

파력발전용 임펄스 터어빈의 자기 기동 특성 해석

문재승*, 현범수*

*한국해양대학교 해양시스템공학과

A Study of Self Starting Characteristics of Impulse Turbine of Wave Energy Conversion

JAE-SEUNG MOON* AND BEOM-SOO HYUN*

*Division of Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wave Energy Conversion 파력발전, Self Starting Characteristics 자기기동 특성, Impulse Turbine 임펄스 터어빈, Wells Turbine 웰즈 터어빈, Setting Angle of Guide Vane 가이드베인 각도, Tip Clearance 날개끝간극

ABSTRACT: The present paper deals with the numerical study to analyze the self-starting performance of impulse turbine in a reciprocating air flow generated by sinusoidal motion of wave inside oscillating water column. Result was compared to that of Wells turbine, well-known wave energy conversion device, and showed that the impulse turbine has a superior self-starting ability. More detailed parametric study was performed to demonstrate the effects of moment of inertia of rotor, loading torque, tip clearance and angle of guide vane.

1. INTRODUCTION

전 세계적으로 화석연료의 고갈과 더불어 환경오염 등의 문제로 인해 새로운 대체에너지의 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 국내에서는 자연 청정에너지 중의 하나인 파력 에너지를 이용한 파력발전에 대한 관심이 높아지고 있다. 파도의 상하운동 에너지를 이용하여 동력을 얻어내는 장치가 파력발전 장치인데 이러한 파력에너지를 유용한 에너지로 변환하기 위해서는 3단계의 과정이 필요하게 된다. 1차로 진동수주(Oscillating Water Column)형 챔버를 이용하여 파력에너지를 공기에너지로 변환하게 되고, 2차 변환장치인 터어빈을 통하여 공기에너지는 기계적 에너지로 바뀌게 되며, 발전기를 통하여 사용가능한 전기적 에너지로 변환하게 된다. 본 연구에서는 파력발전용으로 사용되는 2차 변환장치 터어빈이 파에 의해 정지상태에서 정상상태로 갈 수 있는 능력인 자기 기동 특성(Self Starting Characteristics)을 수치계산으로 해석하고자 하였다.

파력발전 분야는 선진국에서 많은 연구사례들이 발표되고 있고, 특히 일본의 T. Setoguchi et al(2001)가 활발히 연구 활동을 하고 있으며 많은 모형실험과 수치 계산 등을 통해 신뢰성 있는 결과를 많이 내고 있다. 본 연구 주제인 자기 기동에 대해서도 규칙파와 불규칙파에서의 터어빈 자기 기동 특성 해석과 그에 관련된 여러 가지 파라미터에 대한 연구를 많이 수행하는 등 자기 기동 특성에 대해서도 많은 논문을 발표한 바 있다.

제1저자 문재승 연락처 : 부산광역시 영도구 동삼2동 1번지
051-410-4950 always@bada.hhu.ac.kr

90년대 초반까지 가장 유망한 파력발전용 2차 변환장치로 Wells Turbine이 알려져 있었는데, 최근 Impulse Turbine이 그에 비해 우수하다는 연구결과가 많이 발표되고 있다. 특히 자기 기동의 관점에서 유리하다고 알려진 Impulse Turbine을 수치계산 하여 기존의 Wells Turbine과 비교하였으며 터어빈의 회전 관성모멘트, 모터의 Loading Torque 등의 영향을 고려, 상용 CFD code인 FLUENT를 이용하여 수치계산 하였다. 특히 세계적 추세와 맞물려 파력발전에 대한 국제경쟁력 제고 등 연구가치가 충분히 있는 Impulse Turbine에 대해서는 가이드 베인의 각도(Setting Angle of Guide Vane)별 영향, 날개끝 간극(Tip Clearance)의 영향 등 주요 파라미터에 대하여 특성을 파악하여 Impulse Turbine의 자기 기동 특성에 대한 보다 자세한 연구를 수행하고자 하였다.

