LES 난류모델을 이용한 4엽형 수직축 풍력발전기 공력해석 및 실험

류 경 중,¹ 김 동 현,^{*2} 추 헌 호,¹ 심 재 박¹

¹경상대학교 항공특성화대학원

²경상대학교 항공우주시스템공학과 및 그린에너지융합연구소

AERODYNAMIC ANALYSIS AND EXPERIMENTAL TEST FOR 4-BLADED VERTICAL AXIS WIND-TURBINE USING LARGE-EDDY SIMULATION (LES) TURBULENCE MODEL

G.J. Ryu,¹ D.H. Kim,^{*2} H.H. Choo¹ and J.P. Shim¹

¹Graduate School of Aerospace Engineering, Dept. of Aerospace Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

²Dept. of Aerospace and System Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ. &

Research Institute for Green Energy Convergence Technology

In this study, aerodynamic analyses have been conducted for 4-Bladed Vertical-Axis Wind Turbine (VAWT) configuration and the results are compared with experimental data. Reynolds-averaged Navier-Stokes equation with LES turbulence model is solved for unsteady flow problems. In addition, the computation results by standard $k-\omega$ and SST $k-\omega$ turbulence models are also presented and compared. An experiment model of 4-Bladed VAWT model has been designed and constructed herein. Experimental tests for aerodynamic performance of the present VAWT model are practically conducted using the vehicle mounted testing system. Comparison results between the experiment and the computational fluid dynamics (CFD) analyses are presented in order to show the accuracy of CFD analyses using the different turbulent models.

Key Words : 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 수직축풍력발전기(Vertical Axis Wind Turbine, VAWT), 난류모델(Turbulent Model), LES(Large Eddy Simulation), 차량장착시험(Vehicle Mounted Test)

1. 서 론

풍력발전시스템은 회전 방식에 따라 수평축 풍력발전기와 수직축 풍력발전기로 구분된다. 수평축 풍력발전기는 풍향의 변화에 따라 블레이드 회전면이 항상 수직으로 위치하도록 제어되며 풍향 전환 시 필연적으로 회전속도의 저감 현상이 발생되고, 블레이드 끝단에서 강한 볼텍스 생성으로 공력소음이 큰 단점이 있다. 하지만, H-형 수직축 풍력발전기는 운전 중 풍향이 변화해도 회전속도가 지속적으로 유지되며, 블레이드에서 발생된 회전력이 암 끝단에서 모두 작용하기 때문에

저속에서 기동특성이 우수한 특성이 있다. 또한 공력소음 수준이 수평축의 60~70% 이하로 정적풍속 수준에서도 환경소음 규제 수준에 부합되기 때문에 주택가 설치의 경우에도 발생 소음과 관련된 민원 발생 가능성이 매우 적은 장점이 있다. 공기역학적 원리상 그 원리상 회전속도의 직경 증가에 따른 수직축 풍력발전기는 수평축 풍력발전기에 비해 풍향에 구애받지 않으므로 약한 바람에서도 지속적인 회전이 가능하다는 장점이 있다. 그러므로 건물과 건물 사이의 국부 바람간섭 효과로 풍속 및 풍향의 변화가 심한 도심지역이나 지역적 특성으로 풍향변화가 심한 장소에서도 높은 효율의 발전이 가능하기 때문에 최근 영국을 포함한 선진국에서는 도심지역 공동건물 옥상, 공용시설 및 학교 등에 수직축 풍력발전기를 설치하는 추세가 증가되고 있다(Fig. 1).

수평축 풍력발전기의 경우 기존의 BEM (Blade Element Method)나 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 통하여 비교적 정확한 유동해석연구를 수행하여 개발해 왔다. 하지만

Received: August 9, 2011, Revised: September 14, 2012,

Accepted: September 17, 2012.

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

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2012.17.3.011

© KSCFE 2012

Fig. 1 Roof top mounted VAWT (England)

수직축 풍력발전기의 경우 수평축에 비해 보다 다양한 형태의 모델들이 있으며, 수직회전 원리상 블레이드 방위각에 따라 유입흐름 전방에서 통과한 블레이드 후류가 뒤쪽에 위치한 블레이드와 간섭작용을 일으키게 된다. 수평축 풍력발전기에 비해 유동특성이 매우 복잡하고 고반음각 유동박리 현상이나 공력패턴이 불규칙한 특성이 존재하여 적절한 공력해석 기법 선정 및 특성분석과 관련된 연구가 여전히 부족한 실정이다.

