

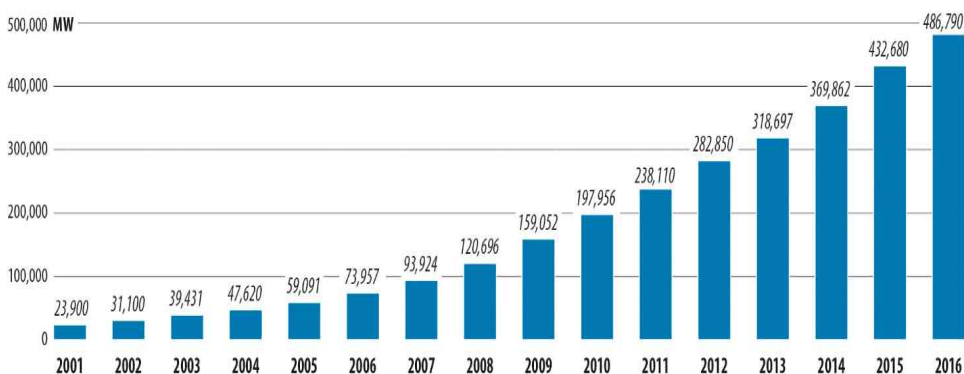
# 풍력발전에서의 환경 이슈

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

## 1. 머리말

기후변화 대응과 에너지안보 측면에서 화석연료 소비를 줄이기 위한 신재생에너지(renewable energy)의 기술개발과 이의 활용이 확대되고 있다. 유망 신재생에너지로 평가 받는 풍력에너지(wind energy)의 경우도 육상풍력발전에서 해상풍력발전으로 영역을 넓리며 늘어나는 전력수요에 대응하고 있다. 세계풍력에너지협회(GWEC: Global Wind Energy Council) 자료에 따르면 전 세계 풍력발전 설치용량은 2016년 말 현재 약 487GW에 달하고, 2021년에는 75GW가 신규 설치되어 누적설치용량이 800GW에 도달할 것으로 예측되고 있다. 특히 2015년 말 기준 풍력발전의 누적설치용량(415GW)은 최초로 원자력발전의 누적설치용량(382GW, 2015.12.1.기준)을 추월했다(한겨레신문, 2015.12.30.일자).

이러한 풍력에너지 산업의 급속한 성장으로 풍력발전단지가 늘어남에 따라 단지 인근 지역 주민의 소음민원, 새, 박쥐 등 야생동물의 충돌피해, 자연경관의 훼손 등 인간과 생태계에 끼치는 부정적 영향에 대한 우려의 목소리가 커지고 있다. 따라서 풍력에너지 산업의 지속가능한 성장을 위해서는 부정적인 영향에 대한 대응이 필요하다. 다음은 현재 풍력발전이 갖고 있는 긍정적 측면과 함께 현재 이슈가 되는 부정적 영향에 대한 현상을 설명하고 이에 대한 전망 및 대책 방향을 모색한다.



출처 : GWEC

<그림 1-1> 전 세계 풍력발전 누적설치용량 추이

## 2. 풍력발전의 긍정적 측면과 부정적 측면

풍력에너지 산업은 발전단지 건설에서 운용에 이르는 전 과정에서 대기, 토양, 수계와 생태계에 환경적 영향을 일부 끼치지만 <표-2-1>에서와 같이 화력발전, 수력발전과 같은 다른 에너지원에 비해 주위 환경에 미치는 영향은 아주 적다. 풍력에너지는 화석연료처럼 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 이산화유황(SO<sub>2</sub>), 수은(Hg), 미세먼지와 같은 공해물질을 대기나 수자원에 직접 대량으로 배출하지 않는다. 풍력단지 건설과 운용 단계에서 CO<sub>2</sub>가 일부 나오지만 배출량은 식물의 광합성 작용을 통해 충분히 흡수될 정도로 아주 적은 양이다.

풍력산업의 평가에 대한 한 가지 사례로서 ‘아일랜드 국가 송전망(Irish national grid)’은 풍력발전의 CO<sub>2</sub> 배출감축 효과를 강조하고 화석연료 발전 대신 풍력에너지를 이용함으로써 얻어지는 CO<sub>2</sub> 배출감축이 0.33~0.59tCO<sub>2</sub>/MWh(330~590gCO<sub>2</sub>/kWh)로 추정된다고 발표했다<sup>(2)</sup>. 또한 독일 연방환경·자연보존·핵안전부의 자료에 의하면 풍력, 바이오매스, 태양전지, 수력발전으로 2006년에 6,700만t의 CO<sub>2</sub>를 감축했으며 이중 풍력발전이 가장 큰 몫을 담당했다고 보고했다<sup>(3)</sup>. 미국 풍력에너지협회(AWEA) 자료에 의하면 나무의 CO<sub>2</sub> 흡수 능력은 1 acre(에이커) 면적의 산림이 연간 약 3ton의 CO<sub>2</sub>를 흡수한다. 이를 기준할 때 100kW 풍력터빈의 CO<sub>2</sub> 배출감축 효과는 24 acre 면적의 산림이 흡수할 수 있는 CO<sub>2</sub> 양과 같다. 즉 풍력발전은 화력발전에 비해 대량으로 CO<sub>2</sub>를 배출하지 않는 청정한 발전시스템이다. 이와 같이 풍력발전은 지구온난화 대응에 도움을 줄 뿐만 아니라 해당 지역의 공해 문제를 완화시켜준다.

풍력발전은 또한 비용을 적게 드는 분산발전 방식으로서 전력망이 없는 지역에 전력을 공급하고 남은 전력을 전력망에 연계해 판매할 수 있다. 또한 신재생에너지 의무인증서(Renewable Obligations Certificates, ROC)를 받아 신재생에너지공급의무화제도(Renewable Energy Portfolio Standard, RPS)의 시행으로 신재생에너지 공급 비율을 맞춰야 하는 발전회사에 판매할 수도 있다. 전력수요자가 풍력에너지로 자가발전하면 기후변화부담금(Climate Change Levy) 면제 혜택도 받을 수 있다.

