

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.3.201

미끄럼 격자를 이용한 HAWT 시스템 주위의 비정상 유동장 해석

이치훈*, 김상곤*, 조창열**

Unsteady Flow Analysis Around a HAWT System Using Sliding Mesh Technique

Chi-Hoon Lee*, Sang-Gon Kim* and Chang-Yeol Joh**

ABSTRACT

An unsteady RANS analysis study of the 3-D flow around the NREL Phase VI horizontal axis wind turbine(HAWT) was performed using sliding mesh approach. Two different analysis models such as rotor-only and rotor with tower/nacelle were constructed to investigate the blade/tower interaction. Analysis results for the rotor with tower/nacelle were compared with the corresponding NREL's experimental data which produced fairly good validation of the present CFD model. Comparison of flows around those two models also clearly showed the blade/tower interaction even it was small for upwind configuration. Other visualization results and integrated aerodynamic loads including torque of the blade demonstrated the effective unsteady flow simulation capability of the present CFD model.

초 록

NREL Phase VI 수평축 풍력터빈 주위의 3차원 유동에 대하여 미끄럼 격자 기법을 사용한 비정상 RANS 해석을 수행하였다. 블레이드/타워의 간섭영향을 해석하기 위하여 로터단일과 로터/타워/나셀의 2가지 해석 모델을 구축하였다. 로터/타워/나셀의 해석 결과를 NREL의 실험데이터와 비교하여 CFD 해석모델의 유용성을 확인하였다. 두 모델에 의한 해석 결과의 비교를 통하여 비록 상풍형 풍력터빈으로서 작기는 하지만 타워/나셀의 영향이 확실히 나타나는 것을 확인하였다. 다른 가시화 결과와 토크를 포함한 적분 공력 하중 등도 구축한 CFD 모델의 비정상 유동해석 능력이 효과적임을 보여주고 있다.

Key Words : Unsteady Flow(비정상 유동), Sliding Mesh(미끄럼 격자), Horizontal-Axis Wind Turbine(수평축 풍력터빈), Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation (레이놀즈 평균 나비에 스토크스 방정식)

1. 서 론

풍력터빈(wind turbine)에 대한 공기역학 해석은 전통적으로 Glauert[1]의 깃 요소 운동량

† 2010년 12월 27일 접수 ~ 2011년 2월 8일 심사완료

* 정희원, 울산대학교 항공우주공학과 대학원

** 정희원, 울산대학교 항공우주공학과

교신저자, E-mail : johcy@mail.ulsan.ac.kr

울산시 남구 대학로 102

(blade element momentum; BEM) 이론을 사용해 왔으나, 최근에는 덴마크의 RISO, DTU를 비롯한 독일의 DLR, 스웨덴의 FOI 및 미국의 NASA, NREL 등 대규모 국립 연구소를 중심으로 Navier-Stokes 방정식을 사용한 유동해석 연구가 활발히 수행되고 있다. 이는 NASA Ames의 NREL 실험[2]과 NREL/NWTC 공력 블라인드 테스트[3]에 의하여 풍력터빈 주위의 유동장이 철저한 3차원 비정상 유동이며, 이를 제대로 모

사하기 위해서는 Navier-Stokes 해석이 필요하다는 사실에 기인한 바 크다.

풍력터빈 로터만(rotor-only)의 유동은 기본적으로 회전방향에 대한 대칭이므로 비대칭형 흐름에 비해 상대적으로 해석하기 쉽다. Sorensen 등 [4]을 비롯하여 비교적 많은 Navier-Stokes 해석이 이미 수행된 바 있다. 여기에는 비압축성/압축성 해석, 포텐셜/N-S 해석을 결합한 복합기법(hybrid method)등의 서로 다른 유동해법과, 여러 난류모델, 천이모델을 달리하는 다양한 접근법들이 사용되었다. 그러나 대부분 회전기준계(rotational reference frame)를 사용한 정상흐름 해석에 기반을 두고 있다.

한편, 타워나 나셀을 포함한 풍력터빈 전체 형상에 대한 CFD 해석은 회전방향에 대한 비대칭 흐름이므로 회전기준계를 사용하여 정상유동화할 수가 없다. 이를 해석하려면 기본적으로 비정상 유동해법이 필요하고, 더불어 비대칭 경계와 회전 대칭인 로터를 동시에 취급하기 위한 특별한 격자구성이 필요하게 된다. Duque 등[5]의 NASA-Ames Phase II 로터에 대한 해석을 비롯하여 Zahle과 Johansen[6], Gomez-Iradi[7]등이 대표적인 비정상 유동해석이며, 이들은 모두 중첩격자(overset grid)를 사용하여 해석하고 있다.

