

# 파력발전용 임펄스터빈의 효율 향상을 위한 Staggered Blade의 적용에 대한 연구

문재승\* · †홍기용\* · 신승호\* · 현범수\*\* · 김길원\*\*\*

\* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, \*\*한국해양대학교 조선해양시스템공학부, \*\*\*한국해양대학교 해양시스템공학과

## Study of Application of Impulse Turbine with Staggered Blades to Improve the Performance for Wave Energy Conversion

Jae-Seung Moon\* · †Key-Yong Hong\* · Seung-Ho Shin\* · Beom-Soo Hyun\*\* · Gil-Won Kim\*\*\*

\*Maritime and Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon 305-343, Korea

\*\*Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*\*Division of Ocean Systems Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약 :** OWC형 파력발전장치는 해수면의 승강운동을 공기실 내의 공기 흐름으로 전환하고 이를 터빈의 구동력으로 사용하는 발전장치이다. 파랑에너지가, 터빈으로 유입되는 공기에너지로 전환하도록 하는 공기실의 내부 수위의 주기적 변동은 상하대칭이 이루어지지 않고, 공기실 내 공기 유동의 압축과 팽창 과정에서 유량차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 이를 이용하여 보다 많은 유량을 임펄스터빈의 압력면으로 유도하여 날개의 압력면과 흡입면의 압력차를 크게 하는 Staggered Blade의 적용에 대해 검토하고 그에 대한 성능 해석을 수행하였다. 터빈의 압력면으로의 공기 흐름을 제어하기 위해 Self-Pitched Blade(가변 피치 날개)를 제안하였고, 이러한 유량차를 토대로 동 조건에서 최대의 발전량과 최고 효율의 터빈을 설계하고자 하는데 그 목적이 있다.

**핵심용어 :** 파력발전, 진동수주형, 충동식 터빈, 비틀림 날개, 초기 비틀림 각도, 가변 피치 날개, 수치해석, 정상해석

**Abstract :** An OWC-type Wave Energy Conversion passes through 3 steps energy conversion process. This paper deal with the impulse turbine with staggered blade to improved performance by numerical analysis using commercial CFD code, FLUENT. Maximum value of axial airflow velocity during exhalation is higher than that during inhalation. This paper deal with special-type of Impulse Turbine so-called "Staggered Blade" for more efficiency to making air flow direct to on pressure side. Also, this paper has proposed special-type turbine with self-pitched blade more efficient.

**Key words :** Wave energy conversion, OWC (Oscillating Water Column), Impulse turbine, Staggered blade, Preset angle of blade, Self-pitched blade, Numerical analysis, Steady analysis

## 1. 서 론

과학기술의 발달과 화석에너지 고갈 등의 문제로 인하여 자연 청정에너지에 대한 관심은 갈수록 고조되고 있는데, 그 중 풍부한 해양자원을 기반으로한 파력발전은 매우 유망한 분야 중 하나로서 유럽, 일본 등 선진국과 함께 (McCormick, 1981; Nielsen and Kofoed, 1997; JAMSTEC, 2004) 국내에서도 이에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다 (홍, 2003; 홍, 2005). 파력발전은 파도의 운동 에너지를 우리가 필요로 하는 가용 에너지로 변환하는 방식에 따라 가동물체형과 진동수주형, 월파(월류)형 등으로 분류할 수 있는데 (홍 등, 1999), 파랑의 작용

에 따라 공기실 내의 수위가 변동하면서 이때 발생된 공기실 내의 왕복유동을 터빈의 구동력으로 하여 발전하는 진동수주(Oscillating Water Column, 이하 OWC) 형은 가장 널리 사용되는 방식 중의 하나이다. 이 방식은 크게 3단계 에너지 변환 과정을 거치는데 초기의 파랑에너지가 공기실에 의해 공기에너지로 1차 변환되고 그 후에 터빈 등의 2차 변환장치를 통해 이 공기류가 기계적 에너지로 변환된다. 본 연구는 2차 변환장치로 주로 사용되는 임펄스터빈을 대상으로 하였으며 그에 대한 성능 해석을 수행하였다.

1990년대 초반에는 OWC형 2차 변환장치로 웰즈터빈이 유망했으나, 진동과 소음 발생 등의 1차적인 문제와 파랑조건

\* 대표저자 : 문재승(정회원), jsmoon@moeri.re.kr 042)868-7586

† 교신저자 : 홍기용(종신회원), kyhong@moeri.re.kr 042)868-7511

\* 종신회원, shinsh@moeri.re.kr 042)868-7584

\*\* 종신회원, bshyun@hhu.ac.kr 051)410-4308

\*\*\* j97402@hotmail.com 051)410-4950

대비 좁은 작동범위, 좋지 못한 자기 기동 특성 (Self Starting Characteristics) 등으로 인해 최근에는 임펠스터빈이 널리 채택되고 있다 (Setoguchi et al., 2001).

임펠스터빈의 날개수 및 허브비에 대한 연구, 터빈으로 유량을 유도하는 역할을 하는 안내깃의 각도와 관련된 연구, 날개끝단과 덕트 사이의 날개끝 간극에 대한 연구 등 임펠스터빈의 효율 향상을 위한 연구가 그동안 많이 수행되어 왔다 (문 등, 2005; 홍, 2005; 홍, 2003; Hyun et al., 2004; Setoguchi et al., 2001; Thakker et al., 2003). 또한 보다 고효율의 터빈을 설계하고자 날개의 끝단에 판을 단 경우 등의 개선된 형태의 임펠스터빈이 고안되기도 하였다 (현 등, 2006; Hyun et al., 2005).

