

파력발전용 링타입 임펄스터어빈의 성능 해석

현범수* · 문재승* · 홍석원** · 김기섭**

*한국해양대학교 해양시스템공학과

**한국해양연구원 해양시스템안전연구센터

A Study on the Performance of the Ring-type Impulse Turbine for Wave Energy Conversion

BEOM-SOO HYUN*, JAE-SEUNG MOON*, SEOK-WON HONG** AND KI-SUP KIM**

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

**Maritime and Ocean Engineering Research Institute, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Wave Energy 파력발전, Impulse Turbine 충동식 터어빈, CFD 전산유체역학, Ring-type Turbine 링-타입 터어빈, Tip Treatment 날개끝 처리, End Plate 익단판, Cooper Mesh 쿠퍼 격자

ABSTRACT: This paper deals with the design and aerodynamic analysis of a so-called "ring-type" impulse turbine for wave energy conversion. Numerical analysis was performed using the CFD code, FLUENT. The main idea of the proposed turbine rotor was to minimize the adverse effect of tip clearance of the turbine blade; the design was borrowed from a ducted propeller with connected ring tip for special purpose marine vehicles. Results show that the efficiency increases up to 10%, depending on flow coefficient, with the higher flow coefficient yielding better efficiency. Decrease of input coefficient CA was the main reason for higher efficiency. Performance of ring-type rotor at various design parameters, as well as flow conditions, was investigated, and the advantages and the disadvantages of the present impulse turbine were also discussed.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 환경오염 등의 문제로 인해 세계적으로 자연 청정에너지에 대한 관심이 높아지고 이와 관련하여 국내에서도 파력발전에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 파도의 운동에너지와 위치에너지를 이용하여 동력을 얻어내는 것이 파력발전이므로 그 파력에너지를 전기에너지로 변환하는 고효율 장비의 설계가 필수적이라 하겠다. OWC(진동수주)형의 파력발전 장치는 통상 3단계의 변환과정을 거치는데, 본 연구는 챔버를 통하여 생성된 공기에너지를 기계적 에너지로 변환하는 2차 변환장치인 로우터를 고효율로 설계하고자 하는데 그 목적이 있다.

90년대 초반까지는 작동원리의 단순성 등으로 Wells 터어빈이 파력발전용 터어빈으로 각광받았으나, 최근에는 넓은 작동범위와 낮은 회전수, 좋은 자기기동 특성으로 인해서 임펄스터어빈이 많이 사용되고 연구도 활발히 진행되고 있다. 본 연구자들은 그동안 고효율의 임펄스터어빈을 설계하기 위해서 날개수나 허브비의 영향 (현범수와 문재승, 2004), 가이드베인의 각도별 영향, 덕트와 로우터 사이의 날개끝 간극(Tip Clearance) 영향에 대한 Parametric Study를 통한 연구를 수행한 바 있다 (Hyun et al., 2004). 이를 바탕으로 고효율의 터어빈을 설계하기 위해 항공기 날개의 Winglet과 비슷한 개념으로 로우터의 끝에 Plate를

설치해서 Roll-up 현상을 막아보고자 의도된 End Plate에 대한 사전연구를 Hyun et al. (2005)에서 수행하였고, 이번 연구에서는 링(Ring)타입 터어빈이라는 보다 고효율의 로우터를 새롭게 제안하게 되었다. Setoguchi et al. (2001)이 발표한 최적 임펄스터어빈을 기본 형상으로 하여 수치계산을 통해 다양한 변화를 시도하였다. 특히 효율과 연관이 있다고 생각되는 링의 축방향 폭, 두께, Penetration 등의 몇가지 파라미터에 대한 체계적인 분석을 통하여 링타입 터어빈의 보다 상세한 성능해석을 수행하였다.

2. 터어빈의 형상 및 수치해석기법

사전 연구를 통하여 기존에 설계된 터어빈 중 가장 우수하다고 알려진 Setoguchi et al. (2001)의 최적 기본형 모델을 대상으로 하여 파력발전용 임펄스터어빈에 대한 성능해석을 수행하였다. 기본형 터어빈의 치수로는 로우터 직경 (38cm), 날개수 (30개), 가이드 베인 개수 (26개), 가이드베인 각도 (30도), 날개끝 간극 (1mm), 허브비 (0.7) 등이며, 로우터와 가이드베인의 간격을 나타내는 G/l,은 0.19로 정하였다. 보다 자세한 치수는 홍석원 (2003)에 소개되어 있고, Fig. 1은 설계된 임펄스터어빈의 2차원 단면 형상을 보여주고 있다.