<표 2-1> 에너지원별 환경에의 영향<sup>(1)</sup>

구분	석탄	천연가스	기름(oil)	원자력	수력	풍력
공기/물 오염	√	√	√			
지구온난화	√	√	√			
수온상승				√		
홍수발생					√	
폐기물 발생	√			√		
채굴/시추	√	√	√	√		
건설 공사	√	√	√	√	√	√

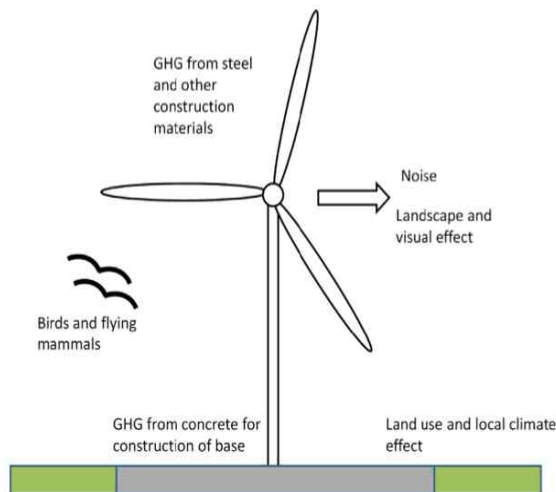
풍력발전의 또 다른 긍정적인 측면으로 수자원 절약을 들 수 있다. 향후 전 세계적인

로 물 부족 문제가 크게 대두되고 있는데 풍력에너지는 다른 에너지 시스템에 비해 많은 양의 수자원을 절약할 수 있다. 화력발전의 경우는 설비청소와 연료처리 등에서 1일 수백만 리터의 많은 물이 사용되는 것으로 알려져 있다. 다른 에너지원에 의한 발전과 풍력에너지 발전의 물 소비량 비교는 <표 2-2>와 같이 추정된다.

<표 2-2> 에너지원별 물 소비량<sup>(1)</sup>

에너지원	gal/kWh	ℓ/kWh
원자력	0.62	2.30
석탄	0.49	1.90
기름	0.43	1.60
복합사이클 가스	0.25	0.95
솔라	0.030	0.110
풍력	0.001	0.004

풍력발전은 부정적 측면으로서 풍력발전단지 주위에 소음공해(noise pollution), 조류의 폐사(avian fatality), 경관훼손 및 시각적 영향(landscape and visual impact), 지표면(land surface)의 기상·기후의 변화(weather and climate change) 등 주거환경, 생물학적 환경, 지표환경에 영향을 끼친다(그림 2-1).



<그림 2-1> 풍력터빈의 환경 영향<sup>(4)</sup>

### 3. 풍력발전기 소음의 환경 영향<sup>(1)(4)(5)</sup>

원하지 않은 소리(unwanted sound)로 정의되는 소음(noise)은 음압(sound pressure) 측정으로 계량화가 가능하지만 주관적인 특성을 갖고 있어 주변 사람들에 대한 불쾌감(annoyance) 여부와 수준이 사람에 따라 다르다.

### 3-1. 풍력발전기의 소음

#### 3-1-1. 소음 특징

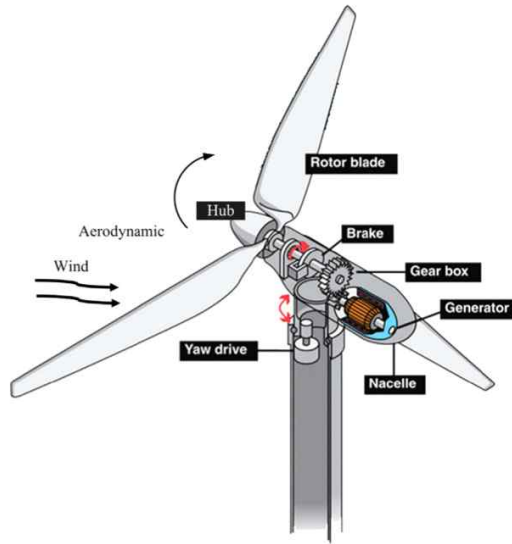
대부분의 풍력발전단지는 거주 지역에서 어느 정도 거리가 떨어진 장소에 위치하므로 대부분 교통 소음이나 도시 소음 즉 단지 주변의 암 소음이 낮기 때문에 풍력발전기의 소음이 이슈가 될 가능성이 높다. 짧은 시간의 풍력터빈 소음은 문제를 일으키지 않을 수 있지만 밤낮으로 들리는 풍력발전기 소음은 주변 사람들을 짜증스럽게 만들 수 있다. 풍력발전기 소음은 낮 시간보다는 상대적으로 암 소음이 적은 밤에 두드러지며, 심리적인 측면에서 풍력발전기가 보일 때 불쾌감을 더욱 느끼게 한다. 또한 풍력단지로부터 경제적 이득이 없는 주민은 혜택을 받는 사람보다 불쾌감을 더욱 크게 느낀다.

#### 3-1-2. 소음의 종류

풍력발전기의 소음은 기계소음(mechanical noise)과 공력소음(aerodynamic noise)의 두 종류 소음이 혼합되어 풍력발전기로부터 방사된다(그림 3-1). 기계소음은 기어박스(gear box), 발전기(generator), 주축 베어링(main shaft bearing) 등 풍력발전기의 기계 및 전기 부품에서 발생한다. 공력소음은 로터 블레이드(rotor blade)와 공기 사이의 상호작용에 의한 회전소음(rotation noise)과 난류소음(turbulence noise)이 합성되어 방사되고 주로 블레이드의 공기역학적 설계와 풍속에 영향을 받는다. 회전소음은 블레이드 직경, 블레이드 매수의 감소, 블레이드의 각속도, 블레이드의 공기역학적 부하(포집 풍력에너지)에 따라 증가한다. 난류소음은 블레이드 선단(tip)의 소용돌이(vortex)와 블레이드 뒤쪽의 난류에 의해 발생하고 선단 속도가 높을수록 음압이 증가한다.

기계소음은 대체적으로 1000hz 이하의 주파수를 가지며 분산 음조 소음(discrete tone noise)을 포함하고 있어 비 음조 소음(non tone noise)보다 더 짜증스럽게 들린다. 하지만 기계소음은 제조사의 소음감소 기술의 진전으로 공력소음 수준 아래로 낮아졌다. 기계소음 감소기술 개발의 예로는 최신의 대형 풍력발전기의 경우, 동흡진기(dynamic vibration absorber) 등 제진장치(vibration control device)를 개발하여 나셀(nacelle)이나 타워(tower)로부터 방사되는 고체전달음의 차단을 꾀하고 있다<sup>(13)</sup>. 반면 공력소음은 풍력터빈의 대형화 추세로 더욱 높아지고 있어 현재 풍력발전기의 소음의 주류를 이루고 있다.

현재 풍력발전기로부터의 소음은 풍속 8m/s에서 98~104dB 수준이고 이 소음은 500m 거리에 주거하는 사람에게 약 33~40dB의 크기로 들린다. Peterson 등<sup>(8)</sup>의 연구에 의하면, 이와 같은 낮은 진폭의 음압은 주위에 교통 소음이나 비행기 소음과 같은 도시 소음이 있는 경우, 대부분 불쾌한 수준은 아니다. 하지만 풍력발전기는 로터 블레이드에 의해 진폭이 변조되어 획(썹)하는 리듬성 소리를 발생하므로 평탄한 음보다 불쾌감을 느낄 가능성은 매우 높다.