또 다른 방법으로 Janajreh 등[8]과 같이 터빈류나 헬리콥터 로터 등과 같은 회전 유체기계에 사용되는 미끄럼 격자(sliding mesh)를 풍력터빈에 적용한다. 본 논문에서도 미끄럼 격자를 사용하였다. 중첩격자는 상대운동이 임의적이거나 해의 일부로서 연속 변화할 경우에 유연하게 해석할 수 있는 접근법이다. 다만 이를 위해서는 중첩격자점의 위치탐색, 홀 컷팅, 보간 등의 복잡한 단계를 거쳐야 한다. 미끄럼 격자는 상대적으로 미끄럼면을 미리 지정하고 표면(surface) 단위로만 중첩탐색과 보간을 하기 때문에 중첩격자에 비하면 계산이 간편하다. 풍력터빈의 회전 유동장 해석에서는 회전면을 명확히 지정할 수 있기 때문에 상대적으로 간편한 미끄럼 격자를 사용하였다.

본 연구는 김태승 등[9]의 로터 모델에 대한 3차원 정상 Navier-Stokes 유동해석에 이어서, 풍력터빈 시스템을 보다 정교하게 설계하고 분석할 수 있는 바탕이 되는 비정상 CFD 유동해석 모델 구축에 관한 것이다. 비정상 CFD 해석 모델은 풍력터빈에 대한 전단풍을 포함한 동적 풍환경의 영향, 블레이드 소음해석, 블레이드의 공력과 구조적 특성이 상호 연계된 공력탄성학적 해석 및 설계, 블레이드 주변 지형 또는 나셀/타워와 같

은 구조물과의 간섭효과 등의 다양한 분야에 활용될 수 있다.

II. 해석 모델

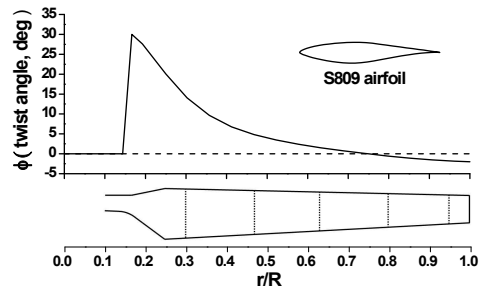
2.1 해석 모델의 선정

해석 대상으로 삼은 풍력터빈 모델은 NASA-Ames 연구소의 80ft×120ft NFAC(National Full-Scale Aerodynamics Complex)풍동에서 실험을 수행한 NREL Phase VI 풍력터빈[2]이다. 실험 레이놀즈수 약 1×10^6 , 차폐율(blockage) 2% 이하이며 풍부한 실험 자료가 제공되어 CFD 해석 결과에 대한 검증이 용이하다.

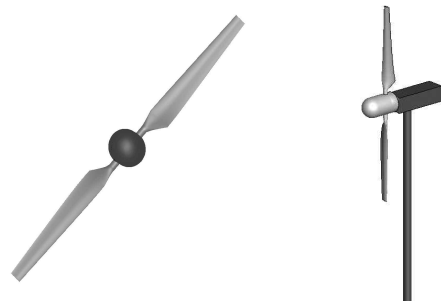
2.2 해석 모델의 형상

로터와 타워/나셀을 포함하는 풍력터빈시스템 전체의 비정상 유동장을 해석하며, 로터와 타워/나셀간의 간섭효과도 함께 계산하기 위하여 로터 단일(rotor-only) 모델과 나셀/타워를 포함하는(rotor with nacelle/tower) 2가지 모델을 구성하였다.

NREL Phase VI 로터는 2개의 블레이드로 구성되어 있으며, Fig. 1에서 보는 것과 같이 반경



(a) Geometry of the NREL Phase VI rotor blade



(b) Rotor-only and rotor/nacelle/tower models

Fig. 1. Modelling of the NREL Phase VI wind-turbine configurations

5.03m, 선형 테이퍼, 비선형적인 비틀림각을 가지고 있다. 단면 형상은 허브에서 로터 15% 반경위치까지는 원형이며 25% 반경위치에서 끝단까지 S809 익형이 사용되었고, 그 사이는 선형으로 블렌딩 되어 있다. 블레이드는 75% 반경위치에서 피치각이 5°(이 위치에서 비틀림각 0°)인 형상을 사용하였다.

나셀은 직육면체(폭 0.91m, 높이 0.79m, 길이 2.81m)이며, 스피너는 반구형(지름 0.51m, 길이 1.76m)으로, 타워는 원기둥(지름 0.41m, 높이 11.5m)으로 형상을 간략화 하였다. 풍동실험은 광범위한 구동 형상에 대해서 수행되었지만, 본 연구에서는 상풍(upwind) 형상, 로터 코닝각 0°, 요각 0° 인 기본 형상을 사용하였다.

