

## 조류발전용 수직축 터빈 주위의 비정상 유동 수치해석

정현주<sup>1</sup> · 이신형<sup>2</sup> · 송무석<sup>3,†</sup> · 현범수<sup>4</sup>

<sup>1</sup>(주) ATEs

<sup>2</sup>서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

<sup>3</sup>홍익대학교 조선해양공학과

<sup>4</sup>한국해양대학교 조선해양시스템공학부

## A Numerical Study of Unsteady Flow around a Vertical Axis Turbine for Tidal Current Energy Conversion

Hyun Ju Jung<sup>1</sup>, Shin Hyung Rhee<sup>2</sup>, Museok Song<sup>3,†</sup> and Beom-Soo Hyun<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Heavy/Construction Group, ATEs, Seoul 152-769, Korea

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>3</sup>Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Chung-Nam 339-701, Korea

<sup>4</sup>Division of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

### 요 약

2차원 비정상 RANS 방정식을 이용하여 피치가 고정된 3개 혹은 4개의 날개(hydrofoil)를 가지는 조류발전용 수직축 터빈주위의 비정상 유동장 해석을 수행하였다. 상용수치해석코드인 Fluent를 이용하여, 균일류에 놓인 NACA65<sub>3</sub>-018날개에 대하여 받음각(angle of attack)의 변화를 주며 계산되는 유체력을 실험값과 비교하였고, 이를 바탕으로 대표적인 수직축 조류발전 터빈의 특성을 2차원적으로 고찰하였다. 사용된 수치해법은 대상 유동을 효과적으로 모사할 수 있음을 확인 하였고, 터빈의 최적 효율은 날개수 및 유속 대비 회전수 등의 적절한 조합으로 실현 될 수 있음을 파악하였다.

**Abstract** – A numerical investigation was performed based on the Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) equations for the two-dimensional unsteady flow around a vertical axis turbine(VAT) with three or four blades. VAT is one of the promising devices for tidal current energy conversion. The geometry of the turbine blade was NACA65<sub>3</sub>-018 airfoil, for which CFD analysis using Fluent was carried out at several angles of attack and the results were compared with the corresponding experimental data for validation and calibration. Then CFD simulations were carried out for the whole vertical axis turbine with a two-dimensional setup. The CFD simulation demonstrated the usefulness of the method to study the typical unsteady flows around VATs and the results showed that the optimum turbine efficiency could be achieved for carefully selected combinations of the number of blade and Tip-Speed Ratio(TSR).

**Keywords:** Tidal Current Energy(조류에너지), Vertical Axis Turbine(수직축터빈), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Tip-Speed Ratio(끝단속도비)

### 1. 서 론

조류발전 시스템(Tidal Current Power Plant)은 해수유동의 운동에너지를 발전기(electric generator)의 구동을 위한 회전력으로

바꾸어 주는 변환장치와 이를 지지하는 구조물로 이루어진다. 재생에너지의 활용에 대한 관심이 고조되면서 다양한 해양재생에너지를 이용하는 발전이 논의되고 실현되고 있으며, 이런 배경에서 조류발전도 가능성 있는 해양재생에너지의 한 축으로 이해되고 있다(에너지관리공단[2008]). 현재까지는 주로 선진국을 중심으로 다양한 형식의 변환장치와 이의 효율적인 운영을 보장하기 위한 구

<sup>†</sup>Corresponding author: msong@hongik.ac.kr

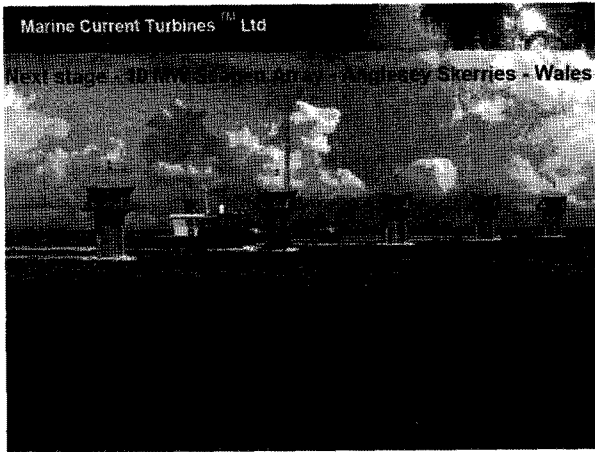


Fig. 1. Schematic picture of typical HAT (MCT).

