



Original Article

수치해석을 이용한 파력발전용 임펄스터빈 날개의 뒤젓힘각과 터빈성능의 연관성 연구

양승권¹ · 김길원² · 이정기² · 현범수^{1,†}

¹한국해양대학교 조선해양시스템공학부

²선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구부

A numerical Study on the Effect of Blade Sweep Angle of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion

Seung-Kwon Yang¹, Kil-Won Kim², Jeong-Ki Lee², and Beom-Soo Hyun^{1,†}

¹Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

²Offshore Plant Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

진동수주형 파력발전장치의 2차 에너지변환장치로 작동범위가 넓고 자기기동특성이 상대적으로 우수한 임펄스터빈이 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 터빈의 성능향상을 위해 날개의 스팬에 뒤젓힘각을 적용하여 그에 따른 특성을 수치해석적인 방법으로 고찰하였다. 뒤젓힘각은 날개의 전단과 후단이 스팬방향으로 휘어진 각을 의미한다. 유동해석은 상용 CFD코드인 Fluent를 사용하였고 격자의존도 테스트를 통하여 최적의 격자계를 도출하였다. 총 20경우의 뒤젓힘각을 변화시키면서 계산을 수행하였으며, 전단은 음의 각도를 적용했을 때 성능이 향상되었고, 후단은 양의 각도를 적용했을 때 성능이 향상되었다. 도출한 최적 뒤젓힘각은 전단과 후단이 각각 -5°, +6°인 경우이며, 기존 모델 대비 8%의 효율이 향상됨을 확인하였다.

Abstract – Because of the wide operating range and the superior self-starting characteristics, the impulse turbine has been widely used as a primary energy conversion device for OWC(oscillating water column) wave energy converter. To improve the turbine efficiency, the effect of sweep angle of turbine blade was studied for both shapes of leading and trailing edges. The numerical model was established by employing the commercial RANS-based CFD code. The grid dependency was checked numerically and the validation of benchmark result was made with available experimental data. Results showed that the negative angle improved the performance of turbine in case of leading edge, while the positive angle improved the performance in case of trailing edge. The optimal sweep angle appeared to be -5° of the leading edge and +6° of trailing edge. It was found that the overall efficiency was improved about 8% compared to the standard model.

Keywords: Impulse turbine(임펄스터빈), Sweep angle(뒤젓힘각), Turbine efficiency(터빈효율), Input coefficient(입력계수), Torque coefficient(토크계수)

1. INTRODUCTION

진동수주형 파력발전장치는 파랑에너지를 공기의 운동에너지로 변환한 후 터빈을 회전시켜 전력을 생산하는 방식이기 때문에 핵심장치가 수면위에 설치되어 유지보수가 상대적으로 용이하여 개

발이 활발하게 진행되고 있다. 적용되고 있는 터빈 형태로는 크게 임펄스터빈과 웰즈터빈으로 구분할 수 있고, 임펄스터빈은 상대적으로 자기기동성능이 좋고 작동범위가 넓으며 소음이 적은 장점이 있다.

임펄스터빈에 대한 연구는 1990년대부터 꾸준히 수행되었으며, 터빈의 효율을 개선하기 위한 연구는 2000년대부터 활발하게 진행되었다. Hyun and Moon[2004]은 임펄스터빈의 날개수, 허브비, 날

†Corresponding author: bshyun@kmou.ac.kr

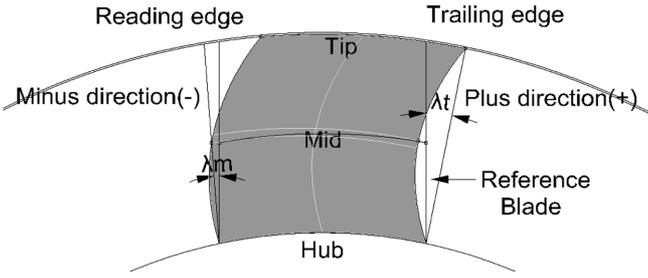


Fig. 1. Schematics of blade sweep angle.

