

## 풍력터빈 블레이드 주위 흐름의 유동특성에 대한 실험적 분석

이정엽\* · 이상준†

### Experimental Analysis of Flow Characteristics around Wind-Turbine Blades

Jung Yeop Lee and Sang Joon Lee

**Abstract.** The flow and noise characteristics of wake behind wind-turbine blades have been investigated experimentally using a two-frame particle image velocimetry (PIV) technique. Experiments were carried out in a POSTECH subsonic large wind-tunnel ( $1.8^W \times 1.5^H \times 4.3^L \text{ m}^3$ ) with KBP-750D (3-blade type) wind-turbine model at a freestream velocity of  $U_o = 15 \text{ m/s}$  and a tip speed ratio  $\lambda = 6.14$  (2933 rpm). The wind-turbine blades are connected to an AC servo motor, brake, encoder and torque meter to control the rotational speed and to extract a synchronization signal for PIV measurements. The wake flow was measured at four azimuth angles ( $\phi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  and  $90^\circ$ ) of the wind-turbine blade. The dominant flow structure of the wake is large-scale tip vortices. The turbulent statistics such as turbulent intensity are weakened as the flow goes downstream due to turbulent dissipation. The dominant peak frequency of the noise signal is identical to the rotation frequency of blades. The noise seems to be mainly induced by the tip vortices.

**Key Words:** Wind-turbine(풍력터빈), Tip speed ratio(팁 속도비), Tip vortex(끝단 와류), Wake(후류)

#### 기호설명

- $\lambda$  : 팁 속도비
- $C_p$  : 출력계수
- $C_Q$  : 회전력계수
- $R$  : 풍력터빈의 반지름
- $\Omega$  : 각속도
- $U_o$  : 자유흐름속도
- $L$  : 블레이드의 길이
- $U_{mean}$  : 주유동 방향 평균속도
- $\phi$  : 방위각

#### 1. 서 론

최근 들어 선진국들을 중심으로 청정에너지 기술 개발에 많은 연구와 관심이 집중되고 있다. 다양한 청정

에너지 기술 중에서 풍력발전은 바람이 있는 곳이라면 어디든 설치가 가능하다는 장점과 기술적 파급효과로 인해 차세대 에너지자원으로 떠오르고 있다. 풍력발전 기술은 유럽과 미국을 중심으로 지속적으로 발전하여 풍력발전기의 설치용량은 최근 5년 동안 35%의 증가율을 보였으며, 덴마크의 경우 전체 전력수요의 20% 이상을 풍력발전이 차지하고 있다.

풍력발전은 무공해 대체에너지원 중 경제성이 높은 에너지로 평가 받고 있다. 기본원리는 다양한 형태의 풍차를 이용하여 바람의 운동에너지를 기계적 에너지로 변환하고, 이 기계적 에너지로 발전기를 구동하여 발생하는 전력을 전력계통이나 수요자에게 공급하는 기술이다. 이와 같은 풍력발전 시스템은 무한정의 청정에너지인 바람을 동력원으로 하므로 기존의 화석연료나 우라늄 등을 이용한 발전방식과 달리 발열에 의한 열공해나 대기오염 그리고 방사능 누출 등과 같은 문제가 없는 무공해 발전방식이다.

이러한 미래 지향적인 풍력기술을 발전시키기 위해서 가장 중요한 요소인 로터 블레이드의 공력특성 해석이나, 블레이드 주위 유동장에 대한 유동분석이 절

†포항공과대학교 기계공학과 교수  
E-mail : sjlee@postech.ac.kr  
\*포항공과대학교 기계공학과

실하게 요구되고 있다. 이와 관련하여 Vermer<sup>(1,2)</sup>는 풍력발전기 블레이드 후류와 관련한 폭넓은 연구를 정리하였으며, 후류의 유동구조, 자유 끝단 와류(free tip vortex), 발전기가 설치될 장소에 대한 환경 평가, 끝단 부착물(tip attachment), 그리고 비정상 공기역학에 대한 체계를 마련하였다. Fujii<sup>(3)</sup> 등은 풍력터빈 타워의 후류와 블레이드 사이의 상호작용에 관한 연구에서 타워의 단면 형상에 따른 소음과 진동특성에 관하여 연구하였다. Bjorkman<sup>(4)</sup>은 풍력터빈에서 발생하는 소음을 분석하기 위한 신뢰할만한 데이터 및 측정방법을 찾기 위해 실제 풍력발전 단지에서 장시간 소음측정 및 분석을 실시하였다. 이들은 풍력터빈 후류 영역에서 나타나는 소음과 관련한 복합적인 유동현상에 관한 연구를 수행하였다. 그 결과 가중합수에 기초한 소음 분석 방법으로는 소음의 영향을 상세히 기술하기 힘들고, 일반적인 소음예측 모델로는 복잡한 환경에서 소음을 정확히 예측하기가 어렵다는 것을 규명하였다. Cho<sup>(5)</sup> 등은 이중 로터 방식의 풍력발전시스템에 대한 모델링, 정상상태와 과도 응답 분석, 피치가 제어방법의 도출 및 비선형 시뮬레이션을 통한 이중 로터 풍력발전기의 성능 예측 결과를 제시하였다. Kim<sup>(6)</sup> 등은 풍력발전용 로터 블레이드의 3차원 유동특성에 관한 해석과 성능 예측을 위한 CFD 코드의 적용성 평가를 수행하였으며, 우수한 성능의 효율적인 풍력터빈의 설계에 대한 연구를 수행하였다.