<그림 3-1> 풍력발전기의 소음발생원<sup>(6)</sup>

### 3-1-3. 풍력발전기 소음의 측정

풍력발전기로부터의 소음방사 측정에는 두 가지 방법이 주로 이용된다. 하나는 반실험적(semi-empirical) 모델과 같은 예측 모델이고 다른 하나는 국제규격이나 국제환경청(IEA: International Environmental Agency)에 의한 A가중치(A-weighting) 측정 장치를 이용하는 것이다. 최근 광범위하게 개발되고 있는 예측 모델로서 몇 종류의 반실험적 모델이 개발됐지만 풍력발전기의 방사소음을 측정하는 것은 어렵다. 이 모델들은 너무 단순하거나 복잡한 CFD 솔버(Computational Fluid Dynamics solver)를 사용하기 때문에 분석 시간이 너무 긴 단점도 갖는다.

소음 측정에 대한 국제규격과 가이드라인은 대부분 산업소음용으로 개발되어 풍력발전기의 방사소음 측정에 모두 적용할 수는 없다. 풍력발전기의 소음 측정은 압 소음에 크게 영향을 받는다. 많은 사례에서 바람소리와 같은 압 소음이 터빈 소음을 압도하기 때문에 일반적으로 8m/s 이상의 풍속에서는 소음이 크게 개선된 신형 터빈의 경우, 음압 측정은 어렵다. 반면 터빈은 작동하지만 풍속이 낮은 경우(예, 4~6m/s)는 바람소리에 의한 압 소음이 높지 않기 때문에 풍력발전기 소음은 뚜렷하게 들린다. Kaldellis 등<sup>(7)</sup>이 조사한 5.1m/s(10m 높이) 풍속에서의 풍력발전기 소음은  $48.5 \pm 1.6$ dB로 측정됐고 주위 압 소음보다 약 9dB 높게 나타났다.

### 3-1-4. 인체건강 및 야생동물에의 영향

최근 Bakker 등<sup>(8)</sup>에 의한 연구에서 풍력발전기 소음은 이를 불쾌하게 느끼는 풍력단지 인근 주민의 일부가 겪는 수면장애, 정신적 스트레스와 관련이 있다고 밝혀졌다. 일반적으로 풍력발전기 소리의 음압에 비례하여 느끼는 불쾌감의 크기가 커진다. 하지만 소리가 들리지 않거나 동요되지 않는 주민들에게는 부정적인 영향이 없는 것으로 나타났다. 또한

풍력단지로부터 경제적 혜택을 받지 않는 사람들은 수면장애와 정신적 스트레스를 경험할 위험이 크고, 이 위험은 터빈의 소음이 높을수록 커진다. 따라서 풍력발전으로 인한 주민 건강 문제가 발생하지 않도록 새로운 단지건설 시 입지에 따른 특성과 소음 영향을 충분히 검토하는 것이 필요하다. 풍력발전기의 소음은 야생동물 종(species)의 폐사에도 영향을 끼친다. 이 점은 뒤에서 상세히 기술한다.

### 3-2. 소음 감소 기술

#### 3-2-1. 기계소음 감소 기술<sup>(13)</sup>

기계소음에 대한 감소 대책에 있어서는 저소음기기(gear box, generator 등)의 적용, 타워와 나셀에서의 소음차폐(내·외측에 방음재/흡음재 부착)와 함께 진동절연(방진지지, 댐퍼 등 제진장치 부착) 등의 방법이 있다. 기계소음에서의 발생원과 전달경로에 따른 기계소음 감소 방안은 <표 3-1>와 같이 요약할 수 있다.

<표 3-1> 기계소음의 발생원, 전달 경로별 감소방안<sup>(13)</sup>

발생원	전달 경로	감소 방안	
기어박스, 발전기, 베어링	기기 발생 진동→ 풍력발전기 구조물(타워 등)→ 외부 방사 (고체 전달음)	기기측	저진동형 기기의 사용
			수리/유지에 의한 저진동화,
		전달경로	기기측 체진(동흡진기)
			방진지지(support), 진동절연(기기 접지부의 방진재 삽입)
		방사면	방사면 차음(타워 외측의 피복 시공 등)
			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

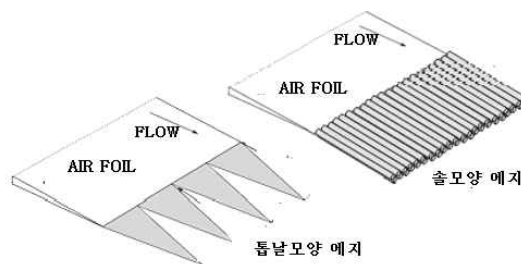
#### 3-2-2. 공력소음 감소 기술<sup>(13)</sup>

풍력발전기 발생 소음에 있어서 중요도가 점차 커지고 있는 공력소음에서는 로터 블레이드의 저소음 설계(공기역학적 손실이 적고 소음이 낮은 에어포일 형상)와 자동운전 제어(기준 소음 도달 시 회전수 강하) 등의 방법을 예로 들 수 있다. 공력소음에서의 공력소음 감소 기술들을 <표 3-2>과 같이 요약할 수 있다.

<표 3-2> 공력소음의 감소 기술<sup>(13)</sup>

구분	감소 기술	
로터 블레이드	블레이드 에어포일 형상	공기역학적으로 손실이 적고 소음이 낮은 형상으로 변경
	블레이드 끝(tip) 형상	
	블레이드 표면	평활화
	블레이드 뒷전(trailing edge)	예각화
풍력발전기의 회전제어	회전수 낮춤	풍력발전기의 운전제어 파라미터를 변경함, 일부 조건에서는 회전수를 낮춤(발전량과 trade-off 필요)

<표 3-2>의 공력소음 감소기술 중 로터 블레이드의 소음 감소 기술에 관련된 연구 사례를 소개한다. 이 연구는 공력소음 개선을 위해 블레이드 뒷전에 부착 가능한 공력소음 감소용 디바이스(device) 개발에 관한 것이다. 블레이드의 소음에 있어 블레이드 뒷전 형상에 따른 넓은 주파수대에서의 감소효과는 이미 많은 연구를 통해 알려져 있다. 이 연구에서 블레이드의 디바이스가 풍력발전기 성능에 영향을 주지 않도록 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석과 풍동(wind tunnel) 실험으로 성능을 검증한 후 실증실험을 통해 효과를 확인한다. 우선 블레이드 뒷전에 부착하는 디바이스는 문헌을 통해 톱날 모양의 에지(saw shape edge)와 솔 모양의 에지(brush shape edge) 2종류를 선정했다(그림 3-2). 추가적으로 블레이드 뒷전 모양을 날카롭게 형성하여 공력소음을 1~2dB 개선했다.