본 논문에서는 Setoguchi et al. (2002)에서 착안하여 공기실 내 공기흐름의 압축과 팽창시 필연적으로 발생하는 유량의 주기적 상하 비대칭성을 이용하여 보다 고효율의 임펠스터빈을 설계하고자 Staggered Blade가 적용된 새로운 터빈 형상을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 상용 Computational Fluid Dynamics (이하 CFD) 코드인 FLUENT를 활용하였으며, 수치해석적 기법으로 2차원 계산과 3차원 계산을 통한 성능 해석을 수행하였다.

## 2. Staggered Blade와 내부 유동

Staggered Blade란 Fig. 1에서 보는 바와 같이 날개의 스핀 방향을 축으로 하여 원하는 방향으로 각도가 조절된 날개를 의미하는데 이는 결국 공기 에너지를 터빈이 잘 흡수하도록 하기 위함이다. Fig. 1에서  $V_i$ 와  $V_e$ 는 각각 압축과 팽창과정에서의 평균유속을 의미하며,  $\gamma$ 는 Preset Angle, 즉 초기 비틀림 각도로 그림에서 보는 것과 같이 회전된 방향이 양의 값을 취하는 것으로 정의하였다.

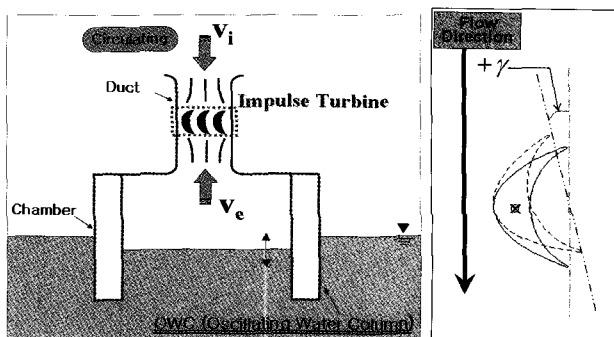


Fig. 1 Schematics of Staggered Blade System

공기실 내에서 형성된 압축 및 팽창의 주기적 왕복유동으로 인하여 터빈이 설치되는 덕트 내의 공기에너지 역시 왕복유동 형태를 띠게 된다. 터빈으로 유입되는 유량은 통상적으로 해수면에서 발생하는 수면을 기준으로한 파고의 상하 비대칭성과, 동일 유입조건 대비 효율 향상을 꾀하기 위한 OWC형 파

력발전장치 자체의 급축소된 형상에서 야기된 급변적 유동 매커니즘(Fig. 1) 등으로 인하여 공기실 내의 유량은 압축시의 유량이 팽창될 때보다 더 크게 발생되게 된다. 이로 인해 이러한 비대칭적인 유동 구조가 주기적으로 반복되어 왕복운동을 형성하게 된다 (Setoguchi et al., 2001). Fig. 2는 Santhakumar et al. 등이 1998년에 이 현상을 실험적으로 밝힌 내용인데 압축과정에서의 유량의 최대값이 팽창시보다 50%이상 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이를 활용하여 날개에 Preset Angle을 부여하여 보다 많은 토크를 발생시키고 이로 인한 압력 손실은 최소화하여 좋은 성능의 터빈을 설계하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

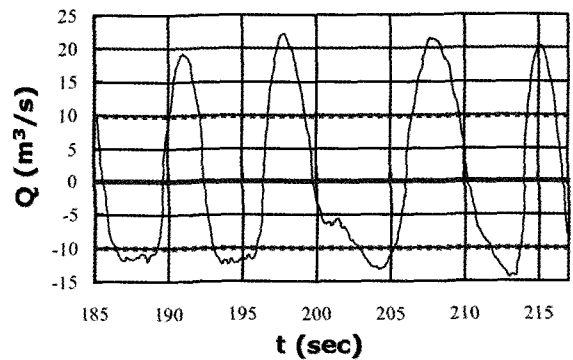


Fig. 2 Flow Rates at OWC Air Chamber

공기실 내의 유동 특성은 외해에서의 파도와 같은 주기를 가지고 왕복유동을 하게 되는데, 이때 발생하는 왕복공기류를 구동력으로 한 터빈은 빠른 회전수를 가지고 회전운동을 하게 된다(문 등, 2007). 파도의 주기와 터빈의 각속도 간의 큰 차이로 상호간섭은 매우 미비하게 되는데, 이에 기인하여 OWC형 파력발전장치의 터빈 주위 및 내부 유동은 준정상 혹은 정상 해석해도 무방하다(현 등, 1993). 그러므로 압축과 팽창시 각각의 덕트내 평균유속을 활용하여 정상해석으로 계산한 후 평균을 취해서 한 주기내의 결과값을 도출하여 터빈 토크, 압력 손실, 효율 등을 분석하기로 하였다.