자체적인 풍력발전 기술을 확보하기 위해서는 풍력발전기 주위 흐름의 유동특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 그러나 현재까지 풍력터빈 주위의 유동 분석 및 성능평가는 간단한 모델에 기초한 수치해석적 연구에 주로 의존하고 있으며, 복잡한 3차원 난류유동인 풍력터빈 블레이드 주위 유동에 대한 실험적 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 선행 연구의 대부분은 측정장비의 한계로 인하여 대부분 몇몇 측정위치에서의 국부적인 유동정보만을 얻었기 때문에 유동장(flow field) 전체에 대한 정량적 유동정보는 체계적으로 정리되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 풍력터빈 블레이드 주위 흐름에 대해 정량적인 계측을 할 수 있는 PIV(particle image velocimetry) 시스템을 구축하고, 이를 이용하여 최대 회전력을 얻을 수 있는 팁 속도비(tip speed ratio) 근처의 값에서 입자영상을 획득하였다. 본 연구를 통해 얻어진 정량적인 속도장 데이터를 이용하여 풍력터빈 블레이드 후류의 유

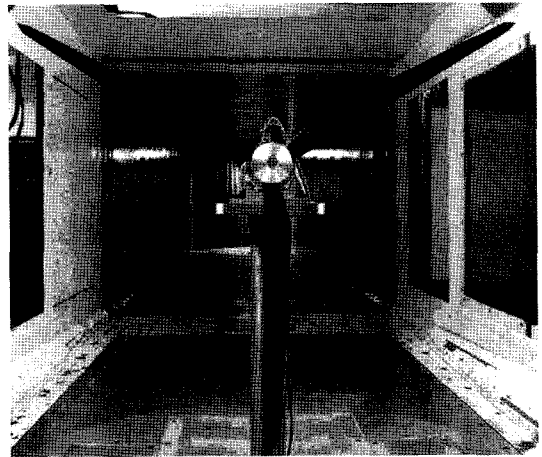


Fig. 1. KBP-750D blades installed in the wind-tunnel test section

동특성을 분석하고 난류 통계치(turbulent statistics)를 구하였다.

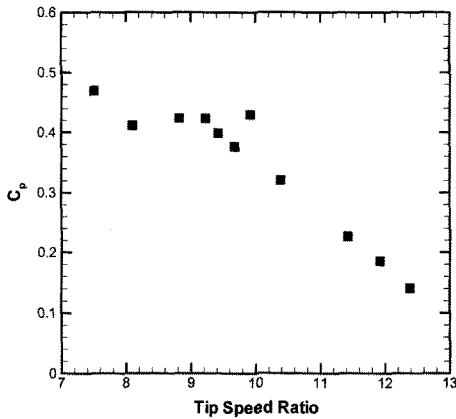
## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 풍력터빈 블레이드

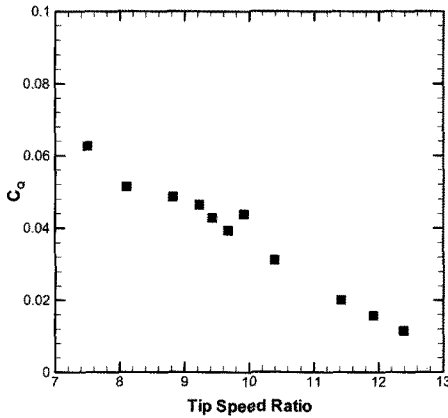
풍력터빈 블레이드는 바람이 가진 운동에너지를 회전력과 같은 기계적 에너지로 변환시켜 주는 장치로써 풍력발전기의 성능을 크게 좌우하는 중요한 부분이다. 기본적으로 비행기의 날개와 같은 익형(airfoil)과 유사한 단면 형상을 가지고 있으며, 블레이드를 향해 불어오는 바람으로부터 양력을 발생시켜 회전력을 얻게 된다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 풍력터빈 블레이드를 보여주고 있는데, 모델명은 KBP-750D이다. KBP-750D는 3-blade 형태의 상용 풍력터빈에서 주로 사용되는 블레이드로 팁 속도비(tip speed ratio)  $\lambda = 7.5$ 에서 최대 회전력을 얻도록 설계되어 있다. 블레이드 길이는 30 cm이며 Fig. 1과 같이 대형풍동 시험부 내부에 설치하여 유동 및 소음측정을 수행하였다. Fig. 2는 팁 속도비에 따른 KBP-750D의 기본 성능곡선을 나타낸 것이다. Fig. 2에서  $C_p$ 는 출력계수를 나타내고,  $C_Q$ 는 회전력계수를 나타낸다. 공력설계 계산값인  $\lambda = 7.5$ 에서  $C_p = 0.47$ 의 최대값을 가진다.