<그림 3-2> 블레이드 뒷전 부착 디바이스 형상<sup>(1)</sup>

회전 중인 풍력발전기의 블레이드에 공력소음 감소용 디바이스를 부착한 경우, 공기역학 특성의 변화, 디바이스에 가해지는 공기역학 하중을 알기 위해 CFD 해석을 실시했다. 계산은 비압축성유동에 관한 표준방법을 사용하고 유동장(flow field) 조건은 실험용으로 설치된 풍력발전기의 표준 운전 상태로 설정했으며, 유속은 블레이드의 앞전 주속(leading edge peripheral speed)과 외부 풍속의 합성 값을 적용했다. 해석 결과, 톱날 모양의 디바이스는 크기와 관계없이 블레이드의 공기역학 특성이 거의 변하지 않는 것으로 확인됐다. 풍동실험을 실시한 결과에서 솔 모양의 에지는 소음 감소량은 높지만 고

주파(4kHz 이상)에서의 소음 상승이 가장 높고 내구성도 취약할 우려가 있었다. 따라서 몇 종류의 튕날 예지 중 소음 감소효과가 가장 크고 고주파 소음 증가가 가장 적은 시료를 풍력발전기에 설치하여 실증실험을 실시했다. 실험 결과 표준풍속 8m/s 조건에서 최대 3.4dB의 소음감소 효과를 확인할 수 있었다. 향후 디바이스의 소음 감소 성능 증대와 실용화를 위해 강도실험, 내구성실험 등 후속 연구를 진행할 계획이다.

### 3-3. 소음 대응 대책

풍력발전에서의 소음 대응은 풍력발전기 및 구조물에서 발생하는 소음 감소가 우선되어야 한다. 하지만 보다 효과적인 대응에는 풍력단지의 기획, 설계 단계를 비롯해 제작, 시공, 운용에 이르는 전 과정에 걸쳐 종합적인 접근이 필요하다.

우선 풍력단지의 기획과 설계 단계에서 소음규격에 맞는 풍력터빈 등 소음발생원의 설계가 중요하고, 등음선 맵(sound level contour map)과 쌍방향 소음모델(interactive noise modeling) 등을 이용한 발전터빈의 최적 배치가 이뤄져야 한다. 또한 저소음 운전과 운전정지가 가능한 제어시스템의 구축이 필요하다. 블레이드 피치(pitch)의 자동조작이나 회전수 조절에 의한 저소음 운전방법으로 소음 민원에 사전 대응할 수 있다. 이러한 제어 대책은 야간이나 이상기후 등 소음 문제가 예상될 때 효과적으로 활용할 수 있다.

마지막으로 풍력발전단지 계획 시부터 지역 주민의 조기 참여가 필요하다. 인근 주민 등 이해당사자들을 다양한 형태(건설 등 사업 참여, 운용수익의 배분 등)로 참여시켜 공동체 의식을 갖게 하는 것이 무엇보다 중요하다.

## 4. 기타 환경 영향

### 4-1. 조류에의 피해<sup>(1)(4)(5)</sup>

풍력발전은 일반적으로 환경 친화적이라고 생각되지만 근래에 들어 풍력발전기의 터빈과 타워 등 풍력시설 구조물에 충돌하여 폐사되는 새, 박쥐 등 야생동물의 피해 조사 결과가 보고되고 있다. 이에 대응하여 산업체와 연구자들은 야생동물에 대한 보호 및 방지 대책을 찾고 있다. 야생동물의 영향은 직접적인 측면과 간접적인 측면으로 나눌 수 있다. 직접적인 영향은 풍력발전시설과의 충돌에 의한 폐사이고 간접적인 영향에는 이동방해, 서식지 교란 등이 있다.

#### 4-1-1. 조류의 피해 규모

풍력터빈 충돌의 가장 큰 희생물은 새로 알려져 있으며 미국 내 지역별 새의 폐사율은 <표 4-1>과 같다. 한편 Sovacool<sup>(9)</sup>은 새의 폐사율에 있어서 풍력에너지는 화석연료에 비해 20배나 영향이 작고, 인간 활동에 의한 피해 규모와 비교하면 무시할 정도라고 주장한다. <표 4-2>는 미국에서의 인간 활동과 관련된 새의 폐사율을 나타낸다. 이 새의 폐사율을 기준으로 미국 풍력에너지협회(AWEA)가 계산한 결과에 의하면 미국 전력수요



를 모두 풍력에너지로 공급하는 경우, 풍력발전에 의한 새의 피해 수준은 인간 활동으로 인한 폐사수의 1/250 수준 정도로 낮다.

<표 4-1> 미국의 지역별 새의 폐사율<sup>(1)</sup>

지역	조사 건수	용량(MW)	로터 직경		마리/터빈/년			마리/MW/년		
			최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대
북서지역	4	397	47	65	1.9	0.6	3.6	2.7	0.9	2.9
로키산맥	2	68	41	44	1.5	1.5	1.5	2.3	2.0	2.5
중서부	4	254	33	48	2.7	1.0	4.5	4.2	2.0	5.9
동부	2	68	47	72	4.3	0	7.7	3.0	2.7	11.7
전체	12	787	33	72	2.3	0.6	7.7	3.1	0.9	11.7

박쥐에 있어서도 많은 개체수가 전 세계적으로 풍력발전시설에 의해 폐사되고 있다. 미국 내의 지역별, 박쥐 폐사율은 <표 4-3>과 같다. 일부 박쥐는 원거리 가청음에 대한 지향 특성이 있는 것으로 알려져 로터 블레이드의 발생소음에 유인될 수 있지만 확인된 증거는 없다. 또한 박쥐는 풍력발전기에서 발생하는 초음파에 흥미를 느낄 수 있다. 열적외선 화상 조사에서 박쥐에는 풍력터빈에 가까운 거리에서 날아다니며 먹이를 찾는 습성을 보여준다. 멧금류는 미국의 경우, 폐사율이 새와 박쥐에 비해 크게 낮은 것으로 보고되고 있다.

<표 4-2> 미국 내 인간 활동에 의한 새의 폐사율<sup>(1)</sup>

인간과 관련된 원인	1년간 폐사한 마리(백만)
고양이	1000
건물	100
사냥	100
차량	60~80
통신탑	10~40
농약	67
전력선	0.01~174
풍력터빈	0.15

한편 폐사율 집계를 위한 현장 시료 조사에서 연구원이 폐사 시료를 발견하기 전 이미 다른 야생동물에게 먹일 수 있고 산림 속에서 모든 시료를 빠짐없이 찾는 것은 불가능하다. 따라서 보고된 각 조류의 폐사율은 실제보다 낮게 집계될 가능성이 높으며 이점을 감안할 필요가 있다. 또한 야생동물에 끼치는 풍력발전의 피해는 다른 에너지원들에 비해 적다는 견해도 제시되고 있다. “풍력발전소에 대한 적절한 입지 선정으로 조류의 폐사율이 크게 낮아지지는 않는다.”는 보고와 함께 화석연료 등에 의한 기후변화가 야생동물에게는 보다 더 큰 위협이 된다는 주장도 있다.

