

풍력발전 소음의 기준과 감소 대책

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 이홍원
(hongwlee@reseat.re.kr)

1. 머리말

지구온난화에 대응하기 위한 CO₂ 배출감축을 위해 청정한 풍력에너지의 이용이 전 세계적으로 확대되고 있다. 한국풍력산업협회 자료에 의하면 2016년 말 기준 국내에 설치된 풍력발전기(wind power generator)는 총 83개소에 551기이며 설비용량은 1GW(1031.4MW)에 달하는 것으로 집계됐다. 이는 화석연료 발전을 포함한 국내 전체 발전설비용량 100GW의 약 1%, 전체 신재생에너지 발전설비용량 14GW의 약 7%에 해당하는 규모이다.

이와 같이 국내에 풍력터빈(wind turbine) 설치가 늘어남에 따라 풍력발전단지 인근 지역으로부터의 소음관련 민원이 증가하고 있다. 세계보건기구(WHO)의 자료에 의하면 일반 사람들에게 낮 시간에 55dB보다 높은 소음은 심한 불쾌감(annoyance)을 주고, 야간에는 40dB 이상이면 수면장애를 일으킬 수 있다.

또한 풍력발전에서의 소음과 진동은 전기로 전환될 에너지의 손실을 의미하고 심한 경우에는 고장으로 이어진다. 따라서 풍력단지 운용에서의 소음 감소는 관련 민원의 해소는 물론 풍력발전의 효율향상과 수명연장 등 풍력산업의 보급 확대를 위해 매우 중요하다. 하지만 풍력발전의 소음 감소 기술은 현재 기술적이나 경제적 측면에서 매우 부족한 수준이라고 할 수 있다.

이러한 풍력발전의 소음감소 기술에 대한 개발 사례로서, 일본 내 풍력발전협회 및 6개회사가 참여한 환경성 위탁사업인 ‘지구온난화 대책기술 개발실증 연구사업(소음을 회피/최소화한 풍력발전에 관한 기술개발, 2011~2013년)’을 예로 들 수 있다.⁷⁾ 지구온난화 대책 기술개발의 차원에서 추진되는 이 연구 사업은 주로 풍력발전의 소음원인 풍력발전기 본체에 대한 소음감소 기술개발¹⁾을 목적으로 하고 있다.

다음은 풍력발전 소음의 환경 영향 및 국내외 소음 기준, 그리고 소음 감소 기술개발 사례와 풍력발전 소음 이슈에 대한 종합적인 접근 방안에 대해 기술한다.

2. 풍력발전 소음의 영향과 기준

2-1. 소음에 의한 환경 영향

일반적으로 풍력발전단지에 인접한 지역 내 사람들은 풍력발전기가 일으킨 소음이 주위의 암 소음(background noise)보다 크게 높을 때 불쾌감을 느낀다. 또한 풍력발전기의

소음은 여러 연구를 통해 불쾌감뿐만 아니라 수면장애, 이명, 어지럼증 등 생활의 질과 건강에 뚜렷한 영향을 끼치는 것으로 밝혀졌다. 한국풍력산업협회의 자료에 의하면 “풍력발전기의 소음은 인간이 민감하게 반응할 수 있는 200~5000Hz 주파수 범위에서 주로 발생하고, 이 때문에 풍력발전단지 주변 1900m 이내 사람들은 심야 소음에 고통을 호소하고 있다”고 밝혔다. 실제 피해를 본 사례도 있다. 전라남도의 발표에 따르면 풍력발전소가 위치한 전남 영양군과 신안군 지역 주민 39%가 두통에 시달리고 43%는 어지럼증을 호소했다.

한편 전 세계적으로 육상풍력단지에서의 소음 문제와 입지 부족으로 지난 10년간 해상 풍력단지가 건설이 늘어나고 있다. 해상풍력단지의 경우는 변환기 플랫폼(converter platform)이나 풍력터빈과 같은 해상구조물을 파일박기(pile driving) 공법 등으로 건설함에 따라 높은 소음이 바다로 방사된다. 결과적으로 해상풍력의 경우도 바다 포유동물의 서식환경에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 국내 서남해 해상풍력발전단지 건설 사업은 이러한 배경에서 어민들의 반대에 어려움을 겪고 있다.