### 2.2 팁 속도비(tip speed ratio) 제어장치

블레이드 끝단의 선속도와 자유흐름속도의 비(ratio)를 나타내는 팁 속도비(tip speed ratio,  $\lambda$ )는 풍력터빈



(a)  $C_p$  curve



(b)  $C_q$  curve

Fig. 2. Measured  $C_p$  and  $C_q$  curves of KBP-750D blades

에서 기본이 되는 무차원 변수로써, 로터 블레이드 후류의 유동특성과 블레이드 성능은 팁 속도비에 의해 결정된다. 따라서 로터 블레이드 후류 유동 측정시 터빈의 운전조건에 따른 팁 속도비를 적절히 제어하여 일정한 각속도로 회전하도록 하는 것은 실험의 정확도를 높이는 측면에서 매우 중요하다. 실제 풍력터빈에서도 시스템에 맞게 설정된 팁 속도비를 유지하도록 기어와 브레이크 등의 장치를 이용하여 제어하고 있다. 팁 속도비는 아래의 식(1)과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{R\Omega}{U_0} \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 풍력터빈의 반지름,  $\Omega$ 는 각속도(rad/s),  $U_0$ 는 자유흐름속도(freestream velocity)를 나타낸다.

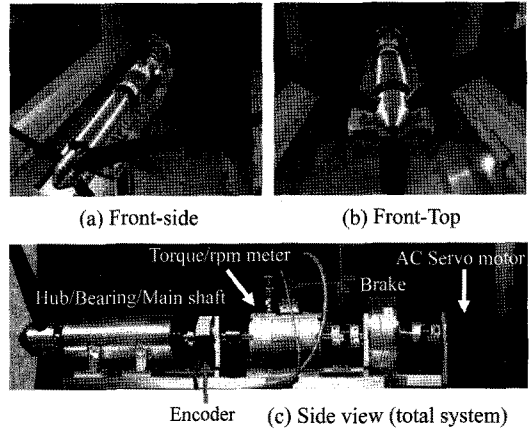


Fig. 3. Photographs of the wind-turbine model and tip speed ratio controller system

본 연구에서는 후류 유동을 결정짓는 팁 속도비를 정확히 제어하기 위해 AC 서보모터, 브레이크 등의 장치를 풍력터빈 축상에 설치하여 항상 일정한 회전수를 유지하고 팁 속도비를 용이하게 설정할 수 있도록 시스템을 제작하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 이들 장치는 블레이드, 허브, 주축(main shaft)과 직렬로 연결되어있고, 브레이크와 AC 서보모터를 통해서 팁 속도비와 회전수를 조절할 수 있게 하였다. 모터 앞단에 설치된 브레이크는 블레이드의 과도운전(overrunning)시 블레이드의 회전수를 줄이는 부하(load) 역할을 하여 모터를 보호하기 위한 장치이며, 모터는 팁 속도비와 회전수를 조절하는 역할을 하게 된다. 그리고 PIV 측정시 동기신호를 추출하기 위한 엔코더, 블레이드의 회전력을 측정하기 위한 토크미터(torque meter)와 동력전달 커플링(coupling)이 축에 연결되어있다.

### 2.3 Two-frame PIV 속도장 측정장치

본 연구에서는 풍력터빈 블레이드 후류의 속도장을 2-프레임 PIV(입자영상속속계) 기법을 이용하여 측정하였다. PIV 시스템은 Nd:YAG 레이저, 한 대의 CCD 카메라, 카메라 이송장치, 영상처리장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. 사용한 CCD 카메라의 해상도는 2048×2048 pixels이며, 한번에 2 프레임씩 쌍(pair)으로 입자영상을 취득하였다. 속도벡터의 추출은 FFT(fast Fourier transform)에 기초한 상호상관(cross-correlation) 방식의 PIV 알고리즘을 적용하여 속도장을 추출하였다. 미소조사구간의 크기는 64×64