<표 4-3> 미국 내 지역별 박쥐의 폐사율<sup>(1)</sup>

지역	조사 건수	용량 (MW)	로터 직경		마리/터빈/년			마리/MW/년		
			최소	최대	평균	최소	최대	평균	최소	최대
북서지역	4	397	47	65	1.2	0.7	3.2	1.7	0.8	2.5
로키산맥	2	68	41	44	1.2	1.0	1.3	1.9	1.3	2.2
중서부	4	254	33	48	1.7	0.1	4.3	2.7	0.2	6.5
동부	2	68	47	72	46.3	28.5	47.5	32.0	31.7	43.2
전체	12	787	33	72	3.4	0.1	47.5	4.6	0.9	43.2

#### 4-1-2. 조류 폐사를 일으키는 요소

풍력발전단지에서의 조류 충돌은 풍력단지의 지형(산마루, 이동경로 여부 등) 및 기상·기후·풍속·풍향, 풍력단지 내 풍력터빈의 공간적 분포(spatial distribution), 발전시설의 특징(조명, 터빈 크기, 타워 형태 등), 조류의 종(크기, 철새/토착조류), 종별 행동특성(비행 고도·속도·시간, 야간이동/먹이지역이동) 등에 영향을 받는다<sup>(5)</sup>.

조명에 대한 연구에서 조류는 안개나 흐린 날씨에 방향 감각을 잃기 쉽기 때문에 풍력발전시설의 조명에 이끌려 블레이드에 충돌될 위험이 높은 것으로 밝혀졌다. 또한 폐사된 48마리 중 단 3마리만 기후와 관련이 없는 것으로 나타난 연구에서와 같이 기상과 기후가 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 철새들은 일반적으로 150m보다 높게 날지만 강풍, 낮은 구름, 강우 등 흐린 날씨에는 낮게 날기 때문에 풍력터빈에 충돌할 위험이 더 크다.

타워 형태에 있어서는 미국 Altamont Pass(California)의 경우, 터빈 설치 높이가 낮고 블레이드의 회전속도가 빠르며 터빈 배치 간격이 좁고 격자형(lattice) 타워 방식인 오래된 풍력발전시설에서 높은 조류 폐사율이 나타났다. 특히 격자형 타워는 조류가 둥지를 트는 경향이 있어 피해가 늘어날 수 있다.

#### 4-1-3. 조류 폐사 방지 대책<sup>(1)</sup>

조류의 폐사율을 낮추기 위한 대책에는 조류보호기구의 설립을 통해 풍력산업에 대한 가이드라인 제시, 자문 활동과 함께 레이더 기술, 타워의 설계 개선, 수직형 터빈 적용 등 기술적 개선을 예로 들 수 있다.

영국은 왕립조류보호협회(RAPB)를 설립하여 풍력발전기 설치로 인한 조류 피해의 방지 및 조류 보호에 나서고 있다. 미국 캘리포니아는 풍력에너지회사들은 정부관료, 환경기관 등 이해당사자들과 함께 국가풍력조정위원회(NWCC)를 설립하여 활동에 참여하고 있다. 이 기구는 풍력에너지 개발로 인한 야생동물 관련 문제들을 해결하고 연구자금도 지원한다. 미국 어류·야생·동물국(FWS)은 풍력발전단지 입지에 대한 자율 가이드라인을 수립하여 권장하고 있지만 산업계의 호응은 아직은 적다. 야생동물 자문에서는 풍력에너지 개발 회사들이 제안한 풍력발전단지 부지(site)를 조사하고 개발회사들에게 영향평가보고서를 제시하는 방식 등으로 야생동물의 피해를 최소화하도록 풍력산업을 이끈다.

기술적 측면의 사례에서 미국항공우주국(NASA)에서 개발한 조류 레이더(avian radar)를 이용하여 조류가 풍력발전 시설에 약6.4Km 이내로 접근하면 자동으로 풍력터빈을 중지하고 조류가 통과한 후 풍력터빈을 재가동시켜 조류 피해를 방지하는 방안이도 추진되고 있다. 또한 풍력산업계는 연방항공국(FAA)과 조류 안전을 위한 풍력에너지 시설의 안전 조명에 대해 협의하고 있다. 풍력 시설에 대한 조류의 충돌을 막기 위해 적절한 항공안전 조명 설치를 추진하고 있다.

## 4-2. 시각적 영향<sup>(1)(5)</sup>

풍력터빈의 대형화 추세로 가시거리가 늘어남에 따라 자연경관의 훼손, 조망권 침해, 그림자 깜빡임(shadow flickering) 현상에 의한 정서적 혼란 등 풍력발전시설로 인한 시각적 영향이 점차 커지고 있다. 풍력발전기로부터의 시각적 영향은 풍력터빈과 주거지 사이의 거리, 풍력터빈의 가동-정지 상태와 풍력터빈의 배치 형태, 풍력터빈의 크기, 색상, 모양 및 시각적 대칭성(visual symmetry), 풍력터빈과 하늘 배경 간의 대비(contrast), 그림자 깜빡임 현상 등의 영향을 받는다. 또한 시각적 영향은 문화의 차이와 풍력발전 시설로부터의 경제적 혜택 여부에 따라 차이가 난다. 혜택을 받는 사람은 긍정적인 생각에서 시각적 영향을 적게 느끼지만 반대의 경우는 시각적 영향을 보다 크게 느낀다.

### 4-2-1. 주요 요소

기본적으로 풍력발전시설의 시각적 영향은 풍력터빈과의 거리가 늘어날수록 줄어든다. 타워 높이의 10배에 해당하는 거리보다 가까운 곳에서 풍력터빈은 뚜렷한 구조물로서 시각적 영향이 아주 크다. 맑은 날에 풍력터빈은 타워 높이의 400배에 해당하는 거리에서도 볼 수 있다. 이것은 타워 높이가 50m이면 20km 떨어진 거리에서도 볼 수 있는 것을 의미한다.

풍력터빈은 블레이드가 회전하고 있을 때보다 정지해 있을 때, 평지보다 작은 섬의 언덕 위에 위치할 때와 같이 개방된 지역보다 좁거나 폐쇄된 장소에 설치될 때, 그리고 다수의 풍력터빈이 집단을 이루거나 반복되어 배치되는 경우, 시각적 영향이 더 크다.

