

# 수평축 풍력블레이드의 비대칭 환경에서의 공력 해석을 위한 자유후류기법에 관한 연구

신형기\* · 박지웅\*\* · 이수갑\*\*\* · 김석우\*\*\*\*

## Development of a free wake model to analyze HAWT blade airload under asymmetry condition

Hyungki Shin\*, Jiwoong Park\*\*, Soogab Lee\*\*\* and Seokwoo Kim\*\*\*\*

**Keywords :** Blade(블레이드); free wake model(자유후류모델); unsteady load(비정상하중); Wind turbine(풍력발전기)

### Abstract

풍력 발전기의 블레이드는 다른 회전기와는 달리 항상 지면의 경계층, 요-에러에 의한 어긋난 유입류, 타워와의 간섭효과의 환경에서 운영된다. 따라서 정상운전상태에서도 이와 같은 환경에서 겪게 되는 공력하중의 해석이 블레이드의 설계에서 중요하게 요구된다. 본 연구에서는 이의 비정상 공력하중해석을 위하여 자유후류기법을 이용한 방법을 연구하였다. 특히, 타워와의 간섭해석을 위하여 FVE라 명명한 후류 모델을 개발하여 적용하였다.

### 1. 서론

풍력 발전기의 블레이드는 바람과 대기 상태, 그 외의 다른 구조물, 작동 조건에 의해 끊임없이 비정상 하중을 받게 된다. 이러한 비정상 하중의 대표적인 외적 요인으로는 지표에서의 경계층에 의한 수직방향의 풍속 구배, 요-에러(yaw-error)에 의한 로터 축에서 어긋난 유입류, 로터 바로 뒤편에 위치한 타워에 의한 영향 등이다[1]. 이와 같은 비정상적인 외부 조건은 특정한 경우에 발생하는 것이 아닌, 풍력 발전기 블레이드가 작동할 때 항상 겪게 되는 일반적인 조건이며 이 하중은 풍력 발전기의 성능에 영향을 미칠 뿐 아니라 블레이드에 반복적인 하중을 가하여 피로하중과 같은 문제를 유발하여 구조 설계 및 블레이드의 수명에 많은 영향을 준다. 따라서 풍력 발전기 블레이드의 공력 설계 및 성능과 하중 해석을 위해서는 이러한 비정상 하중의 고려는 필수적이다[2].

따라서 본 논문에서는 이러한 유동 조건에 의한 블레이드의 비정상 하중에 대한 계산을 가능하게 하면서 블레이드와 타워의 상호 작용의 해석이 가능한 자유 후류 기법에 대한 연구를 수행하였다.

### 2. FVE 자유후류기법

풍력발전기의 로터는 바로 뒤에 타워가 위치하고 있어 이것이 블레이드 하중에 주기적으로 미치기 때문에 이에 대한 고려가 필수적이다(그림 1). 일반적으로 자유후류법에서 후류는 후류패널(wake panel)[3] 또는 직선이나 곡선형 와동(vortex)으로 묘사된다.[4] 그러나 이러한 기법은 블레이드 뒤편에 타워와 같은 장애물의 해석에 어려움을 갖는다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 몇가지 방법이 고안 되어왔다.[5][6][7]

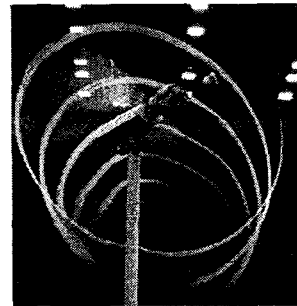


Fig. 1 The interaction of rotor tip vortices with a body

그러나 풍력 발전기의 경우 블레이드에서 나온 와류 필라멘트는 타워에 부딪치게 되면 결국 끊어지게 되므로[8], 본 연구에서는 이를 모사하기 위해 다음과 같은 와류 필라멘트 모델을 만들어 내었다. 블레이드에서 짧은 직선형 와동 요소의 연결로 와류 필라멘트를 만들어 후류를 모사하고 이러한 와동 요소들은 흐름을 따라 내려가다가 타워에 부딪힐 경우 와동링과 말굽형 와동으로 분리되어 내려간다(그림 2). 이 과정은 계속해서 반복되며 후류와 타워의 상호 작용을 모사하며 유동장을 시뮬레이션 한다.

