

## 조류발전용 수직축 터빈의 유체동력학적 3차원 효과에 관한 연구

현범수<sup>†</sup> · 이정기

한국해양대학교 조선해양시스템공학부

# Hydrodynamic Aspects on Three-dimensional Effects of Vertical-axis Tidal Stream Turbine

B. S. Hyun<sup>†</sup> and J. K. Lee

Div. of Naval Architecture & Ocean Systems Eng., Korea Maritime Univ., Busan 606-792, Korea

### 요 약

조류발전용 수직축터빈(VAT)의 3차원적인 유체동력학적 성능을 효과적으로 예측할 수 있는 연구를 진행하였다. 수치 해석은 2차원과 3차원으로 수행하였으며 이를 통해 물리적 유동현상의 차이를 파악하였다. 3차원 효과는 주로 날개 끝단에서 발생하는 날개끝 보오텍스가 주된 원인으로, 이로 인해 터빈 날개가 내어주는 양력이 손실되고 회전하는 터빈은 토크가 감소하였다. 이러한 현상은 본 연구에서 채택한 통상적인 수직축 터빈의 스캔-직경비 범위에서 상당한 수준으로 나타남을 확인하였다. 본 연구에서는 대상 터빈을 선정하고 2차원으로 성능해석 후 3차원 효과를 보정하는 비교적 간단하고 효과적인 방법을 제안하였다.

**Abstract** – Hydrodynamic aspects on three-dimensional effects were investigated in this study for simple and convenient conversion of tidal stream energy using a Vertical-Axis Turbine (VAT). Numerical approach was made to reveal the differences of flow physics between 2-D estimation and rigorous 3-D simulation. It was shown that the 3-D effects were dominant mainly due to the variation of tip vortices around the tip region of rotor blade, causing the loss of lift for steadily translating hydrofoil and the reduction of torque for rotating turbine blade. The 3-D effect was found to be rather prominent for the typical VATs considered in this paper. Simple and yet efficient 2-D approach with the correction of its three-dimensionality was also proposed for practical design and analysis of VAT.

**Keywords:** Three-dimensional effects(3차원 효과), Vertical-axis turbine(수직축 터빈), Tip flow(날개끝 유동), Fixed hydrofoil(고정 수중익), Rotating Blade(회전 날개)

### 1. 서 론

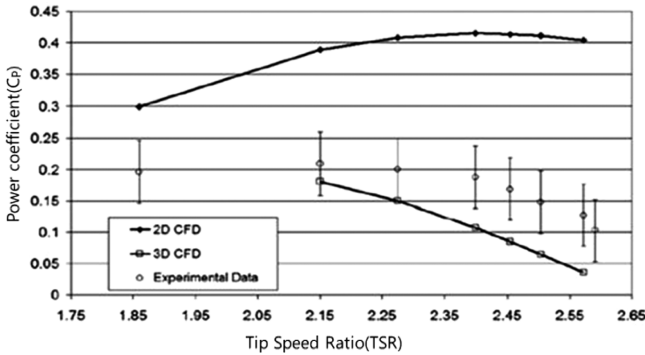
최근 들어 다양한 전산유체역학 기법을 이용한 조류발전용 수직축 터빈에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 수평축 터빈과는 달리 다리우스형 수직축 터빈은 형상이 단순하여 회전하는 터빈의 2차원 수치계산으로도 개략적인 성능을 파악할 수 있지만, 그 결과를 풍동실험이나 3차원 수치계산 결과와 비교할 때 잘 일치하지 않는 경우가 자주 발생하고 있다. 이는 터빈의 회전속도에 따라 날개의 중앙부와 끝단에서 다양한 유동 패턴이 발생함에 기인한 것으로서, 수직축 터빈의 3차원 효과라고 통칭한다.

수직축 터빈의 3차원 효과에 대한 선행연구가 Table 1과 같이 여러 연구자에 의하여 시도되었다. 먼저 Ye *et al.*[2010]은 터빈의 후류와 회전거동 시뮬레이션에 적합한 Vortex 모델을 개선시킨 DVM-UBC Vortex 모델을 이용하여 3차원 비정상해석을 수행하였는데, 난류가 반영되지 않은 해석으로서 3차원 효과가 크게 얻어지지 않았다. Castelli *et al.*[2011]은 풍동실험과 RANS 모델, 공기역학 모델을 적용하여 터빈의 성능을 파악하였는데 2차원 RANS 모델의 경우 실험결과보다 2배 가량 크게 예측되었지만 그 원인에 대해 명확하게 언급하지 않았다. Howell *et al.*[2010]도 풍동실험과 RANS 모델을 적용한 수치계산을 수행하였는데, TSR에 따라 계산 및 실험 결과에 큰 차이가 발생하는 것은 날개 끝단과 중축, 스트럿 등의 복합적인 영향으로 인함을 추론한 바 있다. 하지만 날개 끝 와

<sup>†</sup>Corresponding author: bshyun@hhu.ac.kr

**Table 1.** Summary of previous studies

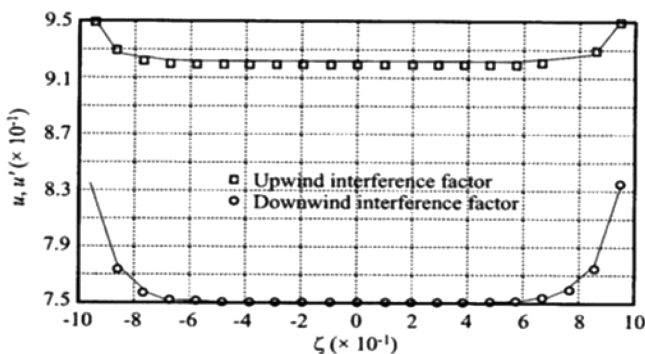
Key research topics	
Paraschivoiu <i>et al.</i> [1988]	· Open test · Development of BEMT code
Howell <i>et al.</i> [2010]	· Wind tunnel test · Application of RANS model
Ye <i>et al.</i> [2010]	· Application of DVM-UBC Vortex model · No bottom, no turbulence
Castelli <i>et al.</i> [2011]	· Wind tunnel test · Application of RANS/Aerodynamic model



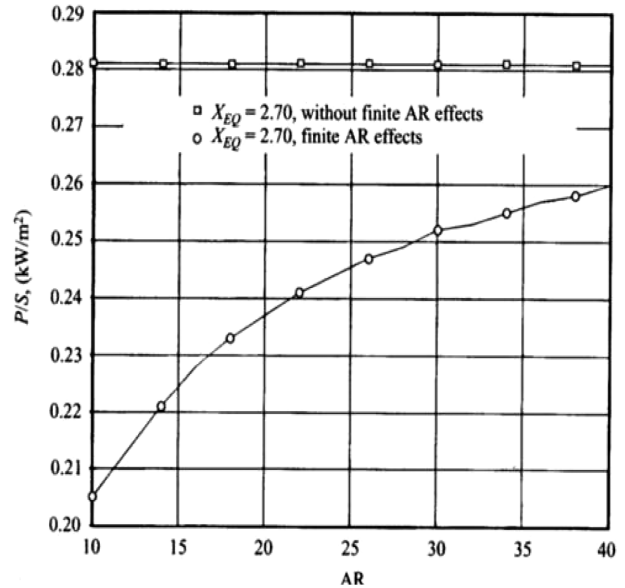
**Fig. 1.** Comparison of power coefficient between numerical and experimental results (Howell *et al.*[2010]).