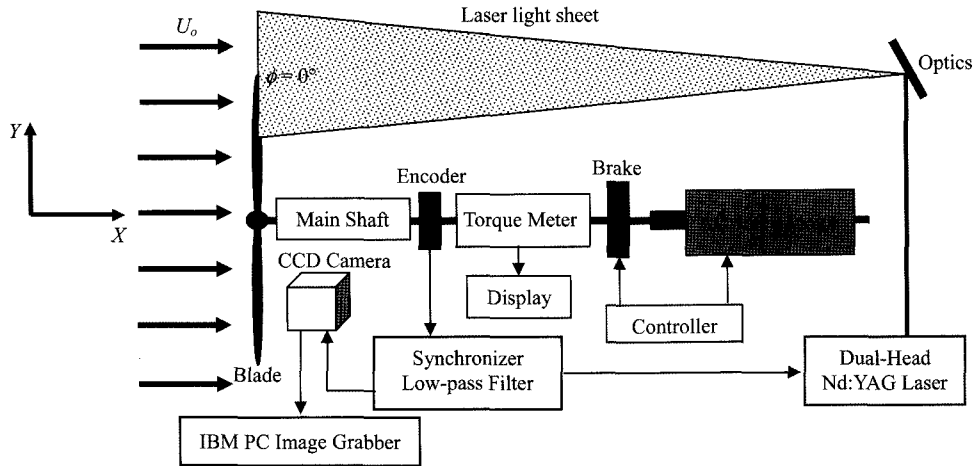


Fig. 4. Schematic diagram of experimental set-up and coordinate system

pixels이며, 인접한 조사구간을 50% 중첩하였다. PIV 속도장 측정에 대한 내용은 Lee<sup>(7)</sup>에 자세히 나와 있다.

실험시 사용한 포항공대 대형 풍동의 시험부 제원은  $1.8^W \times 1.5^H \times 4.3^L$  m<sup>3</sup>이고 자유흐름에서의 난류강도는 0.2% 이하이다. Fig. 4는 PIV 속도장 측정장치의 개략도를 보여주고 있는데, 좌표계는 블레이드 앞단의 중심선과 교차하는 허브의 중심을 기준으로 주유동 방향을 X축, 주유동에 수직인 방향을 Y축으로 설정하였다. Fig. 4와 같이 블레이드 후방에서 광학적 장치를 이용하여 레이저 평면광을 생성시키고, 이를 측정영역에 수직으로 조사하였다. 이때 측정단면의 크기는  $19.5 \times 19.5$  cm<sup>2</sup>이다. 실험 시 자유흐름속도와 블레이드의 회전수를 15 m/s와 2933 rpm으로 고정하였으며, 이때 팁 속도비는 6.14이다. 최대 회전력이 발생하는 팁 속도비는 7.5 이지만, 엔코더로부터의 동기신호 추출, <math>\Delta t</math>를 고려한 레이저와 카메라의 동기, 풍력터빈의 안정적인 운행 등을 고려하여 PIV 실험은 팁 속도비가 6.14인 조건에서 수행되었다. Laskin 노즐을 이용하여 생성한 olive oil 액적을 추적입자로 사용하여 측정영역의 상류에서 공급하였다. 속도장 측정의 기준신호는 회전축에 부착된 엔코더로부터 나오는 신호를 이용하여 CCD 카메라와 레이저를 동기시켰다.

속도장 측정 실험은 하나의 블레이드에 대해 30° 간격으로 4개의 위상으로 나누어 수행하였다. 이 때 2개의 레이저 펄스 사이의 시간간격  $\Delta t$ 는 30 ms로 고정하였다. 각각의 위상각에 대해 400장의 순간 속도장을 얻고 이들을 앙상블(ensemble) 통계처리하여 평균속

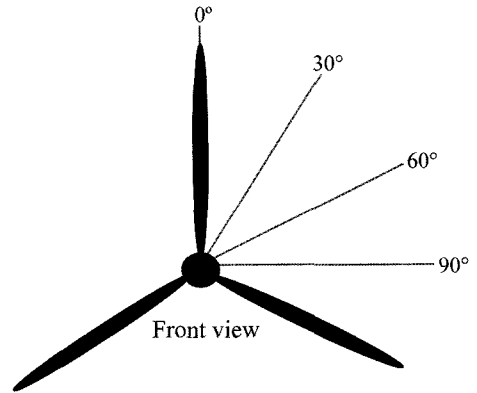


Fig. 5. Azimuth angles ( $\phi$ ) of the wind-turbine blade

도장, 난류강도 분포 등을 구하였다. Fig. 5는 속도장 측정시 사용한 위상각의 정의를 표현한 것이다.