2. TURBINE GEOMETRY, NUMERICAL METHOD AND TEST CONDITION

파력발전용 터어빈인 Impulse Turbine에 대한 자기 기동 특성을 해석하기 위해 Impulse Turbine에 대하여 수치계산을 수행하였다. T. Setoguchi et al (2001) 등의 자료조사를 통하여 기존에 설계된 터어빈 형상중 가장 우수하다고 판단되는 모델을 취하기로 하였는데, 설계된 터어빈의 날개수는 30개, 가이드베인 개수는 26개, 직경 38cm, 허브비는 0.7이며, 보다 자세한 치수는 홍석원 (2003)에 소개되어 있다.

설계된 터어빈의 날개수와 가이드베인의 개수가 배수관계를 이루지 않기 때문에 정확한 계산을 하기 위해서는 전체 모델링

을 해야 하나 3차원해석 결과 그 영향이 무시할 만 하였다(현범수 등, 2004). 그래서 가이드베인 개수를 날개수와 같이 30개로 보고 주기조건(periodicity)을 부여하여 계산을 수행하였다. 그리고 2차원 해석의 경우에는 로우터의 회전 운동을 2차원 날개의 x 방향 직진운동이라 가정하여 해석하였다. Fig. 1은 Impulse Turbine의 2차원 단면 설계를 보여주고 있다.

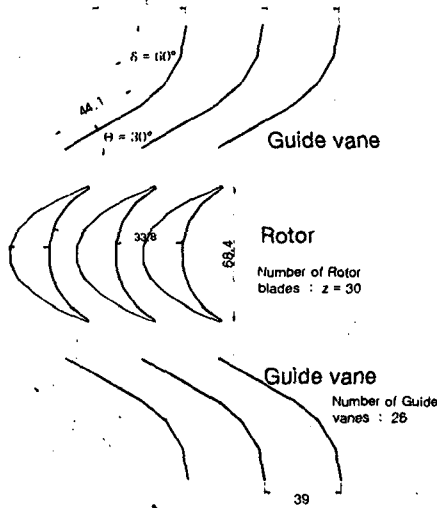


Fig. 1 Impulse Turbine Geometry in 2-D Sense

파도에 의해 덕트에 유입되는 축방향유속은 파도와 같은 주기를 가지고 변화하는 왕복운동이나 파도의 주기와 터빈의 회전 주파수의 연관성이 매우 작아 준정상 혹은 정상유동이라 가정하여도 무방하므로(현범수 등, 1993) 축방향유속은 상수로 취급하였다.

본 계산에 사용된 상용 코드는 유동해석으로는 FLUENT 6.1.22를 사용하였으며 격자생성에는 GAMBIT 2.1.6을 사용하였다. 격자수 민감도조사를 실시한 결과 2차원의 경우는 3,600여개, 3차원의 경우는 190,000여개를 사용함으로써 충분히 수렴된 해를 얻을 수 있었다(현범수 등, 2004). 최대한 유동장의 연속성을 고려하기 위하여 비정렬격자를 사용하였는데, 2차원은 3각형격자를 썼고 3차원의 경우는 전체적으로 4각팔격자를 사용하면서 날개끝에서는 보다 정확한 유동해석을 위해 Cooper 격자를 혼용하였다. 다양한 사전해석결과 Reynolds 수의 영향도 Reynolds 수가 아주 작은 경우를 제외하고는 무시할 수 있었으며(현범수 등, 2004), $k-\epsilon$ 난류 모델을 채택하였고 격자는 Fig. 2와 같다.

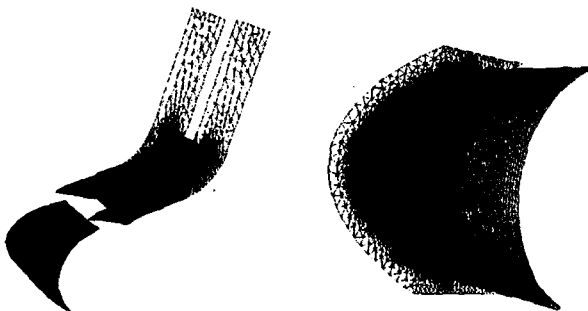


Fig. 2 Grid Generations

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Basic Equation of Motion for a Rotating System

터빈의 초기 자기 기동 특성은 다음의 운동 방정식으로 표현할 수 있다.