류가 성능에 미치는 영향에 대한 명확한 단서를 제공하지 못하였으며, Fig. 1에서 보는 것과 같이 TSR이 높은 구간에서 효율이 특히 크게 감소하는 이유도 밝히지 못하였다.

Paraschivoiu *et al.*[1988]은 포물선형 수직축 터빈의 실험적 실험과 수치해석용 DMS기법을 개발하는 등의 다양한 방법으로 연구를 수행하여 날개의 종횡비(AR)에 따라 출력손실이 달라지는 것을 보여 주었다. Fig. 2는 날개 스펠 방향으로 속도 간섭계수의 변화를 나타낸 것으로서 터빈으로 유입되는 속도성분이 날개 중앙부와 끝단에서 다른 정도를 의미한다. 이는 날개 끝 주위에서 발생하는 유동은 터빈 중앙부와는 다를 것이라는 것을 충분히 예상할 수 있고 이로 인해 터빈의 성능에도 영향을 줄 것이다. Fig. 3은 날개 종횡비에 따라 달라지는 비출력을 나타낸 것인데 여기서 비출력은 날개의 단위 면적당 출력을 나타낸다. 일반적으로 소형 수직축 터



**Fig. 2.** Upwind and downwind interference factors (Paraschivoiu *et al.*[1988]).



**Fig. 3.** Comparison of specific power with respect to aspect ratio (Paraschivoiu *et al.*[1988]).

빈의 날개 종횡비가 30 정도인 점을 감안하면 비출력 손실은 10% 정도임을 알 수 있다.

이상의 연구결과로부터 3차원 효과는 날개 끝단의 영향이 주된 요인으로서 터빈 날개의 종횡비에 따라 그 영향이 달라짐을 예상할 수 있다. 다만 기존의 연구들은 다양한 가정들에 입각하여 수직축 터빈의 3차원적인 특성을 살펴보았지만 불균일 유동장에서 비정상적인 거동을 보이는 복잡한 유동장의 물리적인 규명에는 미치지 못하였다.

본 연구에서는 수직축 터빈의 성능을 효과적으로 수치해석 하여 설계에 반영하기 위한 방편으로서, 터빈의 2차원 해석결과를 바탕으로 3차원 효과를 보정하는 방법에 대하여 고찰하고자 한다. 수직축 터빈의 특성상 3차원 비정상해석이 필수적이지만 이를 직접 구현하기 위해서는 막대한 량의 연산이 요구되는 어려움이 있다. 예를 들어 Intel 3.1GHz 30core 클러스터 컴퓨터를 사용하더라도 1회 계산에 수 일의 계산시간이 요구되는 반면, 2차원 해석은 수 시간 이내의 짧은 시간으로 해석이 가능하기 때문에 2차원결과를 3차원으로 보정하는 방법을 채택하는 것이 현실적이기 때문이다 (Hyun *et al.*[2012]). 3차원효과를 체계적으로 관찰하기 위한 연구 방법으로 먼저 고정된 수중익에 대하여 2차원 및 3차원 수치해석을 수행하여 날개의 3차원효과를 분석해 보았으며, 이를 바탕으로 회전하는 2차원 및 3차원 터빈의 수치해석을 수행하여 회전하는 터빈 날개의 종횡비에 따른 3차원 영향에 대하여 분석하였다.

## 2. 터빈 선정 및 수치해석

### 2.1 대상 터빈

Han *et al.*[2010, 2011]의 연구결과에 의하면 수직축 터빈 설계

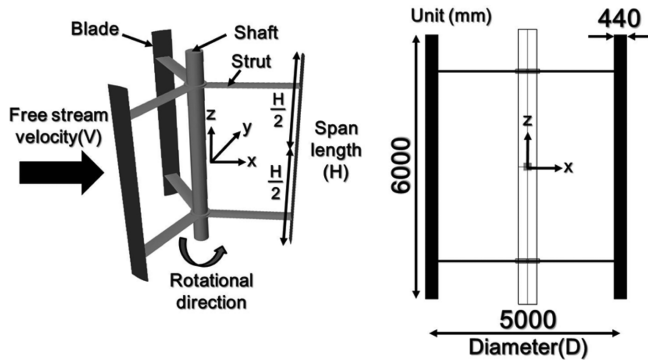


Fig. 4. Schematics of 100 kW-class VAT.

Table 2. Principal particulars of 100 kW-class VAT

Designation	Symbol	
Diameter(m)	D	5
Number of blade	Z	3
Chord length(m)	c	0.44
Solidity	$\sigma$	0.085
Span length to diameter ratio	H/D	1.2
Blade section		NACA 653-018

를 위한 주요변수는 날개수, 솔리디티, 스펠-직경비(H/D)가 있는데 이러한 주요변수를 정하기 전에 먼저 목표발전용량을 설정하는 것이 일반적이다. 해양에너지 이용기술에 대한 연구가 활발한 유럽의 조류발전용 터빈의 발전용량 추세가 100, 300, 500 kW로 설정되고 있는데, 수직축 터빈이 수평축에 비하여 상대적으로 소형에 적용되는 점을 감안하여 100 kW급 대상 터빈을 선정하였다. 이는 Lee *et al.*[2012]의 연구에서 사용하였던 터빈으로서 체계적인 설계법에 의해 제시된 우수한 성능의 터빈이다. 터빈의 주요치수와 형상은 Fig. 4, Table 2와 같다.

### 2.2 수치해석

터빈의 수치해석은 2차원과 3차원으로 나누어 수행하였다. 3차원 터빈 해석시 격자 생성의 간편함을 위하여 스트럿은 제외하였다. 난류모델은 k- $\omega$  SST model을 사용하였는데 이는 k- $\epsilon$  model에 비해 아주 작은 y+가 요구되기 때문에 그에 따라 격자수가 증가하지만 회전하는 물체 해석에 적합한 장점을 가지고 있다. Fig. 5는 3차원 터빈 격자계를 나타낸 것으로 계산 영역은 터빈으로부터 전방으로 5D, 후방으로 10D, 터빈 높이 방향으로 4D만큼의 여유를 두어 구성하였고 터빈이 회전하는 영역(Rotating zone)과 회전하지 않는 영역(Non-rotating zone)으로 나누었으며 총 격자수는 약 5,000,000개이다. 대칭이 되는 경계면에는 Symmetry 조건을 부가하였고, 입구에 Velocity-inlet 조건, 출구에는 Pressure-outlet 조건을 부가하였다. 수치계산 조건은 Table 3과 같으며, 로터의 회전은 Jung *et al.*[2009]과 Han *et al.*[2010]이 적용하였던 슬라이딩 격자기법(Sliding mesh)을 사용하였다. 슬라이딩 격자기법을 적용하기 위해 회전영역과 회전하지 않는 영역의 경계면에 인터페이스 조건을 사용하였는데, 이는 터빈 로터와 그 주위 격자를 이어주면서 격

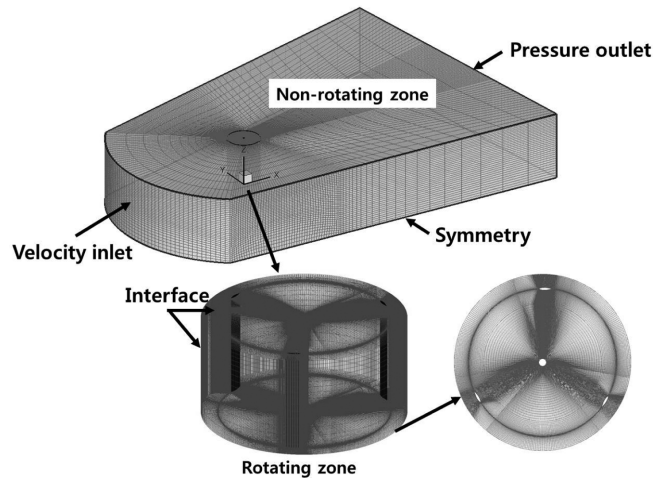


Fig. 5. Grid system around a three-dimensional turbine.

