흡입면은 타원형이다. 흡입면 날개의 형상파라미터 중 타원의 장축은 159.3 mm 이고 단축은 52.4 mm이다. 압력면의 원의 반경은 38.3 mm 이었다. 날개의 수는 30개 이고 피치는 33.8 mm, 코드는 68.4 mm, 스패는 56 mm 이다. 날개 각은 60° 이다. 초기 설계는 허브 비 0.7에 대하여 평균반경 0.85R인 161.5 mm에서 하였고 이차원 단면의 형태를 가지도록 하였다. 제작상의 이유로 틱간격은 1 mm로 하였다. 날개의 sweep 각을 주어야 하기 때문에 흡입면의 최정점을 회전축의 반경방향과 일치하도록 설계를 하였다.

안내깃은 피치가 39 mm 코드가 99.6 mm이며 원형구의 반경이 47.1 mm, 캠버각 60° 이다. 직선부가 44.1 세팅각이 30°이 되도록 하였다. 안내깃의 개수의 개수는 26개이다. 이렇게 설계된 형상은 Fig. 3과 같다.

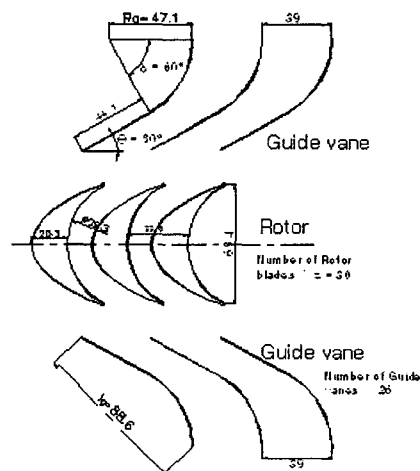


Fig. 3 Turbine geometry

2.2 모형시험 계측

기체의 운동에너지가 터빈의 회전에너지로 변환되는 2차변환기의 성능특성을 알아보기 위하여 계측시스템을 구성하였고 Fig. 4에 개략도를 나타내었다.

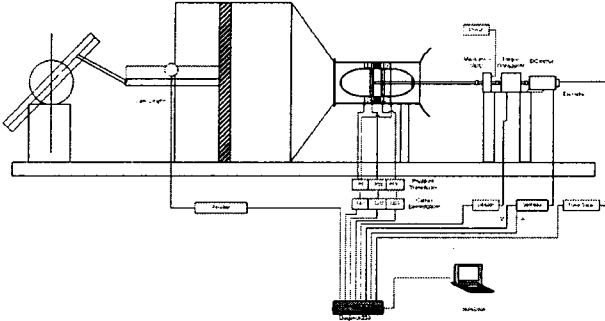


Fig. 4 Schematic of measurement system

임펄스 터빈의 입력은 압력과 유량이다. 압력은 터빈 전후단에 압력탭을 설치하였고, 유량은 피토투브를 터빈 양쪽에 두 개를 설치하였다. 유속계측용 피토투브는 한방향의 속도만을 측정할 수 있으므로 양쪽의 안내기의 직선부에 설치하여 양방향의 속도분포를 모두 측정하였다. 속도는 측정된 전압력과 정압의 차로부터 구하며 그 관계는 식 4와 같다.

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

압력센서는 차압식(Differential Type)의 압력센서이다. 속도의 계측과 터빈에서의 압력강하를 측정하기 위하여 3개를 사용하였다. Fig. 5에 터빈에 설치된 압력계와 2개의 피토투브의 모습이 나타나 있다.