풍력발전기는 직접적인 소음 문제 외에도 반사특성(echo characteristics)이 항공기나 폭풍의 패턴과 유사하여 레이더 추적에 영향을 주기도 한다. 레이더에 대한 직접 간섭은 타워(tower), 나셀 nacelle), 블레이드(blade)와 같은 풍력발전기 요소들의 높은 반사율(reflectivity) 때문으로 알려져 있다. 이 요소들은 탐지물체 판독오류를 일으키고 음영지역(shadowing area)을 증가시키는 등 레이더의 추적 감도(sensitivity)를 떨어뜨린다. 이와 같이 풍력발전시설에서의 소음 문제는 풍력단지 개발에서 고려해야 할 중요 요소이므로 풍력발전에서의 소음 대응 방안 구축이 반드시 필요하다.

2-2. 소음의 국제 기준

1999년에 WHO는 주거환경에서의 집단 소음에 대한 ‘1999 가이드라인’을 발표했다.⁵⁾ 이 가이드라인에서, 일반 사람은 낮/저녁시간대에 55dBA(Leq daytime, 주간등가소음)에서 심한 불쾌감을 느끼고, 50dBA에서는 중간 수준의 불쾌감을 느낀다. 또한 밤 시간대에 수면장애를 일으키지 않는 소음한계 값은 실외와 실내에서 각각 45dBA, 30dBA(Leq nighttime, 야간등가소음)으로 되어 있다. 이후 2009년에 WHO는 밤 시간대에 있어서 수면장애 우려가 없는 실외 소음한계를 종래의 45dBA에서 40dBA로 강화했다.⁶⁾

이러한 WHO 가이드라인을 고려하면 풍력발전시설로부터 야간 수면장애를 피하기 위해서는 밤 시간대의 소음 목표를 40dBA로 정하여 설계하는 것이 이상적이라고 할 수 있다. WHO 가이드라인은 각국의 풍력발전 프로젝트 소음 기준에 기초로 활용되고 있다. 풍력발전 프로젝트에 관련된 해외 풍력발전 기준/규격은 <표 2-1>와 같이 요약된다.

<표 2-1 > 해외 풍력발전 프로젝트 관련 기준/규격⁴⁾

출처	허용한계	비고
WHO	40dBA 야간	수면장애 한계
풍력발전 소음에 대한 국제 기준	45dBA 주간 / 40dBA 야간	전체 규격의 산술평균
U.S. EPA	45dBA 주간 / 35dBA 야간	DNL=45dBA
미국의 주 규격	38-40dBA 야간	3개주(ambient-based 방법)

2-3. 소음의 국내 기준

환경부는 2016년 종료 예정이었던 ‘육상풍력 개발사업 환경성 평가 지침’을 올해 말까지 연장했다. 이 지침은 풍력발전 설치 시 소음과 생활환경 등에 대한 평가 항목을 담고 있다. 환경부는 지난 2014년부터 이 지침을 시행해왔는데 현실 여건 변화 등을 반영해 지난해 말까지 개정할 예정이었다. 이를 위해 산업통상자원부와 함께 전문가 태스크포스 팀도 운영했지만 환경부는 산업계와 환경단체 등에서 다양한 의견을 제시하면서 검토할 사안이 많다는 이유로 기존 지침을 1년 연장하기로 하고 올해 말까지 최종 개정안을 마련할 계획이다.

특히, 환경부는 이 지침을 연장하면서 소음·진동 기준을 강화하는 내용을 반영했다. 현재 풍력발전소 건설 시 소음·진동관리법에 의한 소음기준을 지켜야 한다. 인근에 학교·종합병원·공공도서관 등 주거지역이 있는 ‘가군’의 소음기준은 아침/저녁 50dB, 주간 55dB, 야간 45dB 이하이다. 이 밖의 지역인 ‘나군’은 아침/저녁 60dB, 주간 65dB, 야간 55dB 이하이다. 환경부는 이 소음기준에 풍력발전소 입지 인근에 주거시설이 있으면 주거지역 소음기준 준수를 권고한다는 추가 조항을 반영했다. 다시 말해 풍력발전소가 ‘나군’인 산 속에 건설돼도 인근에 민가나 마을이 있으면 ‘가군’ 소음기준을 적용하겠다는 것이다. 이 경우 야간 소음기준으로 55dB이 아닌 45dB 이하를 적용받게 된다.