Fig. 2는 링(Ring)에 대한 치수 및 개략적인 형상을 보여주고 있다. 기본형 로우터와 동일하나 축방향으로 15% ($l_r=1.15l_r$)정

제1저자 현범수 연락처: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지
051-410-4308 bshyun@mail.hhu.ac.kr

도 길고 두께 (t_p)가 1mm (로우터 직경 D 의 0.26%)인 원통형 판이 날개의 끝단을 일체로 연결하고 있는 것이 유일한 차이점이다.

해석 결과 Reynolds 수의 영향도 Reynolds 수가 아주 작은 경우를 제외하고는 무시할 수 있었다 (현범수와 문재승, 2004). 난류 모델은 $k - \epsilon$ 모델을 채택하였다.

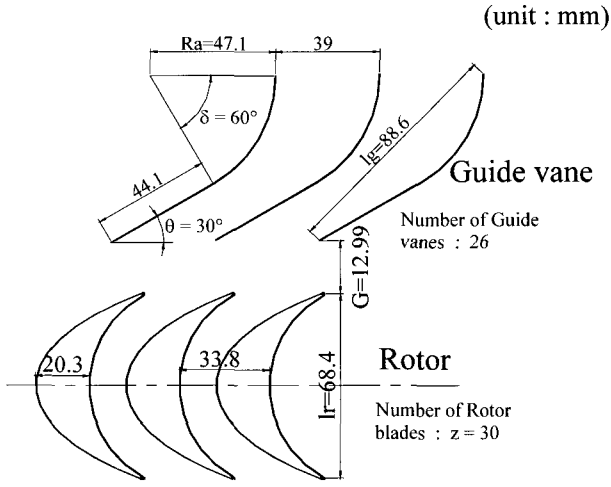


Fig. 1 Turbine geometry

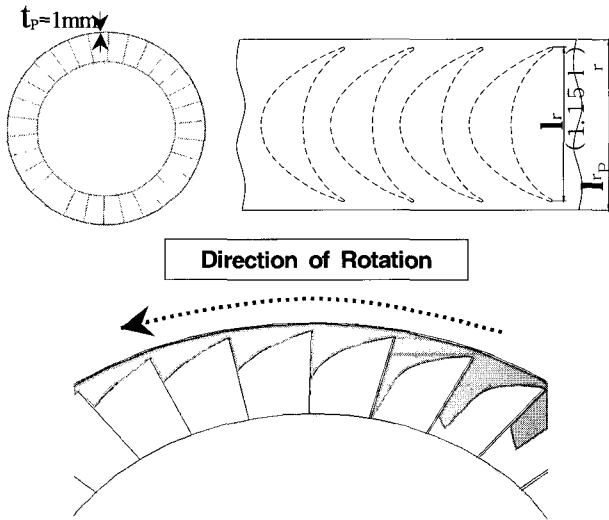


Fig. 2 Configurations of ring-type rotor

파도에 의해서 유입되는 축방향 유속은 파도와 같은 주기를 가지고 변화하는 왕복유동이나 파도의 주기와 터빈의 회전 주파수의 차이가 매우 커 연관성이 매우 작다. 그래서 본 현상을 준정상 혹은 정상유동이라 가정하고(현범수 등, 1993) 수치계산을 수행하였다.

본 계산에는 유동해석용으로 FLUENT 6.1.22를 사용하였으며, 격자 생성에는 GAMBIT 2.1.6을 사용하였다. 격자는 최대한 유동장의 연속성을 깨지 않기 위해서 전체적으로 비정렬 격자를 사용하였으며, Tip 영역의 보다 정확한 유동해석을 위해서 Cooper Mesh를 혼용하였다 (Hyun et al., 2005). 다양한 사전

3. 계산결과

3.1 정의

덕트내로 유입되는 평균 축방향 유속이 v_a 인 유동장에서 작동하는 임펠스터어빈의 성능을 정상상태에서 입력계수 (Input coefficient)와 토오크 계수 (Torque coefficient)로 표현하면 다음과 같다.