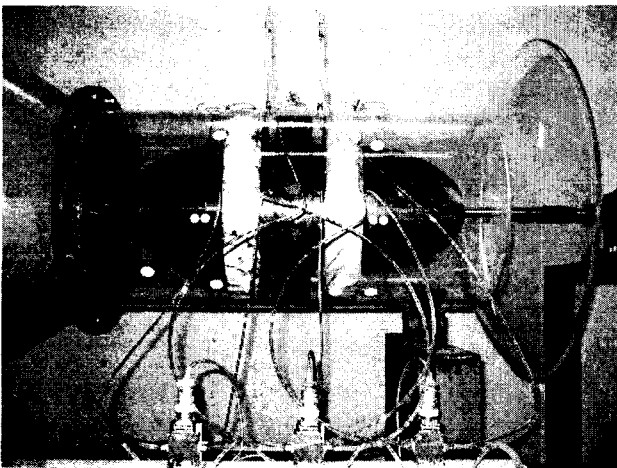


Fig. 5. integration of pressure sensors and pitot tube

Fig. 6은 토오크의 측정을 위한 계측장비 구성모습이다. 터빈에서 발생하는 회전에너지는 부하가 없으면 계측이 불가능하다. 따라서 PM(Permanent Magnetic) 직류발전기를 터빈과 직접 연결

하였다. 직류발전기는 Fig. 7과 같은 회로에 연결하여 부하저항을 생성하도록 하였다. 이 때 15 Ω의 발열저항에 의하여 발전된 전기에너지는 열로써 소모되도록 하였다. 토오크의 계측에 앞서 계측기 자체가 가지는 dummy 토오크를 실험전에 미리 구하여 베어링등에서 발생하는 마찰등에 의하여 생기는 손실값을 보정하였다. 터빈에서 발생한 회전에너지는 토오크와 회전수를 계측하여 구하였다. 토오크 미터는 터빈과 발전기를 연결하는 축에 연결되어 있다. 이 때 각 축의 밸런싱을 맞추기 위하여 커플링을 이용하여 연결하였다. wave simulator의 피스톤에는 potentiometer를 설치하여 피스톤의 변위를 측정할 수 있도록 하였다. 이 값은 입력 에너지의 주기를 측정하기 위함이다.

각각의 신호는 A/D 변환기를 통하여 디지털 신호로 바꾸고 100Hz로 30초간 측정하였다. Fig. 7은 실험에 사용된 시스템의 발전기 Controller의 회로도를 보여주고 있다.

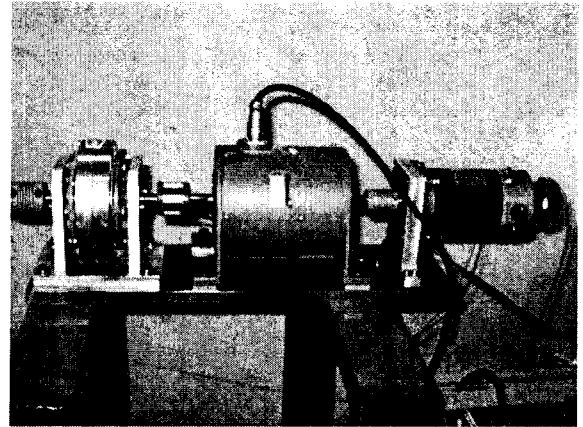


Fig. 6 measurement system for Torque, RPM, generated power

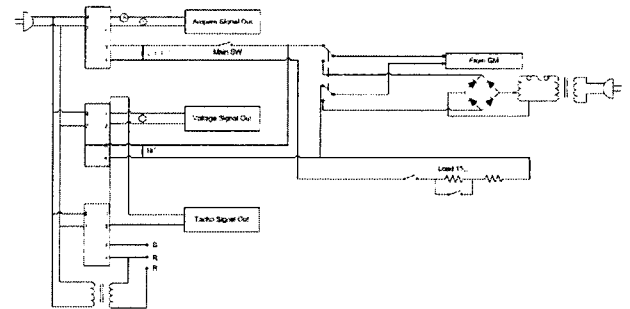


Fig. 7. Controller circuit for generator

3. 무차원화 계수의 정의

덕트내 평균 축방향 유속이 V_a 인 유동장에서 작동하는 임펄스 터빈의 성능을 정상상태에서 입력계수 (C_A Input coefficient)와 토오크 계수 (C_T Torque coefficient)로 표현하면 다음과 같다.