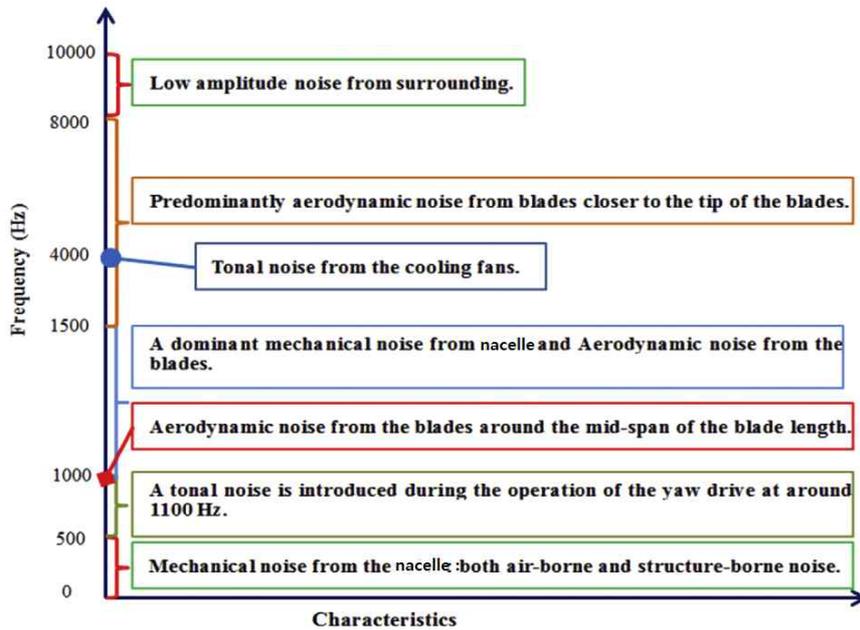
3. 풍력발전 소음의 종류

3-1 소음의 종류

풍력발전기의 발생 소음은 풍력터빈 블레이드가 회전하며 발생하는 공력소음(aerodynamics noise)과 증속기(gear box), 발전기(generator) 등에서 발생하는 기계소음(mechanical noise)으로 구분할 수 있다. 두 가지 소음 중 공력소음이 풍력발전 소음의 주된 발생원이고 공력소음이 기계소음에 비해 일반 사람들에게 더 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 풍력발전 소음은 주파수에 따라 고주파 소음, 중간주파 소음, 저주파 소음으로 나눌 수 있다. 고주파 소음은 휘파람소리와 같은 높은 주파수의 음이고 중간주파수 소음은 보통 말소리와 같은 중간 높이의 음을 나타내며, 저주파 소음은 웅~웅 소리와 같은 낮은 음을 말한다. 이러한 모든 소음은 풍력터빈 블레이드의 속도와 부하

에 영향을 크게 받는다.¹⁰⁾

<그림 3-1>은 풍력발전 소음에서의 주파수 특성 분포도의 한 가지 사례다. 100~500Hz 사이의 저주파대역에는 기계소음이 주 발생원이고 소음의 메인 주파수인 500~1000Hz대에서는 공기와와의 작용으로 발생하는 블레이드 소음이 주로 차지한다. 그리고 1000~1500Hz 주파수대는 나셀로부터의 기계소음과 블레이드 소음이 함께 포함되고 2000~8000Hz대는 공력소음이 대부분 차지한다.³⁾



<그림 3-1> 풍력발전 소음 주파수 특성 분포도 ³⁾

3-2. 공력소음

풍력터빈 블레이드와 바람 사이에서의 상호작용에 의해 발생하는 공력소음은 유입난류 소음(inflow turbulence noise), 순음형 소음(tonal noise) 및 블레이드 자체 소음(airfoil self-noise)⁸⁾으로 나눌 수 있다. 유입난류 소음은 터빈 블레이드와 대기 난류 간의 상호작용에 의한 압력변동으로 발생된다. 순음형 소음은 증속기, 발전기, 냉각팬(cooling fan) 등에서 방사되어 인접부에서의 들을 수 있는 소음이고 블레이드 자체 소음은 주로 회전하는 터빈 블레이드와 공기흐름 간의 마찰에 의해 발생된다.⁹⁾