### 2.4 소음 측정

블레이드의 회전에 기인한 유동소음을 측정하기 위하여, 블레이드로부터 15 cm 떨어진 하류 위치에 마이크로폰을 설치하여 유동소음을 측정하였다. 소음측정은 PIV 실험조건과 마찬가지로 팁 속도비 6.14 조건에서 수행되었다. 블레이드의 회전과 유동소음 사이의 상관관계를 규정하기 위해 소음 데이터를 FFT 분석하여 유동특성과의 상관관계를 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 풍력터빈 주위 유동장 분석

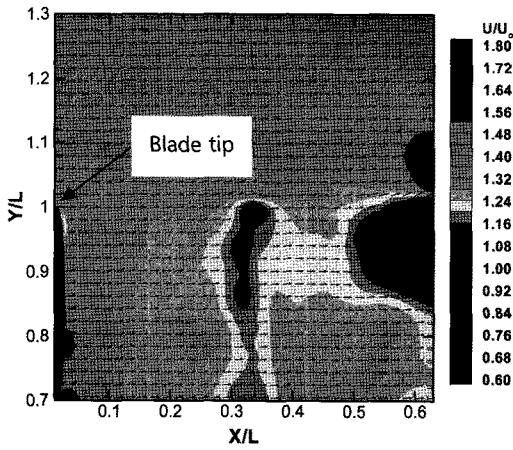


Fig. 6. Mean velocity field of wake behind the wind-turbine blade at  $\phi = 0^\circ$

풍력터빈 블레이드(KBP-750D) 후류의 유동특성을 파악하기 위하여, 팁 속도비가  $\lambda = 6.14$ 일 때 PIV 기법

을 이용하여 800장의 입자영상을 취득하여 400장의 순간속도장을 얻었다. 이렇게 얻어진 순간속도장 결과를 통계처리하여 평균속도장(mean velocity field)과 와도장(vorticity field) 등을 구하고, 실험결과를 나타내는 모든 그래프의 X, Y축을 터빈 블레이드 길이(L)로 무차원화하였다.

블레이드 후류의 주된 유동특징은 블레이드 끝단에서 발생하는 큰 와도(vorticity)값을 가지는 끝단 와류(tip vortex)라고 할 수 있다. 이 끝단 와류들은 주유동 방향 국부 평균속도(local mean velocity,  $U_{mean}$ )와 비슷한 속도로 하류도 흘러간다.<sup>(8)</sup> 따라서, 끝단 와류의 유동구조를 보다 자세히 살펴보기 위해서는 측정된 속도장에서 평균속도를 빼주어야 한다(Reynolds decomposition). 본 연구의 경우, 주유동 방향인 X축 속도성분이 거의 모든 유동장에서 지배적으로 관찰되고, 동일한 위상각에서 위상평균된(phase-averaged) 평균속도장(Fig. 6)을 얻었기 때문에 위상평균 속도장(phase-

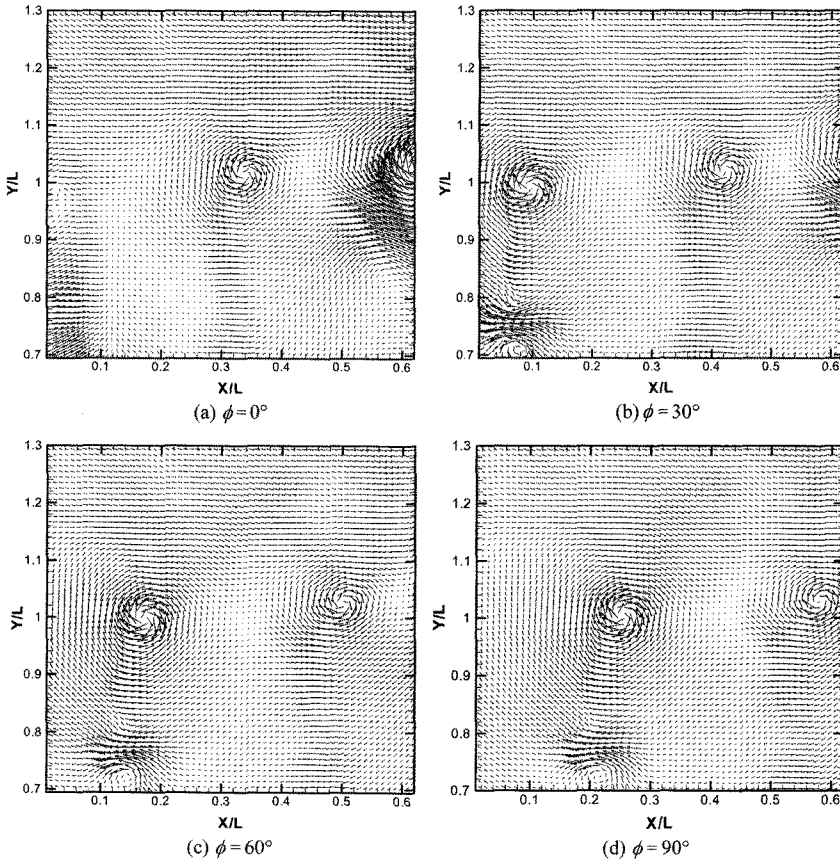


Fig. 7. Phase-averaged Reynolds-decomposed fluctuation velocity fields in the longitudinal plane at  $\lambda = 6.14$