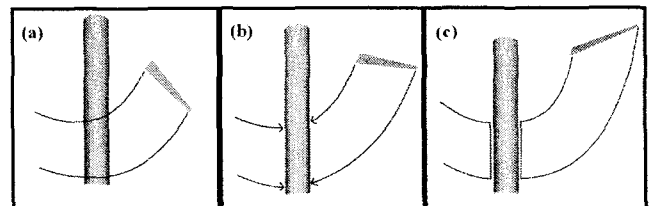


Fig.2. Blade-wake-tower interaction (a) before vortex filaments hit the tower (b) vortex filaments strike against the tower (c) vortex elements are separated into vortex ring and horse-shoe vortices

\* 한국에너지기술연구원, 선임연구원, hkeewind@kier.re.kr

\*\* 서울대학교 대학원, pjw77@snu.ac.kr

\*\*\* 서울대학교 교수, solec@plaza.snu.ac.kr

\*\*\*\* 한국에너지기술연구원, 선임연구원, wemins@kier.re.kr

각각의 와동요소가 유도하는 속도는 Biot-Savart Law에 의해서 다음과 같이 계산된다.

$$v_{free} = \frac{\gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|} (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \cdot \left( \frac{\mathbf{r}_1}{r_1} - \frac{\mathbf{r}_2}{r_2} \right) \quad (1)$$

그러나 속도를 계산하고자 하는 점이 와동요소의 끝점에 있을 경우 특이성(singularity) 문제가 발생하여 곡선형 와동 요소의 계산에서 사용되는 방법을 차용하여 다음과 같이 계산된다.

$$v_{edge} = -\frac{\Gamma}{4\pi R} \ln \left[ \frac{4R}{d_c} \right] - \frac{\Gamma}{8\pi R} \ln \left[ \left( \tan \frac{\theta_1}{4} \right) \left( \tan \frac{\theta_2}{4} \right) \right] \quad (2)$$

여기서  $d_c$ 는 cut-off distance를 나타낸다.

이렇게 만들어진 와류 필라멘트는 FVE(Finite Vortex Element)라 명명하고 후류 구조를 만드는 기본 와류 필라멘트로 사용된다[10].

위와 같은 방법으로 만들어진 와류 필라멘트를 이용하여 전체 후류의 구조는 Quackenbush et al.에 의해 연구된 CVC(Constant Vorticity Contour)를 이용하여 구성하였다[9].

풍력블레이드의 하중 해석을 위하여 그림 3와 같이 타워와 블레이드는 와류 패널로 구성되고 후류는 개발된 FVE 자유후류모델을 사용하였다.

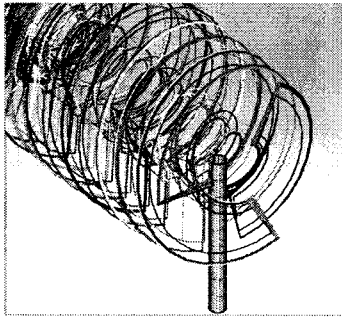


Fig. 3 Blade, tower and wake geometry

### 3. 풍동실험모델

개발된 자유후류모델의 검증을 위하여 풍동실험을 실시하였다. 풍동 모델의 경우 블레이드의 반지름 0.53m의 맞바람 형식의 풍력발전기이다(그림4). 블레이드 팁의 코드길이 11mm, 테이퍼비 0.25, 트위스트 각 15.6°의 세 개의 블레이드를 가진 형태이다. 타워의 반지름은 0.072m이며 로터 뒤쪽 0.245m에 위치하여 있다. 실험은 공군사관학교의 풍동에서 수행되었으며, 풍속 13~15m/s에서 RPM과 토크 측정, 후류 측정을 수행하였다. 후류의 측정 및 분석을 위하여 열선(hot-wire)를 사용하여 유동장 측정을 수행하였다[11].

