

2엽형 수직축 풍력발전기의 유동해석 및 실험 비교

황미현,¹ 김동현,^{*2} 이종욱,¹ 오민우,¹ 김명환,¹ 류경중¹

AERODYNAMIC ANALYSIS AND COMPARISON OF EXPERIMENTAL DATA FOR 2-BLADED VERTICAL AXIS WIND TURBINE

M.H. Hwang,¹ D.H. Kim,^{*2} J.W. Lee,¹ M.W. Oh,¹ M.H. Kim¹ and G.J. Ryu¹

In this study, aerodynamic analyses based on unsteady computational fluid dynamics (CFD) have been conducted for a 2-bladed vertical-axis wind turbine (VAWT) configuration. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with standard $k-\omega$ and SST $k-\omega$ turbulence models are solved for unsteady flow problems. The experiment model of 2-bladed VAWT has been designed and tested in this study. Aerodynamic experiment of the present VAWT model are effectively conducted using the vehicle mounted testing system. The comparison result between the experiment and the computational fluid dynamics (CFD) analysis are presented in order to verify the accuracy of CFD modeling with different turbulent models.

Key Words : 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 수직축풍력발전기(VERTICAL AXIS WIND TURBINE, VAWT), 난류모델(Turbulent Model), 차량장착공력실험(Vehicle Mounted Aerodynamic Experimental Test)

1. 서 론

풍력발전시스템은 크게 회전축 형식에 따라 수평축 풍력발전기와 수직축 풍력발전기로 구분된다. 일반적으로 수직축 풍력발전기는 수평축 풍력발전기에 비해 풍향에 구애받지 않으므로 약한 바람에서도 풍향에 상관없이 지속적인 회전이 가능하다는 장점이 있다. 우리나라처럼 기후변화가 심하고 풍속과 풍향이 일정하지 않은 지역에서는 풍향의 영향을 적게 받으며 시동풍속이 낮은 수직축 풍력발전기가 적합하다고 할 수 있다.

수평축 풍력발전기의 경우 기존의 BEM(Blade Element Method)나 CFD(Computational Fluid Dynamics)해석을 통하여 비교적 정확한 유동해석연구를 수행하여 개발해 왔다. 하지만 수직축 풍력발전기의 경우 작동원리상 수평축 풍력발전기에 비해 유동특성이 매우 복잡하고 유동박리 현상이나 공력패턴

이 불규칙한 특성이 존재하여 수직축 풍력발전기와 관련된 연구는 대부분 실험적인 결과만을 별도로 제시하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 기존 참고문헌에서 제시된 풍력발전기 실험 모델에 대해서 유동해석을 수행하여 CFD 해석에 대한 검증을 수행하였다. 이를 위해 수평축 풍력발전기해석에 관한 참고문헌[1,2]에 대하여 다양한 난류모델을 적용하여 수행한 후, 결과와 가장 근접한 특성을 나타내는 난류모델을 선정하였으며, 수직축 풍력발전기 실험에 관한 참고문헌에 대해 선정된 난류모델을 적용하여 가상 성능해석기법을 확립하였다.

이를 토대로, 수직축 풍력발전기에서 최대의 효율을 얻을 수 있도록 설계된 자체 개발한 에어포일을 사용하여 2엽 수직축풍력발전시스템을 제작하여 풍동실험과 유동해석을 통해 공력특성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 비정상 점성 유동해석

비정상 압축성 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 유동해석 지배 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

접수일: 2010년 10월 25일, 수정일: 2010년 12월 10일,
게재확정일: 2010년 12월 17일.

1 정회원, 경상대학교 대학원 기계항공공학부

2 정회원, 교수, 경상대학교 기계항공공학부

* Corresponding author, E-mail: dhk@gnu.ac.kr

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \tilde{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\tau_{ij} + R_{ij}] \quad (2)$$

여기서, 전단응력 텐서, 변형 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} = 2\mu[S_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}] \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2}[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}] \quad (4)$$

또한

$$\tilde{u} = u_j - u_{g,j}$$

여기서, $u_{g,j}$ 는 격자속도를 의미한다. 또한 레이놀즈 응력 텐서 R_{ij} 는 Boussinesq 가설에 따라 다음과 같이 가정된다.