$$I \frac{dw}{dt} + T_L = T_i$$

$$\text{where } T_i = \frac{1}{2} \times \rho_a (v_a^2 + U_R^2) b l_r z r_m \times C_T$$

I , w 는 터빈의 회전 관성 모멘트(Moment of Inertia), 터빈의 각속도이다. T_L 은 모터의 Loading Torque로, 터빈의 축계 등으로 인해 손실되는 Frictional Torque와 발전기에서 흡수 사용되는 Generator Torque를 더한 것이 되겠고, C_T 는 터빈의 토크 계수이며, T_i 는 터빈의 토크이다. C_T 는 수치계산을 통해 구한 터빈의 정상유동 해석치를 사용하며 준정상상태에서의 토크 계수가 된다(현범수 등, 2004). 날개이론에서 받음각(Angle of attack)에 대응하는 물리량인 유동계수 (Flow coefficient) ϕ ($\phi = v_a / U_R$, 이때 v_a 는 축방향유속, U_R 은 터빈의 회전속도)에 대해서 각각 구한 정상유동해석치를 사용하며, 주어진 유동계수에 따라서 변하는 준정상상태의 토크 계수이다. T_L 은 터빈 발전기 시스템의 특성치로부터 구하고, I 는 구조해석 코드인 pro/Engineer를 이용하여 구했다.

3.2 Comparison Between Experiments and Calculations

본 연구의 신뢰도를 확인하기 위해서 상세한 연구에 앞서 Impulse Turbine의 3차원 수치계산으로 구한 해들을 본 운동방정식에 대입한 결과와 T. Setoguchi 등 (2001)의 논문에 실린 자기 기동 특성 커브를 비교하여 보았다. Fig. 3에서 보는 것처럼 정성적으로 비슷한 경향을 보이고 있고, 정량적으로도 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. $w^* = w/f$ 로 터빈의 회전수를 유입파의 주파수로 무차원한 것이며, $t^* = t/T$ 로 총시간을 유입파의 주기로 무차원한 값이다. (X는 3.4절 참조)

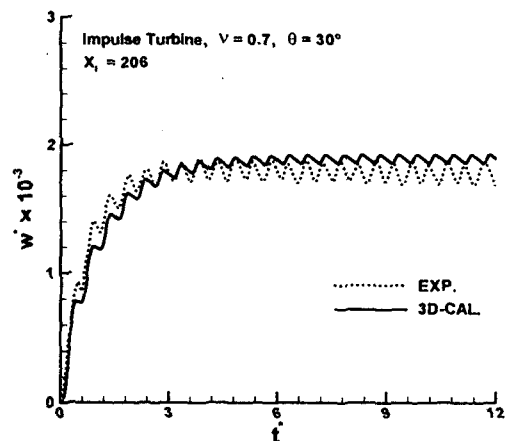
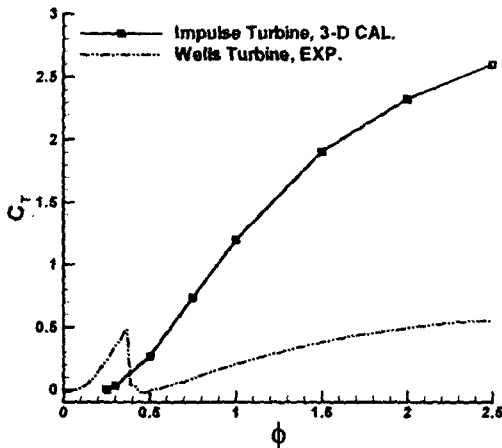


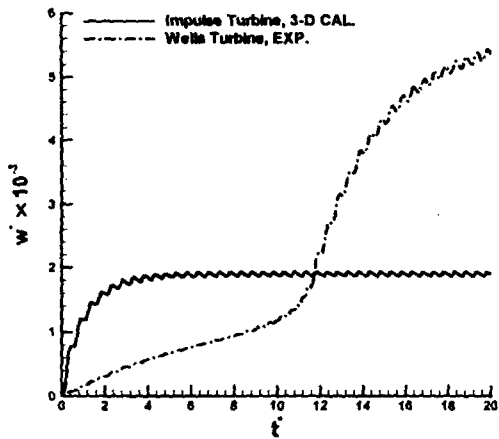
Fig. 3 Comparison between Experiment & Calculation