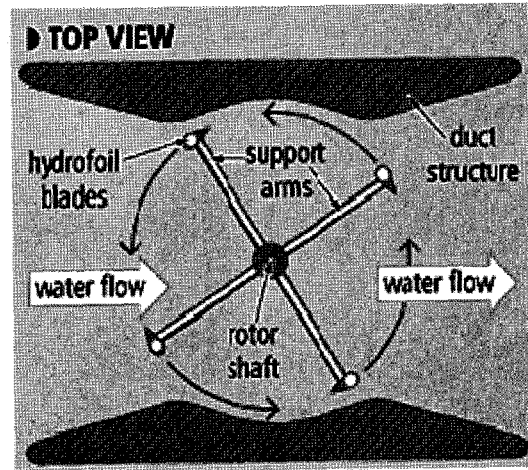


Fig. 3. A typical VAT(Darrieus turbine) arrangement (Blue Energy).

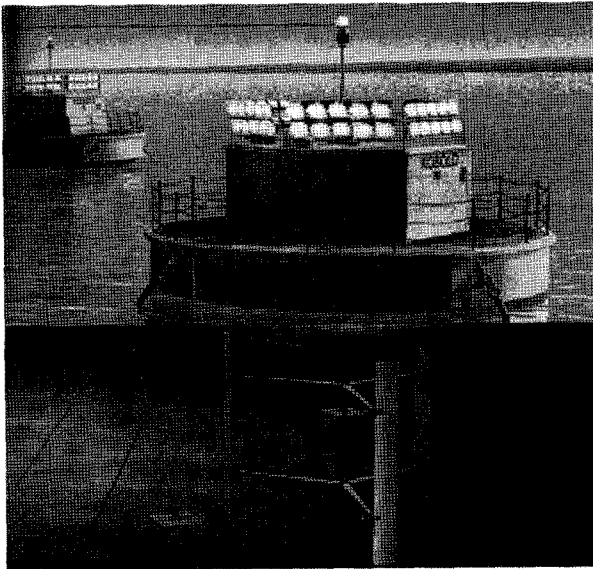


Fig. 2. Schematic picture of typical VAT (Kobold).

조물, 그리고 복수의 모듈 배치(multiple module arrangement) 등의 연구가 활발히 이루어지고 적용되고 있는데, 조류에너지 변환 장치의 핵심은 양력을 발생시키는 날개(hydrofoil)로, 이들의 배치 형식에 따라 크게 수평축 터빈 방식(HAT, horizontal axis turbine, Fig. 1)과 수직축 터빈 방식(VAT, vertical axis turbine, Fig. 2)으로 나뉜다.

수평축 터빈 방식은 추진장치인 프로펠러의 역개념으로, 조류의 방향과 평행한 축을 가진 터빈의 날개 각도(blade pitch angle)를 조절하여 발생하는 양력으로 축의 회전을 만들어 내는 개념이다. 풍력발전을 바다라는 환경으로 확장한 개념으로 원리가 단순하다는 장점이 있지만, 조류의 방향이 축과 일치하여야 효율이 보장되고 조류가 역전되면 회전 방향이 바뀌는 단점이 있다. HAT의 효율을 극대화 하기 위하여 터빈의 직경, 날개 수, 반경방향 피치 분포, 날개 코드길이(혹은 확장면적비) 등이 주어진 제약조건, 즉 조류와 공간의 특성, 목표동력, 캐비테이션 등에 따라 결정되어야 한다.

한편, 수직축 터빈 방식은 회전축이 조류의 방향과 수직하고 축과 평행하게 놓인 날개에 발생하는 양력으로 회전함으로서 얻어지는 회전력에 기초한다(Fig. 3). 초기구동이 어렵고, 수평축 터빈 방식에 비하여 효율은 다소 떨어지지만, 조류방향과 무관하게 한 방향으로 회전하고 발전기 등을 수면 위에 위치시키기 용이하다는 장점이 있다. VAT의 효율 역시 터빈의 직경, 길이, 날개수, 피치 크기, 날개위 코드 길이 등이 주어진 제약조건, 즉 조류와 공간의 크기, 희망동력 등에 따라 적절히 결정되어야 극대화 될 수 있다.

기존의 자연에너지를 이용하는 터빈에 관한 해석은 주로 풍력 터빈(wind turbine)에 초점이 맞추어져 연구되어 왔으며, Glauert [1963]에 의해 도입된 날개 요소 운동량 이론(blade element momentum theory, BEMT)은 각종 터빈과 같은 유체기계 해석 시 기본이론으로 현재도 폭넓게 사용되고 있다.