3-3. 기계소음

풍력발전기의 기계소음은 증속기, 허브(hub), 커플링(coupling), 발전기 등의 트랜스미션 체인(transmission chain) 시스템에서 주로 발생된다. 증속기는 마찰과 진동에 의해 충격을 받아 소음을 일으키고 베어링(bearing)의 마찰과 진동도 역시 소음을 발생시킨다. 또한 회전 요소들의 언밸런스도 소음을 만든다. 예를 들면 증속기와 발전기를 연결하는

고속 축의 정렬 방향이 좋지 않으면 25~30Hz의 소음이 발생된다. 기계소음에는 냉각 팬, 발전기, 증속기, 나셀 및 허브와 같은 기계적 구조물 자체에서 발생하는 소음도 포함된다.³⁾

4. 풍력발전의 기계소음 감소 기술¹⁾

4-1. 기계소음 발생 메커니즘

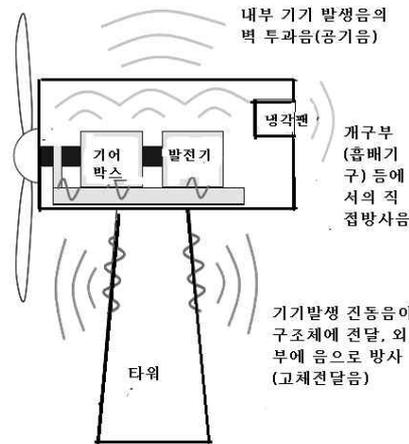
기계소음은 공력소음에 비해 에너지는 약하지만 불쾌감을 주는 지배적 주파수 성분이 포함되어 있기 때문에 소홀하게 다룰 수 없다. 풍력발전기의 기계소음에 대해 이미 보고된 실측 주파수 분석 자료에 의하면 대략 100~200Hz의 주파수 대역에서 뚜렷한 우세 주파수(predominant frequency) 성분이 존재하는 것으로 알려져 있다. 이 소음은 일정 거리 이내에서 나셀 내의 증속기나 발전기 등에서 발생하는 기계음보다 더 뚜렷하게 들림으로써 불쾌감을 늘리는 것으로 추정된다.

또한 풍력발전기의 증속기 등 나셀 내부기기의 진동, 타워의 진동, 타워의 근접(외부) 부위로부터의 소음에 대한 실측 주파수 분석에서 대략 200Hz를 중심으로 하는 주파수대역에서 공통적으로 우세한 주파수 성분이 발견됐다. 이 실측 데이터에서 증속기 진동과 타워 진동의 크기 차이는 수 dB 정도이고 나셀 내부기기로부터 타워로 진동이 직접 전달되는 것으로 밝혀졌다.

이상의 검토로부터 풍력발전기의 기계소음은 <그림 4-1>과 같이 나셀 내의 기기로부터 발생한 진동이 풍력발전기 구조물에 전달되어 타워에서 외부에 방사되는 고체전달음(structure-borne noise)이 대부분인 것으로 밝혀졌다.

4-2. 고체전달음 감소 기술

고체전달음을 감소시키는 데에는 기기의 탄성 지지(elastic support)에 의한 방진(vibration isolation)이 가장 일반적이다. 하지만 운전 중에 있는 풍력발전기에 있어서 풍력발전기 로터(rotor), 주축으로부터 발전기까지 동력전달계(drive train)를 구성하는 기기들에 대한 방진은 상대적인 변위가 발생되어 정상 운전이 문제될 수 있고 개조 등의 경우에도 곤란하므로 현실성이 낮다.



<그림 4-1> 기계소음의 발생원과 전달경로¹⁾

4-2-1. 동흡진기(dynamic vibration absorber) 개발

전술한 이유로 고체전달음을 줄이는 방법으로는 제진장치(vibration control device)인 동흡진기 적용이 가장 효과적인 것으로 볼 수 있다. 감소 대상의 주파수 영역에서 풍력 구조물의 모드밀도가 높아 모드를 특정하여 제진하는 것은 곤란하다. 따라서 단일강제 가진 주파수에 동조시킨 반공진형(anti-resonance type) 동흡진기를 검토했다. 이 기술을 변압기 등을 대상으로 실용 가능성을 확인하고 있다. 동흡진기를 이용하여 쉽게 효과를 얻는 것은 소음 발생원인 타워의 막 진동(membrane vibration)에 대한 제진 때문이다. 하지만 중량 증가 등의 우려로 이미 설치된 풍력발전기 타워에 적용하는 것은 적합하지 않아 가능한 진동발생원 근접 부위(나셀 내부기기 측)를 제진하는 것도 검토했다.