3.3 Comparison Between Wells Turbine and Impulse Turbine

기준에 파력발전용 터어빈으로 많이 사용되던 Wells Turbine 과 최근에 많이 각광받고 있는 Impulse Turbine의 자기기동 특성을 3차원 계산하여 비교해 보았다. 여기서 Wells Turbine의 경우는 T. Setoguchi et al(2001)의 실험값을 활용하여 Impulse Turbine과 비교하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 Impulse Turbine의 경우가 Wells Turbine보다 자기 기동이 더 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. Wells Turbine의 회전수가 더 커지는 것은 Wells Turbine의 작동구간에서 ϕ 가 크기 때문이다.



(a) Torque Coefficients



(b) Self Starting Characteristics

Fig. 4 Comparison between Wells Turbine & Impulse Turbine

3.4 Self Starting Characteristics of Impulse Turbine

본 절에서는 90년대부터 많이 사용되던 Wells Turbine보다 성능이 우수하다고 알려져 있는 Impulse Turbine을 자기 기동적 측면에서 보다 상세히 연구해보고자 하였다. 먼저 터어빈의 회전 관성모멘트(Moment of Inertia)와 발전기 모터의 Loading Torque 등 2개의 파라미터에 대하여 자기기동 특성을 비교해보았다.

파도라는 것이 불규칙적이고 유동의 변화가 심하므로 터어빈 설계적 관점에서는 그 변화에 민감하게 반응할 수 있는 가벼운 재질의 터어빈이 유리할 것이다. 그렇지만 전기적 관점에서는 안정적인 전기 공급을 위해서 다소 무거운 재질이 유리할 수도 있을 것이다. 본 연구에서는 자기 기동의 측면에서 접근하여 알루미늄($X_f=412.59$, 이때 $X_f = \frac{T_L}{\pi \rho_a r_m^3 v_a^2}$ 이고 ρ_a 는 공기의 밀도,

r_m 은 $0.85R$, v_a 는 축방향유속)과 스테인리스($X_f=1406.59$) 2가지의 재질에 대하여 비교하여 보았다. 다음 Fig. 5는 터어빈의 자기 기동 특성에 대한 회전 관성모멘트(Moment of Inertia)의 영향을 나타낸 것인데, 그림에서 알 수 있듯이 가벼운 알루미늄이 파에 민감하게 반응하여 자기 기동의 관점에서 유리한 것을 확인할 수 있다. 반면 앞서 언급하였듯이 진폭 등을 고려한 안정적인 전기 공급 차원에서는 무거운 스테인리스가 더 나은 결과를 보여 주었다. 터어빈을 설계할 때 파력발전 장치가 설치되는 곳의 환경적인 요인 등을 따져서 터어빈의 자기 기동과 전력의 안정적 공급 간의 적절한 선택이 중요할 것으로 판단된다. Impulse Turbine의 Torque Coefficients는 Fig. 4와 같다.