III. 수치해석

3.1 수치해법

로터 유동장에 대한 전산유체 해석을 위하여 FLUENT[10]의 셀중심 유한체적법(cell-centered finite volume method) 기반의 비압축성 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 해석과 저 레이놀즈수 $k-\omega$ SST 난류모델[11]을 사용하였다. 시간 이산화는 2차의 시간 정확도를 가진 내재적 시간적분(implicit time integration)을 사용하였다. 비정상 해석을 위하여 반복 시간 전진(iterative time advancement)을 사용함으로써, 비선형 대류항을 정확히 계산하고 분리오차를 제거하여 방정식간 상호 연계성을 충실히 확보하도록 하였다. 압력과 속도의 연계는 Patankar와 Spalding의 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, odd/even 압력 분리를 피하기 위해 Rhie와 Chow의 압력 보간법[12]을 사용하였다. 대류항의 이산화는 QUICK을 사용하였고 확산항은 2차의 정확도를 가진 중앙차분법을 사용하였다.

로터 주위의 비정상 회전 유동장을 해석하기 위해서 미끄럼 격자(sliding mesh)를 사용하였다. 미끄럼 격자는 지배방정식의 플럭스항에 격자속도를 고려한 항을 추가하여 자유류 내에서 로터 블레이드와 격자체가 주어진 속도로 함께 회전하는 관성기준계에서 유동장을 직접 해석할 수 있게 해준다.

3.2 해석영역 및 경계조건

먼저 로터단일(rotor-only) 모델(Fig. 2a)의 수치해석을 위해 대칭축에 로터 중심을 위치시키고 원통형의 외부경계를 가지도록 유동영역을 설정

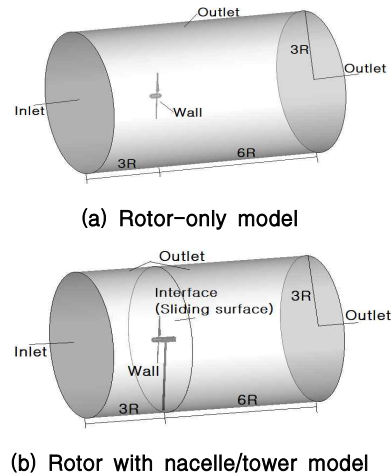


Fig. 2. Computational domains and boundary conditions

하였다. 반경방향 거리는 로터 반경의 3배, 상류 방향으로는 반경의 3배, 하류 방향으로는 반경의 6배를 각각 지정하여 교란에 대해 비교적 충분한 거리를 확보하도록 하였다.

원통형의 원방 경계면은 일정 압력의 출구조건을 적용하였다. 상류의 입구 경계면은 일정 풍속을 가지는 자유류 조건을, 하류 경계면은 일정 압력의 출구조건을 각각 적용하였다. 출구 경계에서의 유동의 방향은 내부 유동으로부터 외삽되어 결정한다. 전체 해석영역을 회전영역(rotational domain)으로 설정하여 로터의 회전속도로 함께 회전하도록 하였다.

타워/나셀을 포함한 전체 풍력터빈시스템(rotor with nacelle/tower) 모델의 경우(Fig. 2b)에도 원방경계를 로터단일(rotor-only) 모델과 동일하게 설정하였다. 이는 로터단일 모델과 비교를 통해서 타워/나셀의 영향을 용이하게 파악하기 위해서이다. 격자구성의 편의를 위하여 지면(풍동 시험부 바닥)의 영향을 무시하였으며, 로터가 지면으로부터 충분히 먼 거리에 위치하고 있다고 가정하였다.

로터/타워/나셀 모델에서는 해석영역을 회전영역(rotational domain)과 고정영역(stationary domain)으로 구분하였다(Fig. 3). 상류의 회전영역은 로터를 포함하고 있으며 하류의 고정영역은 타워/나셀을 포함하고 있다. 회전영역은 격자 전체가 로터의 회전속도와 동일하게 회전하도록 하였으며, 고정영역과의 경계면인 미끄럼면(sliding surface)을 격자 접촉면(grid interface)으로 설정하여 매 시간 스텝마다 양 쪽 격자간의 겹침을

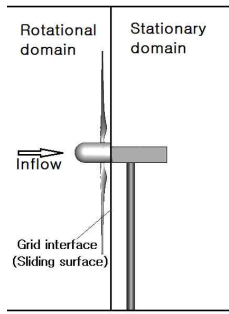


Fig. 3. Sliding surface between rotational and stationary domains

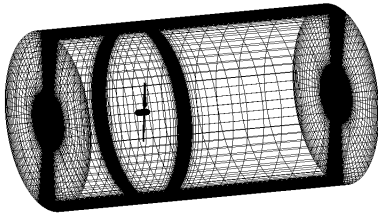
확인하여 접속 플럭스(interface flux)를 계산하도록 하였다.