$$R_{ij} \cong \mu[S_{ij} - \frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}] - \frac{2}{3}(\rho k)\delta_{ij} \quad (5)$$

식 (2-5)는 제어체적(control volume)을 근간으로 하는 상용 전산유체해석 코드인 Fluent Ver. 6.3을 이용하여 계산된다. 한편 복잡한 유동흐름과 유동박리 현상이 나타나는 VAWT 비정상 유동해석의 수렴성을 향상시키기 위해, 비점성 Euler equation을 적용하여 residuals를 1차 수렴시키고, 난류모델인 SST k- ω 정상상태 해석을 수행하여 2차 수렴시킨 후, 비정상 상태해석을 수행하였다.

본 연구에서는 Navier-Stokes (N/S) 해석을 위해 2차 난류모델인 SST k- ω 모델과 표준형(standard) k- ϵ 모델이 적용되었고, RANS 방정식의 이산화를 위해서 2차 풍상기법(2nd upwind scheme)을 적용하였다.

2.2 SST k- ω Turbulence Model

Shear-Stress Transport (SST) k- ω Model은 난류운동에너지(k)와 난류운동에너지의 비 소산률(ω)로 이루어져있으며 k- ω 모델의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \tilde{G}_k , G_ω , Γ_k , Γ_ω , Y_k , Y_ω 는 다음의 식으로 표현된다.

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \quad \Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$$

σ_k 와 σ_ω 는 각각 k와 ω 의 난류 프란틀 수를 나타내며 μ_t 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega}]}$$

S는 변형률(strain rate)의 크기를 나타낸다.

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1/\sigma_{k,1} + (1-F_1)/\sigma_{k,2}}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1/\sigma_{\omega,1} + (1-F_1)/\sigma_{\omega,2}}$$

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4)$$

$$\Phi_1 = \min[\max(\frac{\sqrt{k}}{0.09 \omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}]$$

$$D_\omega^+ = \max[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}]$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2)$$

$$\phi_2 = \max\left[2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2\omega}\right]$$

여기서 y 는 다음 표면(surface)까지의 거리를 나타내며 G_k , G_ω , \tilde{G}_k 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i},$$

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k$$

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^*k\omega)$$

transitional flows 옵션을 사용하면 $k-\omega$ 난류 모델의 경우, 감쇠계수 $\alpha^* = 1$ 로 적용되는 Low-Reynolds-number 의 수정으로 이루어진다.

2.3 Standard k-ε Turbulence Model

표준형 k-ε Model은 난류운동에너지(k)와 이의 소산율(ε)의 수송방정식을 기본으로 하고 있다. k-ε 모델의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (9)$$

여기서 k 는 난류운동에너지를 ϵ 은 난류운동에너지를 소산 비율을 그리고 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 는 상수를 나타내며 σ_k , σ_ϵ 은 각각 k 와 ϵ 의 난류 프란틀수를 나타내며 G_k , G_b , Y_M 은 각각 다음의 식으로 표현된다.

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (11)$$

식 (11)에서 프란틀수(Pr_t)는 표준형 k-ε 모델의 경우 초기값이 0.85이며 열확산계수(β)는 다음과 같다.

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

$$Y_M = 2\rho\epsilon M_t^2 \quad (12)$$

식 (12)에서 M_t 는 다음과 같다.

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}}$$

또한 난류점성(μ)는 k 와 ϵ 의 조합으로 이루어지며 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

여기서 C_μ 는 상수이며 식 (8,9)에서 사용된 상수 값은 다음과 같다.

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

S_k 와 S_ϵ 은 사용자 정의에 의해 결정되는 항이다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 여러 에어포일에 대해 고 받음각 영역에서의 공력성능을 나타낸 Robert E. Sheldahl, Paul C. Klimas[1]의 결과 중 NACA-0018에 대하여 $Re = 1.6 \times 10^5$ 의 레이놀즈 수에 대해 세가지 난류 모델을 적용하여 실험값과 비교하여 보았다. Fig. 1은 NACA-0018 익형의 비정상 유동해석을 위한 경계조건을 보여주고 있으며 Fig. 2는 유동해석을 위한 격자계를 나타내고 있다. 익형 주변의 boundary는 wall로 정의하였고, 점성효과를 정확하게 계산하기 위해 정렬격자를 이용하였다.