개끝단 간극, 가이드베인 각도에 따른 터빈의 성능에 대해 조사하였다. 날개수의 증가는 유입되는 유량의 감소를 초래하고 최적의 날개수는 30개로 발표하였으며, 허브비의 증가는 단면적 감소로 유속은 증가하지만 효율은 감소함을 확인하였다. 가이드베인 각도는 날개로 유입되는 흐름을 안내하는 역할을 하며 최적의 각도는 30°, 날개 끝단간극은 작을수록 유리함을 발표한 바 있다. 또한, Hyun *et al.*[2006]은 날개 끝에 판을 부착시킨 End-plate 부착형과 날개 끝을 일체형으로 감싼 Ring-type 임펄스 터빈을 고안하여 성능을 해석하였는데 End-plate와 Ring-type 날개를 적용한 터빈의 경우 기존 임펄스터빈의 날개끝에서 원활한 흐름을 방해하는 유동박리와 날개끝 Vortex roll-up 현상을 줄이는 효과가 있으며 각각 5%, 10% 정도의 효율이 향상됨을 보인 바 있다. Liu *et al.*[2016]은 날개 설치각 변화에 따른 성능을 조사하였는데, 날개에 설치각을 적용함으로써 날개의 압력면에 보다 많은 유량을 발생시키도록 하는 것이다. 설치각이 5° 일 때 터빈 효율이 약 10%정도 향상됨을 확인한 바 있다. 지금까지 고안된 특수 터빈의 날개의 끝에 부가적인 구조물을 설치하거나 날개의 초기설치각을 적용하는 방법이므로 전자는 터빈의 관성모멘트를 증가시켜 자기기동특성에 영향을 줄 수 있고, 후자는 흡기시의 효율을 현저하게 감소시켜 최종출력에 영향을 주는 등 단점을 갖고 있다.

본 연구에서는 위에서 언급된 단점들을 보완하는 동시에 성능이 개선된 임펄스 터빈을 설계하는 목적으로 Halder *et al.*[2016]이 웰즈터빈에 적용한 뒤젓힘각을 임펄스터빈에 적용하였다. Halder *et al.*[2016]은 웰즈터빈에 뒤젓힘각을 적용하여 수치해석적인 방법으로 성능을 고찰하였으며 약 6%정도의 효율이 향상됨을 보인 바 있다. 기존에 고안된 터빈은 허브부분부터 끝단까지 스캔방향으로 동일한 단면형상을 갖는 기존 터빈의 형상과는 다르게 Fig. 1에 기술한 바와 같이 날개의 전단과 후단에 각각 뒤젓힘각 λ_m 과 λ_t 를 적용하여 그 성능을 수치해석적인 방법으로 고찰하였다.

2. TURBINE GEOMETRY

본 연구에 사용된 임펄스터빈은 직경이 0.8 m인 30 kW급 터빈이다. 규모추정은 선박해양플랜트연구소에서 구축한 용수시험과력 발전소에 설치된 임펄스터빈의 성능곡선을 이용하여 수행하였으며, 자세한 제원은 Fig. 2, 3과 Table 1에 나타내었다(Ministry of Oceans

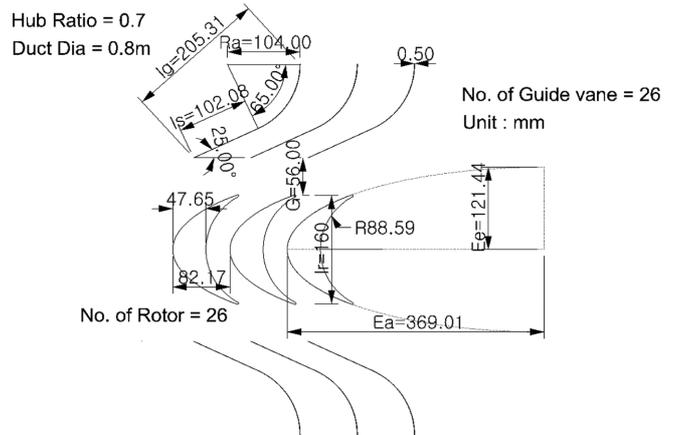


Fig. 2. Configuration of Impulse turbine.

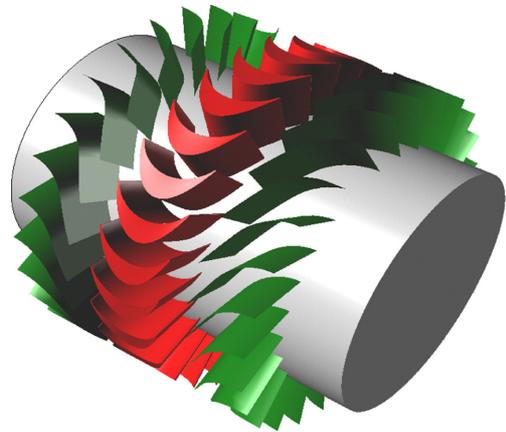


Fig. 3. 3-D CAD model of Impulse turbine.

Table 1. Specification of Impulse turbine selected

Designation	Symbol	Value
Diameter (mm)	D	800
Number of blades	z	26
Number of guide vane	z_g	26
Hub ratio		0.7
Tip clearance (mm)	T_c	1

and Fisheries [2016]).

뒤젓힘각을 적용하는 방법은 허브와 날개전단(Leading edge)이 만나는 지점에서 λ_m 각도만큼 전단선형을 변경하였고, 마찬가지로 후단(Trailing edge)에서 λ_t 만큼 각도를 적용하여 후단선형을 변경하여 날개 형상을 생성하였다. 또한, 뒤젓힘각도는 전단 방향을 음의 각도로, 후단 방향을 양의 각도로 정의하였다.