입·출구 및 원방의 원통면에는 로터단일 모델과 동일한 경계조건을 지정하였다. 하류 고정영역 내의 나셀/타워는 고정벽면(stationary wall) 경계조건을, 상류의 로터와 스피너는 회전 속도 크기의 이동벽면(moving wall motion) 조건을 지정하였다

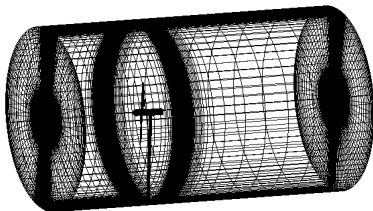
3.3 격자계

공간 격자계는 OH형의 육면체 정렬 격자(hexahedral structured grid)를 기본으로 하고 블레이드 끝단 일부에 사면체(tetrahedral) 비정렬 격자를 가진 다중블록 혼합 격자계(hybrid mesh)로 구성하였다.

로터의 표면 첫 격자가 y^+ 가 1 정도 되도록 밀집하였다. 로터가 회전할 때는 안쪽(inboard)과



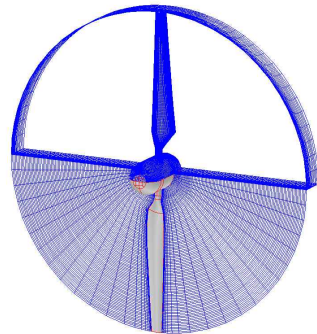
(a) Rotor-only model



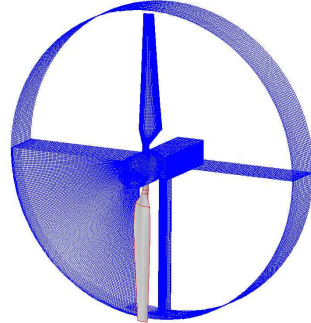
(b) Rotor with tower/nacelle model

Fig. 4. Overall view of boundary mesh

바깥쪽(outboard)에서 속도의 차이가 발생되므로 균일한 y^+ 를 얻기 위해서 첫 격자의 높이를 서로 달리하였다. 로터단일 모델의 경우에는 전체 영역이 회전하므로 하나의 격자계로 구성하였다. 로터/타워/나셀 모델의 경우에는 회전영역과 고정영역을 구분하여 각각 격자계를 구성하였으며 그 경계면인 미끄럼면은 가능한 두 영역의 격자 모양과 밀집도가 유사하도록 하였다. 격자계 모습과 정보는 Fig. 4-6과 Table 1에 나타나 있다.



(a) Rotor-only model



(b) Rotor with tower/nacelle model

Fig. 5. Near view of surface mesh around rotor or rotor/tower/nacelle system

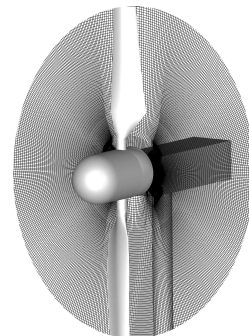


Fig. 6. Sliding grid interface between spinner and nacelle

Table 1. Grid information on two models

Configurations		Total grid nodes (Blocks)	Blade surface grid nodes Chordwise × Spanwise	Sliding surface grid nodes
Rotor-only		3,728,861(230)	144×85	-
Rotor with tower/nacelle	Rotational domain	2,498,539(162)	144×85	35,198
	Stationary domain	3,542,526(180)	-	70,392

IV. 해석 결과 및 검토

4.1 압력 분포 및 블레이드 공력하중

풍속 7m/s, 로터 회전수 71.9 rpm, 끝속도비 5.41일 때 유동 해석 결과를 NREL 실험 결과[2]와 비교하였다. NREL 풍동실험 형상은 본 연구에서 로터/타워/나셀 모델에 해당하므로 이 형상을 실험과의 비교에 사용하였다.

타워/나셀의 영향을 해석하기 전에 미끄럼 격자가 해의 정확성에 미치는 영향을 rotor-only 모델(Fig. 3에서 미끄럼면 후류의 나셀/타워가 없는 상태)을 사용하여 분석한 바 있었으며, 그 영향은 거의 없음을 확인하였다. 본 논문에서는 이를 바탕으로 로터/타워/나셀 모델에 대해 미끄럼 격자를 적용하여 그 결과를 분석하였다.

비정상 해석을 위하여 로터를 총 8회 완전 회전시켰으며 마지막 회전에서 공력 데이터를 수집하였다. 초기 5회전은 회전각 10°에 해당하는 시간 스텝(0.0232sec)을 사용하였으며, 나머지 3회전을 1°에 해당하는 시간 스텝(0.00232sec)을 사용하였다. 미끄럼이 발생하는 격자 접촉면(grid interface)에서의 격자 밀집도를 고려해 볼 때, time-accurate 계산을 위해서는 시간 스텝을 회전각 0.25° 정도까지 감소하는 것이 바람직하지만 계산시간 관계상 더 이상 감소시키지 못하였다.