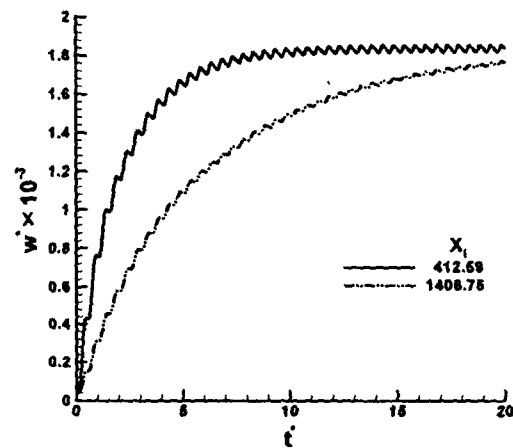


Fig. 5 Effect of Moment of Inertia

파력발전의 궁극적인 목적이 파력에너지를 사용가능한 전기 에너지로 변환하는 것인데 2차 변환장치에 의해 변환된 공기 에너지가 전기에너지로 변환되기 위해서는 발전기를 거쳐야만 한다. 이때 발전기에 토크가 걸리게 되는데 자기 기동과의 관계를 알아보았다. 이 토크를 T_L (Loading Torque)라고 하며 축계 등의 마찰 손실 토크(Frictional Torque)와 발전기에 의해 소요되는 토크(Generator Torque)로 나눌 수 있다. 전자는 터어빈의 회전수와 상관없이 거의 일정한 값을 가지고, 후자는 터어빈의 회전수에 비례하여 증가하는 경향을 보인다. Fig. 6은 Frictional Torque를 0.04로 일정한 값하에, Generator Torque를 변화시켜가면서 이에 대한 터어빈의 자기 기동 특성을 확인하여 보았다. 각각에 대응되는 값들은 본 연구와 관련하여 모형 실험을 수행하고 있는 한국해양연구원의 계측값들과 M. Inoue et al(1986)의 Wells Turbine에 사용된 값들을 참고하여 유추하

었다. 결과에서 알 수 있듯이 터빈의 자기 기동 특성이 T_L 에 아주 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다.

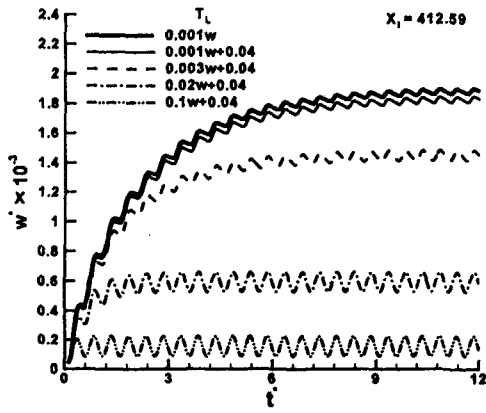


Fig. 6 Effect of Loading Torque

다음으로는 Impulse Turbine의 가이드베인 각도 θ (Setting Angle of Guide Vane)와 자기 기동 특성 간의 관계를 살펴보고자 한다. 2차원 계산과 3차원 계산을 수치적으로 수행한 후 T. Setoguchi 실험치(T. Setoguchi et al, 2001)와 비교하였는데, 수치 해석 결과 가이드베인 각도의 영향에 대한 값은 2차원 계산 결과에서 유사한 경향의 결과를 얻어 정성적으로 충분히 신뢰할 수 있었고, 3차원 계산의 경우에는 정량적으로도 실험과 매우 유사한 결과를 보여주었다(Hyun et al, 2004). 수치 계산과 실험으로 구한 Torque Coefficients를 살펴보면 가이드베인 각도가 15°일때 토오크가 가장 크고, 각도가 커질수록 토오크가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이것으로 인해서 자기 기동 측면에서 역시 터빈의 토오크가 커질수록 유리한 결과를 얻어 토오크가 큰 경우, 즉 가이드베인의 각도가 작은 경우에서 자기 기동이 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 가이드베인 각도와 자기 기동 특성간의 관계를 보여주고 있다. (이때, $T_L=0.003w+0.04$ 임)

