

실험을 통한 풍력발전기의 후류구조 분석

박지웅, 김호건, 신형기, 이수갑

Wake Analysis of the HAWT by Windtunnel Test

Jiwoong Park, Hogeon Kim, Hyunki Shin, Soogab Lee

Key words : Wind Turbine Blade, Wake Structure, Hot-wire Probe, Biot-Savart Law

Abstract : To generate electricity from wind energy, wind turbine generally has a rotor blade. Since this rotor blade is a kind of the rotating machinery, the wake from the rotor is very important role in the side of the aerodynamic performances. Thus the study about wake is essential to analyze wind turbine aerodynamics. In this study wake characteristics are analyzed by hot-wire probe in the K.A.F.A(Korea Air Foece Academy) wind tunnel. It is possible to analyze the wake characteristics by hot-wire probe from acquiring the velocity fluctuations at given positions in the flow. This velocity data are arranged by trigger signal at same azimuth of the blade in periodic manner of the rotor blade. From this various wake characteristics are found : radial and axial position of the tip vortex, vortex core characteristics in the flow etc.

1. 서 론

풍력 발전 시스템의 성능에 영향을 미치는 요소들은 매우 다양하며, 이에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다. 그 중 한 가지가 풍력발전단지내의 다른 풍력발전기나 구조물들에 의해 발생하는 후류의 영향에 대한 연구로써, 이는 곧바로 블레이드에 작용하는 하중, 발전량, 진동에 대한 영향과 직결된다[1]. 이를 연구하기 위해서는 우선적으로 풍력발전기의 블레이드에서 발생하는 후류에 대한 연구가 필요하다. 수평축 풍력발전기의 경우 로터의 하류에서는 강한 후류(wake)가 발생되며 풍력발전단지 내의 풍력발전기중 일부는 이 후류 영역에 위치하게 되는데 이러한 풍력발전기는 성능에 커다란 영향을 받게 된다. 뿐만 아니라 후류는 회전하는 로터 블레이드에 직접적인 영향을 미침으로 인해 블레이드의 공력 특성에 직접적으로 영향을 미치기도 한다. 후류의 특성은 수치해석적인 기법을 통해 어느 정도 예측이 가능하나, 더욱 정확한 정보를 얻기 위해서는 실험이 필수적이며 많

은 연구기관에서 다양한 실험을 수행하고 있다. 이러한 실험들로는 연기(smoke)를 이용한 유동장 가시화, LDV나 5-hole probe 등을 사용한 유동장 측정방법 등을 예로 들 수 있다. 연기를 이용한 유동장 가시화 실험은 후류의 정성적인 정보는 쉽게 얻을 수 있으나, 속도장이나 보텍스 코어(vortex core)의 특성과 같은 구체적인 정보는 얻기가 힘들다[2].

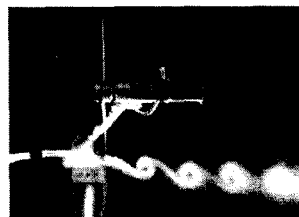


그림 1. 연기(smoke)를 이용한 흐름 가시화(TU-DELFT.[2])

서울대학교 기계항공공학부 공력소음연구실
e-mail : piw77@snu.ac.kr
tel. : 02)880-7384, fax : 02)875-4360

이에 본 연구에서는 열선(hot-wire)을 이용하여 구체적인 후류데이터를 얻고자 하였다. 열선을 이용함으로써 블레이드 뒤 각 부분에서 속도장 뿐만 아니라 열선이 가지는 뛰어난 시간 해상도(time resolution)을 통해 유동의 섭동(fluctuation)을 분석함으로써 와류(vortex)영역의 가시화뿐만 아니라 와류강도 등의 구체적인 유동정보도 얻을 수 있기 때문이다.