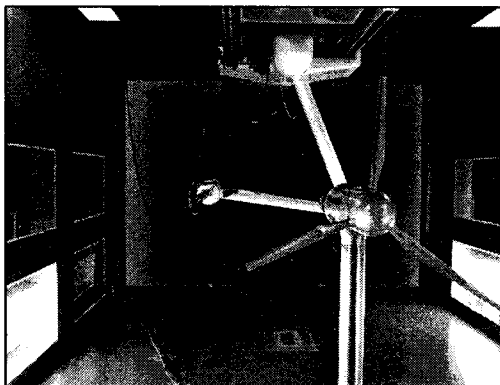


Fig.4 Wind turbine model installation

### 4. 결과 분석

풍동실험에서 후류의 속도장 측정에 사용된 열선의 경우 높은 시간 해상도에 의해 비정상적인 속도장을 측정하는 것에 유리하나 하나의 점에서 측정이 이루어지므로 전체 유동장의 파악에는 어려움을 갖는다. 이를 보완하기 위해 회전적 유동장이 주기성을 가지는 성질을 이용하여 블레이드 방위각에 대한 트리거 신호를 동시에 기록하여 서로 다른 점에서의 측정이 동시간대에 이루어진 것과 같은 효과를 만들어 내었으며 이를 통하여 얻어진 데이터를 이용하여 블레이드 끝단 와류의 정확한 정보를 얻을 수 있었다. 이는 그림 5에 간략히 설명되어 있다.

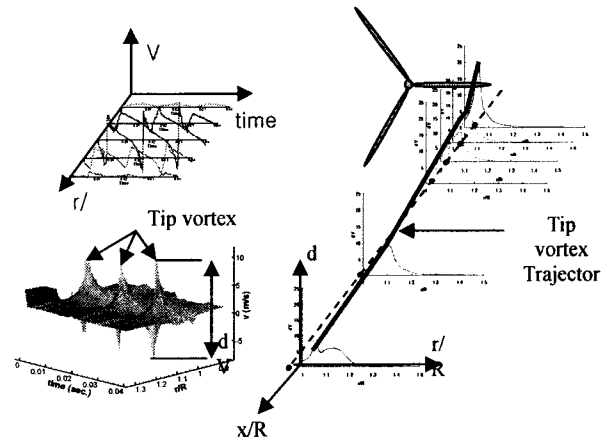


Fig. 5 Wake analysis by hot wire probe

이와 같이 얻어진 끝단 와류의 위치 정보는 개발된 자유 후류모델의 검증에 사용되었다. 자유 후류의 경우 FVE의 특성으로 인해 직선형 와동 요소로 구성 되기 때문에 원형으로 생기는 후류를 정확하게 묘사하여 해의 정확도를 높이기 위해 방위각에 대하여 30개로 나누어 후류를 구성하고 12도 간격으로 블레이드를 진행시키며 계산을 수행하였다. 방위각에 대한 블레이드의 진행은 블레이드의 공간상의 이동과 후류 수립의 시간 진행을 동시에 수행하게 된다. 즉 블레이드가 이동할 때 마다 후류는 블레이드가 이동한 시간과 후류위의 속도에 대한 곱으로 후류 위치가 이동하여 후류와 블레이드의 공간상의 이동과 시간상의 진행을 동시에 이루게 된다. 해의 수립 여부는 시간-공간상의 진행에 따른 토크의 변화를 기준값으로 사용하였다. 일반적으로 3~4회전 후면 수립이 이루어지며 이때 후류 형상 역시 안정화가 이루어 지었다. CVC로 모델링되어 얻어진 후류의 형상과 실험에서 얻어진 끝단 와류의 위치를 비교하면 다음 그림 6과 같다. 풍속 13m/s와 15m/s에서 TSR=5.5와 6.5의 데이터와 요(yaw)각이 5도, 10도가 있는 경우를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 개발된 자유후류모델의 끝단 와류의 위치와 측정에서 얻어진 위치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 기존의 다른 모델로는 비교가 어려운 요(yaw)각이 있는 경우에도 실제의 현장을 잘 모델링 함을 알 수 있다.

