

## 수평축 풍력터빈 블레이드의 이산소음과 광역소음의 수치해석

\*유기완<sup>1)</sup>, 유병민<sup>2)</sup>

### Numerical Study on Discrete and Broadband Noise Generated from Horizontal Axis Wind Turbine Blade

\*Ki-Wahn Ryu, Byung-Min Yu

**Key words** : Discrete Noise(이산소음), Broadband Noise(광역소음), 수평축 풍력터빈(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)

**Abstract** : Numerical calculation for the 1MW class horizontal axis wind turbine blade has been carried out to estimate the magnitude between discrete noise and random noise. Farassat formula 1A was adopted to get the discrete noise signal, and blade element momentum theory was used to obtain the distribution of the aerodynamic data along the blade span. Fukano's approach was also adopted to calculate the unsteady aerodynamic random noise due to the Karman vortex generation at the trailing edge of the wind turbine blade. From the noise prediction for the 1MW class horizontal axis wind turbine, the frequency band of the discrete noise lies in the infrasound region, and that of the random noise lies in the audible band region.

#### 1. 서론

국제간의 기후변화협약에 대한 대책의 일환으로 풍력에너지를 설치용량이 2006년 현재 전 세계적으로 74.2GW에 이르게 되었다. 국내에서도 이에 대한 관심이 고조되어 제주도, 대관령, 영덕 등지에 풍력발전 단지가 조성되어 상용 운전되고 있으며 총 설치 용량은 175MW에 이르며, 해상풍력 등 설치 용량이 앞으로 크게 증가될 추세에 있다. 2012년 만료되는 교토의정서 이후로 포스트 교토 의정서에 대한 논의가 진행되고 있다.

오늘날 환경문제에 대한 관심이 높은 현 상황을 감안할 때 블레이드에서 발생하는 소음문제는 풍력단지 건설에 앞서 검토해야 할 주요 문제로 대두되고 있는 상황이다. 소음이 미치는 영향을 파악하기 위해서는 풍력발전단지에서 소음을 직접 실측하는 방법이 있겠으나, 소음 측정은 바람이 센 상태에서 마이크로폰에 미치는 영향을 최소화하기 위한 별도의 측정 방법을 IEC61400-11<sup>(1)</sup>에서 제시하고 있다. 일반적인 소음 측정은 바람이 불지 않는 상태에서 측정하는 것을 권고하고 있으나, 풍력터빈의 경우에는 바람이 불지 않을 경우에는 블레이드가 작동되지 않아 소음을 발생시키지 않고 바람이 세면 셀수록 소음 문제가 심해 소음 측정을 통한 정확한 분석이 쉽지 않은 특성이 있다. 풍력터빈이 대형화되면서 이산소음으로 문제되는 저주파 소음은 특

수한 저주파 측정용 마이크로폰을 통해 측정하여야 하는 문제도 있다.

본 연구에서는 풍력터빈 소음의 실측과는 다른 관점에서 블레이드에서 발생하는 소음을 해석적인 방법으로 예측하기로 한다. 이산소음 예측에 대해서는 헬리콥터 로터나 프로펠러에 대한 많은 연구 결과가 있어<sup>(2)-(4)</sup> 이를 풍력터빈에 접목하기는 그리 어렵지 않다. 이산소음 해석 방법은 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H) 방정식<sup>(5)</sup>을 시간영역에서 공간 미분을 시간미분형식으로 변화시킨 Farassat 공식을 적용하도록 한다<sup>(6)</sup>.

반면에 광대역 소음 해석을 위한 유동정보를 유동장 해석을 통해 얻기는 쉽지 않다. 풍력터빈과 같은 회전익의 경우에는 블레이드의 두께 및 하중소음 보다도 블레이드 날개 뒷전에서 발생하는 Karman 와열에 의한 소음이 주 소음원이 될 수도 있다. 또한 회전익의 특성상 날개 뒷전의 유속은 허브 측에서 팁 쪽으로 갈수록 더 빨라지기 때문에 Karman 와열의 이탈 주기도 더 커지게 되는 경향을 갖게 되어 여러 주파수대역에서 널리 소음이 분포하는 광대역 특성을 갖는다. 본 연구에서는 Fukano의 해석 방법을 적용하기로 한다<sup>(7)</sup>.