풍력발전기의 시각적 영향 수준은 풍력터빈과 주위 배경과의 대비차가 클수록 커진다. 로터 블레이드와 타워의 색상과 하늘 배경과의 조화 여부가 풍력단지의 시각적 매력 여부에 영향을 준다. 일반적으로 풍력발전기는 타워 하부를 그린 색으로 도장하고 점차 위쪽을 회색이나 옅은 회색계열로 도장하여 하늘 배경과 조화시키는 방법으로 색상대비를 낮게 해 시각적 영향을 줄인다. 하늘의 색상 패턴은 기상 상태에 따라 변화하므로 가장 길게 지속되는 기상 조건에 맞춰 색상을 조절하는 것이 좋다.

그림자 깜빡임 현상은 풍력발전에서만 일어난다. 이 현상은 순간적이면 큰 문제가 안 되지만 장시간에 걸쳐 발생하면 주거생활에 불안과 혼란을 줄 수 있다. 햇빛이나 강한 광원에 노출된 풍력터빈은 그림자를 만들고 회전하는 로터 블레이드에 의해 깜박거림 현상이 나타난다. 그림자 깜박거림은 블레이드가 빛에 반사될 때 심해지므로 로터 블레

이드 등 터빈 구조물에 저 반사 물질로 코팅하여 반사 강도를 줄일 수 있다. 회전속도를 줄이는 방법도 있지만 터빈효율 저하가 문제가 된다. 깜박거림 수준이 가이드라인보다 큰 경우는 특수 설계한 모듈로 풍력터빈 가동을 정지하는 방법이 있다. 이 모듈은 계산을 통해 제작한 그림자 쉐딩터에 의해 정해진 시간에 그림자 발생 여부에 관계없이 터빈운전을 제어한다.

#### 4-2-2. 수용성(acceptability) 평가

주어진 풍력단지 부지(site) 내의 풍력터빈의 다양한 크기, 밀도, 배열, 색상에 대한 수용성 평가를 위한 가시화 툴(visualization tool)이 개발됐다. 예로서 Miller 등은 가상공간 내 터빈 위치를 다양하게 변화시켜 터빈 배열의 최적 패턴을 제시하는 쌍방향 가시화법을 개발했다. 시각적 영향을 수치화하고 등급 산출법이 진행되고 있다. Quechee 실험, 다중기준 평가프레임워크(multi-criteria impact evaluation frameworks), 지각 모델(perception model) 등이 이에 포함된다. Baban과 Parry<sup>(14)</sup>는 지리정보시스템(GIS)을 이용하여 풍력자원 이용과 인구밀도, 시각적 예민도 등을 고려하여 적합한 풍력단지 부지를 지도(mapping)화 했다. 이와 같이 제안된 부지에 대해 시각적 영향 지역 여부와 수준을 파악하기 위한 시각적 영향 평가는 대부분의 GIS에 기초하여 이뤄진다.

#### 4-2-3. 전망

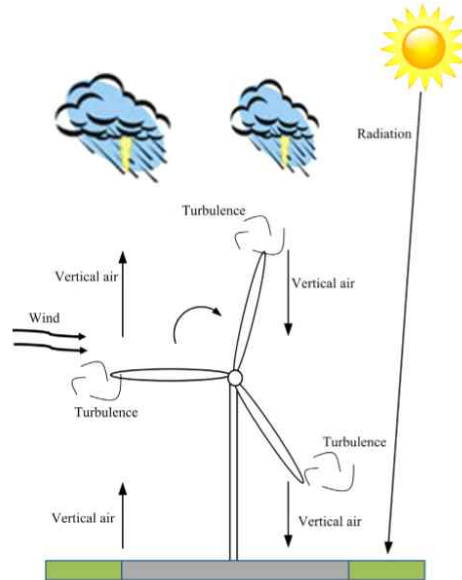
좋은 입지의 풍력발전단지에서 잠재된 발전량을 추출하고 수익성을 높이기 위해서는 풍력터빈의 대형화와 대규모 단지가 바람직하다. 이러한 입장에 있는 풍력산업회사들과 여러 연구를 통해 나타난 것과 같이 소규모 단지를 선호하는 일반 대중과는 이해가 상충된다. 또한 풍력발전산업의 확대에 따라 시각적 피해에 대한 이슈는 더욱 커질 것이 분명하다. 여기에 태양열·태양광, 소수력 발전시스템과의 입지 경쟁은 계속 될 것이므로 제한된 미개지, 휴양지의 잠식 없이 풍력단지 부지를 찾는 것은 더욱 힘들게 될 것이다. 여기에 풍력단지 시설로 지가 하락을 우려하는 님비(NIMBY: Not In My Back Yard) 현상도 커질 것이다. 해상풍력으로 이러한 문제들을 완화할 수는 있지만 해상풍력도 나름대로의 문제를 지니고 있어 모든 것에서 자유로워질 수는 없다.

### 4-3. 지표면에 대한 영향<sup>(4)(5)</sup>

#### 4-3-1. 기상과 기후의 변화

풍력터빈이 회전하는 동안 로터 블레이드 뒤쪽의 후류(wake)에는 소규모의 난류(turbulence)가 발생한다. 카오스적(chaotic)이고 무작위(random)에 가까운 공기의 이동 현상인 난류는 하층공기와 상층공기의 상하혼합 상태를 변화시킨다. 이러한 상하층 공기 혼합의 변화는 낮과 밤 시간에 다른 모양으로 풍력단지의 지표면에 영향을 끼친다. 난류 상태인 후류는 낮에는 서늘한 공기를 밑으로 혼합시키고 더운 공기는 위로 혼합시킨다. 반면 밤에는 더운 공기를 밑으로 혼합시키고 차가운 공기는 위로 혼합시킨다. 이 현상은 밤에는 지표 온도를 높이지만 낮에는 난류에 의해 지표면에 생성된 냉기가 태양열

에 의해 가열되므로 지표 온도에는 뚜렷한 영향을 주지 않는다. 또한 대기 상하층 간 수직방향으로의 혼합 상태의 변화는 구름 형성에 영향을 주고, 이 결과 국지성 강수량에 변화를 일으킬 수 있다. 즉 풍력터빈은 바람이 가진 운동에너지를 전기에너지로 변환시키는 동안 지표-대기의 상호교환(surface-atmosphere exchange)과 대기 속의 에너지, 운동량, 질량(mass)과 습기의 이동을 변화시킨다(그림 4-1).



