풍력발전기 소음

신 형 기*
(한국에너지기술연구원)

1. 머리말

현재 전 세계적인 에너지 문제로 인하여 재생에너지가 가장 큰 이슈로 대두되고 있다. 여러 재생에너지원 가운데 풍력발전은 미국과 유럽에서 가장 성공적으로 상용화를 이루고 있으며, 기존 발전원과 경제성에서도 대등한 수준을 이루고 있다. 그리고 2011년 말 현재 전 세계적으로 241 GW 용량의 풍력발전기가 설치되어 있다.

이러한 대규모 풍력발전기의 보급은 친환경적이라는 재생에너지의 명성에 걸맞지 않는 또 다른 환경 문제를 유발시키고 있다. 이 가운데 가장 큰 영향을 주는 것이 소음 문제이다. 풍력발전기에서 발생하는 소음은 설치 장소 주민에게 불쾌감을 유발함으로써 민원 문제를 발생시켜 풍력발전기의 보급에 장애요인으로 작용하게 된다.

현재 상용화되어 있는 3개의 날개를 가진 upwind 방식의 풍력발전기와 유사한 형태의 기계장치는 크게 헬리콥터 로터와 축류 휀, 선박의 프로펠러를 들 수가 있다. 풍력발전기의 로터는 이러한 기계장치와 그 형태와 작동방식이 유사하지만 로터의 회전수, 날개의 끝단속도, 유입류의 난류 조건의 상이성으로 인하여 주 소음원은 서로 다른 발생 메커니즘을 가지게 된다. 회전익 소음 분야에서 많은 연구가 이루어진 헬리콥터, 축류 휀 등의 연구 결과를 적용시키는 것에 무리가 따른다.

2. 풍력발전기 소음

2.1 풍력발전기 소음 특성

실제 2 MW급의 대형풍력발전기의 소음크기는 표 1과 같다. 풍력발전기의 소음은 일반적인 상황에서 음압이 60 dB(A)이하이며 거리가 500 m 이상 떨어지게 되면 45 dB(A)이하로 감소하게 되어 다른 기계장치에 비해 그리 크지 않은 소음수준을 갖는다. 그러나 풍력발전기의 운전 특성상 24시간 운전을 가정하여 연속적으로 운전하게 되므로 배경소음수준이 낮은 야간의 경우 주변

표 1 풍력터빈의 소음 수준

Model Nordex N90 Rotor Dia.90 m Hub height : 80 m							
Wind speed (m/s)	SPL	Sound pressure level dB(A)					
		Distance (m)	100	200	300	400	500
6	100.9		53.8	49.2	46.1	43.7	41.8
7	101.7		54.6	50.0	46.9	44.5	42.6
8	102.8		55.7	51.1	48.0	45.6	43.7
9	103.3		56.2	51.6	48.5	46.1	44.2