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

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho_a (v_a^2 + U_R^2) b l_z r_m} \quad (2)$$

여기서 Δp , Q , T 는 압력강하, 유량, 로우터의 토오크를 나타내며, r_m , z 은 날개의 평균반경과 날개수를 나타내고, U_R , b , l_z 은 각각 $r = r_m$ 에서 회전방향유속, 날개의 스펠과 코오드 길이이다. 터빈의 효율은 다음 식으로 정의된다.

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

여기서 $\phi = v_a / U_R$

3.2 링-타입 (Ring-type) 로우터의 성능

파도의 상하 운동에너지를 우리가 필요로 하는 동력으로 변환하기 위해서는 통상 3단계의 변환과정이 필요하게 된다. 그중 챔버를 통하여 생성되어 덕트에 유입되는 공기에너지를 기계적 에너지로 변환하는 2차 변환장치인 터빈을 보다 고효율로 설계하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다. 먼저 항공기 날개의 Winglet에서 착안하여 로우터의 Tip에 End Plate를 설치하는 아이디어를 발표하였는데 기본형에 비하여 최대 5% 정도 향상되는 결과를 얻을 수 있었다 (Hyun et al., 2005). 이 개념은 날개 끝에서 Vortex Roll-up을 막아보고자 하는 것이 주목적이었는데, 연구를 수행하던 중 기왕에 Roll-up을 감소시키는 게 목적이란 차라리 날개끝을 완전히 End Plate로 감싸는 형상인 소위 링타입 터빈이 효율이나 제작면에서 유리할 것이라 생각하게 되어 특허출원과 함께 본 연구를 수행하게 되었다. 연구결과 기대치에 부응하는 터빈 효율을 얻을 수 있었는데, Fig. 3은 기본형, End Plate 부착형 및 링타입 터빈 각각에 대한 입력계수, 토오크계수, 효율을 비교하여 보여주고 있다.