<그림 4-1> 풍력발전과 지표-대기 간의 물리적 프로세스<sup>(4)</sup>

이러한 변화는 국지적으로 기상과 기후에 뚜렷한 영향을 준다. 세계 4번째로 큰 풍력단지인 미국 서부의 중앙Texas 주변지역에 대한 위성 데이터를 기초로 Zhou 등<sup>(10)</sup>은 특히 밤 시간에 풍력발전시설이 없는 인근 지역 대비 풍력단지의 온도가 2003~2011년 사이에 0.72℃ 상승했다고 밝혔다. 풍력터빈의 기후에 대한 뚜렷한 영향은 이론 연구에 의해서도 뒷받침되고 있다. 즉 대형 풍력에너지는 (a)발전 시의 운동에너지 손실로 풍속 저하, (b)터빈 후류 내 블레이드와 비슷한 크기의 난류 발생, (c)터빈 후류 속의 풍속 저하로 생긴 전단 유도 난류(shear driven turbulence)가 대기경계층에 직접 영향을 끼치는 것으로 해석된다. 또한 대형풍력단지는 설치된 풍력발전시설들에 의해 지표면을 거칠게(roughness)하고, 열과 습기의 이류(advection)와 경계층 속의 난류 이동을 통해 국지성 기상에 간접적으로 영향을 끼친다. 또한 농업지역에 풍력단지가 건설되면 토양 속 지하수의 증발 가속화로 물 손실이 증가하는 등 기상 변화로 인해 경작 활동이 피해를 받을 수 있다. 이러한 직접 피해로 농지(풍력회사에 임대) 임대료보다 더 많은 비용이 급수(irrigating) 비용으로 지출될 수도 있다.

#### 4-3-2. 전망과 대책

대형 육상·해상풍력단지에서의 잠재적 기후 변화 영향을 시뮬레이션하기 위해 3차원 기후 모델이 사용된다. 이 모델은 IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체)가 제안한 수준

과 같이 전 세계 에너지 수요의 10% 이상을 풍력에너지로 공급할 경우, 육상풍력단지의 지표온도는 10℃ 이상 온도가 상승될 것으로 분석했다<sup>(15)</sup>. 이 모델은 또한 육상풍력단지에서 멀리 떨어진 지역도 지표온도가 올라가거나 내려갈 것으로 예측했다.

Roy와 Traiteur<sup>(11)</sup>는 지표온도의 영향을 최소화하는 풍력에너지 활용 방안에 대해 연구했다. 국지성 기상에 대한 풍력단지의 영향을 줄이기 위한 방안으로서 후류 속 난류 형성을 억제하는 로터 블레이드의 설계, 그리고 주위에 대기경계층 난류(atmospheric boundary layer turbulence)가 강한 지역에 풍력단지를 건설하는 방법을 제시했다. 새로운 블레이드 개발에는 비용 증가가 불가피하고, 풍력단지 입지 변경 방안에는 난류 속 노출 증가로 인한 로터 블레이드의 손상과 풍력단지가 전력수요처에서 멀어지는 데에 따른 송전 손실 및 비용이 증가한다.

이상의 여러 영향을 고려하여 전 세계의 추출 가능 풍력발전량을 과거 추정치의 절반 수준으로 줄이자는 제안이 제시되고 있다. 새로운 이슈 분야인 지표면에 관련된 영향에 대해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

## 4-4. 전자파 영향과 및 레이더 장애

### 4-4-1. 현상과 원인

일반적으로 풍력발전기 내의 발전기, 변압기 등 각종 전기·전자부품에서 발생하는 전자파복사(EMR: Electromagnetic Radiation)나 회전하는 로터 블레이드(특히 금속소재 사용)는 방송과 통신 중계, 레이더 탐지 작동에 장애를 줄 수 있다. 풍력터빈에서 방출되는 EMR는 또한 인근 주민들의 건강에 직접적인 피해를 줄 수 있다. 풍력터빈의 EMR의 강도는 비교적 약한 수준이지만 현재 많은 통신 중계기가 설치되어 있어 주변의 EMR 부하(background EMR load)는 이미 크게 높아진 상태이므로 풍력터빈의 EMR 추가는 인간의 건강에 보다 심각하게 영향을 끼칠 수 있다.

레이더 장애 영향에 있어서는 풍력발전기의 타워, 나셀, 블레이드의 높은 반사율(reflectivity)로 인해 레이더의 음영지역(shadowing area)을 증가시키는 등 탐지물체에 대한 관측오류를 일으킴에 따라 레이더의 추적 감도(sensitivity)를 떨어뜨릴 수 있다.

### 4-4-2. 대책 방안

전술한 전자파 영향과 레이더 장애 문제로 많은 국가에서는 풍력사업 면허에 방송·통신 중계 시설이나 레이더 시설 등 군 시설과의 최소 거리를 규정하고 있다. 이에 따라 관련 기관의 전파환경평가에 부합되도록 풍력단지 건설 시 기획단계에서부터 풍력발전기 개발과 부지 선정이 이뤄져야 한다.

기술측면에서 EMR 대책으로서 EMR 발생 우려가 큰 풍력터빈과 제어 부품 등에 저 EMR 기재를 채용하고 EMR 발생 부위에는 다음과 같은 EMR 방지 기술을 적용해야 한다. ①EMR 부품이나 EMR를 흡수하는 부품을 금속재 케이스(또는 금속으로 도금이나 코팅한 비금속 케이스) 안에 넣어 EMR을 차단하는 차폐(shielding) 기술, ②디지털 소자나 부하변동이 급격한 배선회로에 있어서 불필요하게 발생한 고주파 성분의 전류가 도선에

도달되기 전 미리 적절한 고대역의 저지필터를 설치하여 EMR을 차단하는 필터(filter) 기술, ③도선 간의 간격을 멀리하고 신호발생원과 부하 사이의 거리를 짧게 하는 배선(wiring) 설계와 접지(grounding) 기술 등을 활용하여 EMR 영향을 최소화한다<sup>(16)</sup>.

레이더 간섭 방지 대책에 있어서는 ①로터 블레이드, 타워, 나셀 등 주요 레이더 전파 반사 부품에 대해 레이더 반사 단면적(RCS : Radar Cross Section)을 최소화하고 전파를 받는 표면이 레이더 전파에 대해 최적 경사를 갖도록 설계한다. ②레이더 전파를 흡수하기 위해 전파흡수 재료(RAM: Radar Absorbing Material)로 코팅하거나 구성품 자체를 전파흡수 구조(RAS: Radar Absorbing Structure)로 제작하는 방안을 적용할 수 있다. 또한 전파흡수 재료 설계 방법에는 입사된 전파가 전파흡수 재료 표면에서 일부 반사하고 나머지는 전파흡수재 내부로 입사하여 반사되어 나오도록 임피던스를 조절하는 공진형과 임피던스 값이 재료 표면에서부터 안쪽으로 갈수록 점차 감소하도록 설계하는 임피던스 경사형의 두 가지 방법이 있다.