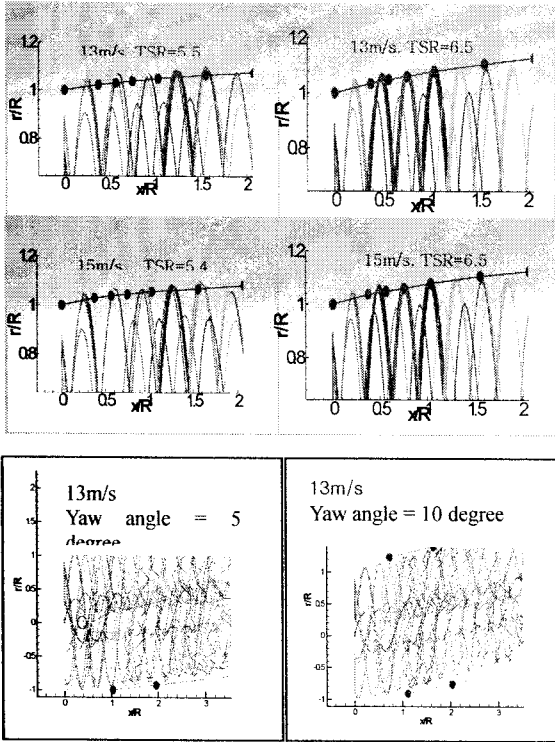


Fig.6 comparison of tip vortex location

끝단 와류의 궤적에 대하여 좀 더 정확하게 파악하고 계산에 의한 후류 형상을 검증하기 위한 또하나의 방법으로 팁 볼텍스 피치 각을 정의하여 비교하였다[12]. 팁 볼텍스의 경우 공간상에 나선형으로 형성 되기 때문에 이것을 평면상에 펼쳐 놓으면 직각 삼각형이 되며 이때 끝단와류의 피치 각을  $\theta$ 로 정의하면 삼각형의 양변의 길이에 대한 삼각비로 구할 수 있다. 각 삼각형의 양변은  $2\pi R$ 과  $L$ 로 정의 되며 이때  $R$ 은 앞서 구한 팁 볼텍스의 반경방향에 대한 위치가 되며, 길이  $L$ 은 팁 볼텍스가 흐르는 속도  $U$ 와 1 주기 동안 팁 볼텍스가 측정점을 지나가는 시간  $\Delta t$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 이렇게 구해진 끝단와류의 피치각 비교는 그림 7에서 볼 수 있다. 이 경우 역시 실험치와 계산치가 대체로 일치함을 알 수 있다.

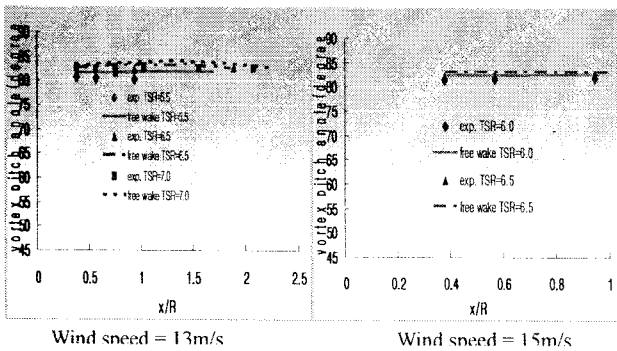


Fig. 7 Comparison of tip vortex pitch angle

팁 볼텍스의 위치와 피치각에 대한 실험치와 계산치의 비교는 본 연구에서 개발된 자유 후류 기법이 다양한 경우에 실제 후류 형상을 잘 묘사하고 있으며 이 기법의 타당성을 보여주었다.

FVE 자유후류 모델의 유용성은 타워가 있는 경우에 대한 블레이드의 하중과 축에서의 토크 비교를 통하여 잘 알 수가 있다. FVE 자유 후류의 경우 타워를 지나면서 와류 필라멘트

가 끊어져 타워 뒤편으로 흐르게 된다. 이러한 후류 모델과 타워의 포함 여부는 블레이드 전체의 하중에 영향을 주게 된다. 이것은 하나의 블레이드가 회전하면서 받게 되는 방위각에 따른 수직 하중 계수를 비교하면 좀 더 자세히 알 수 있다. 그림 8은 각 경우에 대하여 방위각과 블레이드 스패ن 방향에 대한 수직 하중 계수의 분포를 나타낸다. 타워를 포함하지 않은 기존의 자유 후류 모델로 계산된 수직 하중 계수의 경우 방위각에 대하여 일정한 값을 가지지만 타워를 포함하는 FVE 모델에 의해 계산된 수직 하중 계수의 경우는 타워가 위치하는 방위각 180도 부근에서 하중의 변화를 나타내고 있다. 그림 9는 기존의 자유 후류 모델과 FVE 자유 후류 모델에 의해 계산된 토크와 실험치와의 비교를 보여준다. 풍속 12m/s, 13m/s, 14m/s, 15m/s에서 측정된 결과이며 각 경우의 TSR은 5.55로 일정하다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 FVE 자유 후류 모델의 경우 기존의 자유 후류 모델의 경우보다 모든 경우에서 좀 더 작은 값을 나타내고 있다. 이는 블레이드와 타워의 상호 간섭이 성능에 악영향을 줄을 알 수 있으며, 특히 블레이드의 반경에 대해 타워가 두꺼운 소형 풍력발전기와 같은 경우 좀 더 정확한 성능 예측을 가능하게 함을 알 수 있다.