본 연구에서는 수직축 풍력발전기 실제 실험모델에 대해 다양한 난류모델로 유동해석을 수행하여 결과를 비교 하였다. 또한 CFD 해석 결과와 실제 실험결과와 비교를 통해 난류모델이 4엽형 수직축 풍력발전기 유동해석 특성에 미치는 영향을 검토하고자 한다. 이를 위해 수평축 풍력발전기 유동해석에 관한 기존 참고문헌[1-2]을 분석하였으며, 수직축 풍력발전기 실험 및 유동해석에 관한 참고문헌[3-4]에서 선정된 난류모델을 기본적으로 적용하여 실험결과와 비교하였다. 본 연구에서 검토한 수직축 풍력발전기는 경상대학교 벤처기업인 씨에이코리아(주)에서 공동개발 및 관련 기술이 특허 등록되었으며, 저풍속 기동특성 및 고풍속 회전 진동특성이 우수한 4개의 블레이드를 가지는 모델이다. 본 연구에서는 보다 정확한 해석결과 도출을 위해 LES(Large Eddy Simulation) 난류모델에 기반하여 비정상 유동해석을 추가로 수행하였다. 또한 수직축 풍력발전기는 블레이드 개수 및 형상에 따라 유동특성이 상당히 달라질 수 있는데, 특성에 따라 난류 모델의 정확도에 도 다소 차이가 발생할 수 있음을 보였다.

2. 이론적 배경

2.1 비정상 점성 유동해석

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

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

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

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, $\tilde{u} = u_j - u_{g,j}$ 이다. 여기서, $u_{g,j}$ 는 격자속도를 의미한다. 또한 레이놀즈 응력 텐서 R_{ij} 는 Bossinesq 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 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. 풍력발전기 실험결과와 비교를 위한 수직축 풍력발전기 난류 점성유동해석에는 Fluent (Ver. 6.3)를 활용하였다.

2.2 LES Turbulent Model Filtered Navier-Stokes Equations

LES(Large Eddy Simulation)에 대한 지배방정식은 Fourier (wave-number) space 또는 configuration (physical) space의 Navier-Stokes 방정식에서 필터링 함으로써 얻을 수 있다. 이 결과 방정식은 large eddies의 동적 지배를 받게 된다. 필터링된 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{\Phi}(x) = \int_D \Phi(x') G(x, x') dx' \quad (6)$$

여기서 D 는 유동장이다. Fluent에서 유한체적을 분할하게 되면 다음과 같은 식으로 된다.

$$\bar{\Phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \Phi(x') dx', \quad x' \in V \quad (7)$$

여기서 V 는 계산되는 셀의 체적이며, eddies의 크기가 결정된 필터 함수 $G(x, x')$ 는 다음 식에 의해 정해진다.

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, & x' \in V \\ 0, & x' \text{ otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

Fluent 유동해석 프로그램에서 LES 모델은 압축성 유동에 적용된다. 하지만 축약된 다음 이론은 비압축성 유동에 적용되는 식이다. Navier-Stokes 방정식에서 필터링하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (9)$$

그리고

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (10)$$

여기서 σ_{ij} 는 다음에 의해 정의되는 전단응력이다.

$$\sigma_{ij} \equiv \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (11)$$

또한 τ_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_{ij} \equiv \overline{\rho u_i u_j} - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (12)$$

Smagorinsky-Lilly Model

이 모델은 Smagorinsky에 의해 처음 고안되었으며 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| S_{ij} \quad (13)$$

Smagorinsky-Lilly 모델에서 eddy viscosity는 식 (14)에 의해 정의된다.

$$\mu_{sgs} = \rho (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (14)$$

Fig. 2 Lab-view system configuration of VAWT model

여기서, $\Delta = (Volume)^{\frac{1}{3}}$ 을 말하며 계산되는 셀의 체적이다. 그리고,

$$\bar{S} = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (15)$$

이다. effective viscosity는 다음으로부터 계산된다.