한편 최근 청정에너지 기술에 관한 높은 관심도와 컴퓨터의 발전으로 CFD 해석이 적극적으로 이용되고 있는데, 덴마크의 RISO, DTU를 비롯한 독일의 DLR, 스웨덴의 FFA 및 미국의 NASA, NREL 등 대규모 국립 연구소를 중심으로 풍력발전용 터빈의 유동장에 대한 수치해석이 활발히 수행되었다(Sorensen et al.[2001]). 특히 NASA Ames에서 수행한 NREL 실험과 NREL/NWTC 공력 블라인드 테스트(aerodynamic blind comparison test, Sorensen et al.[2002])는 CFD 해석의 우수한 적용성을 보여준다.

반면, 풍력발전에 비해 조류발전용 터빈에 관한 발표된 수치연구는 많지 않고, 특히 수직축 터빈의 성능 최적화를 위한 체계적인 수치연구는 찾아보기 어렵다. 이는 준 정상상태로 가정하고 해석이 가능한 수평축 터빈과 달리, 수직축 터빈은 기본적으로 비정상 상태의 유동현상이라는 점과 터빈 블레이드 주위의 압력 강하에 기인하는 캐비테이션(cavitation) 현상의 고려 등의 어려움에 이유가 있다.

본 논문은 VAT의 최적설계를 위해 활용될 수 있는 기법을 개발함을 궁극적인 목표로 하는 연구의 기초 결과로서, 상용 CFD 소프트웨어 FLUENT[2006]를 이용하여 수직축 터빈 주위의 비정

상 유동 대한 2차원 전산유체 해석을 내용으로 한다. 풍력발전에서 많이 활용되는(Quinn[1944]) 날개에 대해 받음각(angle of attack)에 따른 결과를 실험값과 비교하여 검증하였고, 이를 바탕으로 조류발전용 수직축 터빈해석을 하였다. 터빈의 회전 속도(tip-speed ratio, TSR) 및 날개 수에 변화를 주며 수치해법의 유용성을 확인하였고 터빈의 효율이 이들의 적절한 조합으로 극대화 될 수 있음을 확인하였다.

## 2. 해석 모델 및 유동장

### 2.1 해석 모델의 선정

풍력 발전에 관한 기존의 자료를 토대로 상하대칭인 층류익형 NACA65<sub>3</sub>-018 날개(Fig. 4)를 대상으로 하였다.

해석 터빈의 운용속도는 식 (1)에 정의된 TSR을 기준으로 하여, 이 값이 2~3.5 사이에 놓이도록 하였고, 해당되는 레이놀즈수(Re)는 코드길이가 1m일 경우 약  $4 \times 10^6 \sim 7 \times 10^6$ 가 된다. 이 영역에서는 날개 표면에서 laminar-transition이 발생하지 않아 특별한 처리가 불필요하다. 유동해석 조건을 아래의 Table 1에 보였다.

$$TSR = \frac{R \cdot \Omega}{V} \quad (1)$$

(여기서 R=터빈반지름, Ω=각속도, V=조류속도)

터빈의 반지름은 날개간의 간섭이 최소화 될 수 있는 일반적인 크기로 판단하여 4 m로 고정하였고, 양력의 작용점이 날개코(leading edge)로부터 코드길이의 25% 지점인 것으로 하여 각 날개의 이점이 터빈 원주상에 고정된 것으로 하였다. 본 연구에서는 피치의 변화를 고려하지 않아 원주의 접선과 날개의 코드는 일치한다.

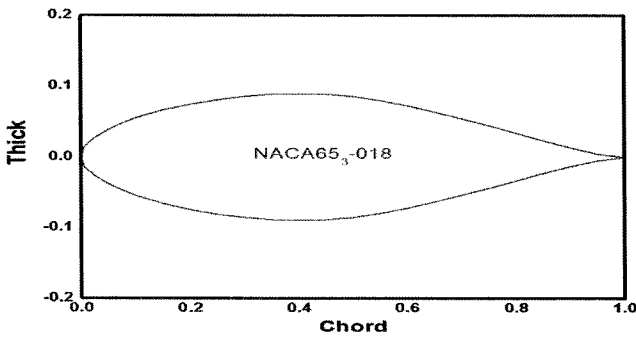


Fig. 4. NACA65<sub>3</sub>-018 blade section.