* E-mail : hkeewind@kier.re.kr

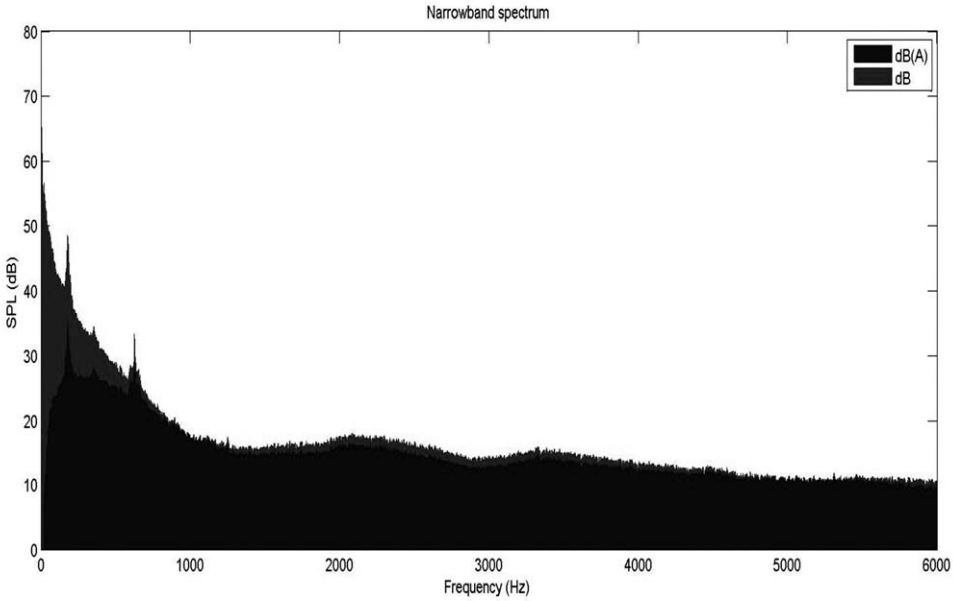

그림 1 풍력터빈의 소음 스펙트럼(1.5 MW 급, 풍속 : 10 m/s, 계측 위치 : 100 m 로터 후면)

거주자에게 불쾌감을 유발할 수 있으며, 쉬지 않고 연속적으로 발생하게 됨으로써 성가심(annoyance)을 유발하게 된다.

풍력발전기의 일반적인 소음 스펙트럼은 그림 1과 같다. 풍력발전기 소음의 주파수 특성은 일반적인 회전익 장치와는 달리 토널(tonal) 성분이 약하다. 또한 회전수가 30 RPM이하가 되기 때문에 BPF(blade passing frequency)가 가청 주파수 이하가 된다. 이에 비해 광대역 소음이 주요 소음 성분으로 존재한다. 따라서 기존의 회전익 소음의 해석과 예측에 많이 사용되었던 BPF 성분을 중심으로 하는 분석 기법의 적용에 어려움이 따른다.

풍력발전기의 주요 소음 발생 요소는 그림 2와 같다. 이 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 가장 큰 소음을 발생시키는 것은 공력소음 성분이며 이는 주로 블레이드에서 발생하게 된다.

풍력발전기의 공력 소음은 날개의 팁 속도와 밀접한 관계를 가지며 다음식과 같이 날개 팁 속도의 로그스케일에 비례하게 된다.

$$\text{음향파워}\ (A-weighted) \propto \log_{10}(\text{날개팁속도}) \quad (1)$$

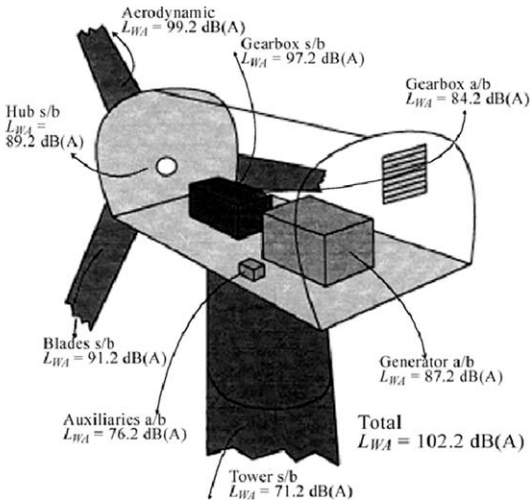

그림 2 풍력 터빈의 소음원

따라서 소음을 줄이는 가장 손쉬운 방법은 풍력발전기의 회전 속도를 낮추어 팁 속도를 낮추는 방법이다. 그런 이유로 표 2에서 볼 수 있듯이 육상용 풍력발전기의 경우 60 m/s 내외의 팁 속도를 가지도록 운전되고, 소음이 상대적으로 적은 해상용 2 MW급 이상의 풍력발전기는 80 m/s의 팁 속도를 갖는다.