Table 3. Calculation condition

	Conditions
Turbulence model	k- $\omega$ SST model (2 eq. model)
Turbine rotation	Sliding mesh
y+	$\leq 5$
Rotational speed (rad/s)	2.4
TSR	1.5~4.5

자수를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 터빈의 회전은 시간 간격당 2.75도(0.02초)가 되도록 하였고 이는 통상 추진기 성능해석 시의 시간 간격인 5도를 회전시키는 것에 비해 더 세밀한 것이다. 계산의 수렴여부는 TSR에 따라 다르지만 통상 5회전 이상이 되면 실질적으로 수렴하는 것으로 판단되었다.

해석도구로는 ANSYS사의 FLUENT Ver.14.5를 사용하였으며 Intel 3.1Ghz 8 core 클러스터 컴퓨터에서 해석하였다. 수치해석의 격자의존도와 해석결과와의 검증 등은 Han *et al.*[2010] 및 Lee *et al.*[2012]가 수행하였던 검증과정을 동일하게 적용하여 서로 잘 일치하는 결과를 얻었기 때문에 본 논문에서 더 이상의 설명은 생략하기로 한다. 보다 구체적인 내용은 참고문헌의 결과를 참고하면 된다.

Fig. 6은 TSR=1.5, 3.0, 4.5에서의 위상각에 따른 동력계수의 변화를 나타낸 것이다. TSR에 따라 최대동력계수가 변화하는 것을 잘 보여주고 있는데, 효율이 가장 우수한 TSR=3을 설계점으로 정하였다. 각 TSR에서 1회전시의 동력계수를 평균하면 Fig. 7에서와 같이 평균 동력계수를 구하게 된다.

Fig. 7은 대상 터빈에 대하여 2차원 및 3차원 해석을 수행한 수치해석 결과를 서로 비교한 것이다. 3차원 해석으로 도출한 동력계수 값들이 2차원 해석결과에 비해 작게 얻어지고 있다. 특히, TSR이 커짐에 따라 그 차이가 커짐을 알 수 있으며 이에 대한 근거로는 Lee *et al.*[2012]이 언급한 바, 높은 TSR에서 동력계수가 터빈의 부가물(중축, 스트럿 등) 등의 영향을 크게 받는 구간(Secondary effect region)에 해당한다고 설명한 바 있다. 그러나 본 계산이 스트럿을

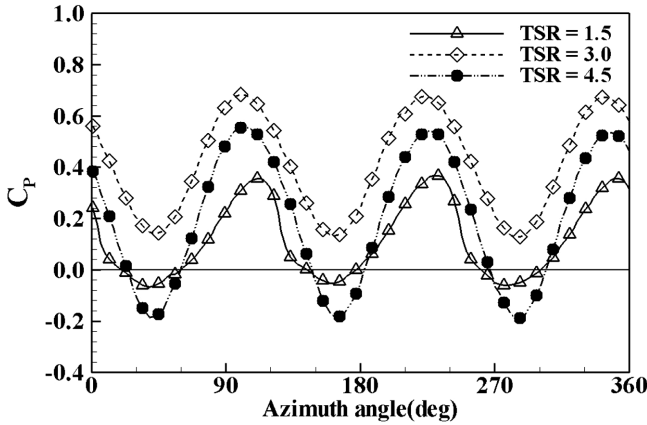


Fig. 6. Comparison of power coefficient as azimuth angle ( $H/D=1.2$ ).

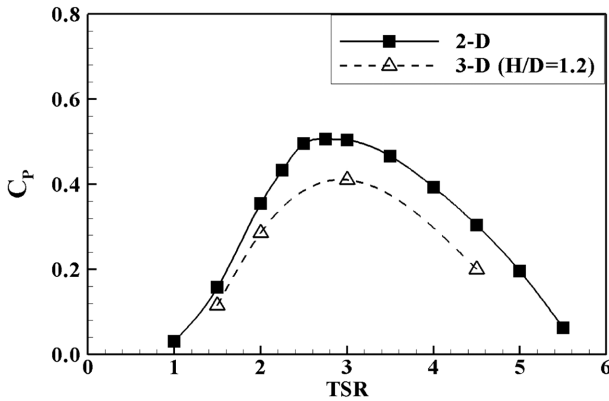


Fig. 7. Comparison of power coefficient between 2D and 3D results.

Table 4. Comparison of typical calculation time

	Number of grid	Hardware	Time(hr)
2-D	270,000	Intel 3.1 GHz 8core	4
3-D	5,000,000	Intel 3.1 GHz 8core	170

제외한 계산임을 감안한다면 전체 동력계수에 미치는 터빈 날개의 3차원성에 기인한다고 해석하는 것이 보다 타당할 것으로 여겨지는데, 이에 대하여는 추후 정밀한 조사가 필요하다.

한편, Table 4에서 보는 것과 같이 3차원 터빈 수치계산은 2차원에 비해 아주 많은 시간이 소요된다. Ye *et al.*[2010]도 터빈의 3차원 계산은 2차원에 비해 계산시간이 약 40배 정도 더 소요된다는 연구과정을 소개한 바 있다. 물론 터빈 로터의 z축 방향으로 발생하는 비정상적 유동현상과 터빈이 회전함에 따른 후류의 영향 등을 포함하고 있어 그것을 파악하는 것이 중요하지만, 결과를 해석하는 과정이 쉽지 않기 때문에 2차원 계산결과를 활용해서 3차원 효과를 보정할 수만 있다면 매우 효과적일 것이다.

### 3. 직진하는 수중익의 3차원 효과

회전하는 터빈은 유입속도와 로터 회전속도의 벡터합으로 받음각을 받는데, 위상각( $\theta$ )과 TSR에 따라 식 (1)과 같이 받음각의 범

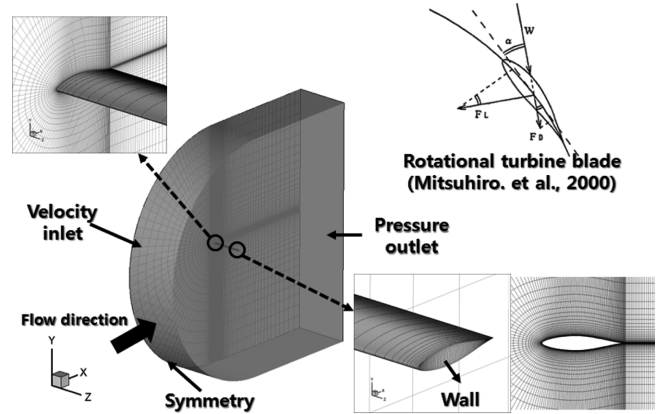


Fig. 8. Grid system for fixed hydrofoil.