Table 1. Flow condition

TSR	Current Speed(m/s)	Turbine's Angular Speed (rad/s)	Re
2	2	1.00	3.98e+06
2.5	2	1.25	4.98e+06
3	2	1.50	7.97e+06
3.5	2	1.75	6.97e+06

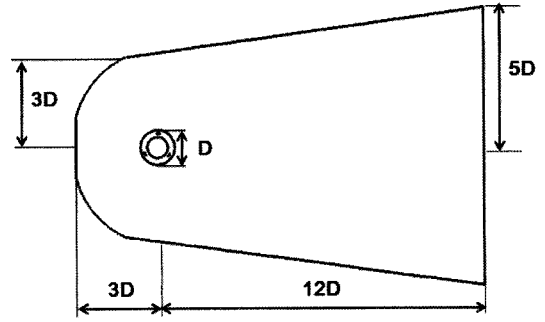


Fig. 5. Computational domain.

### 2.2 해석유동장 제원

일차 수치해석을 통하여 유동경계의 영향이 나타나지 않는 유동장의 크기를 도출하였다. Fig. 5에 보인 바와 같이 계산 영역은 터빈의 지름을 기준으로 길이 방향으로 앞쪽으로는 3배 뒤쪽으로는 12배의 공간을 주었고 폭은 뒤쪽으로 가면서 넓어지는 형상으로 입구 쪽은 6배, 출구 쪽은 10배가 되도록 하였다. 전술한 바와 같이 터빈 날개의 스펜(span)방향 끝단의 3차원 효과는 무시하고 2차원 유동을 가정한다.

## 3. 수치해석

### 3.1 수치해법

유동장의 해석을 위하여 상용 CFD 코드인 FLUENT를 사용하였다. FLUENT의 셀 중심 유한체적법(cell-centered finite volume method) 기반의 비정상 비압축성 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였고, 터빈영역의 공간을 회전시키기 위해 sliding mesh 기법을 사용하여 회전 유동장을 구현하였다. 압력과 속도의 연계를 Patankar와 Spalding[1972]의 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 대류항의 이산화는 QUICK을 사용하였으며 확산항은 2차의 정확도를 가진 중앙차분법을 사용하였다. 내재적(implicit) 시간적분을 적용하였으며 다중격자(multi-grid)와 국부시간 점층(local time stepping)을 사용하여 정상해를 위한 수렴을 가속시켰다. 난류모델은 2-방정식 k-ω SST 모델(Menter[1993])을 사용하였다. 계산 시 터빈의 회전 없이 정상상태에서 먼저 수렴을 시킨 다음 터빈의 회전속도를 가하여 비정상 해석을 수행하였다.

### 3.2 경계조건

로터의 회전을 구현하는 영역은 블레이드를 감싸는 도우넛 모양의 원으로 구성하였고, 뒤쪽으로 갈수록 넓어지는 형태의 원방 경계 형태를 만들었다. Fig. 6에 보인 바와 같이, 조류가 유입되는 곳은 터빈을 둘러싼 원방경계의 3면으로 정의하였고, 나머지 하나의 면을 출구조건으로 정의하였다. 회전하는 유동현상을 계산하기 위해 회전하는 블레이드들을 감싸는 영역의 계산 값과 고정된 원방경계를 계산 값을 연결해 주기 위해 보간법(interpolation)을 사용하였고, 이를 위해 인터페이스(interface) 조건을 선정하였다.

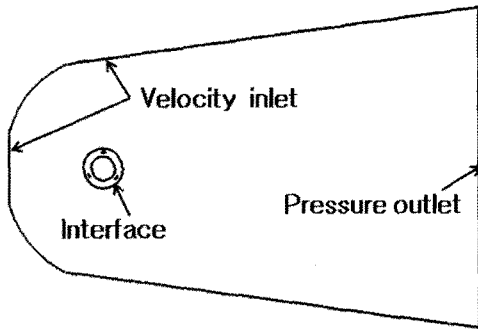


Fig. 6. Boundary conditions.

앞서 정의한 조류가 유입되는 원방경계에서는 일정 유속을 가지는 경계조건(velocity-inlet condition)을 사용하였고, 출구 경계면은 일정압력 조건인 경계조건(pressure-outlet condition)을 주었다. 이때 출구 경계에서의 유동의 방향은 내부 유동으로부터 외삽(extrapolation)되어 결정된다. 터빈 블레이드는 벽면 경계조건(no-slip condition)을 주었고 속해있는 영역에 대한 상대속도를 0으로 주어 회전하는 영역(rotating-zone)과 동일하게 회전하도록 하였다.