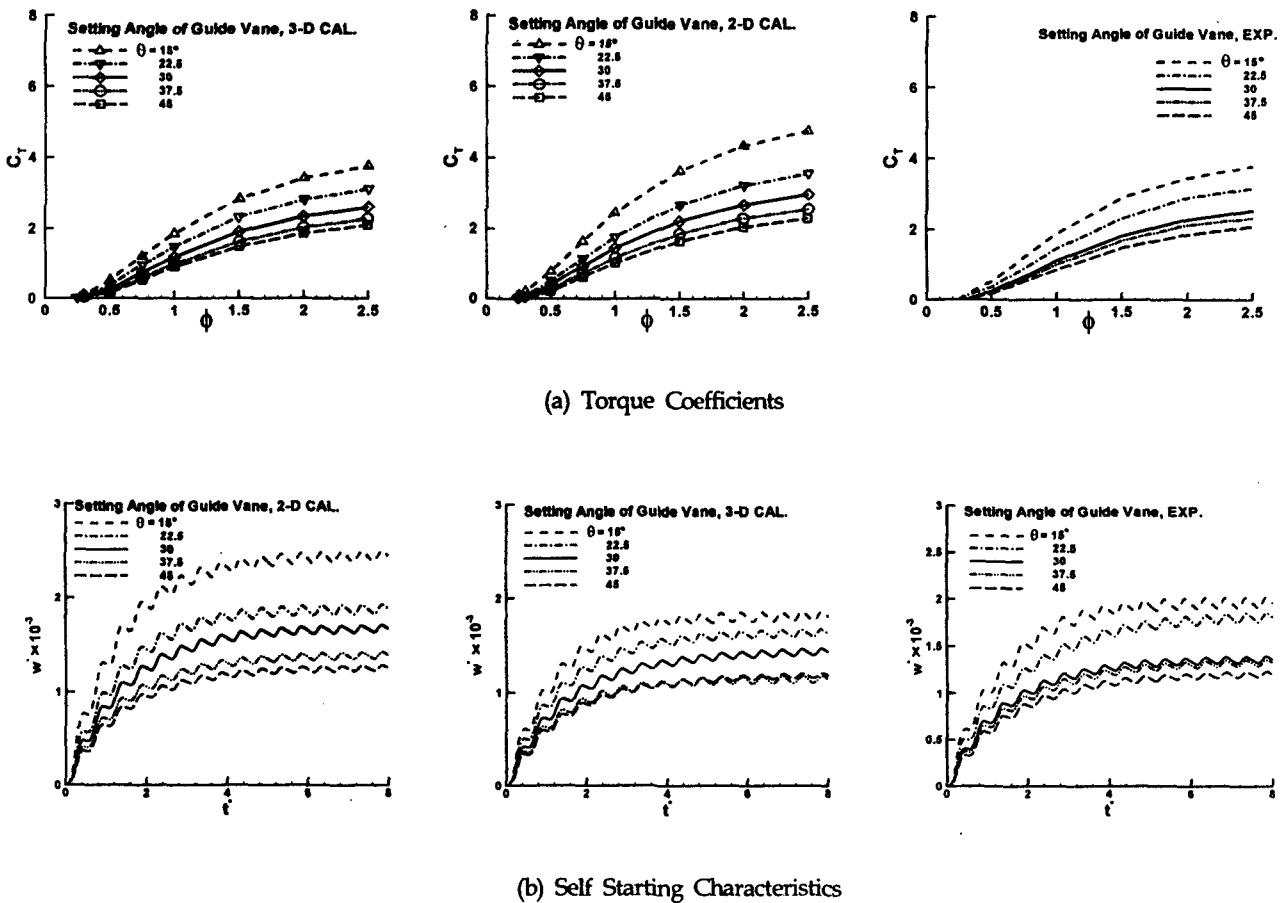
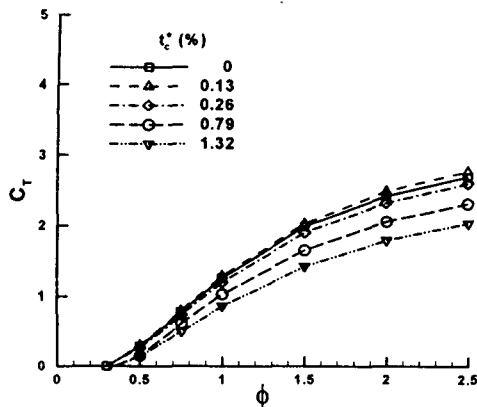
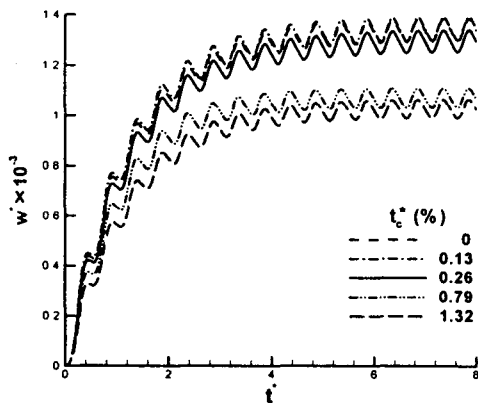