Fig. 3은 $Re = 1.6 \times 10^5$ 에서 표준형 k-ε 모델과 표준형 k-ω 모델, 그리고 SST k-ω 난류모델이 적용된 N/S 해석을 통해 계산된 시간평균 양력계수에 대하여 실험결과[1]와 비교한 것이다. 표준형 k-ε 모델과 표준형 k-ω 모델의 경우는 실속영역에서 정확한 양력값을 예측하지 못하였으며 SST k-ω 모델의 경우는 실속영역을 비교적 정확하게 예측함을 알 수 있었다.

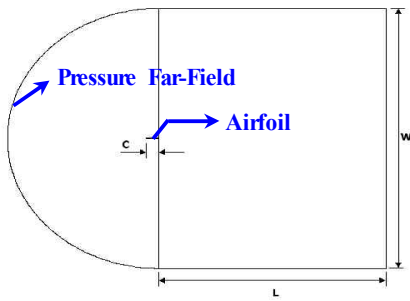


Fig. 1 Boundary condition for CFD analysis

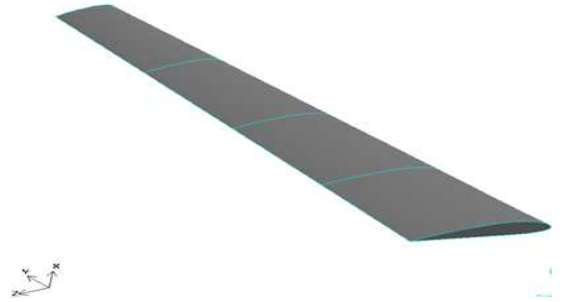
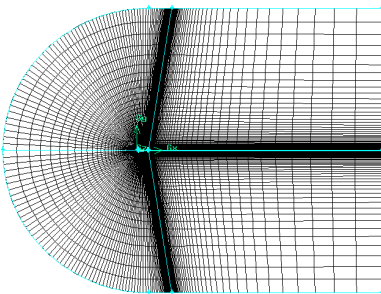
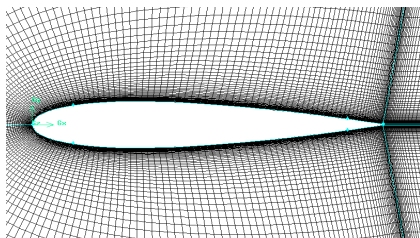


Fig. 4 HAWT rotor blade configuration



(a) Full view



(b) Airfoil view

Fig. 2 Grid structure of NACA-0018 airfoil

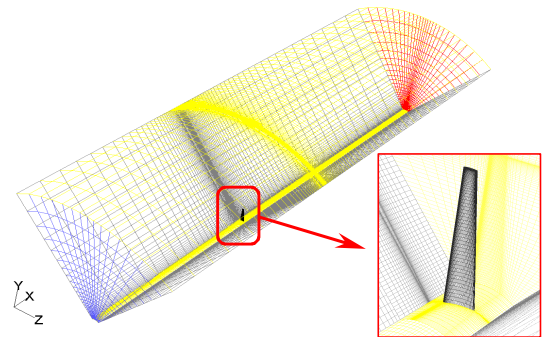


Fig. 5 Grid for 5-blade HAWT model(NACA4415)