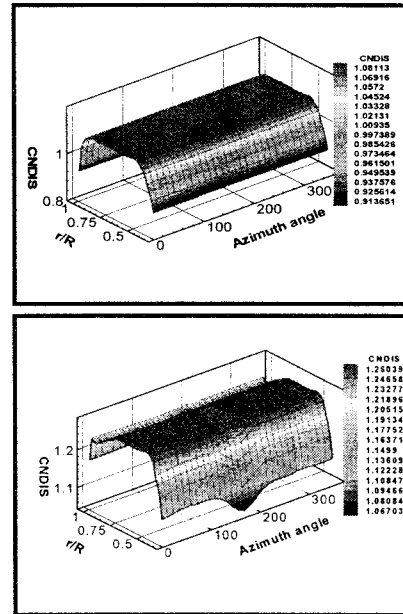


Fig. 8 Normal force distribution, 14m/s, 1400RPM, Yaw=0, (a) conventional free wake without tower, (b) FVE free wake with tower

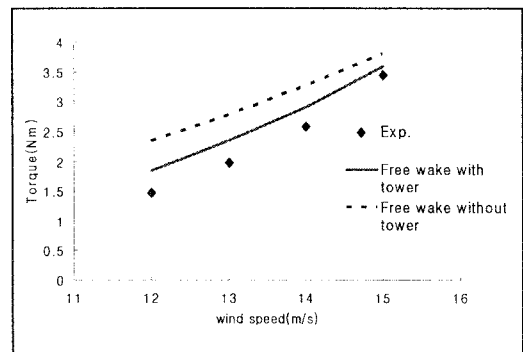


Fig. 9 Comparison of measured and computed results, Yaw=0

그림 10은 풍속 풍속 13m/s 에서 요-각 10도, 20도, 30도의

토크 측정 결과와 기존의 자유 후류 모델로 계산한 결과, FVE 자유 후류 모델에서 예측된 결과의 비교를 나타내고 있다. Head-on flow의 경우와 같이 FVE 자유 후류에 의해 예측된 결과는 기존의 자유 후류 모델에 의해 예측된 결과보다 작은 값을 가지며 측정치에 좀 더 근접한 결과를 나타내고 있다. 그러나 결과에서 알 수 있듯이 이 차이는 요-각이 증가함에 따라 점점 작아지며 요-각이 30도의 경우 FVE 자유 후류 모델에 의한 결과와 기존의 자유 후류 모델에 의한 결과가 거의 차이가 없음을 보여 주고 있다. 이는 요-각이 10도인 경우 유동의 빗나감이 크지 않아 Head-on flow의 경우와 같이 타워가 블레이드 바로 뒤편에 있는 것과 같이 작용하여 후류의 형상에 타워가 영향을 많이 주지만, 요-각이 30도로 증가하면 타워와 블레이드의 상호작용보다 요-에러에 의한 영향이 강하게 작용하여 두 기법의 결과에서의 차이가 거의 없게 만들기 때문이다. 이 외에 요-각이 30도가 되면 실험치와 계산치의 예러가 상당히 커짐을 알 수 있다. 이는 블레이드 측면으로의 유동 영향이 강해지며 방위각에 따른 받음각의 변화가 심해지기 때문에 dynamic stall 모델에 의한 보정 등이 필요함을 알 수 있다.