뒤젓힘각을 적용한 터빈의 형상에 대한 이해를 돕기 위해 뒤젓힘각 적용유무에 따른 형상을 비교하였고(Fig. 4), 선정된 터빈의 뒤젓힘각 변화에 따른 성능을 비교하기 위해 총 20가지 경우로 구분하였다(Table 2).

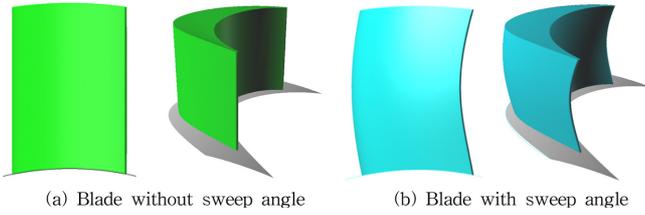


Fig. 4. Comparison of blade shapes between the blade without sweep angle and with sweep angle.

Table 2. All cases for sweep angle

Model	λ_m (deg.)	λ_t (deg.)
Reference	0	0
A01	-10	0
A02	-4	0
A03	+4	0
A04	+10	0
A05	0	-10
A06	0	-4
A07	0	+4
A08	0	+10
A09	-10	+10
A10	-20	0
A11	-5	+6
A12	-5	+10
A13	+4	+9
A14	+5	+10
A15	+10	+10
A16	-10	-10
A17	+2	+4
A18	+3	+4
A19	-10	-5
A20	-10	+5

3. PNEUMATIC PERFORMANCE EVALUATION

터빈의 성능을 도출하기 위한 식으로는 (1)~(3)에 기술한 바와 같이 정의된 입력계수(C_A), 토크계수(C_T), 효율(η)이 있다.

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

$$C_T = \frac{2T}{\rho_a(V_a^2 + U_R^2)bl_z r_R} \quad (2)$$

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

$$\phi = V_a / U_R \quad (4)$$

여기서 Δp , Q , T , ρ_a 는 각각 압력강하, 유량, 토크 및 공기밀도를 나타내며, V_a , U_R , b , l_z , r_R , w 는 각각 축방향 평균유속, $r=r_R$ 에서의 회전방향유속, 날개 스패 길이, 날개 코드길이, 날개수, 날개의 평균 반경(여기서는 $0.85 R$), 각속도를 의미한다. 또한, 식 (4)와 같이 정의되는 유동계수(ϕ)는 축방향 유입속도와 터빈 회전방향 속도의 비를

의미하는 것으로, 날개이론에서 받음각에 대응하는 물리량이다. 이 상에서 정의된 변수들은 터빈이 정상상태에서 작동된다는 가정을 포함하고 있다.

4. NUMERICAL METHOD AND VALIDATION

임펠스터빈의 성능해석은 유한체적법 기반의 CFD 상용 코드인 FLUENT를 이용하여 날개 1매, 가이드베인 한 쌍에 대해 3차원 정상상태로 계산을 수행하였다. 또한, 터빈의 회전을 위해 MRF (Moving Reference Frame)기법을 적용하였고, 난류모델은 Realizable $k-\epsilon$ 모델(Standard wall function)을 사용하였다.

전체 계산영역은 회전영역과 회전하지 않는 영역으로 구분하였고, 터빈 날개의 흡입면과 압력면은 정렬격자로, 나머지 영역은 비정렬 격자인 혼합격자계로 구성하였고, 전체 격자수는 총 300만개이다. 경계조건으로는 날개 회전효과를 적용시키기 위해 periodic조건을 부여하였고, 입구 및 출구조건으로 Velocity inlet 및 Pressure outlet을 각각 부여하였으며, 경계조건 및 터빈 날개의 격자분포를 Fig. 5에 나타내었다.

임펠스터빈의 성능해석기법 검증을 위해 Setoguchi *et al.*[2001]의 터빈을 대상으로 연구결과와 비교하였고, 축방향 유속(V_a)을 고정 한 상태에서 날개회전속도(U_R)를 변경하는 방법으로 수치계산을 진행하였으며, 계산조건은 Table 3에 나타내었다.