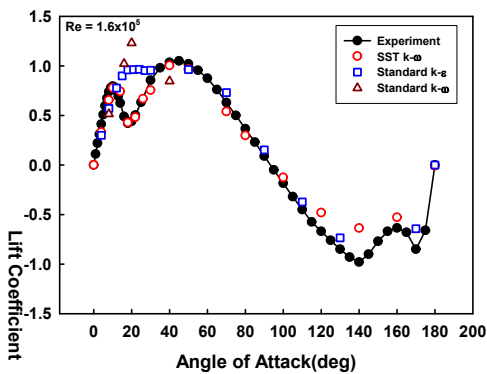


Fig. 3 Lift coefficients for different turbulent models

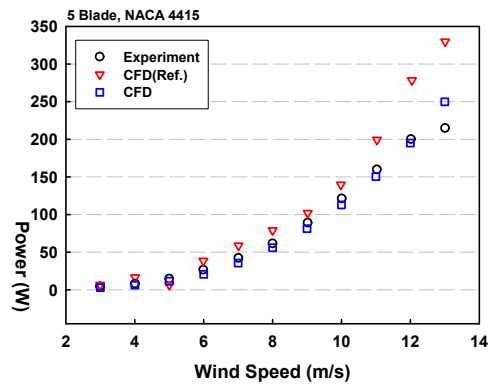


Fig. 6 Comparison of power characteristics of HAWT

앞서 선정된 SST k- ω 모델을 적용한 난류모델을 3차원 수평축 풍력발전기 모델에 적합하지 판단하기 위해 실험결과에 대해 CFD 해석결과가 함께 나타난 출력성능 결과와 비교하여 해석을 수행하였다. 200W급 3차원 5-bladed HAWT 에 대한 성능평가를 수행하였으며, 풍동실험 결과를 참조[2]하고 CFD 해석을 수행하여 형상에 따른 TSR과 출력과의 상관관계를 비교하였다.

5-bladed HAWT의 로터 블레이드의 형상은 Fig. 5와 같이

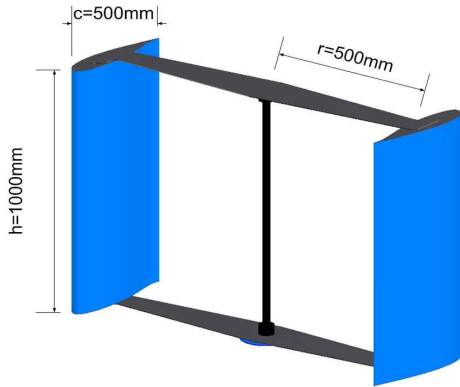


Fig. 7 Configuration of CATIA model



Fig. 8 Configuration of experimental VAWT model

NACA-4415를 사용하였으며 반경 0.362 m, 허브 측 시위길이 0.0759 m, 팁 측 시위길이 0.03 m, 허브와 팁의 비틀림 각은 8deg이다. 전체 계산영역은 길이 4 m, 반경 1.4 m이고, 전체 계산영역은 1/5 부분을 주기조건(periodic condition)으로 처리하였으며, 속도 영역은 2-14 m/s 범위에서 2 m/s 간격으로 계산하였으며, 총 격자수는 108,021개이며 총 노드 수는 108,349 개 이다. 경계조건으로는 density based solver에 SST k- ω 난류 모델을 적용하였으며 총 반복계산 횟수는 7200으로 40회전에 대해 해석하였다. Fig. 6은 5-bladed HAWT 모델의 풍속에 대한 출력선도를 나타내고 있으며, 저 풍속영역에서 잘 일치하고 있으며 고 풍속영역에서 실험결과가 CFD 해석과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

본 실험실에서는 차량실험 시스템을 통해 각 측정값들을 구할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 외부에는 소형 풍력발전기와 풍속 풍향계를 차량에 설치하고 설치한 풍력발전기의 RPM을 측정하기 위한 RPM 측정센서를 소형 풍력발전기에 고정시켰다. 시험 지점에 있는 기상측정 마스트인 풍속 풍향계는 소형 풍력 발전 시스템을 운전시키는 바람의 속도와 방향을 측정하기 위해 소형 풍력발전시스템과 이웃하게 위치하게 되며, 시험지점의 지형은 출력 성능측정에 중요한 영향을 미친다. 따라서 기상측정 마스트와 시험지점은 아래와 같은 점을 고려하여 바람의 흐름변화에 영향을 주는 요인을 고려해야 한다.