표 2 여러 종류의 로터 직경에 따른 날개 팁 속도

Wind turbine	Power (MW)	Dia (m)	Tip speed (m/s)
BONUS 600 kW	0.60	44.0	62.2
BONUS 1 MW/54	1.00	54.0	42.6
BONUS 1.3 MW/62	1.30	62.0	61.7
BONUS 2 MW/76	2.00	76.0	67.7
BONUS 2.3 MW/82	2.30	82.4	71.6
De Wind D4	0.60	48.0	73.4
De Wind D6/1000	1.00	62.0	67.2
De Wind D6/62	1.00	62.0	81.8
De Wind D6/64	1.25	64.0	83.1
De Wind D8/2MW	2.00	80.0	86.7

그러나 팁 속도를 낮게 운전하게 되면 실제로 기계적인 부담을 증가시키게 된다. 출력은 축의 토크와 회전수의 곱으로 표시되기 때문에 일정 출력을 얻기 위해 회전수를 낮추게 되면 결국 토크가 증가되어 주축에서부터 풍력발전기 전체의 하중을 증가시키게 된다. 따라서 소음 문제로 인해 낮아진 회전수는 풍력발전기 전체의 하중을 증가시키고 이는 제작 단가의 상승과 유지 보수의 문제에 악영향을 주게 된다.

2.2 소음원의 분석

풍력발전기의 주요 공력 소음원은 표 3과 같다. 이 가운데 주 소음원은 난류 유입 소음, 난류 경계층 소음, 끝단 소음이다. 따라서 회전익 소음해석에 많이 사용되는 음향상사법을 적용하고자 할 경우 사중극이 주요 소음원이 되기 때문에 정확한 난류 유동의 해석이 필요하다. 그러나 현재까지 현실적으로 블레이드 주위의 난류해석은 실질적으로 많은 어려움이 따르게 된다. 따라서 소음의 해석과 예측을 위하여서는 현재까지 실험식에 기반한 방법이 주류를 이루고 있다.

그림 3은 유럽 SIROCCO(SIlent ROtors by acoustic Optimisation, 2003~2006) 프로젝트의 연구 결과로 풍력발전기 날개의 주 소음원의 위치

표 3 풍력터빈에서 소음원의 주 공기역학

		Mechanism	Characteristics
Steady thickness noise		Rotation of blades	Frequency is related to BPF, not important at current rotational speed
Unsteady loading noise		Passage of blades through tower velocity or wakes	Frequency is related to BPF, small in case of unwind turbines
Inflow turbulence noise		Interaction of blades with atmospheric turbulence	Contribution to broadband noise; not yet fully quantified
AIRFOIL SELF NOISE	Trailing edge noise	Interaction of boundary layer turbulence with blade trailing edge	Broadband, main source of high frequency noise
	Tip noise	Interaction of tip turbulence with blade tip surface	Broadband; not fully understood
	Stall, separation noise	Interaction of turbulence with blade surface	Broadband
	Laminar boundary layer noise	Non-llinear boundary layer instabilities interacting with the blade surface	Tonal, can be avoided
	Blunt trailing edge noise	Vortex shedding at blunt trailing edge	Tonal, can be avoided

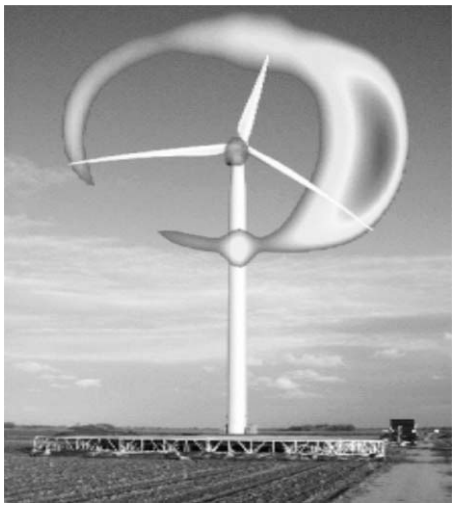

그림 3 풍력 터빈의 소음도(SIROCCO 프로젝트)

는 날개의 팁 부분이 아니고 날개 끝 근처 70~85 % 위치가 되며 날개가 회전하며 지상으로 접근할 때 강한 소음을 발생시키는 것을 보여주고 있다. 따라서 풍력발전기 날개의 소음을 해석하기 위하여서는 후류와 날개의 간섭에 의한 영향보다는 난류에 의한 영향과 에어포일 자체가 방사시키는 소음이 주로 영향을 주는 것으로 판단된다.