## 3. 모형, 격자계, 계산조건 및 해석기법

Staggered Blade가 장착된 파력발전용 임펠스터빈의 성능 해석을 수행하기 위해서 홍석원 (2003)이 지난 수년간 최적형상 도출을 위해 연구해온 모형을 대상으로 해서 수치해석을 수행하였다. Fig. 3은 그에 대한 개략적인 형상을 보여주고 있는데, 터빈 직경이 0.3m, 코드길이가 0.054m, 날개의 스핀길이는 0.045m이며 허브비는 0.7이고 날개끝 간극은 0.0005m이다.

본 연구에서는 유동해석용으로 FLUENT 6.1.22를 사용하였고 격자생성은 FLUENT Package인 GAMBIT 2.1.6을 사용하였다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 격자의 예를 보여주고 있는데 임펠스터빈은 외력 성분 중 점성력 대비 압력력이 주를 이루는 충동식 터빈으로써 격자 민감도가 상대적으로 적다. 따

라서 임펠스터빈과 같은 복잡한 회전체 형상에 대한 격자 생성과정에서의 효율성을 높이기 위해 전체적으로 비정렬격자를 주로 사용하였다. 다만, 날개 표면과 Vortex Roll-up이 발생하는 Tip 부근과 같이 유동의 심한 변화가 예상되는 부분에서는 정렬격자를 사용하는 등 하이브리드 격자계를 사용함으로써 Grid Quality를 높혀 수치해석상의 정확도와 수렴성을 향상시키고자 하였다. 또한 계산의 효율성을 위해 가이드베인 개수를 날개수와 같은 30개로 보고 주기조건(Periodic Condition)을 사용하여 1/30만 계산을 수행하였으며, 이는 지난 현 & 문 (2004)의 사전연구를 통해 검증한바 있다. 난류모델은  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며, 경계조건 등의 자세한 내용은 문 등 (2005)과 같다.

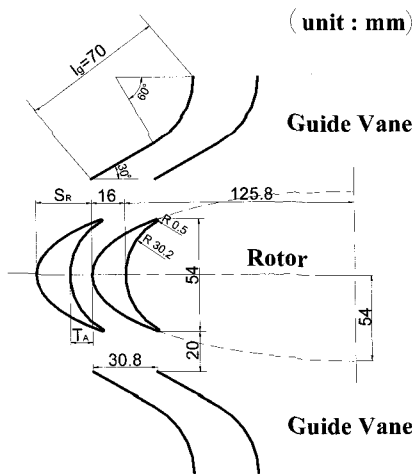


Fig. 3 Impulse Turbine Geometry in 2-D Sense

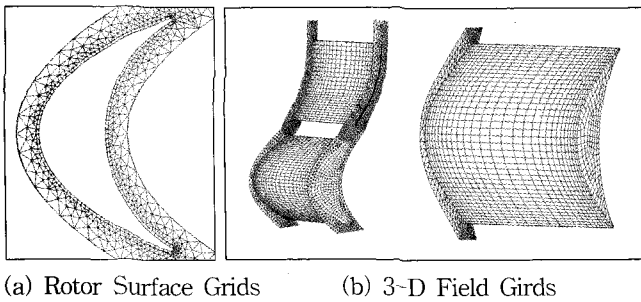


Fig. 4 Grid Generations

2차원 계산의 경우 Blade의 회전운동을 날개의 접선방향 직진운동이라 보고 계산을 수행하였고 3차원에서는 FLUENT의 MRF(Moving Reference Frames) 기법을 사용하여 회전운동을 구현하였다. 격자의존도 점검을 위하여 격자수 민감도 조사를 실시하였는데, 2차원의 경우 1,000~10,000의 격자를 사용하여 검토해본 결과, 3,600개 이상이면 충분히 수렴된 해를 얻는 것을 확인할 수 있었다. 3차원의 경우 약 200,000여개의 격자가 사용되었다(문 등, 2006).

덕트내 평균 축방향 유속이  $v_a$ 인 유동장에서 작동하는 임

펠스 터빈의 성능을 입력계수(Input coefficient)  $C_A$ 와 토크 계수(Torque coefficient)  $C_T$ 로 표현하면 다음과 같다.

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

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

여기서  $\Delta p$ ,  $Q$ ,  $T$ 는 압력강하, 유량, 토크를 나타내며,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도이다.  $v_a$ ,  $U_R$ ,  $b$ ,  $l_r$ ,  $z$ ,  $r_m$ 는 각각 축방향 평균유속,  $r = r_m$ 에서의 회전방향유속, 날개의 스패น, 날개의 코드 길이, 날개수, 날개의 평균반경 (여기서는  $0.85R$ ) 이다.

터빈의 효율  $\eta$ 는 다음 식으로 정의된다.

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

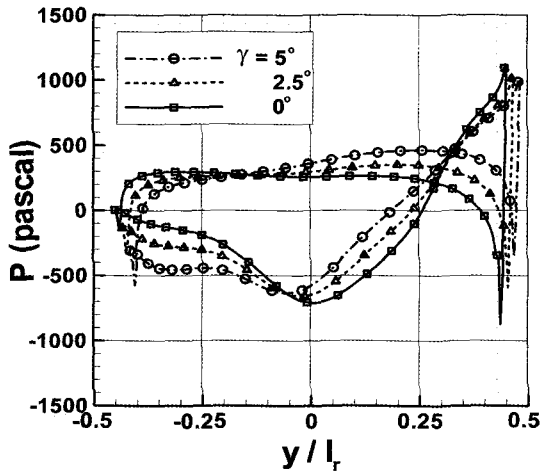
여기서  $\phi$ 는 유동계수 (Flow coefficient,  $\phi = v_a / U_R$ )로서 날개이론의 받음각 (Angle of Attack)에 대응하는 물리량이다.