- 기상측정 마스트의 위치 결정
- 지형학적 편차
- 장애물들(건물, 나무, 등)

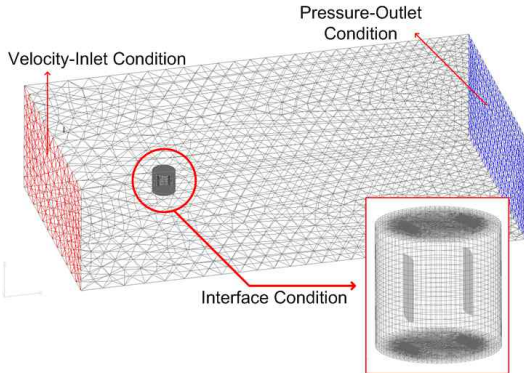
지형학적 편차는 차량시험 시스템의 경우 운행 중 지표면의 편평도를 고려해야 하는데 이를 위해 아스팔트 도로가 10 km 이상 이어진 외곽 국도를 활용하였다. 주위환경은 사방이 트인 공간에서 측정하여 외부 간섭에 기인한 2차 와류 유동 효과를 가능한 배제하였다. 소형풍력발전기와 RPM측정

기, 풍속계로 구성되어 있는 실험 시스템은 차량 외부의 센서에서 전달되는 회전속도(RPM)를 측정할 수 있도록 하였다. 회전속도를 측정하기 위하여 proximity sensor 타입을 적용하였으며 보다 안정적인 측정을 위해 최대 2240 RPM까지 측정할 수 있는 장비를 사용하였다. 풍속 및 풍향 측정기는 측정기간 동안 일정한 보정상태를 유지하는 컵형 풍속계로 측정하였다. 전력계통시스템(electric power system)은 무부하 조건, 부하조건에 대하여 실험을 수행하였다. 무부하 조건은 전기적인 부하의 연결이 없이 발전기 베어링 마찰을 제외한 순수 풍력발전기의 공력성능을 측정할 수 있다.

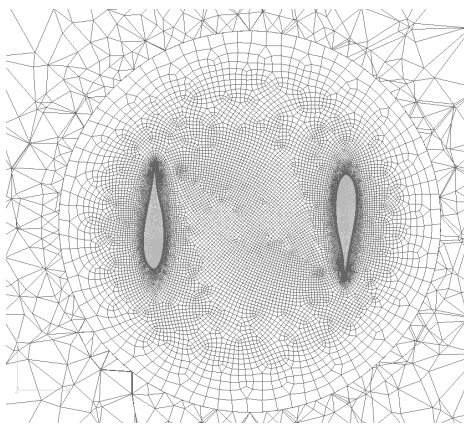
각 출력데이터는 평균 2분 동안 일정한 값이 유지되는 시점에서 수집되었으며, 측정되는 동안 회전속도의 수렴범위는 ± 2 RPM이 되도록 측정하였다. 또한 풍속에 따라 변화하는 출력성능을 정확하게 관찰하기 위하여 충분한 시간간격을 두어 실험을 수행하였다. 또한, Fig. 7,8은 각각 풍동실험에 사용된 VA-03 에어포일 블레이드를 적용한 2 bladed 수직축 풍력발전기의 CATIA 모델과 실물 사진으로써 설계사양은 회전직경 1.0 m, 블레이드 높이 1.0 m, solidity는 0.318이다.

Fig. 9는 자체개발한 2엽 수직축 풍력발전기의 회전 유동 해석을 위해 생성한 3차원 격자계와 회전영역 경계조건을 보여주고 있다. 회전하는 풍력발전기의 유동 점성효과를 충분히 고려하기 위하여 블레이드 주변의 경계층에 격자를 가능한 밀집시켰다. 블레이드를 둘러싸고 있는 원통영역은 블레이드 길이방향으로 정렬격자 형태를 적용하였으며 블레이드 단면 방향의 유동격자 형태는 그림과 같이 비정렬 유동격자를 적용하였다. 또한, 회전영역과 비회전 영역의 경계에는 인터페이스조건을 부여하였으며 본 유동해석을 위한 격자계의 총 격자수는 528,662개이다.

실험 및 해석은 주어진 풍속에서 최대회전수를 나타내는 무부하 조건에서 수행되었으며 무부하 실험조건과 해석결과



(a) Full view



(b) Closed view

Fig. 9 CFD Grid and boundary condition of VAWT model

를 비교하기 위해 각 풍속에서 출력이 0이 되는 회전속도 (RPM)를 찾는 과정을 수행하였다. 비정상 유동해석 시 회전 모멘트 값이 일정한 패턴으로 주기적인 응답을 나타낸 후부터 10회의 유동회전 응답을 나타낼 때 까지 수행되었으며 최종 3회 회전의 평균 모멘트 값을 사용하여 모멘트를 계산하였다.