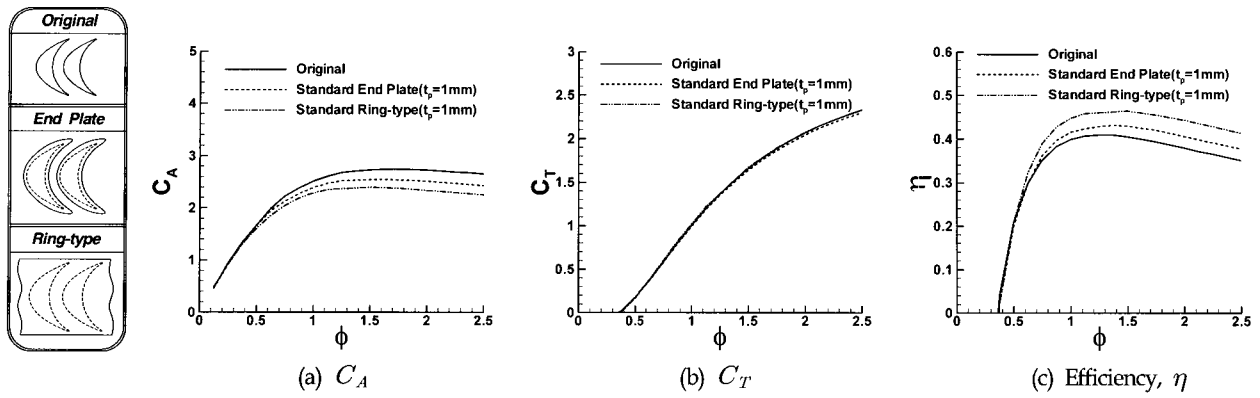


Fig. 3 Comparisons of performance for 3 different rotor types

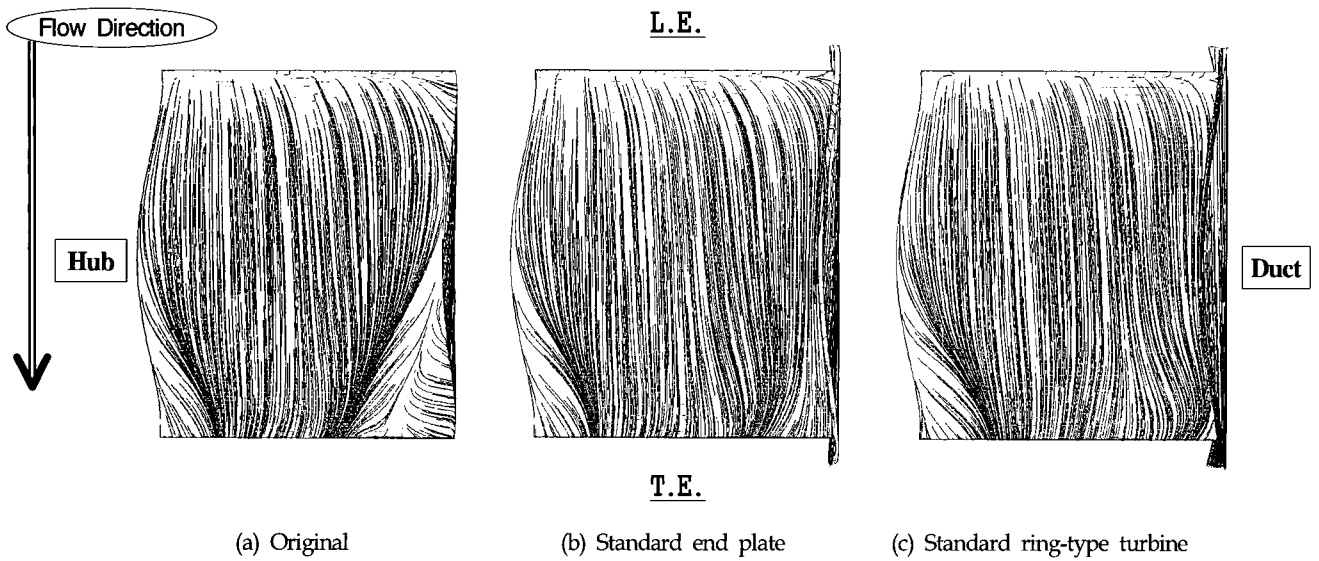


Fig. 4 Flow pathlines on suction side of rotor blade($\phi=1$)