3.3 격자계

공간격자는 사각형 정렬격자(quadrilateral structured grid)를 기본으로 하고, 로터의 중앙은 특이점(singular point)이 있으므로 비정렬격자를 생성하여, 다중블록 혼합 격자계(hybrid mesh)로 구성하였다. 모두 네 개의 블록으로 되어있고, 셀의 총 갯수는 3-bladed의 경우 194,299, 4-bladed의 경우 241,947 이다. Fig. 7은 4개의

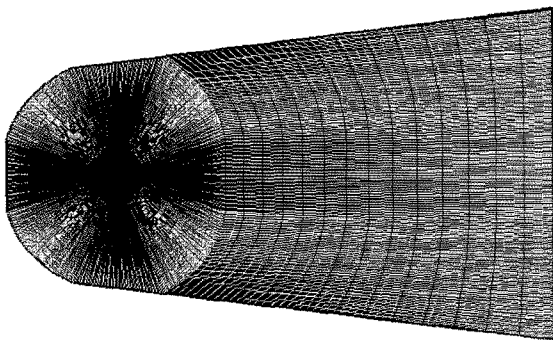


Fig. 7. Overall view of the mesh.

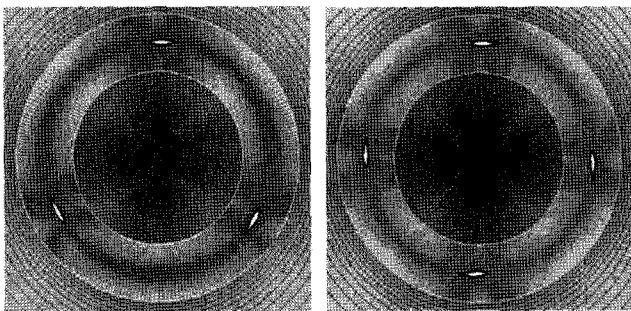


Fig. 8. Rotating zone mesh for 3- and 4-blade turbine.

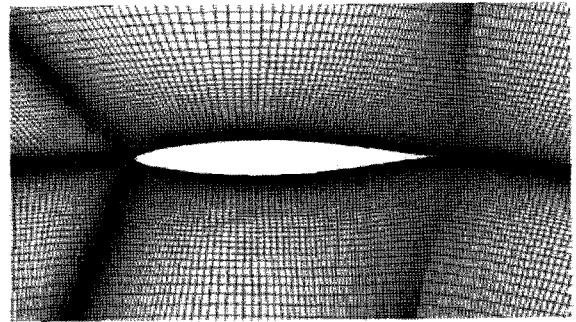


Fig. 9. Grid around the blade.

날개를 가진 경우 완성된 전체 격자계의 모습을 보여주고 있다.

Fig. 8은 각각 3-blade와 4-blade를 가진 경우 날개와 함께 회전하는 격자와 고정된 배경 유동 격자를 보여주고 있다. Fig. 9는 날개 근처의 격자를 확대하여 보인 것인데, 블레이드 표면 첫 격자는  $y^+ = 5$  이하가 되도록 구성하였다.

4. 해석결과 및 고찰

4.1 고정 날개 유체력 해석 검증

해석결과의 신뢰도를 확인하고 관련된 수치 파라미터들의 결정을 위해 간단한 수치 실험을 수행하였다. 채택된 NACA465,-018 날개에 대해 받음각을 변화 시키며 정상상태에서의 유체력을 계산하였다. 해석 레이놀즈수는  $Re = 6.0 \times 10^6$ 이고 코드길이는 1.524 m (60 inch)이다. 각 해석 당 약 1,500번 정도의 반복(iteration)으로 수렴되었으며 평균적으로 20분 정도 소요 되었다.

Fig. 11~13에는 계산결과를 실험값(Abbott et al.[1959])과 비교하여 보였다. 받음각 10도 전후까지는 계산된 양력값(Fig. 10)과 항력값(Fig. 11)이 실험치와 잘 일치함을 확인 할 수 있으며, 그 이상의 받음각에서의 차이는 실험에서 확인되는 비정상 상태의 유동현상을 계산에서 고려하고 있지 않기 때문으로 판단된다. Fig. 12에 보인 날개표면에서의 압력계수는 받음각 16.5도에 대한 것으로 계산과 실험 결과가 유사함을 알 수 있다.

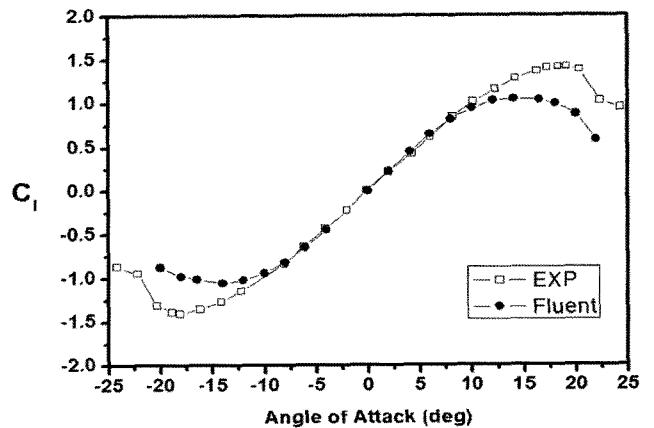


Fig. 10. Comparison of lift coefficients from calculation and experiments(Abbott et al.[1959]).