Fig. 7 Effect of Setting Angle of Guide Vane



(a) Torque Coefficients



(b) Self Starting Characteristics

Fig. 8 Effect of Tip Clearance

Fig. 8은 터빈의 3차원성과 자기 기동의 관계를 알아보기 위하여 3차원성을 잘 나타내주는 파라미터인 Tip Clearance와 자기 기동의 관계를 확인하여 보았다. 간극이 작은 경우에서 토오크가 커 자기 기동에도 유리하게 작용되었다. 여기서 t_c^* 는 날개 끝간극을 로우터 직경으로 나눈 값으로서 %로 표시하였다. 터빈의 효율적인 측면과 자기 기동의 측면 모두 간극이 작을수록 유리하게 작용하였다. 한국해양연구원에서 모형실험을 수행하고 있는데 실제 모형 제작시의 치수인 간극이 1mm($t_c^*=0.26$)인 경우가 자기 기동이 잘 되는 결과를 보여주어 현재 시스템이 자기 기동의 관점에서도 적절한 치수임을 확인할 수 있었다.

4. SUMMARY AND DISCUSSION

파력발전용 터빈의 자기 기동 특성을 해석하기 위하여 상용 code로 수치 계산하여 보았다. 자기 기동 측면에서 Impulse Turbine이 Wells Turbine보다 우수하다고 알려져 있었는데 수치 해석 결과 이를 확인할 수 있었고, Impulse Turbine에 대하여 다음과 같은 자기 기동 특성에 대한 결과를 확인할 수 있었다.

1) Moment of Inertia가 작을수록 변화가 심한 파도에 민감하게 잘 반응하는 등 자기 기동의 측면에서 유리한 결과를 얻었고, 반면에 유입파에 의한 민감성으로 인해 터빈의 회전에 대한 진폭이 커져서 터빈의 설계시 전기의 안정적인 공급 측면에서는 좋지 않은 결과를 얻었다. 파력발전장치 설치 장소의 환경적 요인 등을 고려하여 자기 기동과 안정적 발전의 상호 고려가 필요할 것이다. Loading Torque에 대해서도 민감하게 반응하였다.

2) 터빈의 가이드베인의 각도별 영향은 터빈의 토오크가 클수록, 즉 가이드베인의 각도가 작은 경우에 자기 기동이 잘 되는 결과를 얻었다. 2차원 계산과 3차원 계산 모두 실험과 비교하였을 때 정성적 측면에서 타당한 결과를 얻었다.

3) 3차원성과 자기 기동 간의 관계를 확인해 보기 위하여 자기 기동과 날개끝 간극의 영향을 수치 계산하여 보았다. 역시 자기 기동과 연관이 깊은 파라미터인 토오크가 큰 경우에서 자기 기동이 잘 되는 결과를 얻을 수 있어서 현재 수행중인 모형시험 ($t_c^*=0.26$)이 바른 방향임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원 지원으로 수행되는 파력에너지 실용화 기술개발 위탁연구 결과 중 일부임을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 홍석원 (2003), "한·인도 해양에너지 개발 공동연구", 한국해양연구원 보고서, UCM00470-2471
- 현범수, 문재승(2004), "수치해석을 이용한 파력발전용 임펄스 터빈의 성능 해석", 한국해양공학회지, 제 18권, 5호.
- 현범수, 서정천, 이관목 (1993), "파력발전용 웰즈터빈의 유체 역학적 성능연구", 대한조선학회 논문집, 제 30권, 제 4호, pp 23-30.
- B.-S. Hyun, J.S. Moon, S.W. Hong, Y.Y. Lee(2004), "Practical Numerical Analysis of Impulse Turbine for OWC-type Wave Energy Conversion Using a Commercial CFD Code", Proc. 14th ISOPE Conf., Toulon, France, May 23-28.
- M. Inoue, K. Kaneko, T. Setoguchi, S. Raghunathan(1986), "Simulation of Starting Characteristics of Wells Turbine" AIAA/ASME 4th Fluid Mechanics, Plasma Dynamics and Lasers Conference, Atlanta, America, May, 12-14
- T. Setocuchi, M. Takao, Y. Kinoue, K. Kaneko, S. Santhakumar, M. Inoue(1999), "Study on an Impulse Turbine for Wave Energy Conversion", Proc. 9th ISOPE Conf., Brest, France, May 30-June 4.
- T. Setoguchi, S. Santhakumar, H. Maeda, M. Takao, K. Kaneko (2001), "A Review of Impulse Turbines for Wave Energy Conversion", Renewable Energy 23, Pergamon, pp 261-292.