본 계산에 앞서 격자계의 검증을 위해 y^+ 를 5, 19, 37, 40으로 증가시키며 격자의존도를 고찰하였으며, Setoguchi *et al.*[2001]의 실험결과와 비교하였다. $y^+=5$ 인 경우를 제외하고는 모두 실험값과 잘 일치하는 것을 확인하였으며(Fig. 6), C_T 는 비교적 일치하는 반면 C_A 값이 일치하지 않는 결과를 보였다. 이는 사용한 난류모델이 낮은 y^+ 에서 날개에 작용하는 전단력을 정확히 예측하지 못하는 특성을 가지므로 터빈효율도 상이한 결과를 보인 것으로 사료된다. 또한, $y^+=37$ 에서 가장 실험값에 정량적, 정성적으로 일치하는 결과를 도

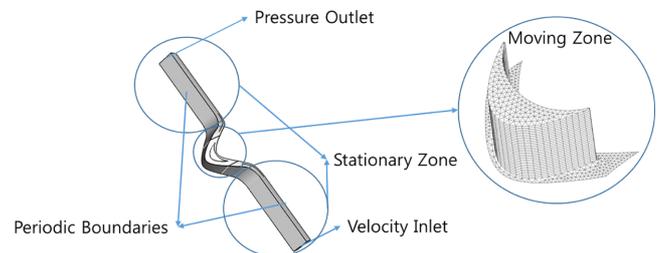


Fig. 5. Boundary conditions and grid on blade.

Table 3. Calculation conditions

ϕ	V_a	U_R
0.5	15	30
1.0	15	15
1.5	15	10
2.0	15	7.5
2.5	15	6

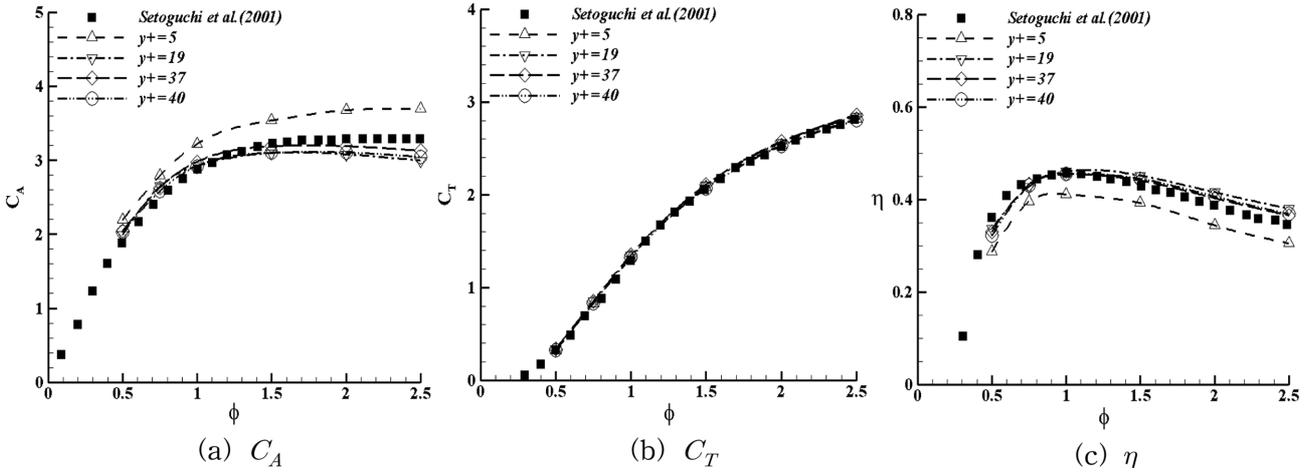


Fig. 6. Results of y^+ dependency test.

출하였는데, 이는 Liu *et al.*[2016]과 유사한 결과를 보였다.

5. RESULTS AND DISCUSSION

$\phi=1.0$ 일 때 뒤젓힘각을 적용하지 않은 기존 모델(RE model)의 날개 주위 압력 및 속도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 보여준 압력은 정압력과 동압력의 합으로 표현되는 전압력이다. 흡입면에서는 공기흐름의 입구방향에서 높은 압력분포를 보였고, 출구방향으로 갈수록 점차 낮은 압력을 보였다. 특히, 날개 끝부분에서 낮

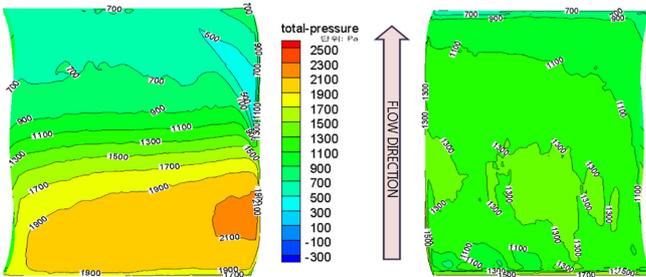


Fig. 7. Pressure contour of RE model on suction and pressure sides at $\phi=1.0$.