우선 풍력터빈 구조물로부터 발생한 고체전달음에 대한 제진장치의 소음 감소 성능을 검증하기 위해 풍력발전기 구조물의 모형시료에 대해 동흡진기 시작품으로 기초실험을 실시했다. 이 결과, 약 10dB의 소음이 개선됨으로써 반공진형 제진장치의 실용성을 기대할 수 있었다. 한편 기초실험에서 나타난 문제점을 해결하고 풍력발전기로의 실용을 위해서는 시작장치의 개량이 필요하다. 반공진형 동흡진기는 적용 가능한 주파수 범위가 좁은 단점이 있고 실제 운전 시 회전수 변동 등으로 기기에서 발생하는 진동 주파수가 다소 변하기 때문에 주파수 변동에 추종하도록 개발하는 것이 필요했다.

이를 위해 능동(active) 제진기술을 추가하는 것이 효과적이고 제진효율(장치 질량과 개선 효과의 밸런스)을 향상시키는 것도 중요하다. 풍력발전기로의 실제 적용을 고려하면 제진장치의 소요 중량과 치수를 감안하여 구체적인 부착 구조와 설치방법에 대한 검토가 필요하다.

4-2-2 능동 동흡진기 개발

전항에서 검토한 제진장치(단일의 강제가진 주파수에 동조시킨 반공진형 수동(passive) 동흡진기)에 대해 능동 제어에 의한 동흡진기의 사용을 통해 적용 주파수 범위를 확대시

키는 것을 목표로 했다. 우선 풍력발전기 구조물로부터 발생한 고체전달음에 대한 능동 동흡진기의 소음 감소 성능을 검증하기 위해 풍력발전기 구조물의 모형 시료에 대해 동흡진기 시작품을 적용하여 기초실험을 진행했다.

능동 동흡진기의 여러 구조 가운데 외팔보형(cantilever type) 반공진형 동흡진기에 압전소자를 부착한 방식을 기본요소로 하고 반공진형 동흡진기를 액추에이터(actuator)로 보조할 수 있도록 제어 시스템을 구성했다. 이 방식의 주요 특징은 제어력으로서 동흡진기 질량 대신 스프링부를 이용하고, 제진 빔(vibration control beam)을 복수 탑재하여 제어력과 제어 자유도를 확대시킨 점이다. <그림 4-2>는 이 연구에서 제작한 풍력발전기 타워 내면에 적용한 능동 동흡진기 제진장치이다.



<그림 4-2> 타워 내면용 능동 제진장치¹⁾

능동 동흡진기 제진장치 시작품을 제작하고 이에 대한 성능 실험 결과, 기여도 큰 주파수에서 약 10dB의 고체전달음 감소효과가 확인됨으로써 풍력발전기 실제 운전에서는 고체전달음의 우세 주파수 성분을 5dB 정도 줄일 수 있을 것으로 보인다. 실제 적용에서는 증속기에 대한 제어 자유도의 확대와 타워 표면의 설치 위치의 최적화 등의 과제가 남아 있다. 풍력발전기의 실제 스케일에 맞추어 출력을 늘리고 실제 운전 환경에서의 개선 성능과 내구성 확인을 위해 풍력발전기에 대한 실증운전실험이 필요하다.

4-3. 기계소음의 발생원별 전달 경로와 감소 방안

이상과 같이 나셀 내부기기로부터의 진동이 타워 등 구조물을 통해 외부로 방사되는 고체전달음에 대한 소음감소 기술 개발 사례에 대해 기술했다. 이러한 고체전달음 감소 기술을 포함한 기계소음을 포함하는 모든 기계소음의 발생원, 소음의 전달 경로와 이에 대한 개선 방안을 요약하면 <표 4-1>과 같다.