레이더 장애 관련 기술 연구에 있어서, 국내는 2008년 7월부터 2011년 10월까지 한국기계연구원에서 ‘레이더 흡수 풍력 블레이드 원천기술 개발’이 수행됐다. 이 연구에서는 특정한 전기적 특성을 갖는 탄소나노 소재로 제작된 시트를 블레이드 표면에 추가해 레이더 신호를 흡수시켜 열로 바뀌도록 했다. 이는 기존의 블레이드 제작 공정을 그대로 활용할 수 있어 추가적인 비용부담을 최소화하기 위한 것이다<sup>(12)</sup>.

해외의 레이더 간섭 방지 기술 개발 사례로서 레이더 자체를 변화시키는 방법 개발을 목표로 한 사례가 있다. 영국 정부는 2009년 레이더 기술 향상 프로젝트에 대해 군수업체인 레이시온 캐나다(Raytheon Canada)사와 계약을 맺었다. 이 기술은 레이더 전파 처리 알고리즘을 바꾸는 소프트웨어의 개발 프로젝트이다. 즉 반사되어 온 레이더 파가 실제로 움직이는 물체에서 온 것인지, 풍력발전소의 회전날개나 기상관측용 기구처럼 고정된 물체에서 온 것인지를 소프트웨어로 구별하는 기술을 개발하는 것이다. 이 소프트웨어는 단파장뿐 아니라 장파장 레이더에도 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

## 5. 맺음말

풍력에너지는 온실가스와 미세물질을 직접 배출하지 않고 수자원도 크게 절약되며 발전 비용이 낮은 장점을 갖고 있다. 이에 따라 전 세계적으로 풍력단지 건설이 확대되고 있고, 정부도 2030년까지 전력수요의 20%를 신재생에너지로 대체하는 계획을 제시했다. 이 계획에 따르면 현재 1GW 수준의 미미한 풍력발전 누적설치용량이 2030년까지 16GW로 늘게 되어 있어 국내 풍력산업의 규모도 그 만큼 확대될 것으로 예상된다. 이러한 풍력산업의 급속 성장을 실현하는 데에는 소음공해, 자연경관 훼손, 지표면의 기후변화 등 환경에 대한 우려를 최소화시키는 노력이 필수적이다. 물론 소음 문제와 조류 피해는 인간의 다른 활동으로 인한 영향에 비해 지나치게 이슈화됐다는 견해도 있지만 환경 피해를 줄이는 것은 피할 수 없는 과제다. 특히 소음 문제의 해결은 매우 중요하다. 저소음기술 적용 등 하드웨어적 측면의 개선은 기본이지만 풍력단지 건설/운영에의 참여, 이익 배분 등 공동

체 의식을 조성하는 것이 무엇보다 중요하다. 이것은 성공적인 ‘탄소제로섬 “ 으로 알려져 있는 덴마크 삼소섬(Samsø Island)의 사례에서도 확인할 수 있다.<sup>(17)</sup> 또한 각종 보조지원제도의 확충과 풍력소음, 설치제한거리 등 각종 기준의 확립, 전력매입가 조정 등 공공부문에서의 지원 활동도 적기에 이뤄질 필요가 있다. 온실가스 배출감축을 위해서도 우리에게 꼭 필요한 풍력발전산업의 성장을 위해 관련 산업계, 공공부문, 환경단체 등 모든 분야에서의 적극적인 움직임이 어느 때보다 중요하다고 생각된다.

#### <참고문헌>

1. Saidur R, Rahim NA, Islam MR, Solangi KH, “Environmental impact of wind energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2011, pp.2424~2430
2. Wikipedia, Environmental effects of wind power,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_the\\_Republic\\_of\\_Ireland](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_the_Republic_of_Ireland)
3. Martin P, Michael O, Derk JS, “Consequential environmental system analysis of expected offshore wind electricity production in Germany”, *Energy* 33, 2008, pp.747~759
4. Shifeng Wang, Sicong Wang, “Impacts of wind energy on environment: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49. 2015, pp.437~443
5. Tabassum-Abbasi, Premalatha M, Tasneem Abbasi, Abbasi SA, “Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 2014, pp.270~288
6. Kunz TH, Arnett EB, Erickson WP, Hoar AR, Johnson GD, Larkin RP, et al., “Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses”, *Front Ecol Environ* 5(6), 2007, pp.315~324
7. Kaldellis JK, Garakis K, Kapsali M, “Noise impact assessment on the basis of onsite acoustic noise immission measurements for a representative wind farm”. *Renew Energy* 41, 2012, pp.306~314
8. Bakker RH, Pedersen E, van den Berg GP, Stewart RE, Lok W, Bouma J, “Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress”, *Sci Total Environ* 425, 2012, pp.42~51
9. Savacool BK, “Contextualizing avian mortality: a preliminary appraisal of bird and bat fatalities from wind, fossil-fuel, and nuclear electricity”, *Energy Policy* 37, 2009, pp.2241~2248
10. Zhou L, Tian Y, Baidya Roy S, Thorncroft C, Bosart LF, Hu Y, “impacts of wind farms on land surface temperature”. *Nat Clim Change* 2, 2012, pp.539~543
11. Roy SB, Traiteur JJ, “Impacts of wind farms on surface air temperatures”, *Proc Natl Acad Sci USA* 107(42), 2010, pp.17899~17904



12. 김영달, “풍력발전 현황 및 로터 블레이드의 기술 동향”, 전기전자재료, 26(9), 2013, pp.19~27
13. Hisashi SAITO, “Noise Mitigation Technologies for Wind Turbine”, *Wind Engineers*, JAWE, 39(138), 2014, pp.4~9
14. Baban SMJ, Parry T, “Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK”, *Renew Energy* 24, 2001, pp.59~71
15. Wang C, Prinn RG, “Potential climatic impacts and reliability of very largescale wind farms”, *Atmos Chem Phys*, 10, 2010, pp.2053~2056
16. 김세윤, “EMI 억제방안”, 전기학회지, 38(9), 1989, pp.28~34
17. 르몽드 디플로마티크, <http://www.ilemonde.com/news/articleView.html?idxno=7290>

#### <관련기술목록>

1. GWEC(Global Wind Energy Council), <http://www.gwec.net>
2. AWEA(American Wind Energy Association), <http://www.awea.org>
3. 함태호, “육상풍력발전시설의 환경영향평가에 관한 고찰”, 부산대학교 환경대학원 석사논문, 2016
4. Daugarrd N, “Acceptability study of wind power in Denmark. Copenhagen”, Energy Centre Denmark, 1997
5. Lee T, Wren B, Hickman M, “Public responses to the siting and operation of wind turbines”, *Wind Eng* 13, 1989, pp.188~195

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.