## 4. 계산 결과

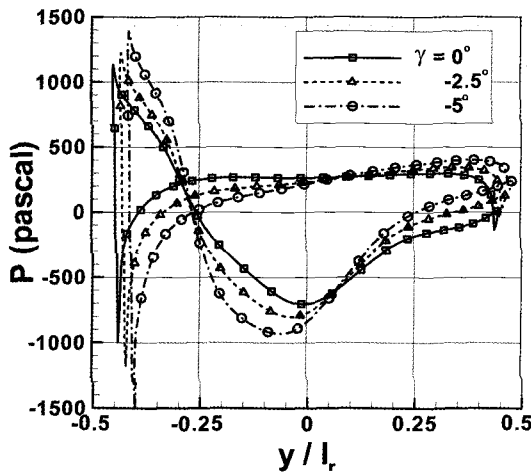
### 4.1 Preset Angle별 Staggered Blade의 성능 해석

Staggered Blade의 임펠스터빈에 대한 적용 가능성과 각도별 성능 해석을 위해서 Preset Angle  $\gamma$ 가  $-5^\circ$ ,  $-2.5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $2.5^\circ$ ,  $5^\circ$ 인 경우에 대해 2차원 및 3차원 정상해석을 수행하였다. 압축과 팽창시 동일한 유량이 발생한다고 가정하고( $V_i/V_e=1.0$ 인 경우에 해당됨.) 평균유속을 터빈의 유입유속으로 사용하여 계산하였다.

각도별 날개면의 압력분포 비교를 통해서 Staggered Blade의 성능 해석을 수행하였는데, Fig. 5는 날개 표면의 압력분포를 나타낸 그림이다. 예상한 것처럼  $\gamma$ 가 양의 각도를 가질수록 압력면과 흡입면의 압력차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.  $\gamma$ 가 양으로 큰 각도를 가질수록 터빈 토크의 향상을 가져왔고, 날개가 공기 흐름에 부합하는 Preset Angle을 가짐으로 해서 정체점(Stagnation Point)이 압력면쪽으로 다소 옮겨가게 되어 흡입면의 압력이 압력면의 압력보다 높은 구간이 줄어들면서 터빈 토크를 발생시키는데 부로 발생하던 압력분포가 정으로 완화된 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 공기의 흐름을 압력면쪽으로 잘 유도되었기 때문으로 생각되며, 이로 인해 흡입면과 압력면의 압력차를 더 크게 유발해서 터빈 토크가 커지는 효과를 가지고 온 것으로 판단된다.



(a) '+' degrees



(b) '-' degrees

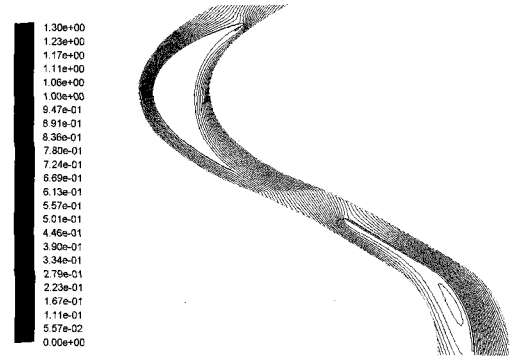
Fig. 5 Pressure Distributions on Blade Surface ( $V_i/V_e=1.0$ )

이와 같은 결과는 Fig. 6에 나타난 유선에서도 확인할 수 있다.  $\gamma$ 가 양의 각도를 가질수록 상부에서 하부로의 흐름이 아주 매끈하게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 반면 음의 각도인 경우에는 날개의 리딩엣지 부근에서 박리가 발생하는 등 압력면 쪽으로의 흐름이 잘 형성되지 않는 것을 볼 수 있으며 출구쪽 가이드베인 왼쪽에서도 박리 등의 흐름 저해요소로 인해 Staggered Blade가 과력발전장치의 압력손실의 한 원인이 됨을 확인할 수 있다.

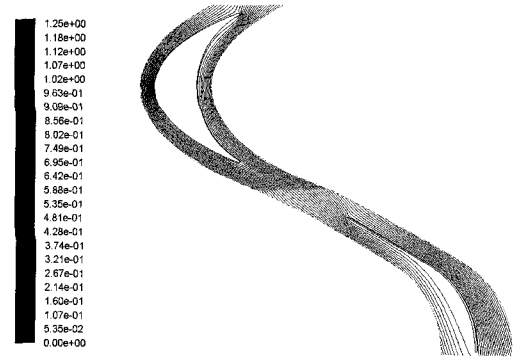
이와 같은 근거들로 인해  $\gamma$ 가 양의 값을 가질수록 임펠스터빈이 좋은 성능을 보여줄 것을 예상할 수 있다. Fig. 7은  $\gamma$  영향을 고려하여 Staggered Blade의 효과를 보다 잘 파악하기 위해서  $V_i/V_e$ 가 1인 경우, 즉 공기실내의 압축과 팽창시에 발생하는 유량이 같다고 가정하여 정상해석한 결과이다.