$$C_A = \frac{\Delta p Q}{\frac{1}{2} \rho_a (V_a^2 + U_R^2) b l_z v_a} \quad (5)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_a (V_a^2 + U_R^2) b l_z r_R} \quad (6)$$

여기서 Δp , Q , T 는 압력강하, 유량, 토크를 나타내며, V_a , U_R , b , l_z , z , r_R 는 각각 축방향 평균유속, $r=r_R$ 에서의 회전방향유속, 날개의 스펠, 날개의 코오드 길이, 날개수, 날개의 평균반경 (여기서는 0.85R) 이다.

터빈의 효율은 다음 식으로 정의된다.

$$\eta_t = \frac{T \omega}{\Delta p Q_a} = \frac{C_T}{C_A \phi} \quad (7)$$

여기서 ϕ 는 유동계수(Flow coefficient)로서 $\phi = V_a / U_R$ 로 정의되며 날개이론에서 받음각 (Angle of attack)에 대응하는 물리량이다. 이상에서 정의된 변수들은 터빈이 정상상태에서 작동된다는 가정을 포함하고 있다.

정상상태의 유동과 달리 본 연구에서의 입력유동은 주기운동이다. 따라서 왕복유동에서 압력강하와 토크 값들은 파의 상하운동에 따라 어떤 주기성을 가지고 변화하므로 대표 값으로 각 값들의 시간에 대한 평균값을 취하였다. 주기의 측정은 피스톤의 위치 신호를 기준으로 하여 식 8과 같이 각각의 반주기를 구분하여 평균 속도를 구하였다. 다른 값들에 대하여는 식 9와 같이 한 주기에 대한 평균값을 구하였다. 식 9에서 x 는 일반적인 값을 의미한다.

$$V_a = \frac{\int_0^{T/2} -Vel dt}{T/2} + \frac{\int_{T/2}^T Vel dt}{T/2} \quad (8)$$

$$X = \frac{\int_0^T |x| dt}{T} \quad (9)$$

4. 모형시험 결과 및 해석

4.1 속도특성

21 절에서 살펴본 바와 같이 wave simulator의 모터가 일정하게 회전을 하는 경우 발생한 유속은 식 3과 같은 형태를 보여야 한다. 계측된 신호 중에서 피스톤의 신호를 이용하여 유속의 한 주기 신호를 취하고, 각각의 피토투브가 올바른 속도를 측정하는 구간에 대하여 식 3을 최소자승법으로 가장 잘 맞추는 곡선을 구하였다. Fig. 8에 결과를 나타내었다. 가로축은 피스톤을 구동하는 모터의 회전각도이며, y축은 피스톤의 위치와 공기의 속도를 나타낸다. 양 방향에서 이론적인 silde-crank 미케니즘을 잘 따라가는 모습을 보여주고 있다. 본 실험장비로 원하는 파고 및 파주기를 형성하는데 문제가 없는 것으로 보여진다. 피토 신호 중에서

유동방향이 피토투브와 반대의 경우 속도분포가 경향은 비슷하지만 값에서는 차이가 많이 나는 결과를 보여주고 있다. 그러므로 각각의 방향에 대하여 유속을 따로 구해주는 계측이 옳은 계측이다. 유속의 방향이 바뀔 때 피토투브에서의 속도가 0점에서 분산되어 분포하는 모습을 볼 수 있었다.