Fig. 7은 로터 회전 방위각에 따른 추력의 수

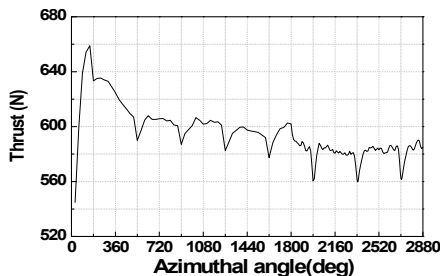


Fig. 7. Time history of the thrust generated by single blade for the rotor/tower/nacelle model

렴 과정을 보여주고 있다. 여기서 추력은 회전중 인 두개의 블레이드 중 하나의 블레이드 만에 의한 추력을 나타낸다. 8회전 정도이면 충분한 수렴에 이르렀음을 알 수 있다. 방위각의 기준은 두 블레이드가 타워와 평행하게 위치할 경우 위쪽 블레이드가 0°에 해당된다.

Fig. 8은 블레이드의 각 스펠위치에서 표면 압력계수를 구하여 실험과 비교하여 보여주고 있다. CFD 해석은 8회전 때 해당 방위각에서의 순간 압력분포이며 실험은 여러 회전동안 측정된 평균값이다. 압력계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{1/2\rho_\infty (V_\infty^2 + (r\omega)^2)} \quad (1)$$

여기서 P_∞ , V_∞ 는 자유류의 정압과 풍속, r 은 로터 반경방향 거리, ω 는 로터의 회전 각속도를 나타낸다.

압력계수 예측값은 실험값과 잘 일치하고 있다. 블레이드 방위각이 0°와 180°일 때 발생하는 순간 압력계수간의 차이는 로터와 타워/나셀간의

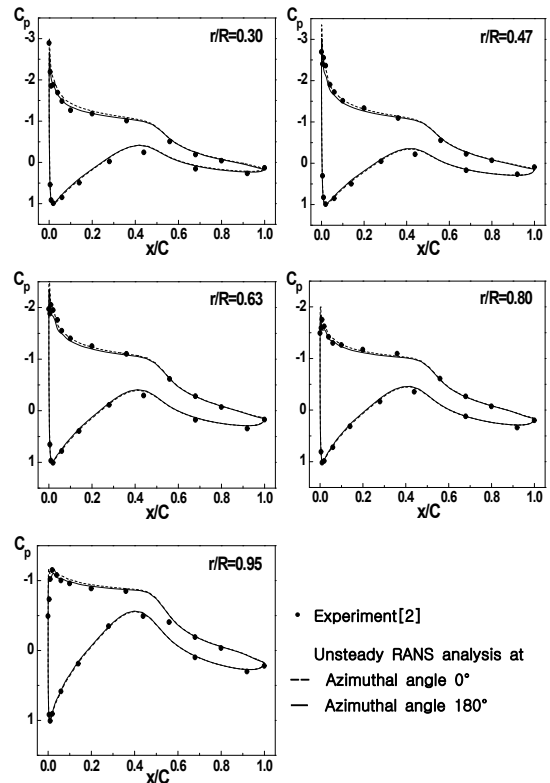


Fig. 8. Pressure distributions on the blade surfaces by experiment and unsteady RANS analysis

간섭 영향으로 로터 흡입면(suction surface)에서 흡입의 손실로 인한 것이다. 타워/나셀의 간섭 영향은 블레이드 허브 쪽으로 갈수록 약간 커지는 것을 볼 수 있다. 전반적으로 타워/나셀로 인한 블레이드 표면에서의 흐름의 변화는 미세한데, 이는 풍력터빈의 형상이 상풍형(upwind)으로서 후류에 위치한 타워가 로터에 크게 영향을 미칠 수 없으며, 또한 자유류의 풍속이 블레이드 회전속도에 비해 상대적으로 낮기 때문이다.

Fig. 9는 블레이드에 작용하는 공력하중으로서 수직력(normal force)과 접선력(tangential force) 계수를 보여주고 있다. 이 힘은 블레이드 표면의 압력을 다음과 같이 적분하여 구한다.

$$C_n = \sum_{i=1}^{no\ of\ taps} \left(\frac{C_{p_i} + C_{p_{i+1}}}{2} \right) (x_{i+1} - x_i) \quad (2)$$

$$C_t = \sum_{i=1}^{no\ of\ taps} \left(\frac{C_{p_i} + C_{p_{i+1}}}{2} \right) (y_{i+1} - y_i) \quad (3)$$

여기서 x, y 는 시위길이로 무차원화 된 좌표값이다. CFD 해석값은 8회전 때 해당 방위각에서의 순간 압력분포이며 실험값은 여러 회전동안 측정하였을 때 발생한 최대·최소값이다.