위가 변하게 된다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta + TSR}\right) \quad (1)$$

이와 같이 회전하는 터빈의 날개는 받음각 변화에 따라 양항력 계수가 달라진다. 물론 날개의 후류 영향으로 실제 날개가 경험하는 받음각은 식 (1)에서 얻어지는 각도와는 다르며 비정상 유동특성을 보이므로 매우 복잡한 유동현상이 된다. 하지만 회전하는 터빈의 3차원 효과에 대한 연구에 앞서 기초연구로서, 식 (1)에 주어진 다양한 받음각 범위에서 직진하는 날개에 대한 2, 3차원 날개의 특성을 먼저 살펴보는 것도 의미있는 일이다. 이는 수치해석의 정도 검증은 물론, 터빈 로터의 회전으로 인한 영향과 후류의 영향을 무시하고 순수하게 날개 끝 유동의 차이에 의한 양항력의 손실만을 살펴 볼 수 있게 한다.

Fig. 8의 우측 상단에 보여진 것처럼 터빈이 회전함에 따라 순서적으로 변화하는 받음각들을 사용하여 직진하는 날개에 대해 수치해석을 수행하였고 결과를 Abbott *et al.*[1959]과 Jung *et al.*[2009]과 비교하였다. 계산은 실험치가 주어져 있는  $Re = 3 \times 10^6$ 에서 정상상태로 수행하였다. 격자계는 Fig. 8과 같이 2차원 격자계(3차원 격자계의 xy면)를 z축 방향으로 확장시켜 구성하였다. 날개 위 격자수는 240개, 전체 격자수는 약 900,000개로 계산영역은 날개 중심에서 전후방, 측방으로 코드길이의 30배 크기로 구성하였다. 계산시간을 고려하여 날개 스팬방향으로 중간 위치에 대칭조건을 주었으며, 날개 끝의 영향을 고려하여 z축 방향으로 날개 끝 지점으

Table 5. Calculation conditions for hydrofoil

	Hydrofoil
Turbulence model	k- $\omega$ SST model (2 Eqn.)
Velocity (m/s)	6.82
Chord length (m)	0.44
Re	$3.0 \times 10^6$
y+	$\leq 5$
Span length(m)	6
Angle of attack(deg)	$\pm 22$

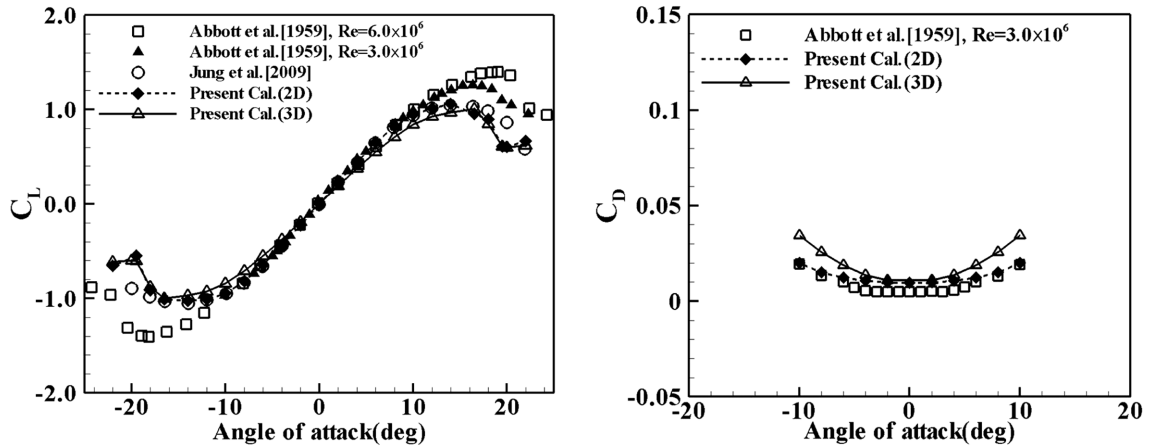


Fig. 9. Comparison of lift and drag coefficient.

로부터 1스팬길이 만큼 여유를 두었다. 터빈 수치해석 시와 동일한 난류모델을 적용하였으며 세부조건은 Table 5로 정리하였다.

Fig. 9는 받음각에 따른 양항력 계수를 비교한 것으로  $Re=6 \times 10^6$  에서 계산을 수행한 Jung *et al.*[2009]과 같이 본 연구에서도 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있다. 실속각인 16도 정도에 근접할수록 수치계산 결과가 실험과 차이를 보이고 있으며, 항력계수가 다소 크게 예측되는 등 미소한 차이를 보임에도 불구하고 전반적으로는 수중익의 양항력을 잘 묘사하고 있다고 판단되었다.

Fig. 10와 Fig. 11은 날개 단면의 압력계수 및 한계유선분포를 받음각 10도와 22도에서 비교한 결과이며, Fig. 12는 동일한 받음각에서 3차원 날개 표면의 압력분포 및 주위유동을 나타낸 것이다. 실속이 일어나지 않는 10도에서 날개 끝단에 형성된 날개 끝 보오텍스 패턴만이 눈에 띄는 반면, 22도에서는 실속의 영향으로 날개 끝이 아닌 영역에서도 3차원적인 흐름의 변형을 볼 수 있다. 이로 부터 실속이 발생하게 되면 그 결과로서 날개의 3차원성이 증가되

는 경향이 있음을 짐작할 수 있다.

Fig. 13(a)와 (b)는 각각 받음각 10도와 22도에서의 2차원 및 3차원 날개표면 압력계수를 비교한 것이다. 3차원 날개의 압력분포는 날개 끝단으로부터 떨어진 거리  $t$ 를 코드 길이로 무차원하여 표기하였다. 즉, 스패방향으로 날개 대칭면 지점인  $z=0$ m부터 1m, 2m, 2.9m, 3m인 지점은 각각  $t/c=6.82, 4.55, 2.27, 0.23, 0$ 에 해당한다. 비교적 날개 중앙부에 해당하는  $t/c=4.55$ 와  $2.27$ 에서의 압력계수는 2차원 결과와 잘 일치하고 있는 반면  $t/c=0$ 인 날개 끝에서는 압력면과 흡입면의 압력차가 거의 발생하지 않으며,  $t/c=0.23$ 에서도 2차원에 비하여 그 차이가 작아 양력이 상당부분 손실된다는 것을 알 수 있다.  $t/c=2.27$ 은 날개 끝으로부터 전체 스패의 1/4 지점에 해당하는데 날개 중앙에 해당하는  $t/c=4.55$ 와 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 이러한 경향은 받음각 10도와 22도에서 공히 나타나는 현상이다.