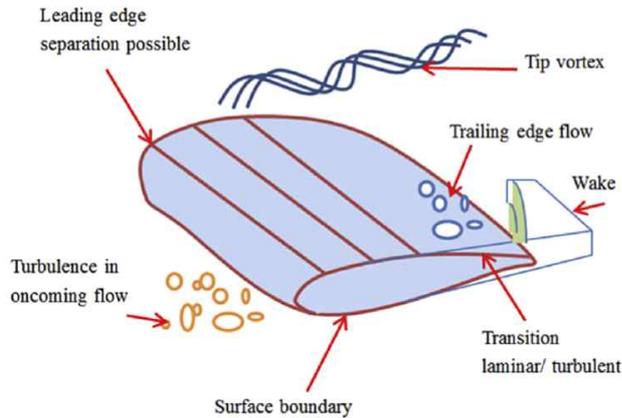
<표 4-1> 기계소음의 발생원, 전달 경로, 감소 방안¹⁾

발생원	전달 경로	감소 방안	
증속기, 발전기, 베어링	기기 발생 진동→ 풍력발전기 구조물(타워 등)→ 외부 방사 (고체 전달음)	기기측	저진동형 기기의 사용
			수리/유지에 의한 저진동화,
		전달경로	기기측 제진(동흡진기)
			방진지지(support), 진동절연(기기 접지부의 방진재 삽입)
			방사면
		방사면 감쇄(댐핑재 부착)	
	기기 방사음→ 나셀 내부→ 나셀 투과음(공기음)	기기측	저소음형 기기의 사용
차음강화, 흡음강화		나셀 패널 방음재 시공(흡음재, 차음재)	
냉각 팬	개구부에서 외부로 직접방사	기기측	저소음형 기기의 사용
		방사개구부	사이렌서 설치

5. 풍력발전의 공력소음 감소 기술¹⁾

5-1. 공력소음 발생 메커니즘

풍력발전에서의 공력소음은 <그림 5-1>에서와 같이 블레이드 깃(airfoil)의 형태, 블레이드 뒷전(trailing edge)의 형태, 블레이드 끝(tip)의 형태, 블레이드의 표면조도 및 블레이드의 끝단 주속(tip peripheral speed)의 영향을 받아 발생된다.¹²⁾ 각 블레이드에는 공기 역학적으로 난류경계층 뒷전 소음(turbulent boundary layer trailing edge noise), 박리 실속 소음(separation stall noise), 층류경계층 소용돌이 소음(laminar boundary layer vortex shedding noise), 뒷전 블런트 소용돌이 소음(trailing edge bluntness vortex shedding noise) 및 난류유입 소음(turbulent inflow noise)의 5가지 자체 소음 메커니즘이 있다.¹¹⁾ 공력소음에 있어서도 가동 중인 풍력발전기에 대한 소음 감소 방안은 기계소음의 경우와 같이 기술과 비용측면에서 충분히 개발되어 있지 않다.



<그림 5-1> 풍력발전 블레이드의 공력소음 발생 개념도¹²⁾

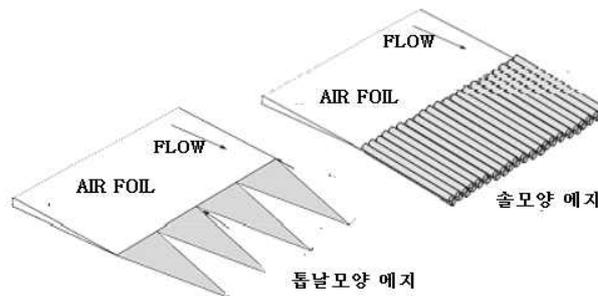
5-2. 공력소음 감소 기술 개발

이 연구에서는 가동 중인 풍력발전기를 대상으로 공력소음 개선을 위해 블레이드 뒷전에 부착 가능한 공력소음 감소용 디바이스(device)를 개발한다. 블레이드로부터의 발생 소음 개선에 관한 연구는 이미 많이 수행되어 왔다. 특히 블레이드 뒷전 형태에 대해서는 폭 넓은 주파수대에서 감소효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

또한 블레이드 뒷전의 디바이스 부착에 의한 풍력발전기 자체의 성능 영향이 우려되어 CFD(computational fluid dynamics) 해석과 풍동(wind tunnel) 실험을 통해 성능을 검증하고 최종적으로는 풍력발전기 실제 기기의 실증실험을 통해 효과를 확인했다.