흡입면과 압력면의 압력 차이를 날개의 운동 방향으로 적분하면 터빈의 토크를 얻을 수 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 날개가 양의 각도를 가질수록 정체점이 흡입면에서 압력면 쪽으로 이동하게 되고, 또한 이때 날개 리딩엣지에서 박리가 생기지 않는 등 압력손실이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 흡입면과 압력면의 압력차가 커지게 되어 터빈 토크를

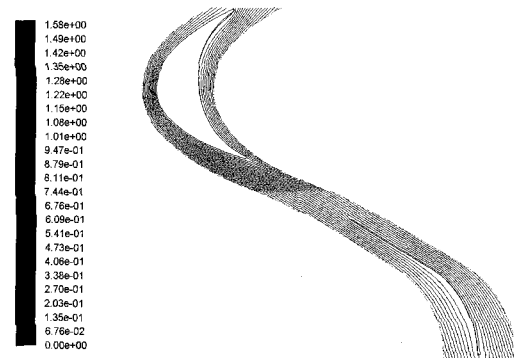
주요변수로 하는  $C_T$ 가  $\gamma$ 이 양의 값에 비례하는 경향을 확인하였다.



(a)  $\gamma=-5^\circ$



(b)  $\gamma=0^\circ$



(c)  $\gamma=5^\circ$

Fig. 6 Streamlines at Several Preset Angles of Blade

( $V_i/V_e=1.0$ )

터빈 블레이드가 각도를 가진 상태에서 동일 유량이 터빈을 지나갈 때 압력 손실이 어떠한지가 임펠스터빈의 효율을 높이기 위한 또 하나의 중요 설계점이다. 토크 측면에서 좋은 성능을 보이는  $\gamma$ 가 2.5°, 5°의 경우에서 Fig. 5의 (a), (d)에서 보는 것처럼 각도가 생김으로 인한 압력손실 등이 없는 것을 확인할 수 있었고, -2.5°, -5°의 경우는 터빈 토크가 작을 뿐만 아니라 압력손실도 크게 야기하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 5의 터빈의 압력분포와 Fig. 6의 유선 분포를 통해서 확인한 것과 동일한 결과로,  $\gamma$ 가 양인 경우에서 좋은 성능을 보

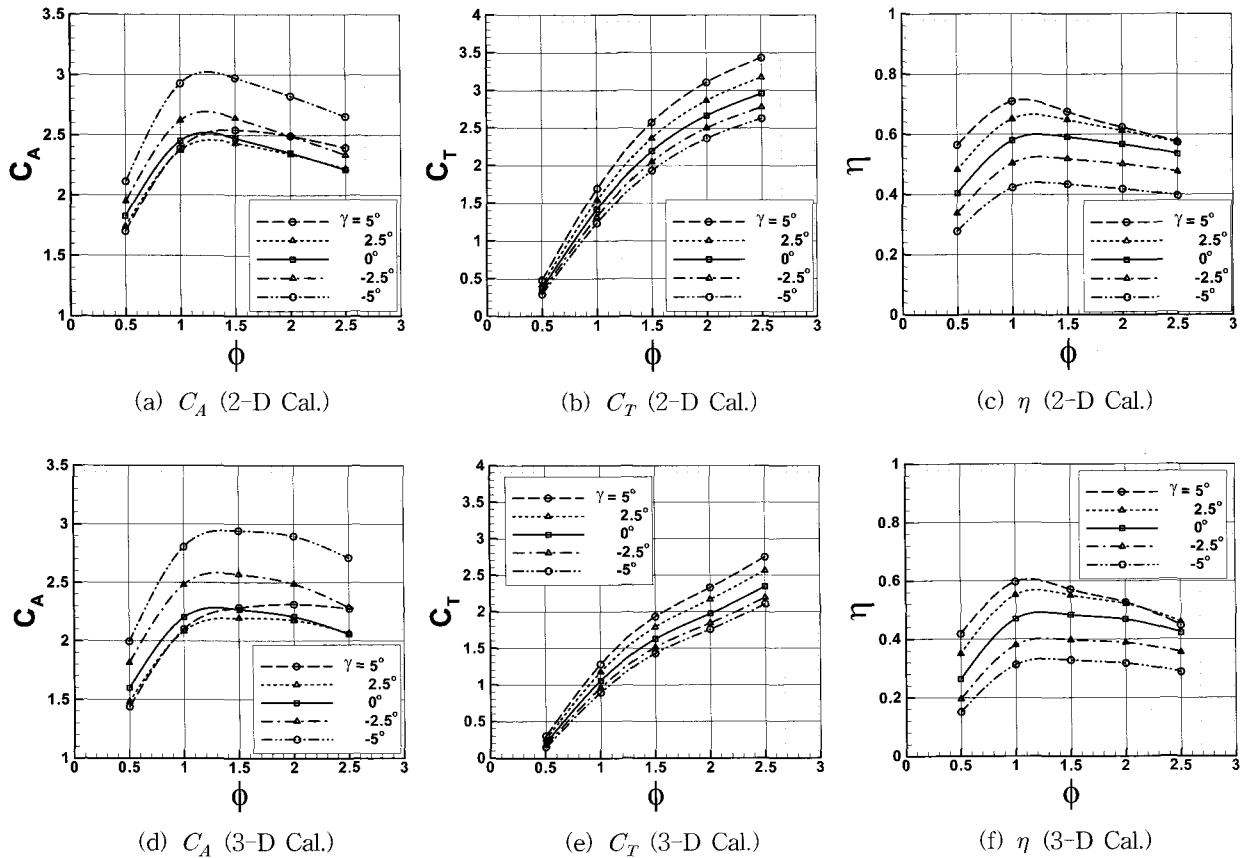


Fig. 7 Comparison of Effect of Preset Angles of Blade ( $V_i/V_e=1.0$ )

였다.