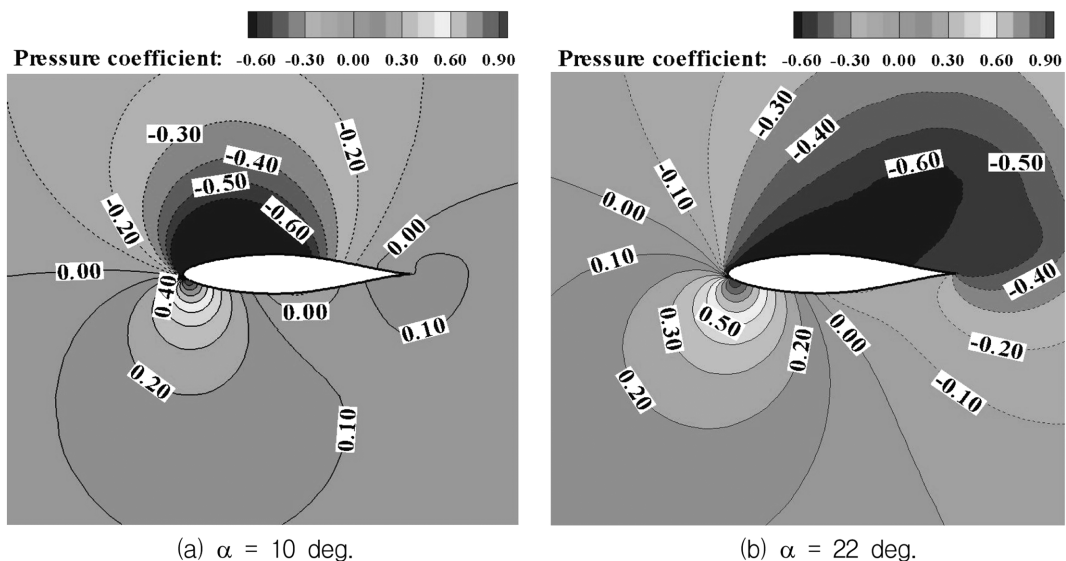


Fig. 10. Pressure contours (2-D).

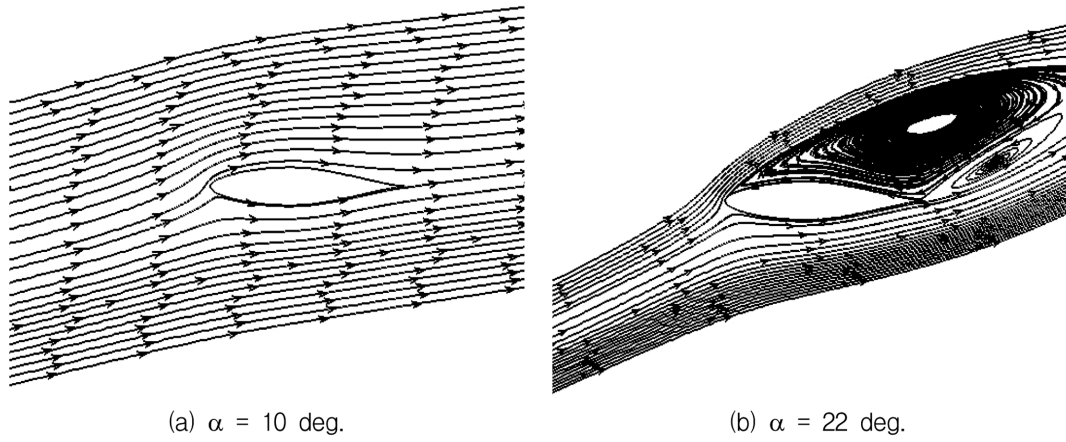


Fig. 11. Streamlines (2-D).

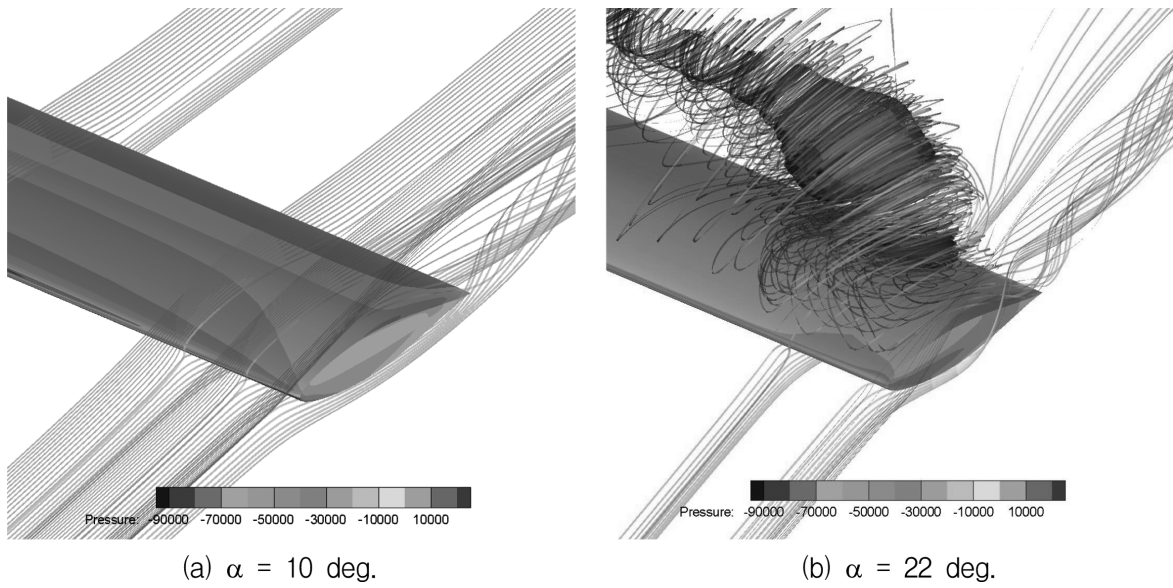


Fig. 12. Pressure contours and streamlines (3-D).

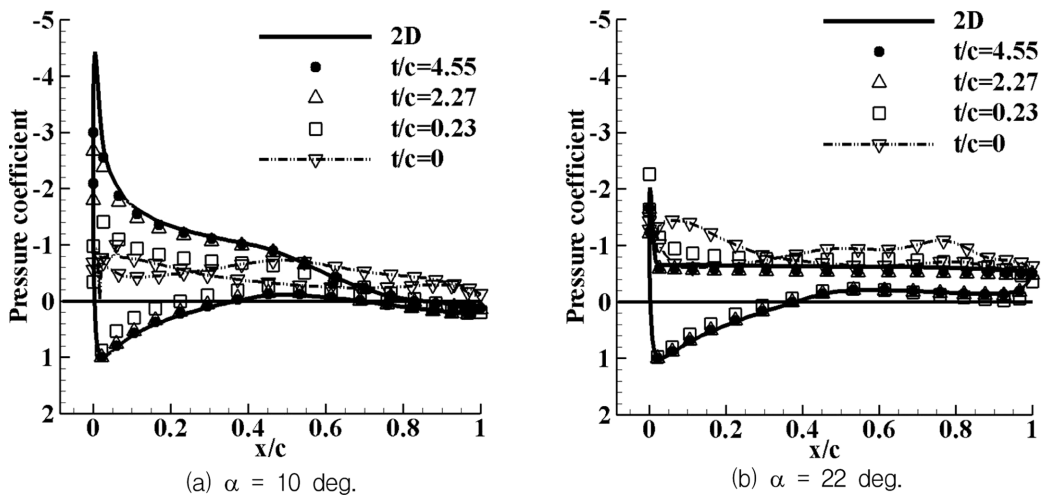


Fig. 13. Pressure distributions on blade surface.