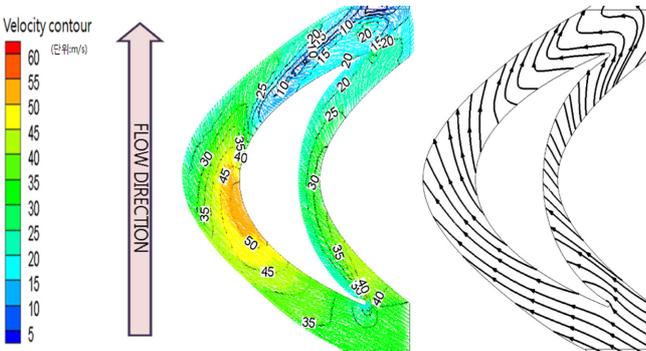


Fig. 8. Flow velocity contour and streamlines of RE model at blade tip section on $\phi=1.0$.

은 압력의 영역을 확인할 수 있었는데, 이는 Fig. 8에 나타난 속도 분포를 고려하여 볼 때, 흡입면에서 생기는 와류에 기인한 것임을 알 수 있었다. 즉, 뒤젓힘각을 적용하여 흡입면에 작용하는 압력을 줄일 수 있는 형태의 선형을 가진 터빈을 설계할 경우 터빈 성능을 개선시킬 수 있음을 예상할 수 있으므로 뒤젓힘각을 적용함에 따른 성능해석을 수행하였고, 이를 기존 터빈의 성능과 비교하였다.

뒤젓힘각을 적용하지 않은 터빈과 뒤젓힘각을 적용한 터빈(A11)의 날개에 작용하는 압력과 유선분포를 비교하였다(Fig. 9~12). 결

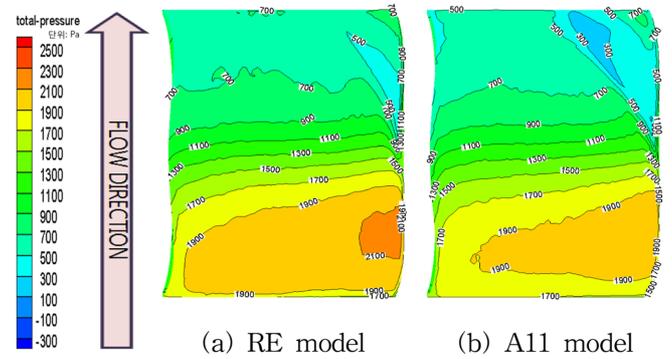


Fig. 9. Pressure contour on suction side under two kinds of blade models.

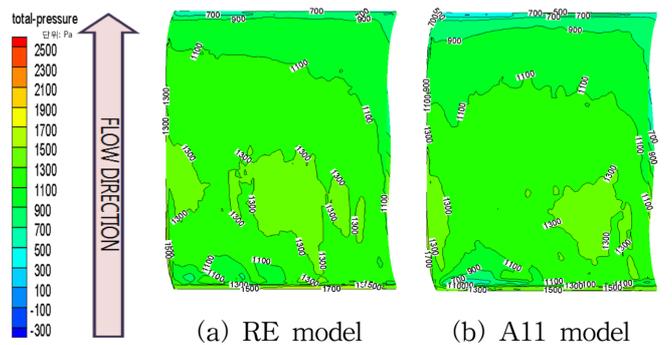


Fig. 10. Pressure contour on pressure side under two kinds of blade models.

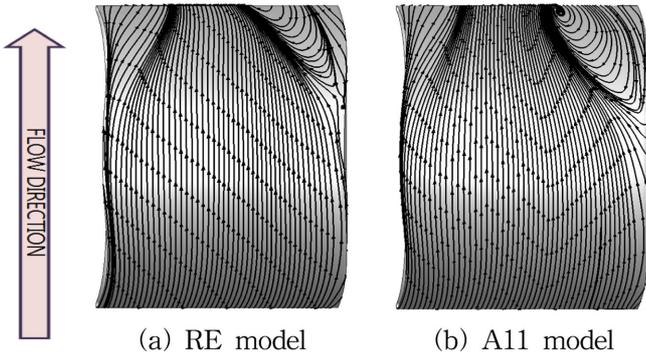


Fig. 11. Limiting streamlines on suction side for RE and A11 model.

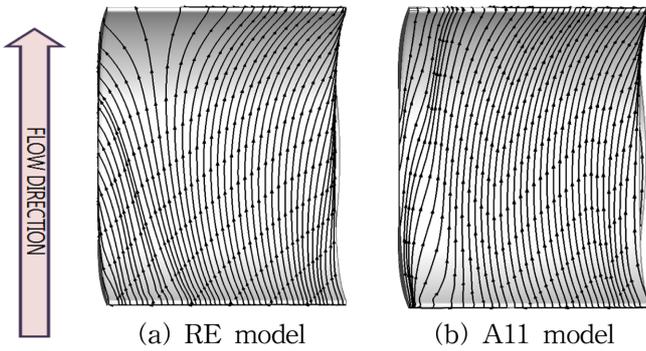


Fig. 12. Limiting streamlines on pressure side for RE and A11 model.