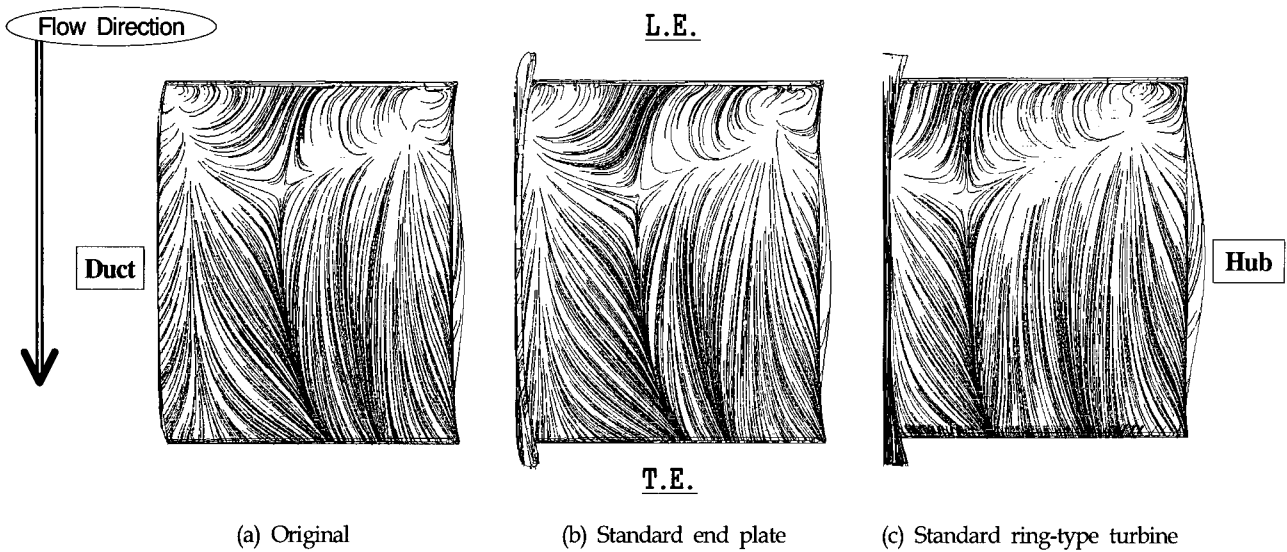
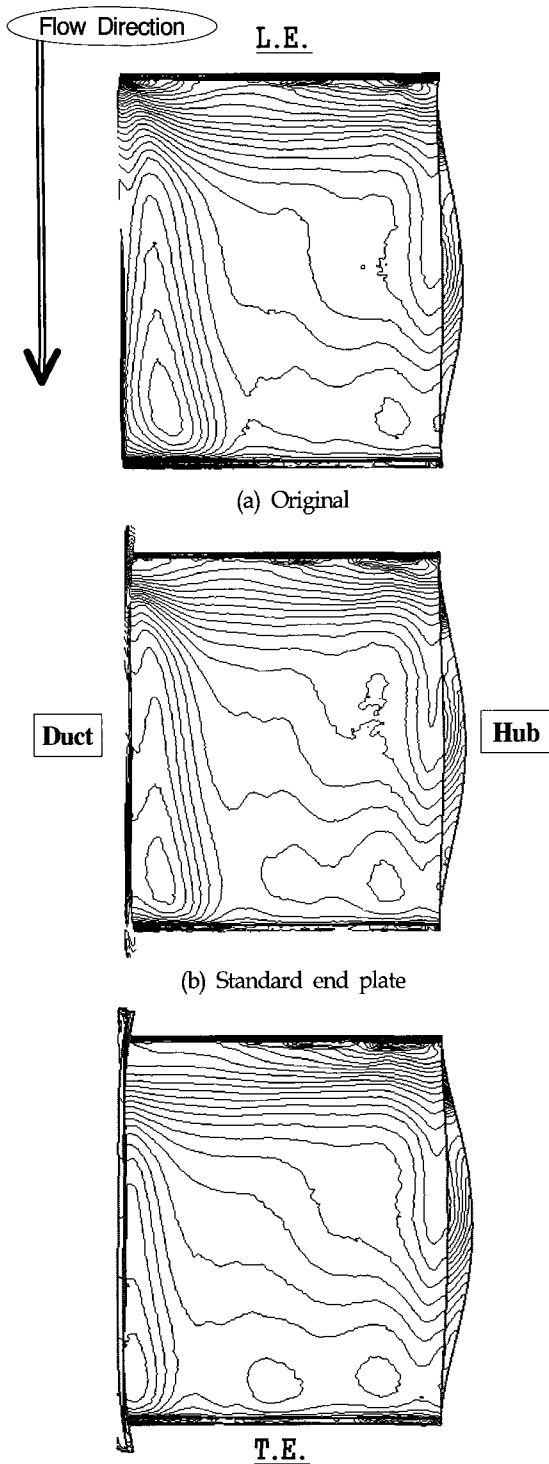


Fig. 5 Flow pathlines on pressure side of rotor blade($\phi=1$)



(c) Standard ring-type turbine
Fig. 6 Pressure distributions on pressure side of rotor blade ($\phi=1$)

효율의 관점에서 볼 때 링타입 로우터가 가장 우수한 성능을 보이며 End Plate 부착형 로우터가 그 다음으로 좋은 성능을 보여주고 있다. Setoguchi et al. (2001)의 기본형 터빈이 현재 가장 우수한 임펠스터어빈의 하나인 점을 감안할 때 그보다 10%

정도나 개선된 링타입 로우터의 효율은 놀라운 결과로 풀이된다. 링타입이 Fig. 3(a)에 주어진 입력계수가 가장 적게 구해짐을 알 수 있는데 이는 링타입 터빈이 로우터와 가이드베인을 통과해 흐르는 흐름의 압력강하를 최소화하기 때문이다. 즉 날개 끝에 설치한 링이나 End Plate가 날개끝에서 원활한 흐름을 방해하는 유동의 박리나 날개끝의 Vortex Roll-up 등을 줄여주기 때문에 가능한 결과이다. 링이나 End Plate 로 인한 토오크계수 C_T 의 차이는 거의 눈에 띄지 않았다.