2.3 소음해석기법

앞에서 언급한 바와 같이 풍력발전기의 주요 소음은 광대역 소음 분포 특성을 갖는다. 이 가운데 세 가지 주요 소음 성분에 대한 해석은 식 (2)와 같이 표시된다.

- 난류 유입 소음 (turbulence ingestion noise, TIN)

$$SPL_{1/3}(f) = 10\log_{10}\left[B\sin^2\theta\rho^2 cR\overline{w}^2U^4/\left(d_0^2c_0^2\right)\right] + K_a(f) \quad (2)$$

- 난류 경계층 소음(turbulent boundary - layer/ trailing-edge interaction noise, TBN)

$$SPL_{1/3}(f) = 10\log\left\{K_2U^5B\overline{D}\frac{\delta s}{r_0^2}\left(\frac{S}{S_{max}}\right)^4 \times \left[\left(\frac{S}{S_{max}}\right)^{1.5} + 0.5\right]^{-4}\right\} \quad (3)$$

- 와동 발산 소음(trailing-edge bluntness vortex shedding noise VSN)

$$SPL_{1/3}(f) = 10\log\left[\frac{K_3BU^6ts\sin^2\theta\sin\psi}{(1+M\cos\theta)^6 r_0^2}\right] \text{ for } t/\delta^* > 1.3 \quad (4)$$

$$SPL_{1/3}(f) = 10\log\left[\frac{K_4BU^{5.3}ts\sin^2(\theta/2)\sin^2\psi}{(1+M\cos\theta)^3\left[1+(M-M_c)\cos\theta\right]^2 r_0^2}\right] \text{ for } t/\delta^* < 1.3 \quad (5)$$

이 글에서는 표 4에 제시된 풍력발전기에 대하여 소음 계산 및 측정값의 비교 분석 결과를 보인다. 그림 4와 그림 5는 앞의 식에 의해서 계산된 소음 예측값과 측정값에 대한 비교이다. 그림의

표 4 WTS-4와 USWP 요목

	WTS-4	USWP
Rotor location	Down wind	Down wind
RPM	30.0	72.0
No. of blades	2	3
Tip speed m/s(M_{tip})	122.4(0.36)	66.5(0.19)
Rotor diameter	78.4	17.1
Hub height	80.0	18.3