$$\mu_{eff} = \mu_{mol} + \mu_{sgs} \quad (16)$$

Smagorinsky 상수 C_s 는 보통 다음의 값을 가진다.

$$C_s = 0.1 \sim 0.2$$

본 연구에서는 유동해석에서의 수렴성을 가속시키기 위해 우선 비점성 Euler 방정식을 적용하여 정상상태 residual을 1차 수렴시킨 후 난류모델을 적용하여 추가 정상상태 해석으로 2차 수렴시키고 본격적인 비정상 난류 유동해석을 수행하였다

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 차량장착 시험 시스템을 통해 풍력발전기의 성능을 실험적으로 예측하였으며, 차량장착 시험평가 기법에 대한 검증결과는 참고문헌[5]를 참조하기 바란다. 차량 내부에서는 Fig. 2에서와 같이 각 센서에서 실시간으로 출력되는 전류, 전압, 전력, 회전속도 및 풍속 등을 LabView 시스템으로 실시간 모니터링 할 수 있게 되어 있다. 측정 데이터는 IEC 61400-1 규정에 부합하도록 초당 2개의 데이터 값을 실시간으로 저장할 수 있도록 모니터링 프로그램을 자체 구축하였다. 그리고 차량외부에는 실험용 소형풍력발전기의 전방에 풍속계 및 풍향계를 설치하여 풍속에 따른 풍력발전기의 성능이 정확하게 예측될 수 있도록 하였다.

Fig. 3 Grid of vehicle mounted testing system

Fig. 4 Vehicle mounted testing system with experimental VAWT model

전력계통시스템 (electric power system)은 CFD 유동해석 결과와 용이한 비교를 위해 무부하 조건에 대하여 실험을 수행하였다. 무부하 조건은 전기발전기의 전기적인 부하 효과를 배제시킬 수 있기 때문에 순수한 풍력발전기 자체의 기본적인 공력 회전특성을 파악하는데 유용하다. 차량장착 시험시 풍력발전기와 차량의 간섭효과를 사전에 파악하고 적절한 타워 최소 높이를 산정하기 위한 유동해석을 수행하였다.

시험용 차량에 대한 유동해석 격자는 Fig. 3에 제시하였으며, 유동 점성효과를 충분히 고려하기 위하여 차량모델의 표면에 밀집된 경계층 격자를 형성하였다. 본 유동해석 격자는 3차원 육면체(hexahedron) 요소로 이루어져 있으며 총 1,136,633개의 격자수를 가진다. 차량간섭 유동해석은 해면고도에서 입구속도 9 m/s 및 14 m/s에 대해 수행되었으며, 대기압 101,325 Pa, 온도 288.15 K 조건을 적용하였고, 난류모델은 SST k- ω transitional flow 모델을 적용하였다. Fig. 4은 3차원 CAD 모델링에 기초하여 시험용 수직축 풍력발전기 및 타워의 위치를 나타낸 것이다. Fig. 5는 유동해석 결과로 시험용 차량 표면의 압력분포와 주변 유속흐름을 나타내었다. 해석결과를 보면 시험용 풍력발전기가 설치될 타워 높이 이상에서는 유동 흐름이 상당히 균질함을 파악할 수 있다. 실제 해석상의 풍속과 비교하여 차량의 전면부에서부터 속도 증가가

Fig. 5 Pressure contour and velocity streamlines

Fig. 6 Geometric configuration of the present 4-bladed VAWT model with small test tower

나타났으나 풍력발전기가 설치되어 있는 블레이드 위치상의 유속의 경우 고른 유속을 보여주고 있으며 해석에 적용한 속도와 큰 차이를 보이고 있지 않고 있다.