1) 전북대학교 공과대학 항공우주공학과  
E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr  
Tel : (063)270-4286 Fax : (063)270-2472

2) 전북대학교 대학원 항공우주공학과

## 2. 1MW급 풍력터빈 블레이드

본 연구에서 소음해석에 적용되는 1MW급 풍력 터빈의 제원은 다음과 같다<sup>(4)</sup>.

Table 1. Main design parameters

Parameter	Value
Rated power, $P$ (kW)	1,000
Number of blade, $b$	3
Rated wind speed (m/s)	12
Design tip speed ratio, $\lambda$	7
Design RPM	26.47
Rotor diameter, $D$ (m)	60.3
Airfoil	6 airfoils
Hub height, $H$ (m)	60.3

블레이드 최적 공력 설계 절차로부터 얻어진 코드 길이는 스팬방향으로 비선형 결과를 보이게 되어 무게 증가와 제작에 어려움이 존재하게 된다. 본 연구에서는 블레이드 제작의 용이성을 위해 블레이드의 스팬 방향으로 60~90도에 존재하는 코드 길이의 평균 값과 기울기를 이용하여 선형화를 실시하였다. 최적 코드 길이와 선형화 시킨 코드 길이의 분포를 비교하면 Fig. 1과 같다.

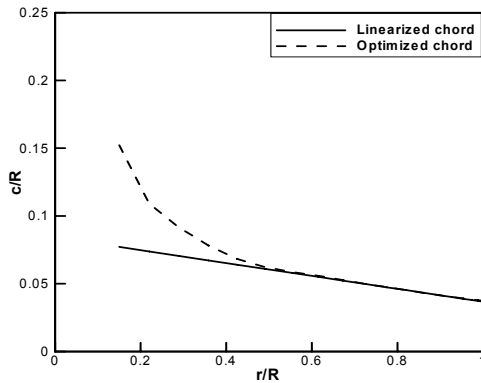


Fig. 1 Distribution of chord length

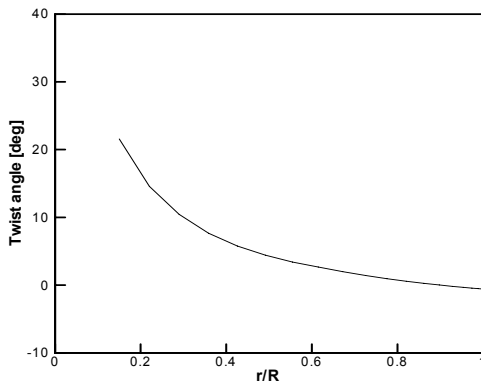


Fig. 2 Distribution of twist angle

Fig. 2는 블레이드 스팬 방향으로 비틀림 각의 분포를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보이듯이 비틀림 각은 블레이드 안쪽에서 가장 큰 값을 갖으며 블레이드 바깥쪽으로 갈수록 감소한다. 이러한 비틀림 각의 분포와 코드의 선형화를 반영한 3차원 블레이드 형상은 Fig. 3과 같다.

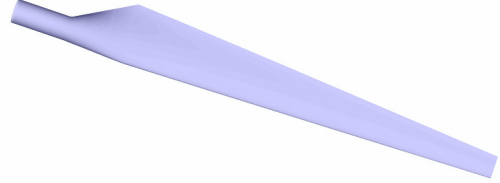


Fig. 3 Final geometry for 1MW scale blade

## 3. 소음 수치 해석

### 3.1 이산소음 해석

Farassat의 공식 1A [4]는 두께소음과 하중소음을 다루기에 편리한 수식으로 나타낸다. 먼저 두께소음은 다음과 같이 표현된다.

$$4\pi p'_T(\vec{x}, t) = \int_{f=0} \left[ \frac{\rho_0 c_0 \dot{M}_n}{r(1-M_r)^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[ \frac{\rho_0 c_0 M_n (r \dot{M}_i \hat{r}_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 (1-M_r)^3} \right] dS \quad (1)$$