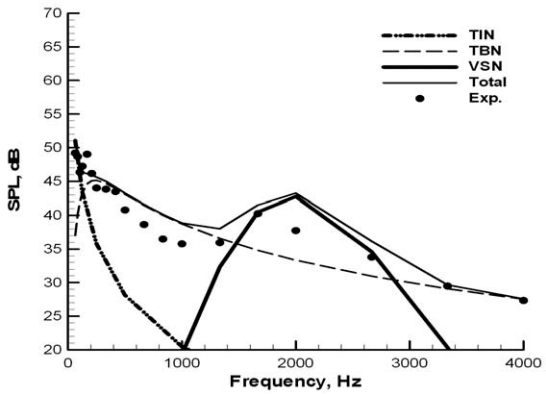

그림 4 USWP(r=91 m)의 광대역 소음 예측 및 계측 결과의 비교

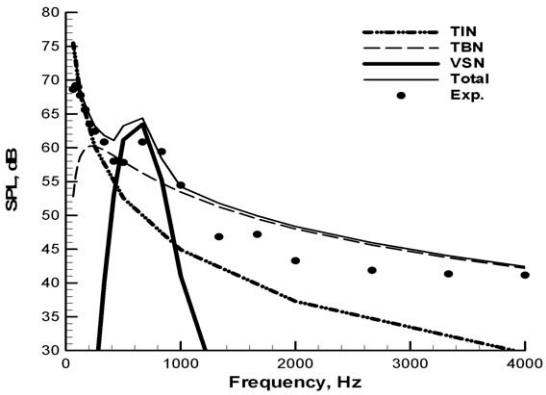

그림 5 WTS-4(r=200 m)의 광대역 소음 예측 및 계측 결과의 비교

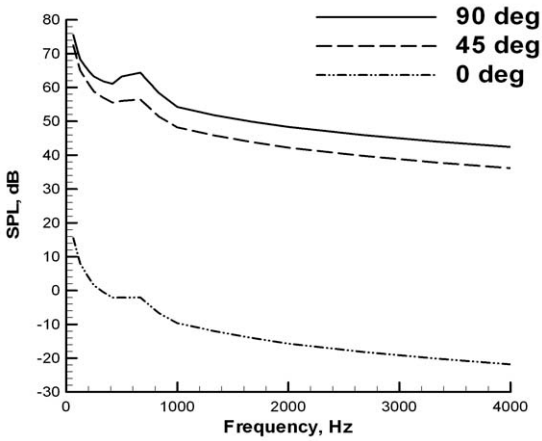

그림 6 WTS-4의 소음 지향성 패턴

결과들을 살펴보면 저주파 영역의 경우 난류 유입 소음이 주성분이며 고주파 영역에서는 난류 경계층 소음이 지배적으로 영향을 주는 것을 알 수 있다. 와동 발산 소음의 경우 에어포일 뒷전 두께와 관련이 있으며 이에 해당하는 중심주파수를 기준으로 하여 특정한 주파수 대역에서 큰 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 이러한 특정한 주파수 대역은 사람의 등청감 곡선을 고려할 때 사람이 가장 민감하게 느끼게 되며 풍력발전기의 소음 저감을 위하여 주로 이에 관련한 연구가 필요할 것으로 보인다.

그림 6은 풍력발전기 광대역 소음의 예측값을 보여주고 있다. 여기서 90°는 풍력발전기의 축방향, 즉 정면 방향을 나타내고 0°는 로터회전면, 즉 풍력발전기의 옆 방향을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 것과 같이 축 방향으로 강한 방향성을 보임을 알 수 있다. 이는 이중극(dipole) 소음의 전형적인 특성이며 이를 통해 볼 때 풍력발전기의 주요 소음은 블레이드의 공력하중에 의한 하중 소음으로 볼 수 있다. 또한 이러한 소음은 축 방향으로 대부분 전파되기 때문에 풍력발전기의 설치 시 주 풍향 방향을 고려하여 풍력발전기의 정면 또는 후면 방향이 민가와 일치되지 않도록 하는 것이 민원의 소지를 피할 수 있는 하나의 방법이라고 하겠다.

3. 맺음말

최근에 와서 심각해진 소음 문제를 해결하기 위해 유럽과 미국에서는 저소음 날개의 개발에 주력하고 있지만, 현재까지 소음 발생 메커니즘이 완전하게 밝혀지지 않았으며 이로 인해 소음 해석 기법 자체의 개발도 미진한 상태이다. 이러한 이유로 그 필요성에도 불구하고 현재까지 확연하게 소음이 저감된 블레이드의 개발은 이루어지지 못하고 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 풍력발전기의 주요 소음은 광대역 소음이며 이로 인하여 해석과 예측에 어려움이 뒤따른다. 가청 성분 영역에서 주요 소음 성분 가운데 에어포일 자체에서 발생하는 소음이 주요 소음원으로 나타나고 있으며, 이러한 소음의 발생 특성상 날개의 형상 변경만으로는 저소음화가 어렵고 에어포일의 설계에서부터 저소음을 고려한 설계가 필요하다 하겠다.

이 외에도 그림 1에서 보듯이 BPF가 가청 주파수 이하의 저주파대역에서 강하게 나타난다. 현재 저주파소음의 유해성에 대한 우려가 확대되고 있으며 풍력발전기의 대형화에 따른 회전수의 감소는 저주파 소음의 영향을 더욱 증대시킬 것이다. 따라서 이에 대한 연구 역시 더욱 필요해질 것으로 생각된다. KSNVE