과로부터 압력면의 압력분포는 거의 유사하게 나타났고, 흡입면은 입구 근처 날개 끝 영역에서 확연한 차이를 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 기존 터빈은 공기흐름이 날개 끝단 간극을 통해 압력면에서 흡입면 방향으로 빠져나감에 따라 날개 끝단에서 상대적으로 높은 압력이 발생하는 반면, 뒤젓힘각을 적용한 터빈의 경우 흡입면의 압력이 다소 감소되었음을 확인 할 수 있다. 날개 표면에서의 속도분포와 유선분포를 통해서 확인할 수 있듯이, 흡입면의 유선형 형상 때문에 속도가 상대적으로 증가하였고, 압력은 감소하였다. 이러한 특성으로 인해 터빈의 토크가 증가하였고, 출구와 입구 사이의 압력강하가 감소하여 효율이 증가한 것으로 판단된다.

뒤젓힘각을 적용한 총 20가지 임펠스터빈에 대해 $\phi=1.0$ 에서의

Table 4. CFD results for all cases at $\phi=1.0$

Model	λ_m (deg.)	λ_t (deg.)	η	C_T	C_A
Reference	0	0	0.429	1.593	3.711
A01	-10	0	0.459	1.658	3.611
A02	-4	0	0.448	1.610	3.597
A03	10	0	0.444	1.596	3.591
A04	4	0	0.440	1.589	3.614
A05	0	-10	0.442	1.586	3.590
A06	0	-4	0.434	1.579	3.637
A07	0	4	0.452	1.625	3.594
A08	0	10	0.443	1.612	3.637
A09	-10	10	0.440	1.607	3.651
A10	-20	0	0.436	1.621	3.721
A11	-5	-6	0.462	1.642	3.555
A12	-5	10	0.448	1.621	3.615
A13	4	9	0.454	1.637	3.606
A14	5	10	0.455	1.639	3.601
A15	10	10	0.440	1.580	3.590
A16	-10	-10	0.455	1.624	3.565
A17	2	4	0.451	1.619	3.588
A18	3	4	0.450	1.618	3.599
A19	-10	-5	0.453	1.617	3.572
A20	-10	5	0.450	1.621	3.606

성능을 기존 터빈과 비교하기 위해 각각의 결과를 Table 4에 나열 하였다. A01~04는 λ_m , A05~08은 λ_t 의 변화에 따른 영향을 조사하기 위해 구분하였다. $\phi=1.0$ 인 조건에서는 뒤젓힘각을 적용할 경우 기존 터빈에 비해 성능이 다소 개선되는 것을 알 수 있었는데, λ_m 과 λ_t 를 각각 변화시킨 경우, λ_m 이 음의 각도로 갈수록, λ_t 는 양의 각도로 갈수록 성능이 더 개선됨을 확인하였다. 이상의 계산결과로부터 $\lambda_m=-5^\circ$, $\lambda_t=+6^\circ$ 인 경우가 최고의 효율을 보이고 있음을 확인하였고, 기존터빈 대비 약 7.7%의 성능이 향상됨을 확인하였다.

터빈의 전체 운용구간에서의 성능을 확인하기 위해 20개의 터빈 계산결과를 다양한 유동계수에 대해 도시하였다. 먼저 기존터빈과 A01, A02, A03, A04 모델의 성능을 비교하였다(Fig. 13). 결과에서 λ_m 이 음의 각도인 경우 $\phi=1.0$ 이후에서 기존 터빈에 비해 입력

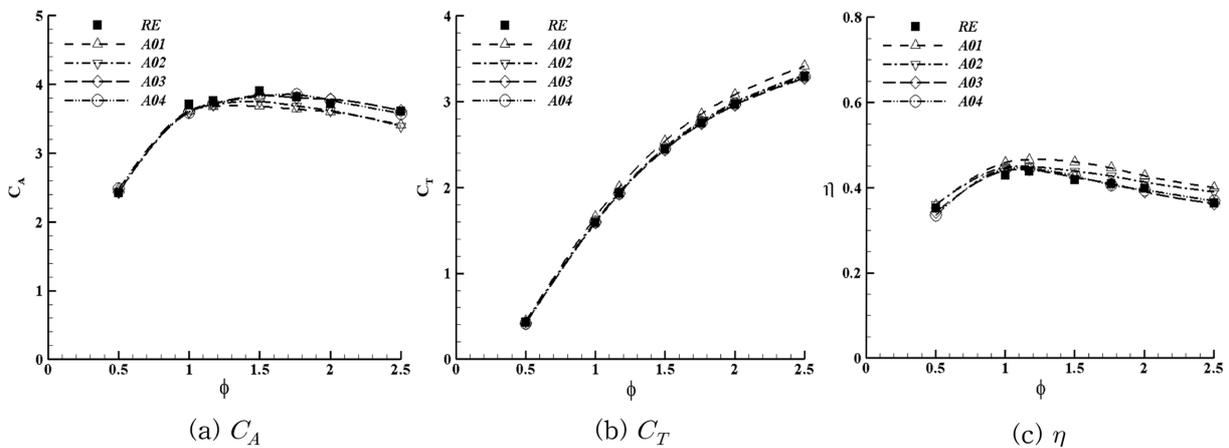


Fig. 13. Comparison of C_A , C_T , η between RE and A01~A04 models.