averaged mean velocity filed)에서 주유동 방향 평균속도( $U_{mean}$ )를 빼주었다. 각각의 방위각에 대해 이렇게 정량적으로 가시화한 끝단 와류를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서  $Y/L = 1.0$  위치는 블레이드 끝단의 위치를 나타낸다. 끝단 와류 일부에서 속도 벡터가 크게 나오는데, 여기서 속도벡터의 크기는 위상평균 속도장의 주유동 방향 속도와 평균속도( $U_{mean}$ )와의 차이에 비례한다.

Fig. 7을 살펴보면 시계방향으로 회전하는 끝단 와류를 명확하게 관찰할 수 있으며, 전반적으로 블레이드 끝단에서 발생하는 와구조가 후류 유동장을 특징짓는 가장 지배적인 인자임을 보여주고 있다. 이러한 끝단 와류는 방위각이 증가할수록 하류로 이동하며, 난류확산에 의해 끝단 와류의 크기는 점차 증가하게 된다. 이러한 난류확산은 끝단 와류가 관찰되는 하류에 해당하는 후류 반류면(wake sheet)에서 발생하는 강한 3차원 난류유동에 기인한 것으로 보인다. 방위각  $\phi = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 에 해당하는 결과를 살펴보면 블레이드 끝단에서 발생하는 끝단 와류 아래쪽  $Y/L = 0.72$  위치에서 작은 크기의 와(vortex)가 관찰되는데, 하류로 나아가면서 점차 감소된다. 그리고 각각의 방위각에서 관찰되는 끝단 와류의 중심 위치는 하류로 나아가면서

후류 중심축에서 조금씩 멀어지는데, 이것은 블레이드 후류 바깥쪽에 위치한 비점성 유동의 유입에 기인한 것으로 보인다. 결국 후류에 존재하는 강한 난류성분과 비점성 영역의 혼합에 의한 영향으로 끝단 와류는 하류로 나아가면서 점차 크기가 증가하며 후류 폭도 확대된다.

Fig. 8은 4가지 방위각에 대해 위상 평균된 폭방향의 와도장 분포를 보여주고 있다. 끝단 와류가 위치한 곳에서 가장 강한 와도값을 가지며, 하류로 나아갈수록 와도값의 크기와 큰 와도값을 가지는 영역은 점차 감소하고 있다. 이것은 Fig. 7에서 언급한 바와 같이 난류확산에 의해서 끝단 와류 중심에서 와도의 세기는 감소하고 난류운동에너지가 주위로 확산되어 와의 크기는 점차 증가한다는 것을 의미한다. 그리고 끝단 와류가 하류로 이동함에 따라 비점성 영역으로 후류 영역의 크기가 확대됨을 관찰할 수 있다.  $Y/L = 0.72$ 에 위치한 와(vortex)도 끝단 와류와 마찬가지로 하류로 나아가면서 와도값이 점차 감소하고 있다.

끝단 와류가 존재하는 후류 반류면에서의 속도변동성분에 의한 난류강도 분포를 관찰하기 위해 Fig. 9와 같이 난류강도 분포를 등고선 형태로 나타내었다. 방위각  $\phi = 0^\circ$ 에서는 최초 끝단 와류가 형성되는 위치에

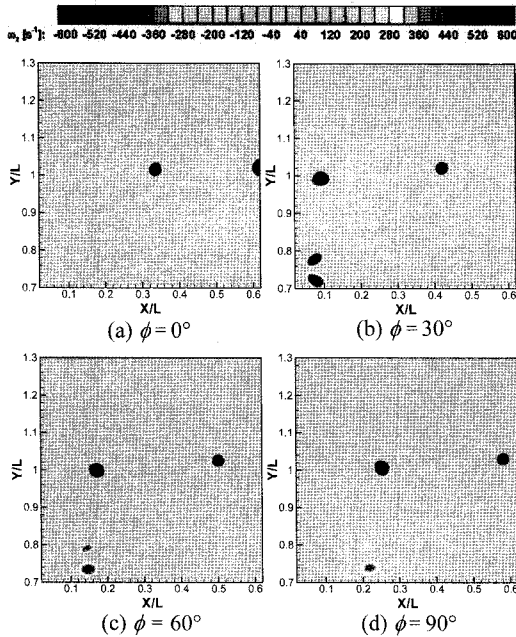


Fig. 8. Spanwise vorticity contours at four different azimuth angles at  $\lambda = 6.14$