5-2-1 디바이스의 선정과 CFD 해석

블레이드 뒷전에 부착하는 디바이스 후보로서 문헌조사를 통해 톱날 모양 에지(saw shape edge)와 솔 모양 에지(brush shape edge)를 선정했다(그림 5-2). 또한 블레이드 뒷전을 날카롭게 함으로써 공력소음이 1~2dB 개선 가능한 것을 확인하고 뒷전 형태를 변경했다.



<그림 5-2> 블레이드 뒷전 디바이스 형태¹⁾

가동 중인 풍력발전기의 블레이드에 공력소음 감소용 디바이스를 부착한 경우, 공기역

학적 특성의 변화, 디바이스에 가해지는 공기역학적 하중을 알기 위해 CFD 해석을 실시했다. 계산은 비압축성유동에 관한 표준방법을 사용하고 유동장(flow field)의 조건은 해석대상으로 설치된 풍력발전기의 표준운전 상태로 가정하며 유속은 블레이드의 앞전 주속(leading edge peripheral speed)과 외부 풍속과의 합성 값을 적용했다. 이 결과, 톱날 모양의 디바이스는 크기의 대소와 관계없이 블레이드의 공기역학적 특성이 거의 변하지 않는 것으로 확인됐다.

5-2-2 풍동 및 실증실험에 의한 성능 확인

디바이스 자체의 공력소음 감소 성능을 파악하기 위해 풍동실험을 실시했다. 결과에서 톱날 모양의 에지는 소음 감소량이 가장 높지만 고주파 측(4kHz 이상)의 소음 상승이 가장 높고 내구성도 약할 수 있었다. 따라서 몇 종류의 톱날 모양 에지 중 소음 감소효과가 가장 높고 고주파 측의 소음 증가가 가장 적은 형태의 시료(공기역학적 성능에 주는 영향도 최대로 억제 가능)를 가동되는 풍력발전기에 설치하여 실증실험에 적용했다. 실증실험에서의 측정 결과, 방향과 풍속 범위가 한정되었지만 표준풍속 8m/s 조건에서 최대 3.4dB의 소음감소 효과가 확인되어 선정된 디바이스의 유효성을 확인할 수 있었다. 디바이스의 소음감소 성능 증대와 실용화를 위한 강도실험, 내구성실험 등이 진행되고 있다.

5-2. 공력소음의 감소 방안 요약

이상과 같이 가동 중인 풍력발전기를 주 대상으로 풍력발전기의 공력소음 개선을 위해 블레이드 뒷전에 부착하는 공력소음 감소용 디바이스 개발이 진행되고 있다. 이를 포함하여 풍력발전기의 공력소음에 대해 대책 부위별 개선 방안을 종합하면 <표 5-1>에서와 같다.

<표 5-1> 공력소음의 감소 방안¹⁾

대책 부위	감소 방안	
블레이드	블레이드 에어포일 형태	공기역학적으로 손실이 적고 소음이 낮은 형태로 변경
	블레이드 끝 형태	
	블레이드 표면	평활화
	블레이드 뒷전	예각화
풍력발전기의 회전제어	회전수 강하	풍력발전기의 운전제어 파라미터를 변경, 일부 조건에서는 회전수를 강하(발전량과 trade-off)

6. 풍력발전 소음에 대한 종합적 대응 방향

풍력발전에서의 소음 대응은 소음의 직접 발생원인 풍력발전기 및 구조물에 대한 소음 감소가 우선이지만 보다 적극적인 대응을 위해 풍력단지의 기획/설계 단계에서부터 제작, 설치, 조업에 이르는 전 과정에 걸쳐 광범위하고 종합적인 접근이 필요하다.

첫째, 기획/설계 단계에서 발전기기를 저소음 규격으로 선정하거나 설계하고, 발전터빈의 배치를 최적화해야 한다. 등음선 맵(sound level contour map) 등을 활용, 소음 민원 잠재지역에서의 소음이 설계목표에 부합되도록 쌍방향 소음모델(interactive noise modeling) 등을 이용하여 발전터빈의 설치 레이아웃을 최적화한다.

둘째, 저소음 운전모드(low noise operating mode) 등에 의한 소음감소 운전이나 운전정지 제어시스템이 필요하다. 블레이드 피치(pitch)의 자동조작 등에 의한 저소음 모드 운전으로 정상운전보다 5dB의 소음 감소(개발업체 주장)가 가능하며, 실제의 프로젝트 시뮬레이션에서 일정 위치에서 가장 가까운 터빈 1기를 정지한 경우도 2~8dB의 소음 감소가 가능하다. 이 방법은 발전량 저하로 수익은 줄지만 소음문제에 즉시 대응되고, 발전기기의 소음규격을 완화할 수 있어 전체 비용은 낮출 수 있다. 이 대책은 특히 야간이나 이상기후 등 소음문제가 예상될 때 적용하는 것이 바람직하다.