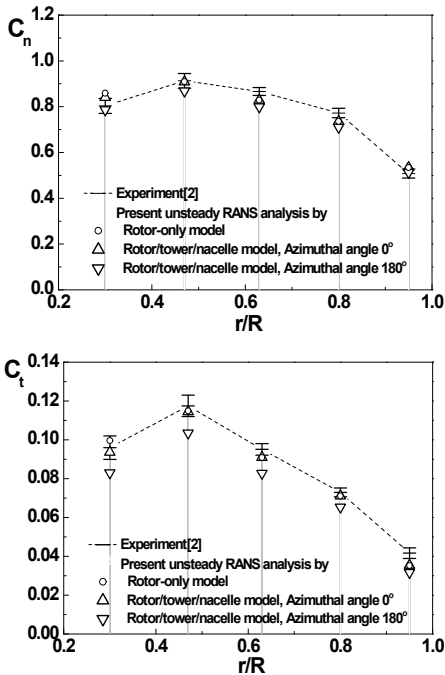


Fig. 9. Spanwise airload distributions by experiment and unsteady RANS analysis

CFD 해석 결과는 실험과 비교적 잘 일치하고 있다. 실험과 해석 모두 허브 쪽으로 갈수록 최대·최소값의 차이가 커지고 있으며 이는 블레이드의 회전속도가 상대적으로 느린 허브 쪽이 타워를 스치는(tower-shading) 시간이 많기 때문에 발생하는 현상으로 보인다.

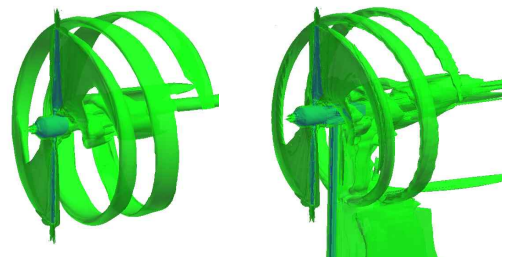
그림에서 실험의 최대 하중이 로터/타워/나셀 모델의 방위각 0°일 때의 하중에 해당되고 실험의 최소 하중이 로터/타워/나셀 모델의 방위각 180°일 때의 하중에 각각 해당된다. 실험에서 최대/최소 하중의 차이가 나는 정도로 해석 결과에서도 유사하게 타워의 영향에 의한 하중의 차이를 보여주고 있다.

또한, 그림에서 로터단일 모델의 공력하중은 로터/타워/나셀 모델의 방위각 0°일 때와 일치하고 있다. 이는 로터의 공력하중에 나셀은 거의 영향을 주지 못하고 오직 타워만 영향을 미치고 있다는 사실을 말해 주고 있다.

4.2 로터와 타워/나셀의 간섭효과

로터와 타워/나셀간의 간섭효과를 확인하기 위하여 로터단일 모델과 로터/타워/나셀 모델의 해석 결과를 상호 비교하였다. Fig. 10은 블레이드, 나셀, 타워에서 발생하고 있는 와도(vorticity)를 가시화하여 보여주고 있다. 블레이드의 끝단(tip)에서 발생하는 와류는 날개끝단와류(wing tip vortex)로서 회전하는 블레이드에서 발생하는 순환(circulation)에 관계하며, 나셀이나 타워의 후류에서 발생하는 와류는 유동의 박리(flow separation)에 의해서 발생하고 있다.

이외에 블레이드의 뿌리(root) 부분에서도 약한 와류가 형성되어 나셀을 감싸며 흐르고 있는 것을 볼 수 있다. 헬리콥터 로터나 항공기의 프로펠러는 추력을 얻도록 로터에 에너지를 공급하므로 끝단와류의 강도가 상당히 강하지만, 풍력터빈은 거꾸로 약한 바람의 운동에너지를 추출해서 사용하므로 끝단와류의 강도는 상대적으로 작다[13].



(a) Rotor-only model (b) Rotor/tower/nacelle model

Fig. 10. Visualization of vorticity sheds from rotor blade, nacelle and tower

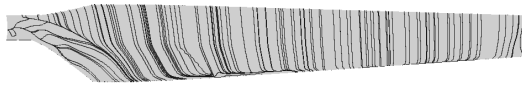


Fig. 11. Surface streamlines on the suction surface of the blade

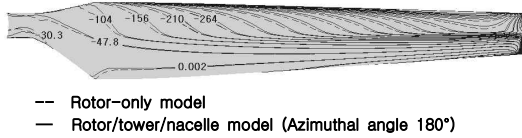


Fig. 12. Gauge pressure contours on the suction surface of the blade

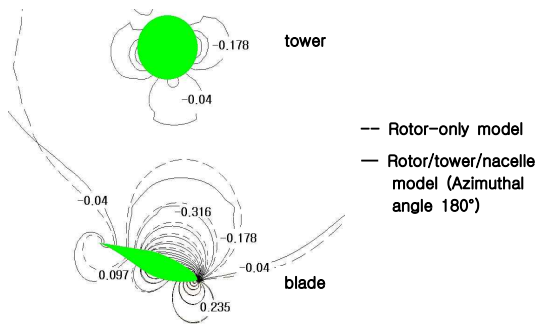


Fig. 13. Contour plot of pressure coefficients on the cross-section plane of 30% blade span location