2. 실험장치의 구성

본 연구를 위한 풍력발전기 블레이드 모델 <그림 2>은 실제 크기의 1:50 축소모델로써, 기하학적 상사성, 동역학적 상사성, 블레이드 끝단에서의 마하수 상사를 통해 풍동에서 풍속 13m/s, 회전속도 1,500rpm의 상태로 운용되도록 제작하였다. 블레이드의 길이는 50cm이며 재질은 알루미늄으로 제작하였다. 나셀 내부에는 rpm 측정 장치, 토크 측정 장치, 시동과 발전기 역할을 하는 DC 모터를 포함하도록 제작하였다. 이때, DC모터를 통한 토크 제어를 통해 주어진 풍속에서의 블레이드 운용조건(RPM)을 결정할 수 있게 하였다. 또한, 피치각 조절장치를 부착하여 3개의 블레이드를 한번에 조절할 수 있도록 하였으며, 다양한 조건에서 실험이 가능하도록 제작하였다.

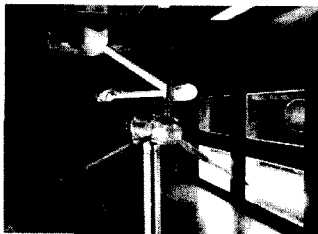


그림 2. 풍동 내부에 구성된 실험장치

본 연구에서 이용된 풍동은 공군사관학교에서 보유중인 중형 아음속 풍동으로서 국내 최대의 단일 폐쇄회로(closed-circuit)식의 길이 8.7m, 폭 3.5m, 높이 2.45m의 측정부를 보유하고 있다. 측정부의 수축비는 7.26:1이며 5~92m/sec의 유속을 낼 수 있다. 또한, 풍동중앙 제어 시스템을 통하여 조종실에서 모든 장비를 제어할 수 있으며 데이터의 획득, 처리, 분석까지 한 곳에서 이루어지게 된다. 열선을 해당 좌표

로 이송하기 위한 프로브 이송장치는 6m*2.94m*2.04m의 이동범위를 가지며 360도의 회전이 가능하다. 이러한 이송장치를 이용하여 열선을 원하는 좌표로 이송하여 속도장을 측정하게 된다. 측정에 사용하게 되는 열선은 3축 hot-wire probe로서 제원은 <표 1>과 같다.

hot-wire는 LDV등 타 측정방법보다 높은 시간해상도를 갖고 있어 좀더 세밀한 섭동을 분석할 수 있는 장점이 있으나 유동장 정보를 한번에 얻어내기가 힘든 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 실험에서는 기준측정신호(trigger)를 이용하여 데이터 정렬을 하였다. 이는 회전하는 로터의 주기성을 이용한 것으로 주기적으로 반복되는 로터의 회전으로 인해 일정한 블레이드 방위각에서는 동시간대에 측정된 효과를 얻을 수 있다는 가정을 이용하였다.

표 1. Hot-wire probe의 제원

Anemometer	Dantec Streamline CTA
A/D board	NI PCI-6110E (12bit, 4 channels)
Probe	Dantec 55R91 triple hot fiber probe (cylindrical hot film probe : 70mm dia. 3mm length)
Overheat ratio	1.8 all
Calibrated velocity range	1m/s ~50m/s
Measurable cone angle(flow angle)	36 deg
Max. resolution	175kHz
Sampling	10kHz, 2.0480sec

3. 실험결과 및 분석

본 실험은 풍동을 먼저 가동한 후 측정하고자 하는 조건으로 풍력발전기 모델을 운전하고 유동장이 안정되면 열선을 주어진 좌표로 이동해 가면서 측정을 하는 방식으로 이루어 졌으며, 열선에서 출력되는 데이터는 lab-view 시스템을 이용하여 기록하였으며, 그 예는 <그림 3>과 같이 나타난다.

열선의 측정좌표는 블레이드로부터 뒤쪽으로 거리와 회전면상의 일정한 각도(방위각, 그림 4.참고)로 고정을 시킨 후에 회전축으로부터 회전면 바깥쪽으로 hot-wire 프로브의 위치를 이동시켜 가면서 각각의 좌표에서 속도를 측정하였다. 이때, 2초간 10kHz의 해상도로 데이터를 획

특하였다. 이렇게 얻어진 데이터는 로터의 3회전에 해당하는 데이터를 추출하고 그 평균값을 결과로서 분석하였다.