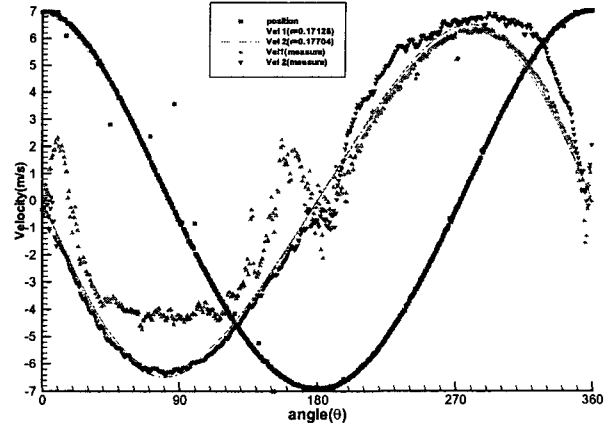


Fig. 8 measured velocity at each pitot tube during one cycle of piston

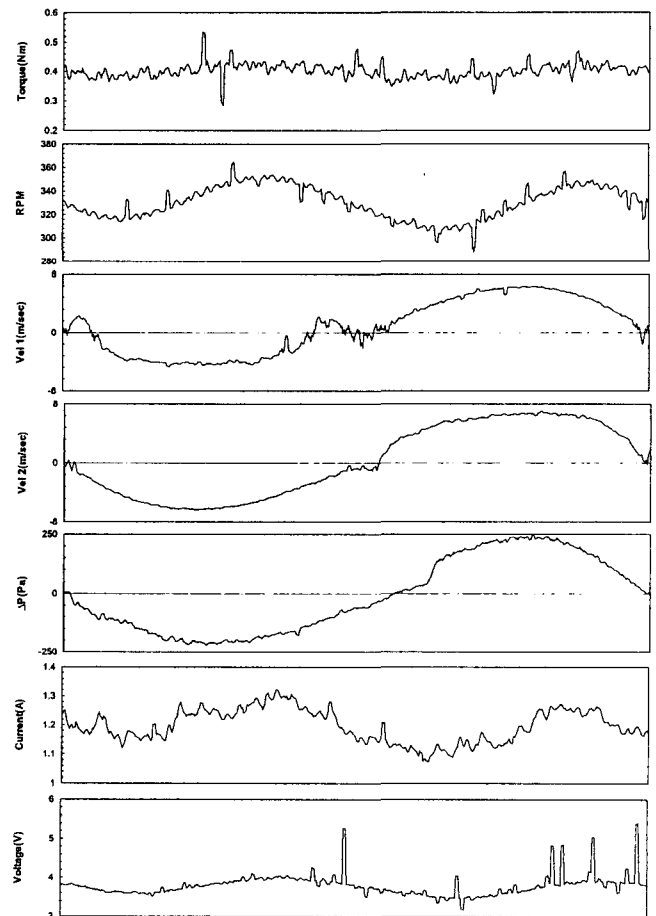


Fig. 9 variation of measured values during one cycle of piston

4.2 계측값의 주기 추종성

Fig 9는 계측값 중에서 피스톤에 의하여 유기된 유동에 대하여 각 계측값들의 추종성을 살펴 보았다. 유속과 압력차는 위상차가 없이 일치하는 경향을 보여주고 있다. 즉 압력차이에 의하여 시간차가 없이 바로 유속이 결정됨을 알 수 있다. 그러나 토오크와 회전수는 위상차가 발생하는 것을 보여준다. 이는 로터가 가지는 2차 관성모멘트에 의하여 유동에 의하여 생기는 토오크가 바로 rpm으로 변환되지 않고 시간차가 발생하는 것을 예상할 수 있다.

4.2 성능추정

Fig 10은 축방향 평균 유속에 대한 유동계수를 보여주고 있다. 속도가 높아짐에 따라서 유동계수는 일정하게 수렴하는 형태를 보인다. 즉 터빈의 회전수는 공기 유속과의 일정한 비로 수렴하는 것을 의미한다. 본 실험이 터빈의 회전수에 대한 구속조건이 없기 때문에 발전기의 부하에 따라서 각각은 일정한 곡선을 그릴 것으로 예상된다.