2차원 계산도 3차원 계산과 일치하는 경향을 보여주어 터빈 설계시 정성적으로 광범위하게 적용될 수 있으리라 판단된다.

#### 4.2 $V_i/V_e$ 별 Staggered Blade의 성능 해석

2절에서 언급한 바와 같이 실제 공기실 내 유동은 압축과 팽창시 유량이 서로 다르게 발생하여 압축시의 유량이 팽창시 보다 큰 비대칭적인 왕복유동장을 형성한다(Setoguchi et al., 2003). 앞절에서는 Staggered Blade만의 영향을 고려하여 보다 효과적인  $\eta$ 의 성능 해석을 위해  $V_i/V_e$ 가 1인 경우, 즉 압축과 팽창시 필연적으로 발생하는 비대칭성을 무시하여 각각의 날개 비틀림 각도별 성능 해석을 수행하였다. 또한 실제 파력발전장치 내부유동은 왕복류 형태를 띄게 되지만, 단일류에 대한 계산을 수행하였다. 본 절에서는 이러한 실제적인 현상들을 다 고려하여  $V_i/V_e$ 의 변화를 통한 공기실 내부 유동의 비대칭성에 대한 Staggered Blade의 성능해석을 수행하였다. 왕복유동의 형태를 띄는 OWC형 파력발전장치의 특성상 Staggered Blade가 각도를 가질 경우 Fig. 8에서 보는 바와 같이 압축과 팽창시 크기는 같지만 서로 다른 방향의 각도를 취하게 된다. 이는 유리한 성능을 보이는 양의 각도와 그렇지 못한 음의 각도의 공존을 의미하는 것인데, 이를 고려한 성능 해석을 위해 압축과 팽창의 1사이클내의 결과값들을 합산한

후 평균취하는 방식으로 성능 해석을 수행하였다.

공기실로 유입되는 유량의 크기는 공기실의 단면적 등 공기실의 용량과 관계되어 결정되는 값들이지만 공기실 내 유동의 압축과 팽창시의 유량 곡선은 공기실의 형상과 관련이 깊으므로 압축과 팽창 과정의 유량 산정시 공기실 내의 유동에 대한 보다 세밀한 연구가 필요하리라 판단된다. 또한 터빈으로 유입되는 유량을 압축과 팽창시 각각의 평균유량을 취하였는데, 보다 실제적인 결과를 도출하기 위해서 이후 행해질 공기실 유동특성에 대한 연구를 토대로 하여 보다 현실적인 유입조건을 활용한 보완된 연구를 수행할 예정이다.

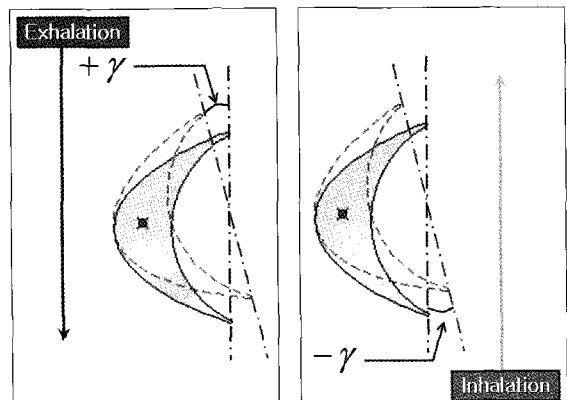
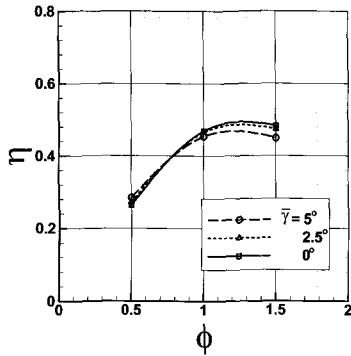
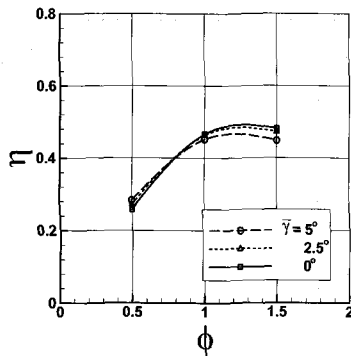


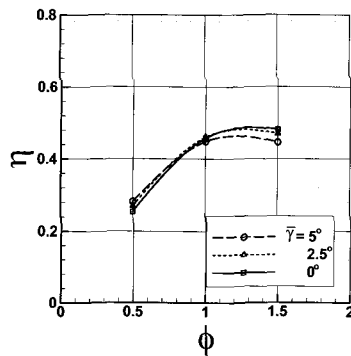
Fig. 8 Preset angle in Oscillating Flow



(a)  $V_i/V_e = 1.0$



(b)  $V_i/V_e = 0.8$



(c)  $V_i/V_e = 0.6$

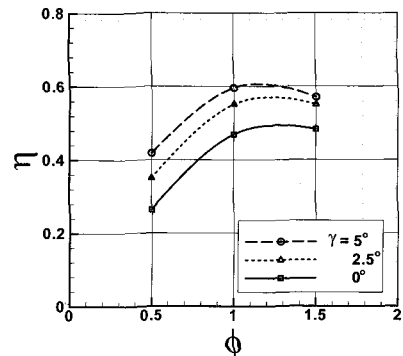
Fig. 9 Effect of Preset Angle under Oscillating Flow Condition