여기서 적분은  $f=0$ 인 물체 표면  $S$ 에 대해 수행한다.  $c_0$ 와  $\rho_0$ 는 유체의 음속과 밀도,  $M_i = v_i/c_0$ 는 물체의 국부 이동 마하 수,  $M_r = M_i \hat{r}_i$ 은 상대 마하 수,  $M_n = v_i n_i/c_0$ 이다.  $M = \sqrt{M_i M_i}$ 는 음원의 이동 마하수,  $\hat{r}_i = \vec{r}/r$ 는 거리 벡터에 대한 단위벡터,  $r = \sqrt{r_i r_i}$ 는 음원과 관찰자까지의 거리이다.  $v_i, n_i$ 는 물체의 국부 이동속도와 수직 단위벡터를 각각 표시하며, 괄호 [ ] 기호는 지연시간  $\tau = t - r/c_0$ 을 고려한 연산을 의미한다. 두 번째로 하중소음은 다음과 같다.

$$4\pi p'_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[ \frac{l_i \hat{r}_i}{r(1-M_r)^2} \right] dS + \int_{f=0} \left[ \frac{l_r - l_i M_i}{r^2 (1-M_r)^2} \right] dS + \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[ \frac{l_r (r \dot{M}_i \hat{r}_i + c_0 M_r - c_0 M^2)}{r^2 (1-M_r)^3} \right] dS \quad (2)$$

여기서  $l_i$ 는 단위면적당 유체에 가해진 힘이다.

### 3.2 광역소음 해석

회전의 뒷전에서 Karman 와류의 흘림은 회전

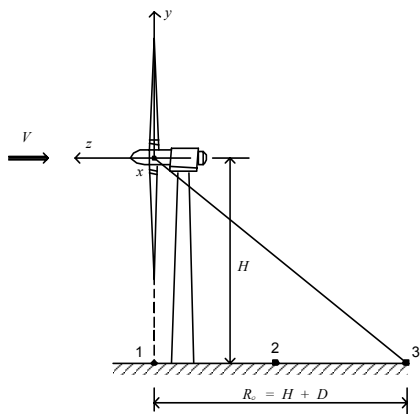
익 표면상에 주기적인 양력과 항력의 변동을 가져 오게 된다. Fukano 등<sup>(7)</sup>은 이 소음원을 저압 축류 팬에서의 주소음원으로 규정하고 회전익의 형상과 회전수 등을 고려하여 대상 팬의 소음정도를 가늠할 수 있는 매우 간단하고 유용한 수식을 제공하였으며, 실험치와 비교하여 매우 좋은 결과를 보여주었다. 일반적으로 3차원 공력해석을 통해서와 와류홀림에 의한 비정상하중을 계산하는 것이 쉽지 않아 Fukano 방법은 와류홀림에 의한 소음해석에 있어서 매우 훌륭한 방법임을 알 수 있다. 이 방법이 의미를 갖는 이유는 보통 저속 회전하는 소형 회전익의 경우에는 두께소음이나 정상하중 분포력에 의한 하중소음 등, 이산소음 성분이 와류홀림에 의한 광대역 소음보다 작게 나타나는 경향이 있기 때문이다. Fukano에 의한 전체 sound power  $E$ 는 다음과 같다.

$$E = \frac{b\pi\rho_0}{1200c_0^3} \int dW^6 dr \quad (3)$$

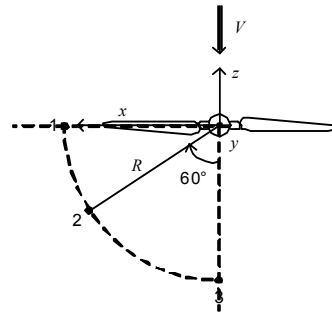
여기서  $b$ 는 회전익의 개수,  $W$ 는 회전익 반경방향 위치에서의 접선 속도,  $d = d_t + \delta_p^* + \delta_s^*$ 는 경계층의 변위두께를 감안한 회전익 뒷전에서의 후류의 특성길이를 나타낸다.