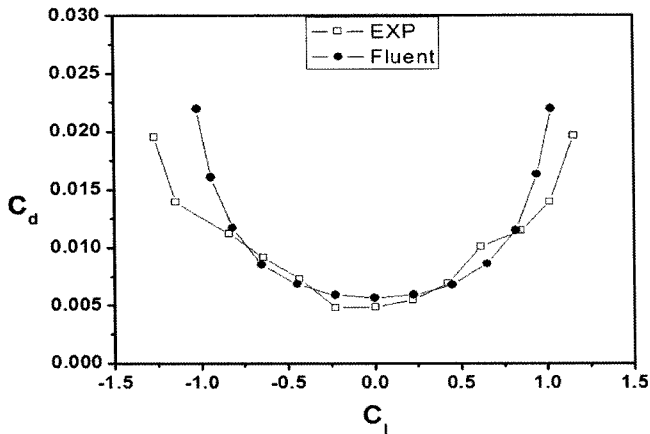


Fig. 11. Comparison of lift and drag correlations from calculation and experiments(Abbott *et al.*[1959]).

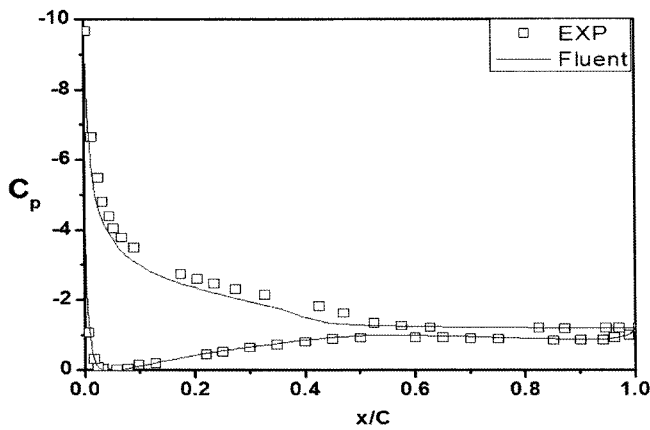


Fig. 12. Comparison of pressure distributions from calculation and experiments(Quinn[1944]) for AOA 16.5.

#### 4.2 회전 터빈 계산결과

터빈이 회전하지 않는 조건으로 2,000번 정도의 반복계산을 진행하면 안정된 정상유동이 얻어지고, 이후 0.01의 시간간격(time step size)으로 매 시간마다 80번 정도의 반복으로 비정상 유동해석을 수행하였다. 안정화된 결과값을 얻어내기 위해 3-blade는 1회전, 4-blade는 2회전 이후의 데이터를 추출하였다. Fig. 13에는 수렴된 압력분포의 예를 보이고 있다. 이 후 설명의 이해를 돕기 위하여 터빈의 회전각이 0도로 정의되는 순간을 함께 보였는데, 3개 혹은 4개의 날개중 하나가 유동장의 최상단에 위치하여 받음각이 0도가 되는 위치이다.

매 시간간격에서 각 날개에 작용하고 있는 토크를 계산하여 합하고 이를 정리하여 Fig. 14(3-blade)와 Fig. 15(4-blade)에 다양한 TSR에 대하여 보였다. 우선 1회전 동안 날개수에 따라 3주기 또는 4주기의 반복을 나타내고 있음을 확인 할 수 있고, 날개수가 상대적으로 많아지면 토크의 최대값과 최소값의 차이가 감소하는, 예측 가능한 현상을 볼 수 있다. 날개수가 상대적으로 작은 경우 최대 순간 토크의 크기는 커지지만 부분적으로 음의 토크가 발생하는 영역도 있어 평균적인 효율이라든지 일정한 축동력의 공급