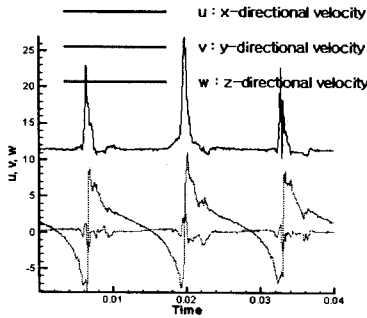


그림 3. hot-wire를 통해 얻어진 속도 정보의 예

이러한 방법으로 각 위치에서의 속도를 측정함으로써 후류에 대한 종합적인 정보를 얻을 수 있게 된다. <그림 4>에서 보듯, 블레이드 끝단 부근에서는 측정위치를 더욱 조밀하게 배치함으로써 블레이드 끝단에서 발생하는 보오텍스(tip vortex) 및 그 강도에 대한 세밀한 정보를 얻을 수 있도록 하였다.

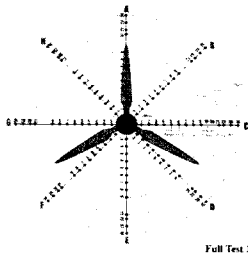


그림 4. 후류측정 기준좌표

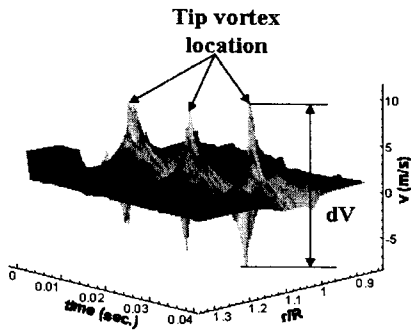


그림 5. 로터 1회전시 측정된 후류의 속도장 성분

<그림 5>는 블레이드가 1회전할 때의 유동장의 속도분포(회전축에서 깃 끝단방향 : V_y)를 나타내는 결과이다. 위와 같은 결과에 따라 후류(wake)에서의 정확한 와류 중심(vortex core)의 위치를 얻어낼 수 있으며, 이때의 속도차이(dV)를 이용하여 그 강도를 알아낼 수 있다. 그래프의 피크부분의 속도차이는 코어(core)로부터의 거리, z 와 강도(circulation)의 관계식(Biot-Savart Law)을 이용하여 $\Delta V = \frac{\Gamma}{2\pi z}$ 와 같은 식을 유도해 낼 수 있으며, 이를 다시 $\Gamma = 2\pi \left(\frac{\partial(1/\Delta V)}{\partial z} \right)^{-1}$ 로 표현하여 강도를 구할 수 있게 된다[3,4]. 이러한 방법을 통해 후류가 어떻게 유동에서 흘러가며, 그 정량적 성질이 어떻게 변해가는 지를 알 수 있게 된다. 이는 앞서 인용했던 유동흐름 가시화 실험으로는 알아낼 수 없었던 정보들을 추출할 수 있는 방법이기도 하다.

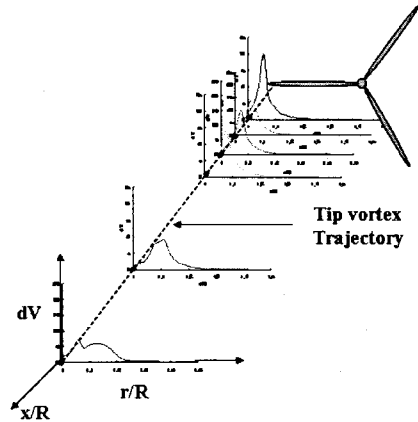


그림 6. 바람의 흐름방향에 따른 와류 중심 정보

앞서 설명한 대로 로터 블레이드 뒤편에서의 후류에 대한 속도장을 분석해 보면 <그림 6>과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림에서는 후류분석을 통해 와류 중심(vortex core)의 위치 및 강도를 표시하였다. 이를 통해 후류의 영역이 확장되어 가는 특성 및 소산(dissipation)되어 가는 경향성을 확인할 수 있다. 로터 회전면을 지난 후류는 뒤쪽으로 흘러갈 수록 확장되어 가지만 주위의 유동장과 섞이게 되면서 그 강도는 점점 약해지면서 소산되어짐을 확인할 수 있다. 구체적인 와류 중심의 위치는 <그림 7>에서 잘 나타난다.