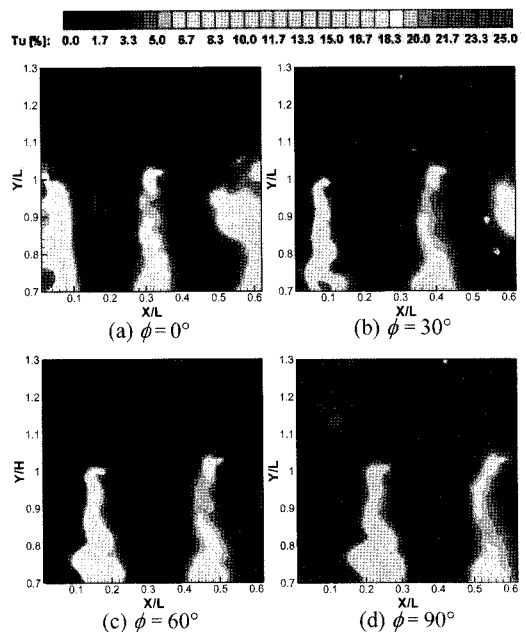


Fig. 9. Streamwise turbulence intensity distribution at four different azimuth angles at  $\lambda = 6.14$

서 가장 강한 난류강도 값을 가진다. 전반적으로 끝단 와류가 위치하는 부분의 후류 반류면에서만 주변보다 큰 난류강도 값이 나타나는데, 이것은 블레이드 근처에서 발생하는 3차원 난류 유동에 의해 속도변동성분이 크게 나타남을 의미한다. 후류 반류면에서의 큰 난류강도는 하류로 나아갈수록 난류확산에 기인하여 점차 감소하게 되며, 후류 반류면 주위로 난류운동에너지를 공급해주는 주요 메커니즘이 된다.  $Y/L = 0.72$ 에 위치한 와에 의해 발생하는 속도변동성분에 기인하여 이 위치에서도 큰 난류강도 값을 가지며, 방위각 증가에 따라 하류로 나아갈수록 점차 강도가 약해진다. 이와 같이 블레이드 길이를 따라 발생하는 서로 다른 유동특성은 블레이드 성능에 크게 영향을 미치므로 풍력 터빈 운행조건에 따른 효과적인 유동제어는 블레이드 설계시 중요한 변수가 된다.

이와 같은 유동장 분석 결과들을 바탕으로 블레이드 후류는 끝단 와류와 후류 반류면에 지배적인 영향을 받으며, 후류와 비점성 영역의 경계인 슬립 스트림(slip stream)에서의 상호작용은 후류폭 증가에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 그리고 후류 반류면을 중심으로 발생하는 난류확산 효과는 하류로 나아가면서 변화하는 후류의 중요한 유동특성이다. 또한 블레이드의 길이방향을 따라 발생하는 유동구조의 변화 역시 후류의 유동특성을 결정짓는 중요한 요소가 됨을 알 수 있다.

### 3.2 유동소음 분석

풍력발전기 설치시 고려해야 할 중요한 요소중 하나로 유동소음을 들 수 있다. 유동 소음은 주변 환경에 직접적으로 영향을 미치게 되므로, 생활환경 측면에서 심각하게 고려되어야 한다. 블레이드의 회전에 의한 유동소음을 측정하기 위해, 블레이드로부터 15 cm 떨어진 하류에 마이크로폰을 설치하여 유동에 기인한 소음을 측정하였다. 소음측정시 실험조건은 PIV 실험과 마찬가지로 팁 속도비 6.14에서 수행되었다.

실험 결과 소음의 크기는 176 dB(데시벨)로 큰 소음이 측정되었다. 이러한 소음 레벨은 풍동 운행에 따른 소음 및 전기적 노이즈(noise)에 의한 영향을 고려하더라도 매우 높은 값에 해당한다. 이것으로부터 터빈 블레이드에 기인한 유동소음이 풍력발전기가 설치된 지역의 생활환경에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 블레이드에 의한 유동소음의 주요 원인

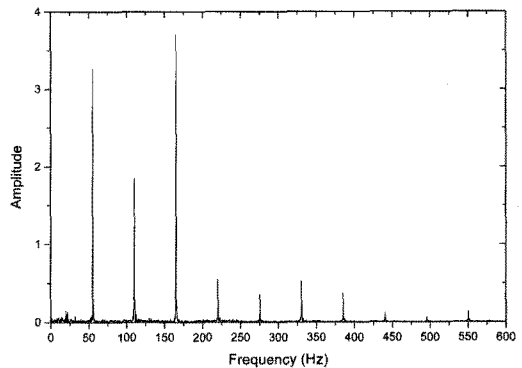


Fig. 10. Spectral analysis of measured noise data at the tip speed ratio of  $\lambda = 6.14$