#### 4. 결과 및 토의

풍력터빈 해석을 위한 좌표계와 소음 측정 위치는 Fig. 4에 나타내었다. IEC61400-11을 참조하고 높이  $H$ 는 블레이드 직경과 같은 값으로 처리하였다. 소음을 관측하는 위치는 지면상에 점 1, 2, 3 세 지점으로 하였으며, 식 (1)~(2)를 이용한 이산 소음과 식(3)을 이용한 광역소음을 수치해석으로 수행하기로 한다. Fukano의 방법이 저압 축류팬에 대해서 계산이 수행되었지만 풍력터빈과 같이 저속 회전하는 경우에는 그 적용성이 우수할 것으로 기대되며, 피치제어 방식의 풍력터빈의 경우에는 유효받음각이 그리 크지 않아서 실속에 의한 소음은 블레이드 뒷전의 와류홀림에 의한 소음보다는 작을 것으로 고려된다. 소음해석을 위한 유동정보는 블레이드 요소이론으로부터 얻어내었다.



(a) Coordinate system



(b) Measured positions

Fig. 4 Observation positions of sound signal

두께소음과 하중소음의 세기를 계산하기 위해서는 블레이드 스패ن 방향으로의 형상과 3축에 대한 하중분포를 알아야 한다. 본 계산에 사용된 1MW급 블레이드는 허브축에 최대 40% 두께비를 갖는 에어포일을 위치시키고 블레이드 팁에서는 두께비가 18%되는 에어포일을 위치시키며 총 6개의 에어포일을 사용하여 허브에서의 구조적 강성과 팁에서 공기역학적 우수성을 갖도록 설계한 것이다. 이 블레이드의 스패ن방향으로의 체적분포를 도시하면 Fig. 5와 같다.

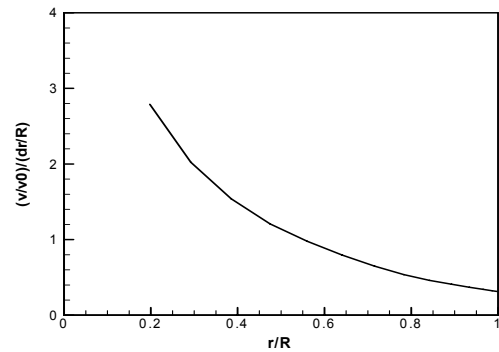


Fig. 5 Volume distribution along the blade span

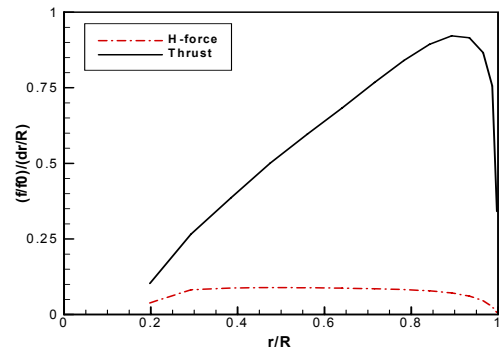


Fig. 6 Loads distribution along the blade span

Fig. 6은 블레이드 스패ن 방향으로의 하중분포를 나타낸 것으로 Prandtl의 팁 손실 효과를 받

영한 결과이다. Thrust는 바람 방향으로의 하중을 나타내며, H-force는 블레이드 회전면에 놓여 토크를 유발하는 하중을 의미한다.

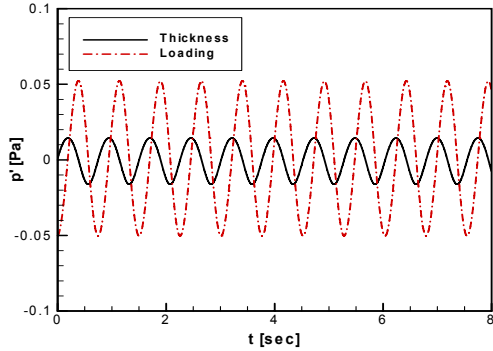
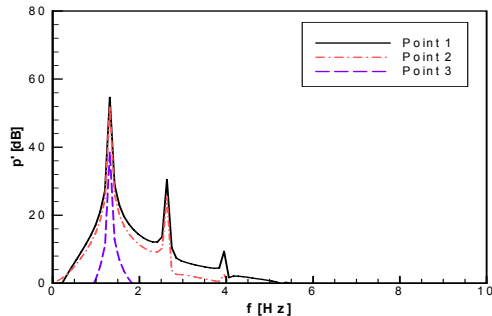
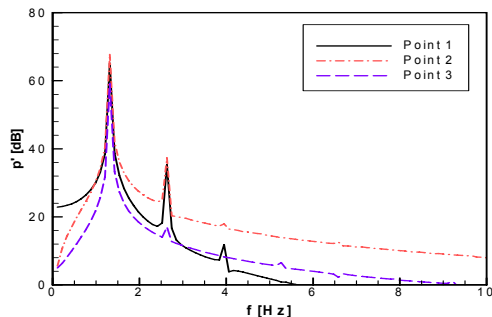