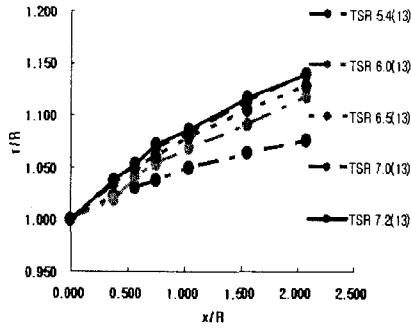


그림 7. TSR에 따른 vortex core의 위치 (풍속 13m/s)

로터 블레이드에서 발생한 끝단 보텍스의 경우 로터 블레이드의 뒷편에서 유동장의 속도가 느려지는 부분(stream tube)의 가장자리 부근에 위치하게 되는데, <그림 7.>에서도 잘 나타나듯이 이는 TSR에 따라 변하게 된다. 이는 TSR의 변화에 따라 로터 블레이드에서 획득하는 에너지의 변화가 생기게 되고, 이로 인해 로터 회전면 뒷편에서의 속도성분이 달라지기 때문이다. 이때, 로터 블레이드의 성능(C_p)은 TSR이 높아짐에 따라 증가하게 되는데, 이로 인해 느려진 유동만큼 속도가 느려지는 부분이 확장되게 된다. TSR이 7.0과 7.2인 경우 블레이드의 C_p 값이 거의 비슷하며, 최대 C_p 를 위한 운용 조건에 가까워 지므로 TSR이 7에 가까워 질수록 stream tube의 형상이 비슷해 지게 되며, 보텍스의 위치 또한 거의 일정하게 되어감을 확인할 수 있었다.

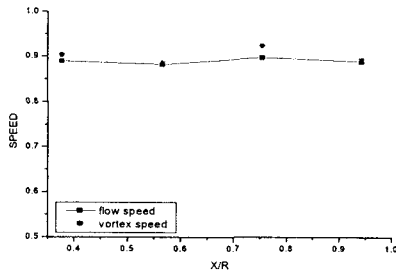


그림 8. 와류의 이동속도

또한, vortex core에서의 속도 섭동과 측정위치 좌표, 시간을 분석함으로써 와류의 이동속도(그림 8.)를 얻어낼 수 있었으며, 마찬가지로 후류의 피치각을 알 수 있게 된다. 여기서 피치각

이라 함은 로터의 1회전에 해당하는 시간동안 후류가 유동방향으로 흘러간 거리에 대한 회전 이동 거리에 대한 비의 개념으로, 나선형으로 흘러가는 후류의 형상을 표현해 주는 값이 된다.

4.결 론

본 연구에서는 아음속 풍동을 이용한 풍력 발전기 축소모델의 풍동실험을 수행하였다. 열선(hot-wire)을 이용하여 후류(wake)의 형상, 이동경로, 와류강도, 와류의 흐름 속도 등을 포함하는 많은 정보들을 얻을 수 있었다. 이러한 분석은 열선의 뛰어난 시간해상도 및 로터의 주기성을 이용하여 가능하였다. 이것은 와류의 특성을 파악함에 있어서 익단 와류(tip vortex)의 위치와 흐름에 관한 정보를 관찰할 수 있도록 하였으며, 와류 중심(vortex core)의 강도에 대한 구체적인 정보를 분석할 수 있도록 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 데이터는 향후 풍력발전기 회전익의 공력해석 연구에서 와류의 영향 및 예측에 유용한 비교자료로 사용되어질 수 있을 것이다.

후기

본 실험을 위해 다방면에 걸쳐 적극적으로 지원해 주신 공군사관학교 풍동실 관계자 여러분께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

- [1] Thomas Hahm, Jurgen Koning, "In the wake of a wind turbine", fluent news, 2002, Hamburg, Germany.
- [2] L.J.Vermeer, "A review of wind turbine wake research at TUDELFT", 2001, The Netherlands.
- [3] N.J.Vermeer, "Velocity measurements in the near wake of a model rotor in the wind tunnel(in Dutch)", Fourth Dutch National Wind Energy Conference, 22-24 February 1998, Noordwijkerhout, The Netherlands.
- [4] N.J.Vermeer, "Velocity measurements in the near wake of a model rotor in the wind tunnel", European Wind Energy Conference, 10-13 July 1989, Glasgow, UK.