#### 4.3 가변 피치 날개를 적용한 Staggered Blade의 성능 해석

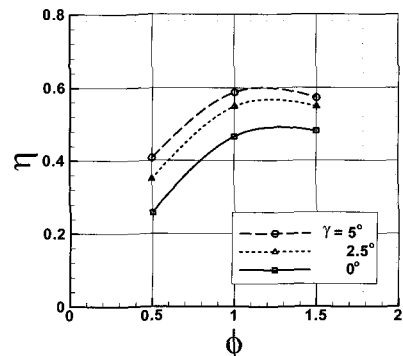
Preset Angle이 양의 각도를 가질 때 날개의 성능이 좋아지는 결과를 보여주었는데, 왕복유동의 특성상 압축과정에서 효율이 좋은 양의 각도로 고정된 날개를 설계하더라도 필연적으로 팽창시에는 같은 크기의 음의 각도가 되어서 고정 피치 날개를 사용하면 Staggered Blade의 잇점을 다 구현하지 못하게 된다. 그래서 본 절에는 터빈의 날개 피치가 흐름 방향으로 제어 가능하도록 하여 압축과 팽창시  $\gamma$ 가 모두 양의 각도를 가지는 가변 피치날개 (Self-Pitched Blade)를 임펠스터빈에 적용하여 보았다. Fig. 10은 가변 피치 날개가 적용된 임펠스터빈의 성능을 보여주고 있는데,  $V_i/V_e=0.6, 0.8, 1.0$ 의 세 경우에 대한 효율을 비교하여 보았다. 그 결과  $\gamma$ 의 각도가 커질수록 성능향상이 두드러졌는데  $5^\circ$ 인 경우에서 효율이 약 10% 이상 향상된 성능을 얻을 수 있었다. Fig. 10에서도  $V_i/V_e$ 에 관계없

이 각도별로 각각의 값들이 유사한 패턴을 보임을 확인할 수 있는데 이는 임펠스터빈 성능이  $\phi$ 가 아주 작은 경우를 제외하고는  $R_e$ 수에 크게 영향을 받지 않기 때문이다(문, 2006a).

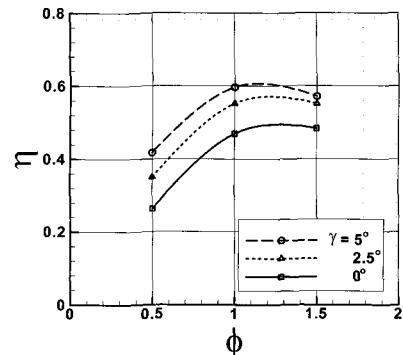
비슷한 예로 효율 향상을 위해 해외에서 가변 피치 안내깃 (Self-Pitched Guide Vane)을 사용하여 실험역 설치 후 성능 점검을 한 사례가 있는데, 이때 유지 보수 등의 문제가 발생하였다(H. Maeda et al., 1999). 다만 날개의 경우 안내깃보다는 구조적으로 안정적이기 때문에 고장 등의 문제에서는 유리한 부분이 있지만 이 부분을 고려하여 세심한 시공이 필수적으로 동반되어야 한다고 생각된다. 추후 터빈으로의 유입유속별로 최적 각도를 산출하고 유속별로 최고 효율을 위한 최적의 상태를 찾아가는 가변 피치 날개에 대한 연구가 이루어진다면 보다 고효율의 임펠스터빈 설계가 가능하리라 판단된다.



(a)  $V_i/V_e = 1.0$



(b)  $V_i/V_e = 0.8$



(c)  $V_i/V_e = 0.6$

Fig. 10 Impulse Turbine Performance with Self-Pitched Blade

## 4. 결 론

파력발전용 임펄스터빈의 효율 향상을 위해서 특수한 형태인 Staggered Blade를 제안하였다. 공기실 내의 유동이 압축과 팽창시 비대칭적인 유동 구조를 가지는 것에서 착안하여 압력면으로 보다 많은 유량을 유도하고자 하는 것이 기본 개념이다. 이에 대한 점검과 성능 해석을 위해서 Preset Angle 별로 수치해석적 기법을 활용하여 연구하였다. 비정상해석이 일반적인 접근방법이지만, 본 연구 대상에 대한 사전연구 결과 준정상 혹은 정상해석으로의 접근이 가능하였기에 정상해석 방법을 취하였다.

(1) Preset Angle별로 경향분석과 임펄스터빈의 Staggered Blade의 적용 가능성 파악을 위해서  $\gamma$ 가  $-5^\circ$ ,  $-2.5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $2.5^\circ$ ,  $5^\circ$ 인 각 경우에 대해 2차원 및 3차원 정상해석을 수행하였다. 그 결과 양의 각도에서 효율이 향상되었으며 반대로 음의 각도일때는 공기의 흐름에 오히려 장애요소가 되어 효율이 나빠지는 결과를 얻었다.