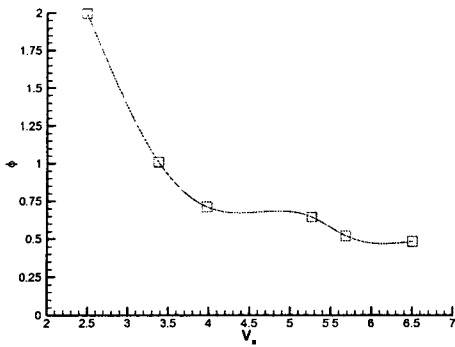


Fig. 10 flow coefficient vs. axial flow velocity

Fig 11은 공기 유속에 따른 터빈 양단에 압력강하와 유속과의 관계를 나타내고 있다. 압력강하와 공기 유속의 비는 터빈에서의 공기의 유속이 커짐에 따라서 선형적으로 증가하는 경향을 보여주고 있다.

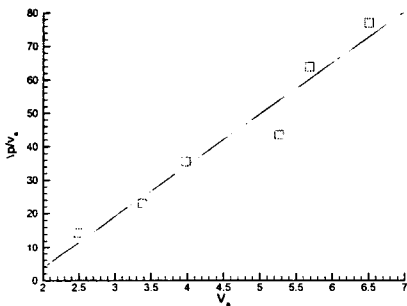
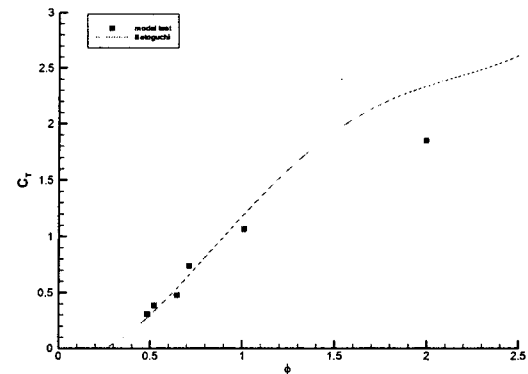


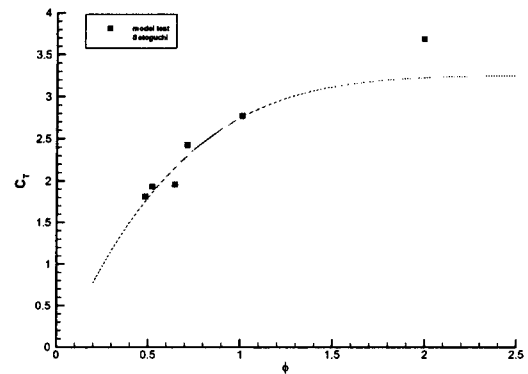
Fig. 11. $\Delta p / v_a$ vs. axial flow velocity

측정된 토오크와 유량이 기존의 결과와 같은 결과를 가지는지를 비교하기 위하여 발표된 기존 데이터 중에서 무차원화된 입력 계수와 토오크 계수를 찾아보았으나 정상상태에서의 결과 밖에 구할 수 없었다. 그러나 이 정상상태의 결과가 왕복유동과 어떤 관계를 가지는 지 비교할 수 있으므로 정상상태의 무차원화된 계

수와 본 연구에서 구해진 값을 평균했을 때 구해진 무차원화된 계수를 그림 과 같이 함께 그려 보았다. Setoguchi의 결과는 정상상태의 유동이고 모형시험은 왕복유동지만 평균값을 이용하여 비교하여 보면 두 값은 같은 무차원화된 계수를 갖는 것을 볼 수 있다. 다만 유동계수가 큰 경우에는 다소 차이가 나는데, 이는 유속이 매우 작기 때문에 발생하는 에러가 가장 큰 문제점으로 생각된다.