Fig. 11은 로터/타워/나셀 모델의 흡입면의 표면유선(surface streamline)을 보여 주고 있다. 설계풍속 7m/s에서 부착흐름(attached flow)이 잘 형성되고 있으며 형상설계가 잘 되어 있음을 확인할 수 있다. 허브 부근에 발생하는 극한유선(limiting streamline)은 허브의 원형 단면에서 발생하는 유동의 박리가 뿌리에서 발생하는 끝단 와류에 영향을 받아 블레이드 outboard 쪽으로 확장되어 나타나는 현상이다. 이는 로터단일 및 로터/타워/나셀 모델뿐 만 아니라 김태승 등[9]의 스피너가 없는 정상유동에서도 모두 나타나는 현상으로서 나셀이나 스피너의 영향과는 무관한 현상이다.

Fig. 12는 두 모델에 의한 블레이드 흡입면에서의 등압력선도이며, Fig. 13은 블레이드가 타워를 스칠 때(방위각 180°), 블레이드의 30% 스패 위치 단면상에 나타난 압력분포이다. 타워/나셀에 의한 압력분포의 변화를 확인할 수 있다.

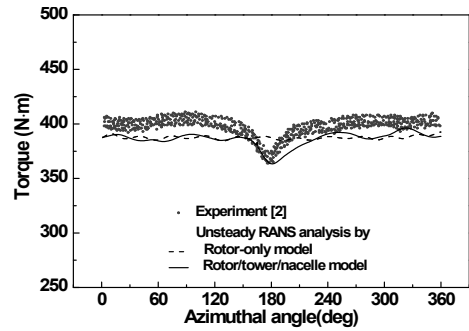


Fig. 14. Torques generated by single blade

Fig. 14는 로터단일 모델과 로터/타워/나셀 모델의 전 방위각에 대해서 단일 블레이드에 발생하는 토크를 보여주고 있다. 토크는 CFD 해석 결과에서 마지막 1 바퀴 회전 중에 1° 간격으로 수집한 데이터이다. 로터단일 모델의 경우는 방위각이 변해도 토크에 큰 차이가 없지만, 로터/타워/나셀 모델의 경우에는 타워의 영향을 받게 되는 방위각 약 120°에서 토크가 감소하기 시작하여 180°일 때 최소가 되며, 240°정도까지 다시 증가하고 있다. 실험과는 경향이 유사하지만 이론값은 토크를 약 3% 정도 작게 예측하고 있다. 또한 방위각 180° 전후를 제외하고는 로터단일 모델과 로터/타워/나셀 모델의 이론값은 차이가 없다. 이는 앞서서도 언급한 바와 같이 나셀이 블레이드에 미치는 영향은 거의 없다는 사실을 확인할 수 있다.

CFD 해석 결과는 로터의 방위각이 시간에 따라 변하는 상태에 대해서 높은 비정상 유동임을 확인할 수 있으며, 회전하는 로터의 타워/나셀의 간섭 영향을 확인하기 위해서는 비정상 유동 해석이 필요함을 보여주고 있다.

4.3 풍하중(Wind load) 해석

로터/타워/나셀 모델에 작용하는 비정상 풍하중을 전체시스템의 표면 압력을 적분하여 구하였다. Fig. 15는 풍력터빈시스템에 작용하는 힘과 모멘트(Fig. 16 참조)를 블레이드의 방위각 별로 표시하여 보여주고 있다.

풍력터빈이 받는 힘은 자유류 방향의 항력이 가장 크다. 이 항력은 블레이드가 회전함에 따라 타워와의 간섭으로 변하게 되는데, 블레이드가 타워와 겹치는 방위각 180°에서 최소가 된다. 축력과 양력은 자유류 방향의 힘에 비하여 상대적으로 작다. 타워가 지면에서 받는 모멘트는 피칭 모멘트가 가장 크며, 이는 큰 항력이 작용하는 로터/나셀이 지상에서 12m 높이에 위치하기 때