### 4. 회전하는 터빈 날개의 3차원 효과

회전하는 터빈 날개는 직진하는 수중익과는 달리 날개의 원주 방향 위치에 따라서 매우 복잡한 유동장이 형성된다. Fig. 14는 터빈의 위상각과 속도분포 및 압력계수를 예측한 지점을 나타낸 것이며  $t/c=0.114$ , 6.818에서의 결과를 2차원 결과와 비교하였다. 그림에서 원주방향으로 90도 위치는 교란되지 않은 유동장에서 구동되는 반면, 180도 위치에서는 상류에서 전개되어 오는 터빈 후류의 영향이 지대한 영역이기 때문에 앞장에서 살펴본 직진하는 수중익과 그 조건이 매우 상이할 것이다.

Fig. 15는  $TSR=3$ 에서 터빈 날개가 위상각 20, 140, 260도에 위치하였을 때 2차원 터빈과 3차원 터빈 주위의 속도분포를 나타낸 것이다. Fig. 15(a)와 Fig. 15(b)에서는 터빈 및 축 주위의 속도분포가 상하 대칭성을 보여주지만 Fig. 15(c)는 매우 비대칭적인 분포를 보이고 있다. 이와 같이 터빈 날개의 스패방향으로 중앙부와 끝부분에서의 유동이 다르기 때문에 각 날개가 받는 압력분포 역시 변화가 클 것이다. 따라서  $H/D=1.5$  터빈의 날개 중앙( $t/c=6.818$ )과 날개 끝단( $t/c=0.114$ )에서의 압력분포를 Fig. 16과 같이 비교해 보았다.

먼저 2차원 해석 결과를 보면, 위상각 140도의 압력분포가 가장 큰 양력을 생성하며, 20도, 260도 순으로 양력이 감소하는 경향이 눈에 띈다. 위상각 20도는 받음각이 0에 접근하여 양력면으로서의 기능을 다 하지 못하고 있으며, 위상각 260도에 위치한 날개는 후류의 영향으로 실질적으로 양력을 생성하는 능력이 현저히 떨어짐을 유추할 수 있다. 즉, Fig. 16의 압력분포들로부터 동력계수는 위상각 140도 날개가 주로 토크, 즉 동력의 생성에 기여한다고 볼 수 있겠다. 날개의 중앙부(Mid-span)와 끝단의 압력분포 차이를 살펴보면, 위상각 20도와 140도에서는 터빈 중앙부와 끝단의 압력계수가 압력면에서 상대적으로 유사한 경향을 보이고 있는 반면, 260도에서는 압력면과 흡입면 공히 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

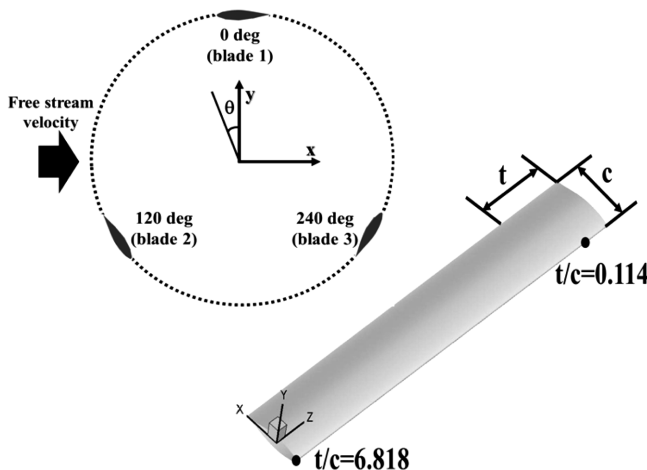


Fig. 14. Coordinates and notations for a turbine blade.

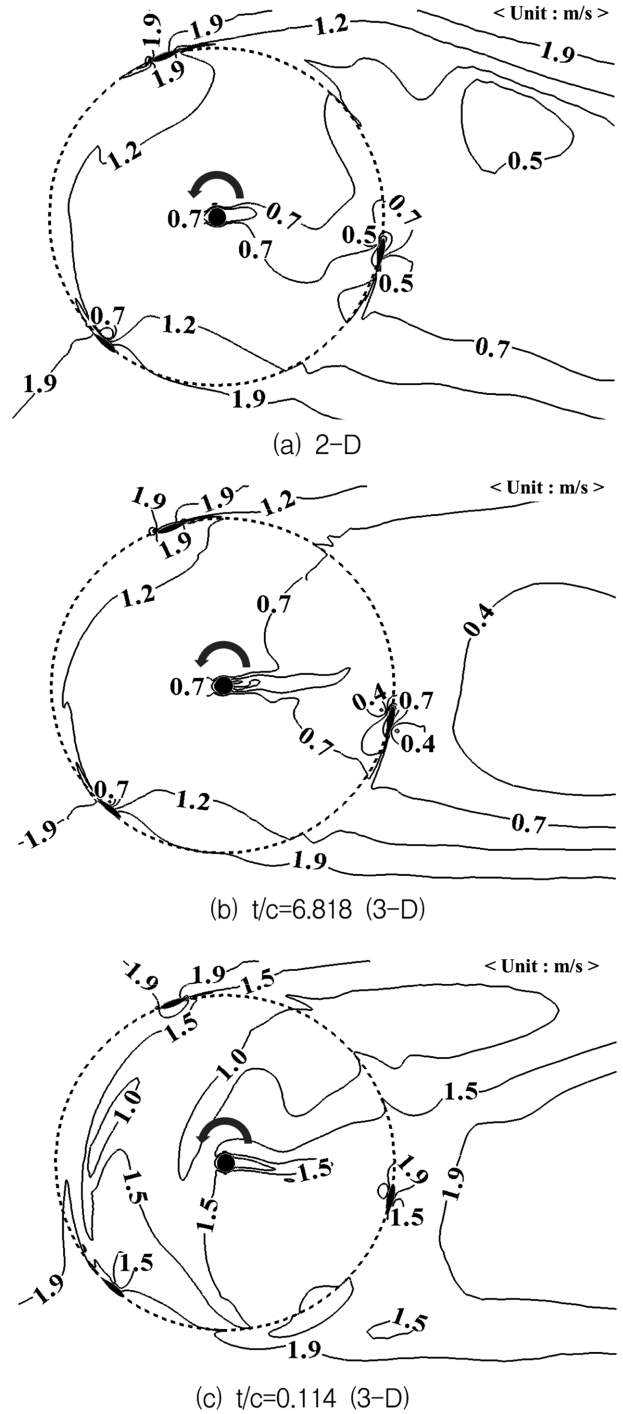


Fig. 15. Velocity contours for 2-D and 3-D turbines.