이를 보다 구체적으로 입증해 보이기 위하여 날개 표면의 유적선을 구해본 것이 Fig. 4와 Fig. 5에 주어져 있다. Fig. 4의 오른쪽면과 Fig. 5의 왼쪽면이 각각 날개의 끝 (즉, 덕트면쪽) 방향이다. 기본형의 경우 흡입면의 덕트면쪽 하부 (그림에서 우측아랫부분)에 Vortex Roll-up 형태의 유동이 확연히 나타나며, 이 와 유동은 End Plate가 설치되면서 상당히 줄어드는 경향을 보이고, 링타입이 되면서 완전히 소멸되는 현상을 명확히 볼 수 있다. 압력면 역시 기본형에서는 그림의 왼쪽면에 날개끝 방향으로 형성되는 흐름이 보이는 반면, 링타입은 잘 정돈된 흐름이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 링이나 End Plate가 날개끝 유동의 개선을 위한 것이기 때문에 로우터 허브부근의 유동엔 영향이 없을 것으로 예상했으며 계산결과 역시 그와 같은 경향을 보여 주었다.

끝으로 Fig. 6은 로우터 날개의 압력면에서의 압력분포를 보여주고 있다. 기본형의 경우 덕트쪽인 좌측의 하단부근에 상대적으로 높은 압력이 발생하고 있는데, End Plate, 링타입으로 변해가면서 이와같이 높은 압력의 영역이 점차로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 날개 끝부분 압력면 상에서의 흐름이 링타입의 경우 코오드 방향으로 보다 원만히 흐를 수 있다는 것을 의미하기 때문에 Vortex Roll-up이 발생되지 않을 것이라는 것을 알 수 있었다. 흡입면상에서의 압력분포는 지면관계상 생략하였으나 여기서도 역시 링타입인 경우 압력의 최소치가 기본형에 비하여 월등히 감소함을 볼 수 있었다.

3.3 링타입 로우터에 대한 Parametric Study

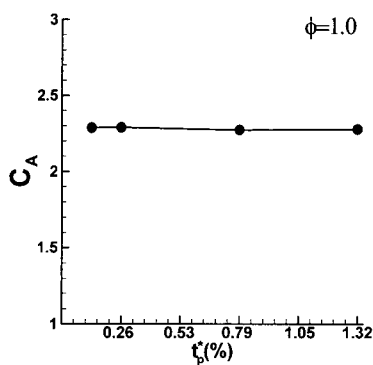
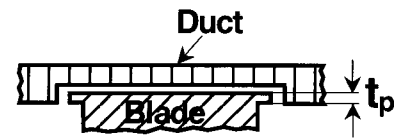
링타입 로우터의 상세한 특성과 성능을 확인하기 위해서 링의 두께, Penetration, 코오드방향으로 링의 폭 등 주요 파라미터에 대해서 체계적으로 수치 계산을 수행하였다. 먼저 Fig. 7은 링의 두께 t_p 에 대한 영향을 나타낸 것인데, $t_p=0.5mm, 1mm, 3mm, 5mm$ 를 비교하여 보았다 (그림에서 $t_p^* = t_p/D \times 100$ 로서, 각각 0.13, 0.26, 0.79, 1.32에 해당함). 그림에서 보는 바와 같이 링의 두께에 의한 영향은 거의 보이지 않았기 때문에 실제 설치시 가공상 적정한 두께의 링을 사용하면 될 것이다.

Fig. 8은 날개끝이 기존의 덕트 안쪽으로 파고 들어간 정도, 즉 Penetration의 영향을 살펴본 것이다. 덕트 쪽으로 파고들어간 정도를 l_p 로 나타내었는데, 그림에서 $l_p^* = l_p/D \times 100$ 로서, 0, 0.26, 0.79, 1.32는 실제 길이로는 각각 0mm, 1mm, 3mm, 5mm에 해당한다. 이것 역시 전체적으로 비슷한 경향을 보이나, l_p^* 가 0과 0.26인 경우 다소 우수한 것으로 확인되었다. $l_p^*=0.26$ 인 경우가 0인 경우보다 C_T 는 약간 좋게 계산되었고 반면 C_A 는 그렇지 않았지만 그 차이는 그리 크지 않았다. 전반적으로 Penetration에 의하여 얻는 이득은 거의 없는 것으로 판단된다.