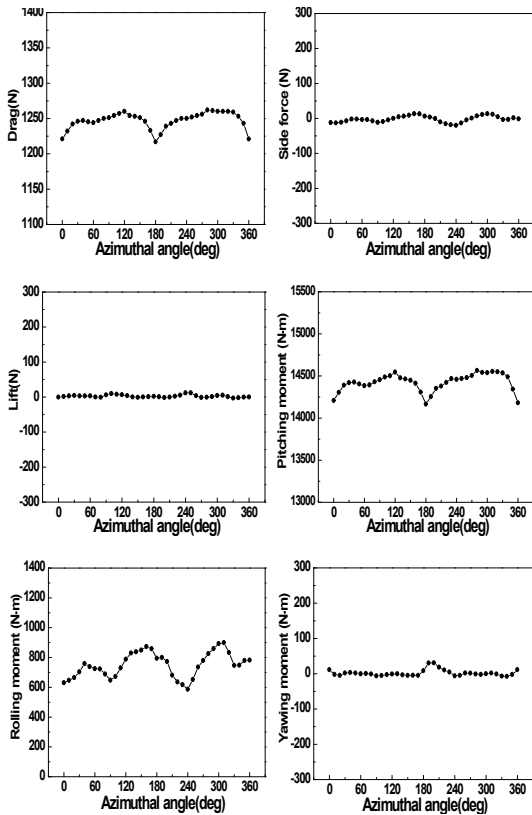


Fig. 15. Forces and moments acting on the wind turbine system

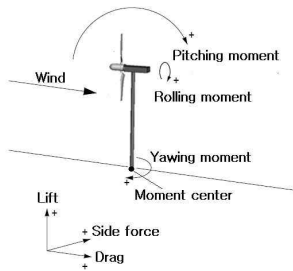


Fig. 16. Definition of coordinates

문이다. 롤링 모멘트는 로터의 회전에 따른 토크에 관계하며, 요잉 모멘트는 블레이드 방위각에 따라 좌우 흐름의 차이에 의해 발생한다. 이들은 피칭모멘트에 비해 상대적으로 크기가 작다.

VI. 결 론

3차원 비정상 RANS 방정식과 저 레이놀즈수 $k-\omega$ SST 난류모델, 미끄럼 격자를 이용하여

NREL phase VI 풍력터빈에 대한 비정상 유동 해석을 수행하였다. 로터와 타워/나셀의 간섭영향을 해석하기 위해 로터단일 및 로터/타워/나셀 형상에 대한 CFD 모델을 구축하였다.

해석 결과, 본 CFD 해석 모델은 압력분포, 블레이드 공력하중, 토크 등에서 실험값과 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 로터의 회전에 따른 풍력터빈 주위의 유동장 및 공력하중분석 결과로써 로터와 타워/나셀의 간섭에 의한 비정상 유동현상을 명확히 확인 할 수 있었다. 타워/나셀의 영향으로 인한 간섭효과는 결과적으로 출력의 감소를 초래하고 이는 블레이드의 방위각이 약 180°일 때 가장 크게 나타났다.

본 연구에서 수행한 풍력터빈의 비정상 유동 해석은 풍력터빈의 동적 풍하중 상태를 해석하고 이를 고려한 풍력터빈시스템 설계에 있어서 유용한 자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2006년 울산대학교의 연구비(2006-0155)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 1) Glauert, H., "Airplane Propellers", Aerodynamic Theory, Vol. IV, Division edited by W. F. Durand, Dover Publication, 1963.
- 2) Hand, M. M., Simms, D. A., Fingersh, L. J., Jager, D.W., Cotrell, J. R., Schreck, S. and Larwood, S. M., "Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI : Wind Tunnel Test Configuration and Available Data Campaigns", NREL/TP-500-29955, NREL., 2001.
- 3) Simms, D., Schreck, S., Hand, M. and Fingersh, L. J., "NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements", NREL/TP-500-29494, NREL, 2001.
- 4) Sørensen, N. N., Michelsen, J. A. and Schreck, S., "Navier-Stokes Predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80ft x120ft Wind Tunnel", *Wind Energy*, Vol. 5, 2002, pp. 151-169.
- 5) Duque, E., van Dam, C. P. and Hughes, S. C., 1999, "Navier-Stokes Simulations of the NREL Combined Experiment Phase II Rotor", "37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,

Reno, NV, AIAA Paper No. 1999-37, Jan. 1999.

6) Zahle, F. and Johansen, J., "Wind Turbine Rotor-Tower Interaction Using an Incompressible Overset Grid Method", AIAA 45th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, AIAA Paper No. 2007-425, Jan. 2007.

7) Gomez-Iradi, S., Steijl, R. and Barakos, G. N., "Development and Validation of a CFD Technique for the Aerodynamic Analysis of HAWT", *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 131, 2009, pp. 031009-1~13.

8) Janajreh I., Talab I. and Macpherson J., "Numerical Simulation of Tower Rotor Interaction for Downwind Wind Turbine", Hindawi Publishing Co., *Modelling and Simulation in Engineering*, Vol. 2010, Article ID 860814, 2010.

9) 김태승, 이철, 손창호, 조창열, "RANS 방정식을 이용한 HAWT 로터 블레이드의 회전 유동장 해석", *한국전산유체공학회지*, 13권 2호, 2008, pp. 55-61.

10) FLUENT User's Guide, FLUENT Inc., 2003.

11) Wilcox, D. C., "Simulation of Transition with a Two-Equation Turbulence Model", *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 2, pp. 247-255., 1994.

12) Rhie, C. M. and Chow, W. L., "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation", *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 11, 1983, pp. 1525-1532.

13) 이철, 조창열, "근사 원방 경계조건을 이용한 HAWT의 Navier-Stokes 유동해석", *한국항공우주학회지*, 36권 6호, 2008, pp. 525-531.