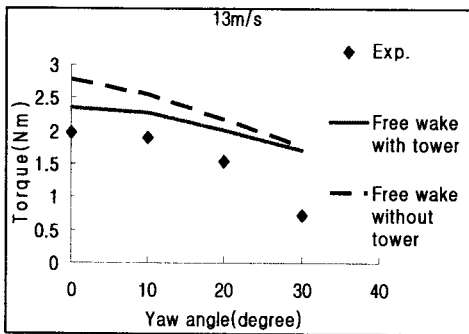


Fig. 10 Comparison of measured and computed results, Yaw=10,20, 30

## 5. 결론

본 연구에서는 후류와 타워의 상호 작용에 유리한 FVE 자유 후류 모델을 만들어내고 이를 풍동 실험을 통한 비교를 통하여 검증하였다. 그리고, 이를 이용하여 수평축 풍력 발전기 블레이드의 비정상 하중 해석과 축에서의 토크 비교를 통하여 본 연구에서 개발된 자유 후류 기법의 유용성을 보였다.

블레이드와 타워의 상호 작용은 블레이드 위에서 주기적인 하중 변화를 일으키며 이는 블레이드에 피로 하중으로 작용하여 블레이드 수명 등에 영향을 미친다. 따라서 개발된 자유 후류 기법은 이와 같은 비정상 하중의 해석에 유리하며 이를 이용한 블레이드 공력 하중 해석 툴은 설계 단계에서 적절한 비정상 하중의 예측을 가능하게 하여, 블레이드의 공력 설계 뿐 아니라 구조 설계 및 피로 하중 저감을 위한 방법 등에 많은 도움을 줄 것으로 기대되며, 특히 블레이드 반경에 비해 상대적으로 두꺼운 타워를 가지는 소형 풍력 발전기의 블레이드 설계 및 해석에 유용하게 사용 되리라 생각된다.

## 참고문헌

- [1] A.J. Eggers, Jr., R. Digumarthi and K. Chaney, 2003, "Wind shear and turbulence effects on rotor fatigue and loads control", Transactions of the ASME, vol. 125, pp. 402-409
- [2] M. Noda, and R.G. J. Flay, 1999, "A simulation model for wind turbine blade fatigue loads", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 83, pp. 527-540.
- [3] Cottet G-H, Koumoutsakos PD. 2000, "Vortex Methods: Theory and Practice." Cambridge University Press: New York
- [4] W.J. McCroskey, 1995, "Vortex Wakes of Rotorcraft", 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan.
- [5] Mavis D. N., Liou S.G., Kommerath N.M., and McMahon H.M., 1989, "Measurement and Computation of the Velocity Field of a Cylinder in the Wake of a Rotor in Forward Flight", Paper AIAA-89-1844, Presented at the 20<sup>th</sup> AIAA Fluid Dynamics, Plasma Dynamics, and Laser Conference.
- [6] Lee J., Oh S. and Yee K., 2005, "Unsteady Aerodynamics Analysis for Complete Smart UAV Configurations with Proprotor-Wing Interaction", Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Vortex Flows and Vortex Models.
- [7] 이재원, 이관중, 오세중, 2006, "비정상 Source-Doublet 패널 기법을 이용한 헬리콥터 로터 공력 해석", 항공우주학회지 제34권, 6호, pp. 1-9
- [8] Leishman J.G. 2000, "Principles of Helicopter Aerodynamics", Cambridge University Press
- [9] Quackenbush, T. R., Bliss, D. B., and Wachspress, D. A., "New Free-Wake Analysis of Rotorcraft Hover Performance Using Influence Coefficient", Journal of Aircraft, Vol. 26, No. 12, December 1989
- [10] Hyungki Shin, Jiwoong Park, and Soogab Lee, Nov. 1-3, 2004, "A new free wake model development for simulation of wind turbine performance" World Wind Energy Conference, China, Beijing
- [11] 박지용, 신형기, 선효성, 이수갑, 김주연, 최성욱, 2004, "풍력발전기용 블레이드의 후류 구조에 관한 실험적 연구", 2004 한국항공우주학회 춘계학술대회
- [12] I. Grant, M. Mo, X. Pan, P. Parkin, J. Powell, H. Reinecke, K. Shuang, F. Coton, D. Lee, 2000, "An experimental and numerical study of the vortex filaments in the wake of an operational, horizontal-axis wind turbine", Journal of Wind energy and Industrial Aerodynamics 85