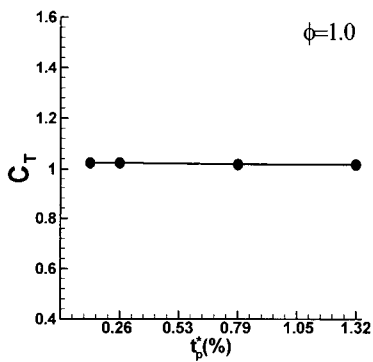
Fig. 9는 링의 축방향으로의 폭의 영향을 살펴본 것이다. 여기서 C_p 는 그림에서 보는 것과 같이 $C_p = l_p / l_r$ 로 정의하였다. 링의 폭 l_p 가 커질수록 좋은 성능을 보여줄 것으로 예상하였으나 그 차이는 그리 크지 않았다.

결론적으로 링타입 터어빈은 기존의 터어빈보다 월등히 높은 효율을 보여 주었으나, 링타입 터어빈의 주요 파라미터들의 영

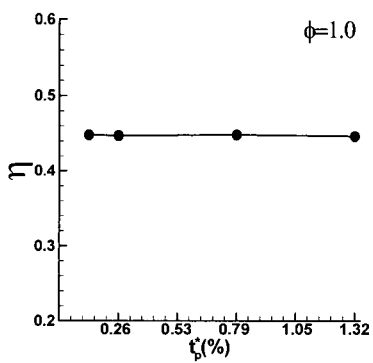
향은 수치계산 결과 전체적으로 큰 영향을 보이지 않았다. 즉 링타입 터어빈의 성능향상은 날개끝에 링을 설치하는 기본개념에 의해 언어짐을 확인하였기 때문에 특별한 주의 없이도 대부분 임펠스터터어빈의 로우터 설계에 손쉽게 활용할 수 있으리라 판단되었다.



(a) Input coefficient, C_A

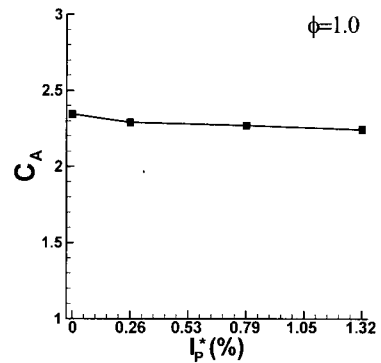
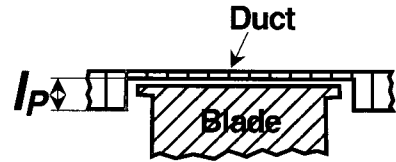


(b) Torque coefficient, C_T

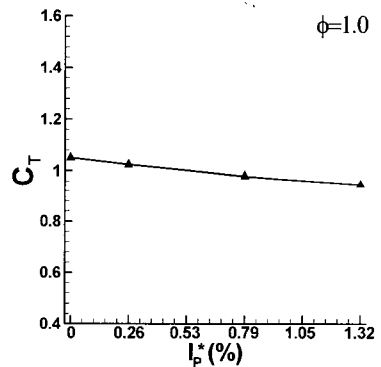


(c) Efficiency, η

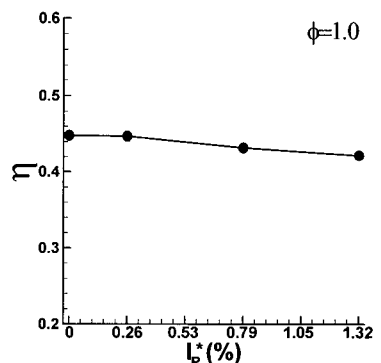
Fig. 7 Effect of thickness of ring



(a) Input coefficient, C_A

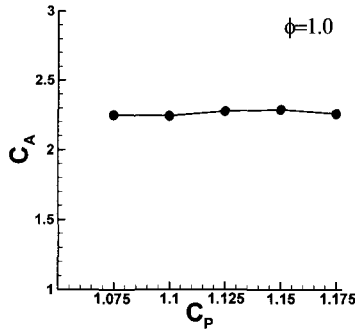
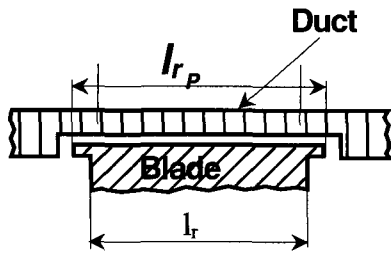