(2) 실제 공기실 유동은 왕복유동장이므로 반드시 압축과 팽창의 과정을 반복적으로 거치게 된다. 고정된 각도를 가진 Staggered Blade를 사용할 경우 압축일 때 Preset Angle이 양이었다면 팽창시에는 같은 크기의 음의 각도가 되므로 이 과정을 포괄하는 왕복유동 중의 연구를 수행하였는데, 그 결과 양의 각도에서 발생한 효율 향상분이 음의 각도에서 손실되어 거의 상쇄되는 결과를 주었다.

(3) 왕복유동에서 압축과 팽창 두 방향 공히 양의 각도를 가질 수 있도록 착안한 것이 임펄스터빈에 가변 피치 날개(Self-Pitched Blade)를 적용하는 것이다. 그래서 왕복유동시 압축과 팽창의 양 방향 모두 효율 향상을 꾀하고자 하였는데 그 결과 효율이 약 10% 이상 향상되는 결과를 얻었다. 다만 구조적 결함의 문제를 야기할 수가 있는데 이에 대한 시공상의 대책이 필요하리라 판단된다.

(4) OWC형 파력발전장치에서 유량의 절대량은 공기실의 단면적 등 공기실의 용량에 의해서 정해지지만 특정한 유량하에 왕복유동 중 압축과 팽창에서의 유량곡선 패턴은 공기실과 덕트 연결부 형상 등 공기실 형상에 의해서 정해지게 된다. 따라서 고효율의 파력발전장치 설계를 위해서는 공기실 내부 유동의 면밀한 분석 등 보다 세밀한 연구가 선행되어야 되며 보다 고효율의 터빈 설계를 위해서는 이를 활용하여 터빈 설계시 공기실 형상 등 공기실과의 상관관계를 고려한 맞춤형 날개 설계의 기법 도입이 필요하리라 판단된다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 “파력발전 실용화 기술개발”과 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 수행하는 기본연구사업(PE0117A)의 일부로서 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 문재승 (2006a), “수치해석을 이용한 파력발전용 임펄스 터빈 주위 유동 해석 및 성능 연구”, 한국해양대학교 대학원 석사학위논문, p. 83.
- [2] 문재승, 현범수, 홍기용, 홍석원 (2005), “OWC형 파력발전장치의 공기실 및 덕트 내부유동해석”, 한국해양공학회 2005년 추계학술대회 논문집, pp. 219-224.
- [3] 문재승, 홍기용, 신승호, 현범수, 류황진, 박순중 (2006b), “OWC형 파력발전장치 공기실 형상에 따른 왕복유동장 해석”, 한국해양학회지 제31권, 제1호, pp. 29-34.
- [3] 현범수, 문재승, 홍석원, 김기섭 (2006), “파력발전용 링타입 임펄스터빈의 성능 해석”. 한국해양공학회지 제20권, 제1호, pp. 20-25.
- [4] 현범수, 문재승 (2004), “수치해석을 이용한 파력발전용 임펄스 터빈의 성능해석”. 한국해양공학회지 제18권, 제5호, pp. 1-6.[5] 홍기용 (2005), “파력에너지 실용화 기술개발”, 한국해양연구원 보고서, p. 545.
- [5] 홍석원 (2003), “한·인도 해양에너지 공동연구사업”, 한국해양연구원 보고서, p. 308.
- [6] 홍석원, 김현주, 강윤구 역 (1999), “해양에너지공학”, 신기술, p. 231.
- [7] 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 Conf., Toulon, France, Vol. 1, pp. 253-259.
- [8] 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 Conf., Seoul, Korea, Vol. 1, pp. 507-512.
- [9] JAMSTEC. (2004), “Research and Development of Technology on Wave energy Utilization - Development on Offshore Floating Type Wave Power Device “Mighty Whale””, JAMSTEC.
- [10] Maeda, H., Santhakumar, S., Setoguchi, T., Takao, M., Kinoue, Y. and Kaneko, K. (1999). “Performance of an Impulse turbine with Fixed Guide Vane for Wave Energy Conversion”, Renewable Energy 17, Pergamon, pp. 533-547.
- [11] McCormick, M. C. (1981), “Ocean Wave Energy Conversion”, Wiley-Interscience Publication, p. 233.
- [12] Nielsen, A. and Kofoed, J. P. (1997), “The Wave Dragon - evaluation of a wave energy converter”, M. Sc. graduate report in Civil Engineering, Aalborg Univ., Denmark, pp. 97.
- [13] Setoguchi, T., Santhakumar, S., Maeda, H., Takao, M. and Kaneko, K. (2001), “A Review of Impulse Turbines

- for Wave Energy Conversion", *Renewable Energy* 23, Pergamon, pp. 261-292.
- [14] Setoguchi, T., Kim, T. H., Kenji Kaneko, Manabu Takao, Lee, Y. W. and Masashiro Inoue (2003), "Air Turbine with Staggered Blades for Wave Power Conversion", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 316-320.
- [15] Thakker, A., Khaleeq, H. B., Takao, M. and Setoguchi T. (2003), "Impulse Turbine for Wave Power Conversion: Effect of Raynolds Number and Hub-to-Tip Ratio on the Performance", *Proc. 13th ISOPE Conf., Honolulu, Hawaii*, Vol. 1, pp. 368-373.

---

원고접수일 : 2007년 4월 9일

원고채택일 : 2007년 11월 9일