이러한 차이는 위상각에 따른 터빈 날개의 동력계수 결과에서 명확히 확인할 수 있으며 Fig. 17에 나타내었다. Fig. 17(a)는 터빈의 한 날개의 중앙부와 끝단의 동력계수를 비교한 것으로 0도에서 약 40도까지는 동력계수에 기여하지 않는 것을 알 수 있고 동력계수가 최대가 되는 위상각은 100도 근처임을 알 수 있다. 또한, 후류의 영향을 받는 영역인 180도 이후부터도 동력에 거의 전혀 기여하지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 17(b)는 3차원 터빈의 모든 날개

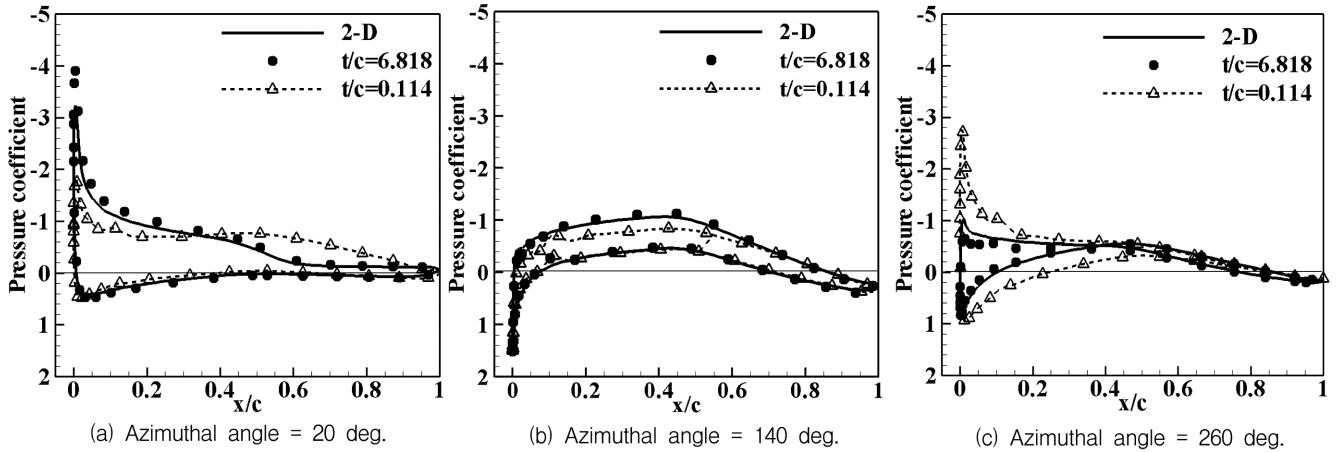
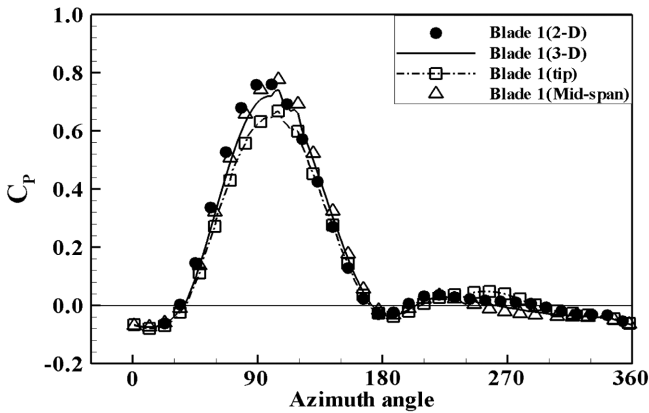
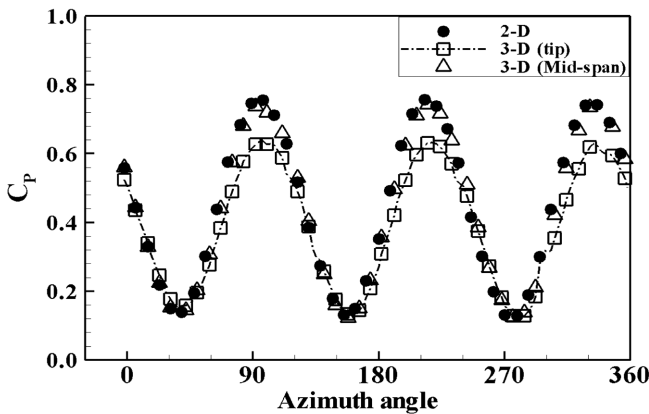


Fig. 16. Pressure distributions on blade surface.



(a) Power coefficient of a single blade



(b) Power coefficient with all 3 blades

Fig. 17. Variation of power coefficients with respect to azimuth angle.

에 대한 중앙부와 끝단의 동력계수와 2차원 터빈 동력계수를 비교한 것으로 2차원과 3차원 터빈의 날개 중앙부 동력계수는 잘 일치하지만 끝단의 경우 최저 동력계수 차이는 없고 최고 동력계수는 2차원보다 약 16%정도 작게 예측됨을 알 수 있었다.

Fig. 18은 2차원과 3차원 터빈의 위상각에 따른 동력계수를 비교한 것으로서 터빈 날개 3개의 동력계수를 합한 결과이다. 2차원 결

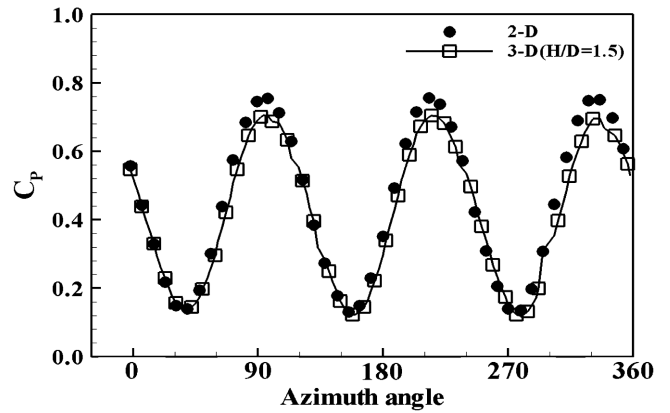


Fig. 18. Comparison of power coefficients between 2-D and 3-D.

과와 비교하였을 때 동력계수의 위상차는 없고 앞선 결과와 마찬가지로 3차원 해석결과가 2차원 결과보다 동력계수의 최대값 부근에서 주로 차이가 발생하고 있으며 다른 곳에서의 차이는 상대적으로 적음을 알 수 있다. 이로부터 터빈 날개의 3차원성은 동력계수의 피크 부근의 성능 감소를 통하여 전체 동력계수의 저하를 야기함을 확인할 수 있었다. 다만 이러한 경향은 터빈의 스팬-직경-H/D에 따라 또 다른 경향을 보일 수 있기 때문에 추후 보다 다양한 관점에서 재검토해야 할 것으로 판단된다.

참고로 Fig. 19는 TSR=3에서 스팬길이만을 변화시키면서 2차원 터빈의 동력계수와 스팬-직경비에 따른 3차원 터빈의 평균 동력계수의 비를 스팬-직경비와의 관계로 나타낸 것이다(Hyun *et al.* [2012]) 여기서  $\beta = (C_p)_{3-D} / (C_p)_{2-D}$ 이다. 스팬-직경비가 1일 때 2차원 동력계수 대비 약 78%에 해당하는 결과를 보여주며, 스팬-직경비가 6 (AR=34)일 때 91% 정도로 수렴하고 있다. 한편 Ye 등(2010)은 스팬-직경비가 3이상인 경우 자신들의 터빈 동력계수가 2차원 터빈 동력계수의 95%까지 근접한다는 결론을 얻는 등 3차원효과를 본 연구보다 적게 예측하였는데, 그들의 해석이 이상유체 가정을 통한 결과였음을 감안한다면 실제 터빈의 3차원효과는 본 연구결과와 같이 이상유체 해석결과보다 다소 더 크게 고려되어야 할 것



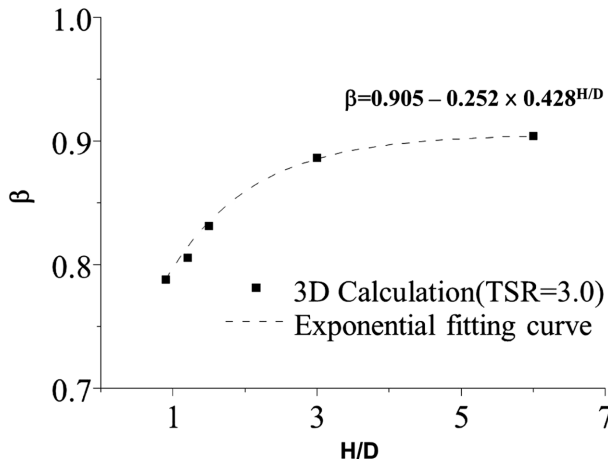


Fig. 19. Relationship between H/D and power coefficient (Hyun *et al.*[2012]).