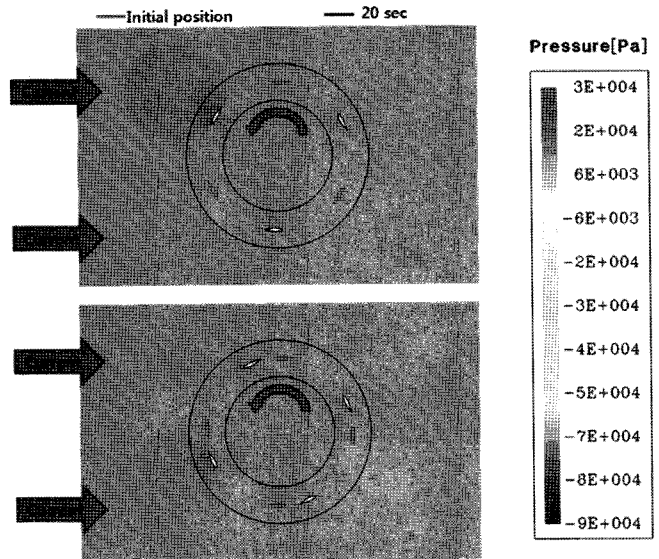


Fig. 13. Typical pressure distributions (20 sec).

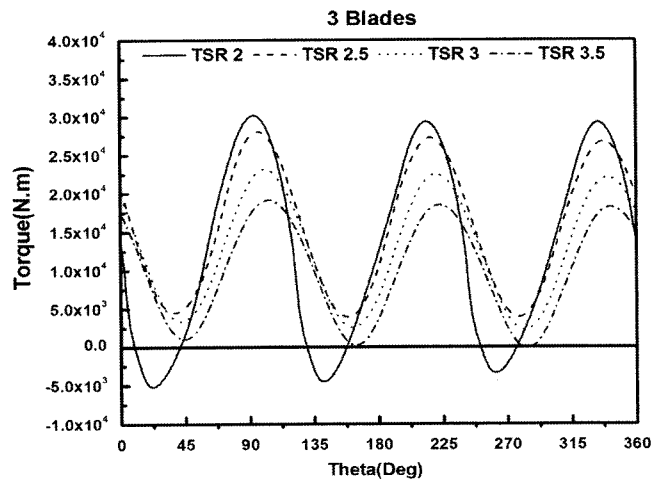


Fig. 14. Variation of torque in time for different TSR values with 3-blade.

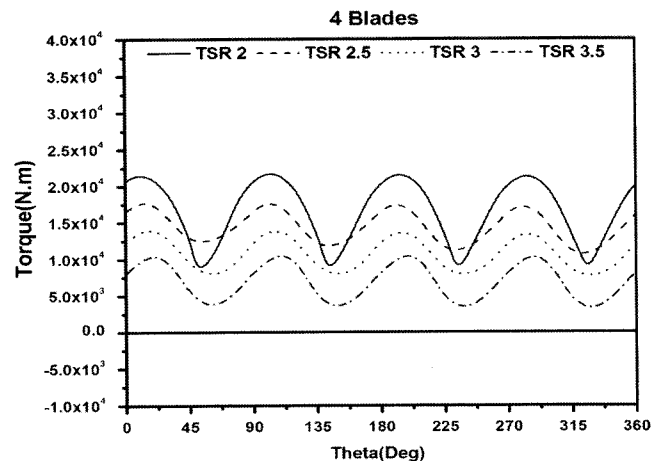


Fig. 15. Variation of torque in time for different TSR values with 4-blade.

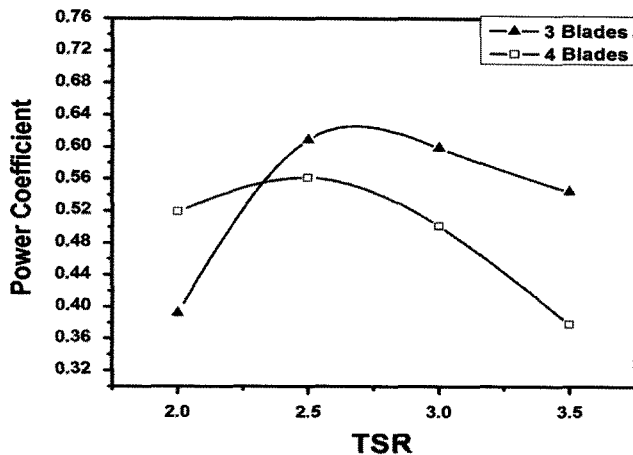


Fig. 16. Power coefficients vs TSR for 3- and 4-bladed turbines.

의 관점에서 주의를 기울일 필요가 있다. 또한 TSR의 증가에 따라 최대 토크의 발생이 약간씩 처져서 나타남을 확인할 수 있고 토크의 평균값과 진폭도 상당히 달라지는 것을 볼 수 있는데, 결론적으로 터빈 성능의 극대화를 위하여 날개수와 TSR, 즉 상대회전속도의 적절한 조합이 요구된다고 하겠다.