(b) Torque coefficient, C_T

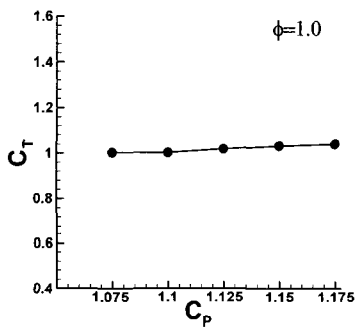


(c) Efficiency, η

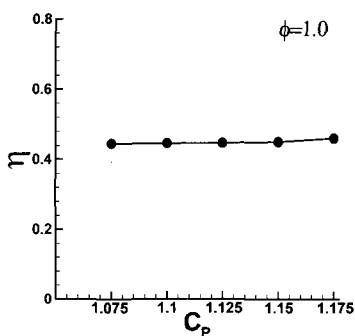
Fig. 8 Effect of penetration depth of rotor blade



(a) Input coefficient, C_A



(b) Torque coefficient, C_T



(c) Efficiency, η

Fig. 9 Effect of width of ring in chordwise direction

4. 결 론

본 논문은 파력발전용 임펄스터어빈의 효율향상을 위하여 제안된 터빈들의 성능을 비교, 평가하는데 그 목적이 있다. 기존의 날개수나 허브비, 가이드베인 각도별 영향, 날개끝 간극의 영

향 등을 토대로 하여 새로운 형태의 End Plate와 링타입 로우터를 착안하였는데 그중 가장 성능이 우수한 것으로 밝혀진 링타입에 초점을 맞추어 심층 연구를 수행하였다. 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 날개끝에서 필수적으로 발생하게 되는 Roll-up 현상을 막아 보고자 날개끝에 부착한 End Plate를 보다 개선한 형태인 링타입 로우터는 기본형에 비하여 탁월한 Roll-up 억제능력을 보여 주었고, 개선된 흡입면과 압력면에서의 압력분포에서 알 수 있듯이 약 10% 정도나 향상된 효율을 얻을 수 있었다.

(2) 링타입 로우터의 상세한 성능해석을 위해 수행한 링의 두께, Penetration 깊이, 링의 축방향 코오드길이의 영향을 Parametric Study를 통하여 분석하였는데 전반적으로 그리 큰 성능의 변화는 없는 것으로 나타났다. 즉, 날개의 끝을 링타입으로 둘러싸는 기본 개념 그 자체만으로 고효율의 파력발전용 임펄스터어빈의 성능향상을 얻게되었다고 판단된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원이 수행 중인 “파력에너지 실용화 기술개발”의 위탁연구 결과의 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

현범수, 문재승 (2004). “수치해석을 이용한 파력발전용 임펄스터어빈의 성능 해석”, 한국해양공학회지, 제18권, 제5호, pp 1-6.

현범수, 서정천, 이판목 (1993). “파력발전용 웰스터어빈의 유체 역학적 성능연구”, 대한조선학회 논문집, 제30권, 제4호, pp 23-30.

홍석원 (2003). “한·인도 해양에너지 개발 공동연구”, 한국해양연구원 보고서, UCM00470-2471.

Hyun, B.-S., Moon, J.-S., Hong, S.W. and Kim, K.S. (2005). “Design of Impulse Turbine with an End Plate for Wave Energy Conversion”, Proc. 15th ISOPE, Seoul, Koera, Submitted.

Hyun, B.-S., Moon, J.-S., Hong, S.W. and Lee, Y.Y. (2004). “Practical Numerical Analysis of Impulse Turbine for OWC-type Wave Energy Conversion Using Commercial CFD code”, Proc. 14th ISOPE, Toulon, France, Vol. 1, pp 253-259.

Setoguchi, T., Santhakumar, S., Maeda, H., Takao, M. and Kaneko, K. (2001). “A Review of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion”, Renewable Energy, Vol 23, pp 261-292.

2005년 9월 20일 원고 접수

2005년 12월 14일 최종 수정본 채택