Fig. 11의 해석에서 각 풍속 당 비정상 유동해석의 반복 (iteration) 계산 횟수는 약 8000번이며 각 반복계산의 하위-반복계산은 최대 20번을 적용하였다. 계산에 사용된 컴퓨터는 Intel Core2 Quad 2.66GHz CPU에 4GB RAM과 500GB HDD 사양의 하드웨어이며 1개의 CPU사용을 기준으로 1000번 반복계산에 약 1800초의 계산시간이 소요되었으며 총 8000번 계산에 약 240분의 계산시간이 소요되었다.

Fig. 10,11을 보면 주어진 풍속에 대한 최대 회전조건에서 2차원 및 3차원 회전조건을 실험결과에 대해 비교해보았다. 2차원 해석결과는 블레이드의 단위길이(1 m)에 대한 유동해석

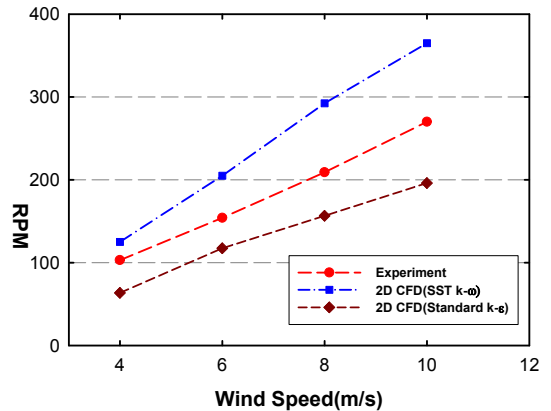


Fig. 10 Comparison between 2D CFD analyses and experiment

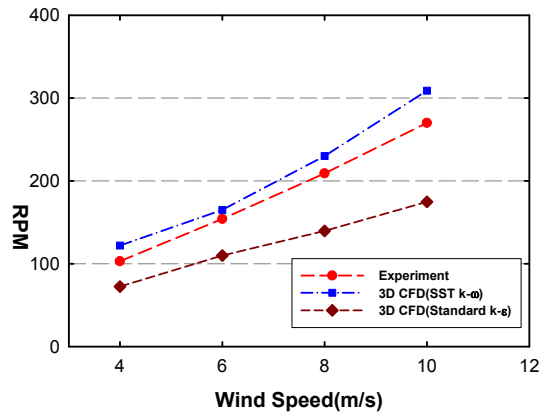


Fig. 11 Comparison between 3D CFD analyses and experiment

결과로 3차원 날개의 끝단 손실효과가 고려되지 않은 결과이다. 따라서 SST k- ω 난류모델이 예측한 회전속도 값은 실험 결과보다 상당히 높게 나타남을 볼 수 있다. 하지만 Fig. 11의 결과를 보면 SST k- ω 난류모델을 사용하여 예측한 결과가 실제 실험결과에 상당히 근접함을 볼 수 있다. 여기서 CFD 유동해석 결과가 실험결과보다 다소 높게 나타나는 이유는 실제 실험에서 베어링 마찰효과 및 암(arm)의 항력토크효과가 고려되지 않았기 때문이다. 또한, Fig. 11을 보면 표준형 k- ϵ 난류모델은 각 풍속영역에서 실험결과의 회전수보다 상당히 낮게 예측된 결과를 보여주고 있는데 이는 수직축풍력발전기의 유동해석에는 부적합함을 알 수 있다.