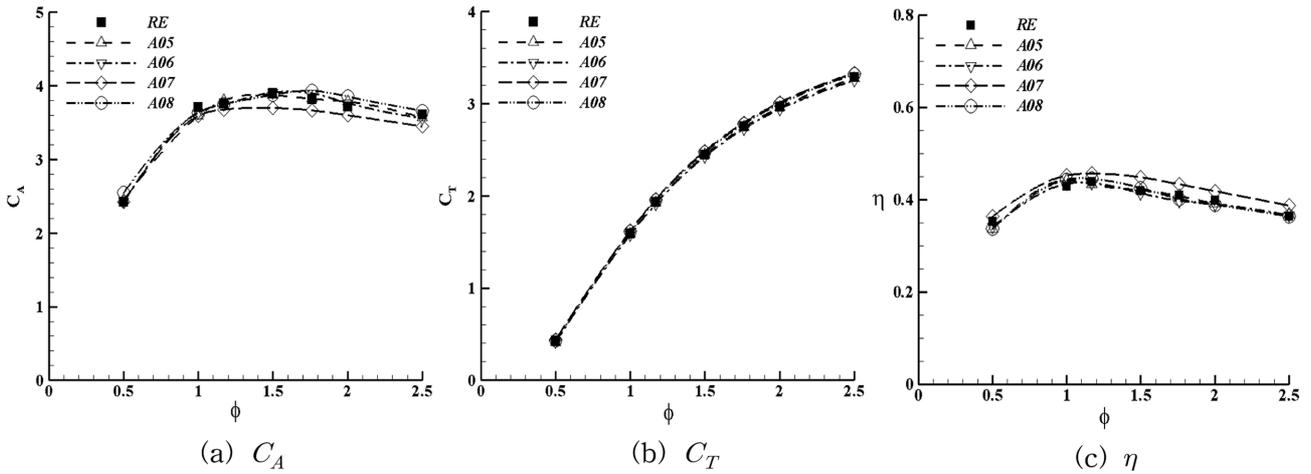


Fig. 14. Comparison of C_A , C_T , η between RE and A05~A08 models.

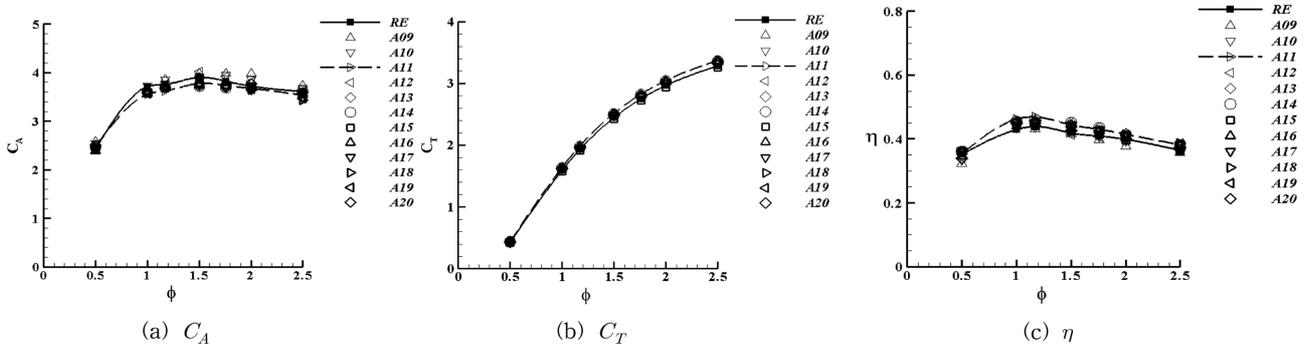


Fig. 15. Comparison of C_A , C_T , η between RE and A09~A20 models.

계수는 감소하고, 토크계수는 증가하였으며, 그에 따라 효율이 증가함을 확인하였다. A05, A06, A07, A08 모델은(Fig. 14) λ_r 가 양의 각도인 경우 앞선 결과와는 달리 기존 터빈에 비해 토크계수는 거의 유사하게 나타났고, 입력계수는 A07인 경우만 현저히 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이는 $\phi=1.0$ 이후 구간에서 λ_r 는 λ_m 과는 달리 각도의 지속적인 증가가 효율을 감소시키고 있음을 알 수 있다.