Figs. 6~7은 본 연구에서 고려한 4엽형 수직축 풍력발전기 3차원 CAD 모델 및 실제 제작모델을 보여주고 있으며, 블레이드의 기본 설계사양은 연구실에서 개발한 수직축 풍력발전기용 에어포일(VA-01) 단면을 가지며 회전직경 1.4 m에 블레이드 높이는 1.6 m이다. Fig. 8은 자체 설계 개발한 4엽 수직축 풍력발전기의 회전 유동해석을 위해 생성한 회전영역 경계조건과 3차원 격자계를 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 단면방향의 유동격자 형태는 그림과 같이 비정렬 유동격자를 적용하였다. 또한, 회전영역과 비회전 영역의 경계에는 인터페이스조건을 부여하였으며, 본 유동

Fig. 7 4-bladed VAWT experimental model

Fig. 8 CFD Grid and boundary condition of VAWT model

해석을 위한 격자계의 총 격자수는 1,058,929 개다.

실험 및 해석은 주어진 풍속에서 무부하시 풍력발전기의 최대 회전수를 나타내는 공력 평형조건에서 수행되었다. 이리

Fig. 9 Comparison of rotational speed for various wind-speed (Experiment vs. CFD)

한 조건은 CFD 비정상 유동 해석 시 주어진 풍속에서의 실험 회전속도 부근에서 회전속도를 변화시켜가면서 블레이드의 평균 회전토크 값이 0 이 되는 지점을 찾는 방식으로 진행된다. 인접한 회전속도에서 CFD 해석의 평균 회전토크가 (+)에서 (-)로 바뀌는 지점을 선형보간 기법을 통해 계산하였다. 회전모멘트 값은 일정한 패턴으로 주기적인 응답을 나타낸 후부터 충분한 수렴을 위해 10회의 유동회전 응답을 나타낼 때 까지 수행되었으며 최종 3회 회전의 평균 모멘트 값을 사용하여 CFD 해석에서의 최종 토크를 산정하였다.

Fig. 9는 차량장착시험 및 서로 다른 난류모델을 적용한 CFD 유동해석 비교결과를 보여주고 있다. 본 해석에서 각 풍속 당 비정상 유동해석의 iteration수는 840 번이며 각 iteration의 sub-iteration은 최대 30 번을 적용하였다. 1 회 iteration할 때에 풍력발전기가 3° 간격으로 회전하도록 하였으며 이를 이용해 time step을 계산해 적용하였다. 계산에 사용된 서버컴퓨터는 Intel(R) Core(TM) i7-2600 3.40 GHz CPU에 8 GB RAM과 1 TB HDD 사양이며, 3 개의 CPU를 병렬처리 하는 기준으로 20 번 반복계산에 약 30 분의 계산시간이 소요되었고 총 840 번 계산에 약 21 시간의 계산시간이 소요되었다. LES 모델의 해석 수행 시 SST k-ω 해석과 동일하게 진행되며 요구되는 시간통계를 위한 Data Sampling을 이용하여 600 번의 계산을 추가적으로 수행하여 최종 수렴시켰다. 본 해석모델의 경우 LES 난류모델을 적용한 경우의 총 계산시간은 SST k-ω 난류모델에 비해 상대적으로 약 1.6 배 증가됨을 관찰하였다. 결과를 보면 LES 난류모델을 사용하여 해석한 결과가 실제 실험 결과에 가장 근접함을 알 수 있다. 이는 이론적으로도 LES 해석이 복잡한 난류특성을 가장 잘 모사할 수 있기 때문인데, 이는 0 도 및 45 도 방위각(azimuth angle)에서 유적선(streakline)을 비교한 Fig. 10을 참조해도 알 수 있다. 부수적으

Fig. 10 Comparison of two-dimensional streaklines at 10 m/s(SST k- ω vs. LES turbulence model)

로 본 CFD 해석에서는 베어링 마찰효과 및 평판(plate)형 압(arm)의 항력토크 효과가 고려되지 않았으며, 베어링에 대한 영향이 상대적으로 미약하나 블레이드 압의 항력토크 효과는 회전속도가 증가될수록 차이를 유발하는 원인이 될 수 있다.

Fig. 11 Comparison of three-dimensional streaklines at 10 m/s(SST k- ω vs. LES turbulence model)

실험은 회전축 베어링의 마찰효과와 블레이드 압의 항력토크 효과가 고려되어 있으므로 LES난류모델의 해석결과와 같이 해석결과가 실험결과보다 약간 높게 도출되는 것이 물리적으로도 타당한 결과이다.