Fig. 8 Acoustic pressure signals at position 1

관측점 1에서 계산된 두께소음과 하중소음에 대한 시간 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 세 개의 관측점에서 얻어진 소음을 두께소음과 하중소음별로 FFT 분석한 결과 강한 이산소음 특성을 보여주고 있으며, BPF에 해당하는 소음이 가장 강한 소음 수준을 보이고 있다. OASPL은 관측점 1, 2, 3 세 점에서 65.6dB, 69.1dB, 59.9dB로 나타남을 알 수 있었다. 블레이드 뒷전에서 형성된 와류에 의한 소음은 Fig. 10에 나타내었으며, 대부분 가청주파수 대역에 분포하며 OASPL 77.5dB를 보이고 있다.



(a) Thickness noise



(b) Loading noise

Fig. 9 FFT results at three measuring positions

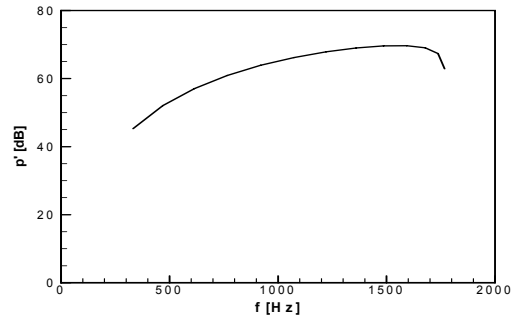


Fig. 10 Broadband noise from wind turbine blade

광역소음의 계산을 위해서 입력된 블레이드 뒷전 두께는 5mm를 적용하였으며, 실제적으로는 허브 측에서는 20mm 정도에 해당하고 팁 쪽에서의 두께는 매우 얇은 편이다. 입력치를 줄이면 소음 수준은 더 줄어들게 되는 특성을 갖는다.

## 5. 결론

1MW급 풍력터빈에 대해서 이산소음과 광역소음 해석을 수치적으로 계산하여 얻어내었다. 이산소음은 가청주파수를 벗어난 초저주파수 대역에 분포하며, BPF에서 최대 70dB 정도를 보였다. 광역소음은 가청주파수 대역에서 78dB로 이산소음보다는 약간 크게 나타났다. 초저주파의 감각수준 레벨은 계산 결과보다 상당히 높기 때문에 풍력터빈에서 크게 문제시 되지 않을 것으로 보인다.

## References

- [1] IEC61400-11, 1999, Wind Turbine Generator Systems - Part 11 : Acoustic Measurement Techniques, International Electrotechnical Commission.
- [2] 유기완, 2005, "축소형 UH-1H 로터에서의 광역소음과 이산소음의 비교," 한국항공우주학회 제33권 제1호, pp.20~25.
- [3] 유기완, 2005, "항공기용 프로펠러에서의 두께 및 하중소음 예측," 한국항공우주학회 제33권 제2호, pp.39~45.
- [4] 유기완, 2007, "피치각 변화에 따른 헬리콥터 로터에서의 두께 및 하중소음 방사," 한국항공우주학회 제35권 제10호, pp.868~874.
- [5] Ffowcs Williams, J. E., and Hawkings, D. L., 1969, "Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 264, pp. 321-342.
- [6] Farassat, F., and Succi, G. P., 1983, "The prediction of helicopter rotor discrete frequency noise," *Vertica*, Vol. 7, pp.309-320.
- [7] Fukano, T., Kodama, Y., and Senoo, Y., 1977, "Noise generated by low pressure axial flow fans, I: Modeling of the turbulent noise," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 50, pp. 63-74.