(a) Input coefficient



(b) Torque coefficient

Fig. 12 Nondimensional parameters of impulse turbine

Fig. 13에는 유동계수에 따른 효율이 나타나 있다. T. Setoguchi는 정상상태와 사인파로 진동하는 상태에서의 각각의 효율 곡선은 발표하였고, 이는 각각 일점쇄선과 실선으로 나타내었다. 모형 시험 결과는 Setoguchi의 사인파 왕복유동에서의 결과와 같은 기준으로 그림에서 점으로 표기하였다. 그림에서 보는 바와 같이 같은 터빈에 대하여 정상상태에서의 효율이 왕복운동하는 상태에서 보다 최대효율 면에서 6% 정도의 효율 상승을 가져오고 있다. 본 연구에서의 결과가 최대 효율 근처에서 효율이 다소 증가된 형태를 보이나 유동계수가 클 때에는 효율이 감소하는 경향을 보이고 있다. 계측된 값 들 중에서 유속의 계측이 왕복유동의 성질 때문에 가장 어려운 점으로 알려졌다. 또한 이 주기성에 의하여 모든 계측 값들이 유입유동과 같은 주기의 특성을 보이므로 평균값을 취할 때에는 주기의 정수배에 해당하는 시간간격을 이용하여야 한다.

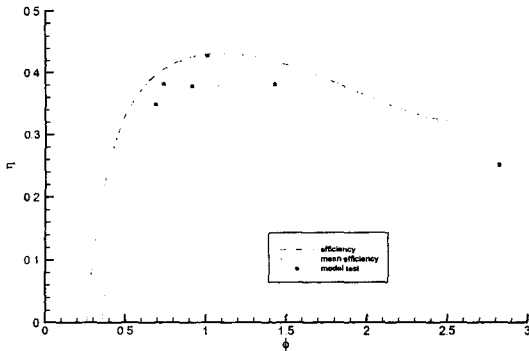


Fig. 13 Efficiency of impulse turbine under steady and sinusoidal condition

5. 결 론

본 논문에서는 파력에너지 2차 변환장치인 임펄스 터빈의 모형시험 시설 및 기법에 대한 검증을 위하여 기존에 발표된 터빈 중에서 가장 좋은 효율을 보이는 T. Setoguchi의 설계를 바탕으로 하여 성능 해석을 수행하였다. 가변 회전수를 갖는 직류 발전기를 이용하여 토오르크를 측정하였고, 이를 바탕으로 성능 해석을 수행하고 기존에 발표된 결과와 비교하였다. 이로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 압력과 유속은 같은 위상을 가지며 입력유동의 특성을 따른다. 토오르크와 회전수는 로터의 2차 관성 모멘트의 영향을 받는다
- (2) 왕복유동에서도 평균을 취하여 무차원화하면 정상상태의 유동에서와 같은 무차원화된 계수를 얻을 수 있었다.
- (3) 평균 효율의 기준으로 보았을 때, 본 연구소의 효율이 다소 크게나오는 결과를 보였다.
- (4) 본 연구에 이어서 유속에 대한 추가적인 연구가 필요로 함을 알 수 있었다.
- (5) 팁 간격의 영향을 알아보기 위하여 부(-)의 팁간격을 가지는 디자인을 고안했다.

파력발전 장비 시험을 위한 모형시험 장비를 구축하였다. 실험 항목들에 대한 이해의 폭을 넓혀서 정밀도 향상이 차기 터빈의 모형시험 평가의 근간이 될 것이다.

후 기

본 연구는 해양수산부지원으로 수행된 "파력에너지 실용화 기술 개발(1)"의 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

홍석원 (2003). "한·인도 해양에너지개발 공동연구", 한국해양연구원 보고서, UCM00470-2471.

Santhakumar (1996), "Impulse Turbine Design for Wave energy", Workshop on Turbines for Ocean Energy Applications

Setoguchi, T., Santhakumar, S., Maeda, H., Takao, M., and Kaneko, K.(2001), "A review of impulse turbines for wave energy conversion" Renewable energy, Vol. 23, pp261-292

Setoguchi, T., Takao, M., Santhakumar, S., Kaneko, K.(2004), "Study of an Impulse Turbine for Wave Power Conversion: Effects of Reynolds Number and Hub-to-Tip Ratio on Performance", Journal of offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 126. pp.1-4

2003년 6월 19일 원고 접수

2003년 7월 20일 최종 수정본 채택