기존의 해석 및 실험결과 비교에서도 잘 나타났던 바이지만 표준형(standard) k- ϵ 모델은 수직축 풍력발전기 해석에는 상당히 부적합함을 알 수 있다. 또한 수직축 풍력발전기의 블레이드 개수가 적어 상호 간섭영향이 적은 경우에는 SST k- ω 모델 또한 어느 정도 결과를 잘 예측하였으나[4], 본 모델과 같이 블레이드 개수가 4개 이상으로 증가하는 경우에는 보다 고차의 LES 난류모델을 적용하는 경우 보다 정확한 해석결과를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

Figs. 10~11은 풍속 10 m/s에서 회전하는 블레이드의 대표적인 방위각(azimuth angle)에서의 유적선(streakline)을 비교한 결과이다. 결과를 보면 CFD 해석에서 예측한 수직축 풍력발전기 내부통과 유동 양상이 상당히 다르게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 본 결과를 보면 LES 모델의 경우가 복잡한 난류 유동특성을 보다 세밀하게 반영하기 때문에 회전하는 블레이드에서 추출하는 에너지 수준이 상대적으로 높아서 블레이드 중심부를 통과하는 후류의 에너지가 줄어들어 흐름의 교란이 보다 복잡해지는 경향을 볼 수 있다. 블레이드가 추출하는 에너지가 상대적으로 크다는 점은 물리적으로는 블레이드 평형

회전속도를 보다 높게 예측하게 되고 이러한 영향이 Fig. 10에 나타나게 되는 것으로 판단된다. 수직축 풍력발전기의 경우 블레이드 개수가 증가할수록 저속기동 특성 및 고속회전 진동특성이 좋아지는 경향이 있는데, 블레이드 개수와 난류모델에 따른 경향성을 보다 명확하게 파악하기 위해 향후 5개의 블레이드를 가지는 수직축 풍력발전기에 대한 실험과 해석을 추가적으로 수행하고 비교할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 4개의 블레이드를 가지는 자이로밀형 수직축 풍력발전기에 대해 LES 난류모델을 고려한 3차원 유동해석을 수행하였으며, 실제 실험모델을 제작하고 차량장착시험을 수행하여 풍속에 따른 결과를 비교하였다. 수직축 풍력발전기의 경우 회전하는 블레이드 사이에 유동간섭 효과가 블레이드 수가 증가함에 따라 더욱 심해지게 된다. 실험결과와 비교한 결과 본 연구에서 고려한 4개의 블레이드를 가지는 수직축 풍력발전기의 경우 블레이드 간섭효과 심화로 인해 기존 풍력발전기 해석에 광범위하게 사용하고 있는 SST $k-\omega$ 난류모델 보다 LES 난류모델이 실험결과에 보다 근접하는 결과를 제시함을 파악하였다.

후 기

본 논문은 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지미래선도인력

양성사업 결과의 일부이며, 지원에 감사를 표하는 바입니다 (No. 20114010203070).

참고문헌

- [1] 1981, R. E. Sheldahl and P. C. Klimas, "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, J.H. Lee, Y.W. Lee, Y.D. Kim, Y.H. Choi and J.H. Kim, K.Y. Park, "Design and Performance Evaluation of Small Wind Turbine for a Streetlight," *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol.10, No.1, pp.119-125.
- [3] 2007, R. Bravo, S. Tullis and S. Ziada, "Performance Testing of a Small Vertical-Axis Wind Turbine," *21st Canadian Congress of Applied Mechanics CANCAM*.
- [4] 2010, M.H. Hwang, D.H. Kim, J.W. Lee, M.W. Oh, M.H. Kim and G.J. Ryu, "Aerodynamic CFD Analysis and Comparison of Experimental Data for 2-Bladed Vertical Axis Wind Turbine," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No4, pp.85-91.
- [5] 2010, J.W. Lee, D.H. Kim, K.K. Park, C.H. Chul and D.R. Kim, "Performance Evaluation of Small Wind Power System Using Vehicle Mounted Testing System (VMTS)," *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol.14, No3, pp.207-213.