셋째 풍력발전단지 계획 시부터 지역주민의 조기 참여가 필요하다. 소음은 시간대, 기상조건에 따라 계속 변하고 소음에 대한 반응도 압 소음 레벨, 사람의 성격 등에 따라 다양하다. 따라서 특히 주민과 같은 이해당사자들을 다양한 형태(건설 등 수익사업 참여, 운용수익의 혜택 등)의 참여를 통해 공동체 의식을 조성하는 것이 중요하다.

7. 맺음말

풍력발전에 있어서 소음의 환경 영향과 국내외 기준, 풍력발전기 자체에 대한 소음감소 기술과 종합적 대응 방안에 대해 기술했다. 풍력발전 소음 기준에 있어, 풍력발전단지 설계시의 소음 목표로는 풍력 프로젝트 소음의 국제적 가이드라인/규격 평균값인 야간 40dB, 주간 45dB 을 적용하는 것이 일반적인 것으로 보인다.

결론적으로 풍력발전에서의 소음 대응에는 소음 발생원인 발전기기에 대한 소음감소 기술 적용으로 설계 소음 목표 준수, 풍력터빈 배치의 최적화 및 저소음 운전 모드 등의 저소음 시스템 그리고 이해당사자들의 사전 참여 확대 등 종합적인 접근방법이 필요하다. 이와 같은 종합적인 대응을 통해 풍력산업의 성장이 가능할 것으로 생각된다.

<참고문헌>

1. Hisashi SAITO, "Noise Mitigation Technologies for Wind Turbine", *Wind Engineers*, JAWE, 39(138), 2014, pp.4~9
2. David M. Hesslera) and George F. Hessler Jr, "Recommended noise level design goals and limits at residential receptors for wind turbine developments in the United States", *Noise Control Eng. J.* 59(1), 2011, pp.94~104
3. W.Y. Liu, "A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques", *Renewable Energy*, 108, 2017, pp.311~320
4. M. Storm, "Apparent trends in wind turbine generator noise criteria and regulation guidance", *InterNoise09*, 2009
5. World Health Organization, "Guidelines for Community Noise", 1999
6. World Health Organization, "Night Noise for Guidelines for Europe", WHO Regional Office for Europe, 2009
7. 環境省, "平成23年度 地球温暖化対策 技術開発等事業 委託業務 騒音を回避・最小化した風力発電に関する技術開発 成果報告書", 2012
8. Renzo Tonin, "Sources of wind turbine noise and sound propagation", *Acoust. Aust.* 40(1) 2012, pp.20~27
9. T. Rogers, S. Omer, "The effect of turbulence on noise emissions from a microscale horizontal axis wind turbine", *Renew. Energy* 41, 2012, pp.180~184
10. Jennifer Taylor, Carol Eastwick, Robin Wilson, Claire Lawrence, "The influence of negative oriented personality traits on the effects of wind turbine noise", *Personality Individ. Differ.* 54, 2013, pp.338~343
11. G. Leloudas, W. JZhu, J.N. Sørensen, W.Z. Shen, S. Hjort, "Prediction and reduction of noise for a 2.3 MW wind Turbine, the Science of making torque from wind", *J. Phys. Conf. Ser.* 75, 2007, pp.1~9

<관련기술목록>

1. S. Wagner, R. Bareiss, G. Guidati, "Wind Turbine Noise", Springer, Berlin, 1996.
2. U.S. EPA Report number PB-239 429, "Information on Levels of Environmental Noise Requisite to Protect Health and Welfare with an Adequate Margin of Safety", 1974.
3. U.S. Environmental Protection Agency, "Model Community Noise Control Ordinance", Report EPA 550/9-76-003, 1975
4. International Standards Organization (ISO), "Standard 9613-2 Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation", 1996
5. R. James and G. Kamperman, "Guidelines for Selecting Wind Turbine Sites", *Sound Vibr.*, 43(7), 2009, pp.8~11

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.