으로 사료된다.

본 연구에서 검토한 TSR=3인 경우는 수직축 터빈의 효율이 우수한 구간으로서 설계 TSR로 삼기에 충분하므로 이 부근에서 얻어진 결과인 Fig. 19는 향후 유사한 연구를 진행함에 있어서 상당한 계산시간이 소요되는 3차원 터빈의 수치계산 대신 2차원 결과를 보정하여 사용하는데 유용한 정보로 활용될 수 있을 것이다. 향후 다양한 H/D와 TSR에 대하여 동력계수에 미치는 3차원성의 해석을 추가하여 범용 3차원 보정계수( $\beta$ )를 도출한다면 대단히 실용적인 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

선행연구를 조사·분석하여 조류발전용 수직축 터빈의 3차원 효과에 대한 연구현황을 파악하고, 이를 검증하여 설계에 활용하기 위하여 수치해석을 수행하였으며 다음의 결과들을 도출하였다.

(1) 3차원 효과를 파악하기 위한 기초연구로 고정날개 수치계산을 통해 날개 중앙부와 끝단에서의 압력분포차이를 확인하였다.

(2) 터빈 수치계산을 통하여 3차원 터빈 날개의 스펠방향으로 터빈 날개 끝단과 중앙부에서의 속도분포 및 압력계수 차이를 살펴본 후, 터빈 날개 끝단에서 발생하는 양력손실에 기인하여 3차원 터빈의 성능이 2차원 터빈 성능보다 저하됨을 확인하였다.

(3) 본 연구의 설계속도인 TSR=3에서는 터빈의 스펠-직경비가 3이상으로 증가함에 따라 2차원 터빈의 효율로 수렴해 감을 알 수 있었다. 하지만 공진회피 설계를 위해서는 스펠-직경비가 작은 것이 유리하기 때문에 실질적인 수직축 터빈의 3차원 효과는 2차원 해석결과 대비 15% 이상의 차이를 감수해야 할 것이다.

(4) 보다 다양한 작동조건에 대한 수치해석결과가 보완된다면 복잡한 3차원 해석 대신 간편한 2차원 해석을 보정하는 방식으로도 수직축 터빈의 성능을 도출하는 실용적인 해석이 가능하다고 사료된다.

## NOMENCLATURE

AR = aspect ratio,  $AR=H/c$

c = chord length

$C_p$  = power coefficient ( $C_p=T\omega/0.5\rho V^3DH$ )

D = turbine diameter ( $D=2R$ )

H = span length

Re = Reynolds number

T = torque

TSR = tip speed ratio,  $TSR=R\omega/V$

V = free stream velocity

Z = number of blade

$\alpha$  = angle of attack

$\beta$  = Ratio between 3-D and 2-D power coefficients ( $\beta=(C_p)_{3-D}/(C_p)_{2-D}$ )

$\rho$  = fluid density

$\sigma$  = solidity,  $\sigma=Zc/\pi D$

$\omega$  = rotational speed

## 참고문헌

- [1]Abbott, H. I et al., 1959, "Theory of Wing Sections including a summary of airfoil data", 632-633.
- [2]Calcagno, G. and Moroso, A., 2006, "Experiment and Numerical investigation of an Innovative Technology for Marine Current Exploitation: the Kobold Turbine", Proc. of 16th International Off-shore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, USA, May 28-June.
- [3]Castelli, M. R. et al., 2011, "The Darrieus wind turbine : Proposal for a new performance prediction model based on CFD", Energy, Vol.36, 4919-4934.
- [4]Han, J.S., Choi, D.H., Hyun, B.S., Kim, M.C., Rhee, S.H. and Song, M.S., 2011, "Parametric Numerical Study on the Performance of Helical Tidal Stream Turbines", J. of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol.14, No.2, 114-120.
- [5]Han, J.S., Hyun, B.S., Choi, D.H., Mo, J.O., Kim, M.C. and Rhee, S.H., 2010, "Study on Design of Darrieus-type Tidal Stream Turbine Using Parametric Study", J. of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol.13, No.4, 241-248.
- [6]Howell, R. et al., 2010, "Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine", Renewable Energy, Vol.35, 412-422.
- [7]Hyun, BS et al., 2012, "Development of Standardized S/W System for the Integrated Design of Tidal Current Turbines", Final Report, Tidal Stream Energy Research Center, Busan, Korea.
- [8]Jung, H.J., Lee, J.H., Rhee, S.H., Song, M.S. and Hyun, B.S., 2009, "Unsteady Flow Around a Two-dimensional Section of a Vertical Axis Turbine for Tidal Stream Energy Conversion", Int'l J. Naval Architecture & Ocean Engineering, Vol.1, 64-69.
- [9]Kim, B.S., Kim, M.E. and Lee, Y.H., 2008, "Basic Configura-

- tion Design and Performance Analysis of a 100kW Wind Turbine Blade using Blade Element Momentum Theory”, J. of the Korean Society of Marine Engineering, v.32, no.6, 827-833
- [10] Laneville, A. and Vittecoq, P., 1986, “Dynamic Stall: The Case of the Vertical Axis Wind Turbine”, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.108, 140-145.
- [11] Lee, D.H., Hyun, B.S., Lee, J.K., Kim, M.C. and Rhee, S.H., 2012, “Development of Hydrodynamic Capacity Evaluation Method for a Vertical-Axis Tidal Stream Turbine”, J. of the Korean Society for Marine Environmental Engineering, Vol.15, No.2, 142-149.
- [12] Li, Y. and Calisal, S. M., 2010, “Three-dimensional effects and arm effects on modeling a vertical axis tidal current turbine”, Renewable Energy, Vol.35, 2325-2334.
- [13] Mitsuhiro, S. et al., 2000, “An Experimental Study of the Characteristics of a Darrieus Turbine for Tidal Power Generation”, J. of Electrical Engineering in Japan, Vol.132 (Translated from Denki Gakkai Ronbunshi, Vol.118-B, 781-787, 1988).
- [14] Paraschivoiu, I. et al., 1988, “Blade Tip, Finite Aspect Ratio, and Dynamic Stall Effects on the Darrieus Rotor”, J. of Propulsion, Vol.4, No.1, 73-80.
- [15] Paraschivoiu, I., 2002, “Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept”, 177-188.
- [16] Sheldahl, R et al., 1981, “Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines”, Technical Report SAND 80-2114, Sandia National Labs., Albuquerque, USA.
- [17] Winchester, J. D et al., 2009, “Torque ripple and variable blade force : A comparison of Darrieus and Gorlov-type turbines for tidal stream energy conversion”, Proc. of 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden.

---

2012년 10월 15일 원고접수

2013년 2월 4일(1차), 5월 7일(2차) 심사수정일자

2013년 5월 13일 게재확정일자