터빈 전체에서 발생하는 1주기 동안의 토크를 시간평균하여 Eq. (2)와 같이 축동력으로 정의하고 이를 Eq. (3)으로 터빈의 효율을 구하였다. Eq. (3)의 동력계수(power coefficient,  $C_p$ )는 터빈전체를 유동의 방향에서 바라본 투영면적을 통하여 유입되는 단위시간당 유동운동에너지에 대한 평균축동력의 비이다.

$$P_w = \Omega \cdot T \quad (2)$$

(여기서  $P_w$ =축동력,  $\Omega$ =각속도,  $T$ =토크)

$$C_p = \frac{P_w}{\frac{1}{2}\rho V^2(2RV)} = \frac{P_w}{\rho R V^3} \quad (3)$$

Fig. 16에 계산된 모든 경우에 대한 터빈의 효율을 보였다. 전술한 토의에서 언급한 바와 같이 효율은 날개수와 TSR에 따라 변하고 이들 변수들의 세심한 선택이 중요함을 확인할 수 있다. 날개수 3개와 4개인 경우 모두 TSR=2.5 근처에서 최대 효율이 나타났고, 날개수 3개인 경우가 최대효율이 상대적으로 높았다. 하지만 최대 효율이 보장되는 TSR 영역은 날개수가 4개인 경우가 상대적으로 큼을 확인할 수 있다.

## 5. 결 론

2차원 비정상 RANS 방정식을 이용하여 피치가 고정된 3개 혹은 4개의 날개를 가지는 조류발전용 수직축 터빈주위의 비정상 유동장 해석을 수행하였다. 상용수치해석코드인 FLUENT를 이용하여, 균일류에 놓인 NACA653-018 날개에 대하여 받음각의 변화

를 주며 계산한 유체력은 기존의 실험결과(Abbott[1959])를 재현하였고, 고정 그리드와 회전 그리드를 조합하여 계산한 터빈의 비정상 유동해석 결과는 사용된 수치해법의 효용성을 보여 주었다. 터빈의 최적 효율은 날개수 및 유속 대비 회전수 등의 적절한 조합으로 실현 될 수 있음을 파악하였고, 본 연구의 대상인 단순화된 2차원 계산의 결과는 TSR=2.5 근처에서 최대의 효율이 얻어짐을 관찰 하였다. 향후 피치각의 영향과 날개를 길이 방향으로 꼬아주는 효과 등에 대한 체계적인 연구가 요망 된다.

## 사 사

본 연구는 한국학술진흥재단 기초연구지원사업(KRF-2007-313-D00932)과 교육과학기술부 지원 World Class University(R32-2008-000-10161-0) 사업의 일환으로 이루어졌습니다.

## 참고문헌

- [1] 김태승, 이 철, 손창호, 조창열, 2008, "RANS 방정식을 이용한 HAWT 로터 블레이드의 회전 유동장 해석", 한국전산유체공학회지, 제13권 제2호.
- [2] 에너지관리공단 신·재생에너지센터, 2008, 신·재생에너지 RD&D 전략 2030 해양, 북스힐, 3-26.
- [3] Abbott, H. Ira, von Doenhoff, Albert E. and Stivers, Louis S. JR, 1959, "Summary of airfoil data", NACA Report-824, pp.477.
- [4] FLUENT User's Guide, 2006, FLUENT Inc.
- [5] Glauert, H., 1963, "Airplane Propellers", *Aerodynamic Theory*, Vol., Division edited by W. F. Durand, Dover Publication.
- [6] Menter, F.R., 1993, "Zonal two equation turbulence models for aerodynamics flows", *AIAA-93-2906*.
- [7] Patankar, S.V. and Spalding, D.B., 1972, "A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.15, pp.1787-1806.
- [8] Quinn, John H. Jr, 1944, "Tests of the NACA airfoil section with boundary-layer control by suction", NACA wartime reports L209.
- [9] Sørensen, N.N., Michlesen, J.A. and Schreck, S., 2001, "Detailed aerodynamic prediction of the NREL/NASA ames wind tunnel tests using CFD", *EWEC, Copenhagen*, pp.48-53.
- [10] Sørensen, N.N., Michelsen, J.A. and Schreck, S., 2002, "Navier-Stokes predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80ft x 120ft wind tunnel", *Wind Energy*, Vol.5, pp.151-169.

2009년 1월 23일 원고접수

2009년 2월 17일 심사완료

2008년 2월 19일 수정본 채택