Fig. 12는 풍속 10 m/s에서 회전하는 블레이드의 서로 다른 위치(azimuth angle = 0, 45, 90deg)에서의 유동흐름을 유선으로 가시화한 것이다. 방위각이 변환에 따라 블레이드 사이와 후류에서의 유동흐름 패턴이 다양하게 변하는 것을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 2차원 및 3차원 공력해석 기법을 활용하여 바람에 대해 회전 운동하는 풍력발전기 로터의 상호간섭 및 유동의 점성효과를 고려한 성능예측기법을 실험결과와 비교하여 성공적으로 구축하였다. VAWT가 주로 경험하는 고 받음각에 적합한 난류모델 선정을 위해 다양한 난류모델을 적용하여 고 받음각 에어포일에 대한 해석을 수행하였으며 선정된 SST $k-\omega$ 모델에 transitional flow를 적용한 난류모델을 3차원 HAWT 실험결과에 대하여 비정상 해석을 수행하여 검증하였다. 본 연구를 통하여 SST $k-\omega$ transitional flow 난류모델을 적용하는 경우 풍력발전기의 성능예측을 정확히 수행할 수 있었다. 향후 LES 난류모델에 대한 해석 수행을 통하여 보다 다양한 난류모델에 대한 검증을 수행할 예정이며 이러한 해석적 기법은 중대형의 고효율 VAWT 설계 시 보다 정확한 성능해석 및 데이터 확보를 가능하게 해 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 1981, Robert, E.S. and Paul, C.K., "Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines," *SANDIA REPORT*, SAND80-2114 UC-261, pp.45-47.
- [2] 2006, 이종훈, 이연원, 김영덕, 최윤환, 김정환, 박광열, "복합시스템 가로등용 소형 풍력 터빈 설계 및 성능평가," *한국풍공학회*, 제10권, 제1호, pp.119-125.
- [3] 2007, Bravo, R., Tullis, S. and Ziada, S., "Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind Turbine," *21st Canadian Congress of Applied Mechanics CANCAM*.
- [4] 2009, 김동현, 박강균, 이종욱, 최현철, 김대룡, "차량 장착시험 시스템을 이용한 소형 풍력발전기의 성능평가," *풍력에너지학회 추계학술대회*, pp.376-382.

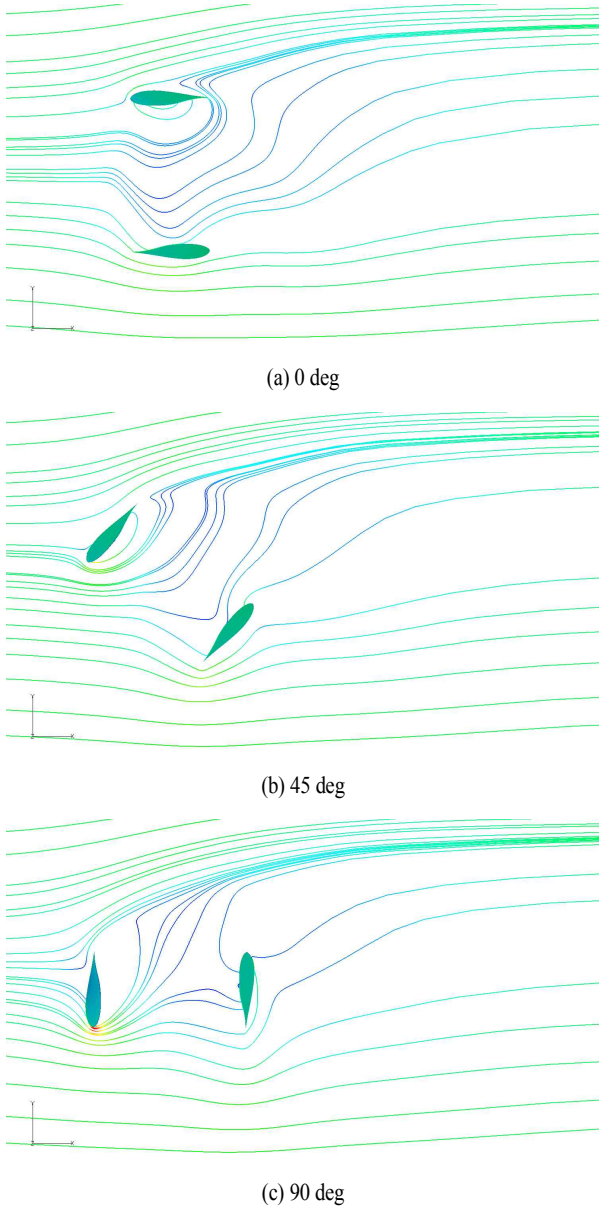


Fig. 12 Stream line for various azimuth angles at 10 m/s