A09~A20은 λ_m 과 λ_r 를 동시에 적용한 경우이고, 결과를 Fig. 15에 나타내었다. 결과에서 12가지 터빈 모델의 경우 $\phi=1.0$ 이후 구간에서 토크계수 변화는 거의 없고, 입력계수는 A09와 A10이 다른 모델에 비해 다소 크게 나타남을 보였는데, 이는 앞서 얻은 A01~A04, A05~A08의 결과로부터 λ_m 과 λ_r 를 과도하게 적용하는 경우 터빈 날개의 면적이 증가하고, 이로 인해 입력계수를 증가시켜 효율이 감소하는 특성을 보이는 것으로 판단된다.

6. CONCLUSION

임펠스터빈의 날개에 표면에 작용하는 압력과 속도분포 검토를 통하여 흡입면에 작용하는 압력을 감소시켜 터빈의 효율을 향상시키고자 뒤젓힘각을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 뒤젓힘각 λ_m 및 λ_r 에 대한 영향을 검토하였는데, λ_r 를 0°에 고정시키고 λ_m 을 -10°,

-4°, 0°, +4°, +10°로 변경하여 성능변화를 살펴보았고 λ_m 을 0°에 고정시키고 λ_r 를 -10°, -4°, 0°, +4°, +10°로 변경하며 성능변화를 살펴 보았다. 즉, 뒤젓힘각 λ_m 이 전단방향으로 커지거나 λ_r 가 후단방향으로 커질때 흡입면에 작용하는 압력을 줄일 수 있었으며, 터빈에 작용하는 유체입자의 흐름이 날개형상을 따라 원활하게 흘러감을 알 수 있었다. 다양한 뒤젓힘각을 적용한 총20가지의 터빈을 분석한 결과 A11모델($\lambda_m=-5^\circ$, $\lambda_r=+6^\circ$)이 뒤젓힘각을 적용하지 않은 RE 모델 보다 약 8%의 효율이 향상되었으며, 웰즈터빈에 적용했을 경우보다 더 좋은 효과를 얻었다. 뒤젓힘각으로 인해 날개 흡입면의 유속을 상대적으로 증가시키므로 표면에 작용하는 압력을 감소시켰으며, 압력면은 날개끝단에서 발생하는 말림(Roll-up)현상을 완화시켜 터빈의 효율이 향상된 것으로 사료된다.

NOMENCLATURE

- b : Blade span length
- C_A : Input coefficient
- C_T : Torque coefficient
- E_a : Semi-major axis of ellipse
- E_e : Semi-minor axis of ellipse

D	: Diameter of turbine
G/l_r	: Gap/Chord ratio
G	: Gap between guide vane and rotor blade
l_g	: Chord length of guide vane
l_r	: Chord length of rotor blade
l_s	: Length of straight line of guide vane
Q	: Flow rate
r_R	: mean radius of blade
R	: Radius of turbine
R_a	: Radius of camber of guide vane on exhalation (inhalation) side
S_r	: Length between guide vanes
T_c	: Tip clearance
T	: Turbine torque
U_R	: Rotational velocity of turbine at r_R
V_a	: Mean axial flow velocity in sinusoidal flow
z	: Number of blade
z_g	: Number of guide vane
ΔP	: Pressure drop through turbine blade
η	: Turbine efficiency
ϕ	: Flow coefficient (V_a/U_R)
θ	: Angle of guide vane
λ	: Sweep angle
ρ_a	: Air density
ω	: Angular velocity of turbine rotor

후 기

본 논문은 해양수산부의 국가연구개발사업인 “방파제 연계형 파

력발전 융복합 기술개발”에 의해 수행되었습니다(PMS3600).

References

- [1] 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", Proceeding of 14th International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France.
- [2] Hyun, B.S. Moon, J.S. Hong, S.W. Kim, K.S., 2006, "A Study on the Performance of the Ring-type impulse Turbine for Wave Energy Conversion", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 20, No. 1, 20-25.
- [3] Halder, P. Rhee, S.H. Samad, A., 2016, "Numerical Optimization of Wells Turbine for Wave Energy Extraction", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol. 9, No. 1, 11-24
- [4] Liu, Z. Cui, Y. Kim, K.W. Shi, H.D., 2016, "Numerical study on a modified impulse turbine for OWC wave energy conversion", Ocean Engineering, Vol. 111, No. 1, 533-542.
- [5] Setoguchi, T. Santhakumar, S. Maeda, H. Takao, M. Kaneko, K., 2001, "A review of impulse turbines for wave energy conversion", Renewable Energy, Vol. 23, No. 2, 261-292.
- [6] Ministry of Oceans and Fisheries, 2016, "Development of OWC wave energy utilization system", Report of Korea Research Institute of Ships and Oceans Engineering.

Received 17 May 2017

Revised 16 August 2017

Accepted 19 August 2017