은 블레이드 끝단에서 발생하는 끝단 와류라고 가정하고 블레이드의 회전과 유동소음 사이의 상관관계를 규정하기 위해 소음측정시 얻어진 실험 데이터를 FFT 분석하여 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. FFT 결과를 살펴보면 최초 3개의 주파수에서 큰 정점(peak)이 나타나고, 그보다 높은 조화(harmonic) 주파수에서 피크값이 관찰되나 그 크기는 주파수 증가에 따라 감소하고 있다. 주파수 분석에서 나타나는 피크값들은 주기적인 압력변동이 발생하고 있음을 의미하고, 이것이 유동소음에 크게 영향을 미치는 요소라고 생각된다. 첫 번째 피크값이 나타나는 주파수는 블레이드의 회전 속도와 거의 일치하며(55 Hz), 두 번째와 세 번째 피크값은 블레이드의 개수가 3개이기 때문에 나타난 것으로 보인다. 앞서 기술한 바와 같이 나머지 피크값들은 정수배의 하모닉 주파수에서 나타나는 것이 특징이다.

주파수 분석 결과로부터 블레이드 후류에서 발생하는 소음의 주요 원인은 끝단 와류라는 것을 확인하였다. 따라서 유동소음과 관련된 문제를 해결하기 위해서는 끝단 와류의 발생과 하류로의 이동현상을 적절히 제어하여야 한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 팁 속도비  $\lambda = 6.14$  조건에서 2-프레임 PIV 속도장 측정기법을 이용하여 풍력터빈 블레이드 후류의 유동특성을 실험적으로 연구하고, 마이크로폰을 이용하여 유동소음을 측정하여 후류 유동특성과의 상관관계를 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

후류 유동은 블레이드 끝단에서 발생하는 끝단 와류 (tip vortex)에 지배적인 영향을 받으며, 후류 반류면 (wake sheet)에 존재하는 끝단 와류는 하류로 나아갈수록 난류확산에 의해 그 크기가 증가하며 후류 폭을 확장시킨다. 와도의 경우, 끝단 와류의 중심에서 최대값을 가지며, 난류강도는 후류 반류면에서 주변보다 큰 값을 가진다. 와도와 난류강도 역시 하류로 나아감에 따라 점차 감소하는데, 이를 통해 끝단 와류가 주변영역으로 운동에너지를 전달하고 있음을 알 수 있다.

그리고 주기적으로 발생하는 끝단 와류와 유동소음 측정결과 사이의 비교 분석을 통해 블레이드 끝단에서 생성된 끝단 와류에 기인한 유동소음이 지배적이며, 이들이 큰 상관관계를 가지고 있음을 확인하였다. 이러한 유동정보는 풍력터빈 설계 및 운행조건 결정 등에 있어서 중요 데이터로 사용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적 연구진흥사업(생체유동현상 규명 및 생체모방 연구)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1) Vermeer, L. J., 2001, "A Review of Wind Turbine Wake Research at TUDelft," AIAA-2001-0030, 20<sup>th</sup>

ASME Wind Energy Symposium, 39<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, ASME, Reno, NV, Jan. 11-14, A01-16933 03-44.

2) Vermeer, L. J., Sørensen, J. N. and Crespo, A., 2003, "Wind Turbine Wake Aerodynamics," Progress in Aerospace Science, Vol. 39(6-7), pp. 467-510.

3) Fujii, S., Takeda, K. and Nishiwaki, H., 1984, "A Note on Tower Wake/Blade Interaction Noise of a Wind Turbine," J. Sound Vib., Vol. 97(2), pp. 333-336.

4) Bjorkman, M., 2004, "Long Time Measurement of Noise from Wind Turbines," J. Sound Vib., Vol. 277(3), pp. 567-572.

5) Cho, Y. M., No, T. S., Jung, S. N. and Kim, J. Y., 2005, "Performance Analysis and Pitch Control of Dual-Rotor Wind Turbine Generator System," J. KSAS, Vol. 33(7), pp. 40-50.

6) Kim, J. H., Kim, T. S., Lee, Y. W. and Kim, Y. D., 2005, "A Study on Aerodynamic Analysis of HAWTs by CFD," J. WEIK, Vol. 9(1), pp.103-108.

7) Lee, S. J., 2005, "PIV/PTV Velocity Field Measurement Techniques-Theory and Practice," PIV'05 Lecture Note, POSTECH.

8) Adrian, R. J., Christensen, K. T. and Liu, Z. -C., 2000, "Analysis and Interpretation of Instantaneous Turbulent Velocity Fields," Exp. Fluids, Vol. 29, pp.275-290.