

에너지전환 청년프론티어

풍력발전 원리와 기술적 과제



한국에너지기술연구원
황 성 목

2019. 7. 12

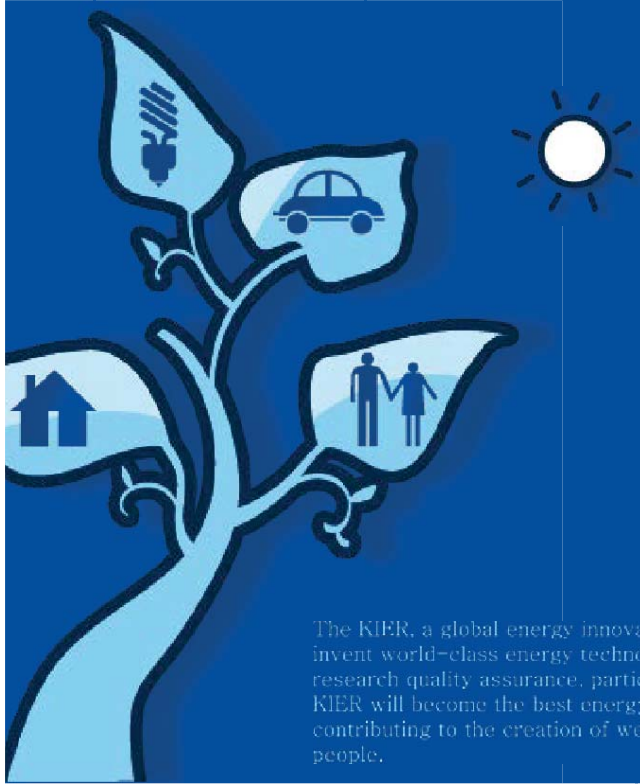
CONTENTS



- 01 기관 소개
- 02 풍력발전 기본 내용
- 03 풍력발전 원리
- 03 기술적 과제

Chapter 01

기관 소개



The KIER, a global energy innovator, does its best in pursuing its mission to invent world-class energy technologies based on open innovation, life-cycle research quality assurance, participatory and open communication. Therefore the KIER will become the best energy technology R&D institute in the world, contributing to the creation of wealth and improvement of quality of life for the people.

Chapter
02

Chapter
03

Chapter
04

한국에너지기술연구원 ('19.03.01 기준)



대전

- 태양광연구실
- 태양열융합연구실
- 연료전지연구실
- 수소연구실
- 신재생에너지 자원정책센터



제주

- 제주 글로벌 연구센터
 - 해양에너지 (염분차)
 - 풍력
 - 시스템 전력제어
- 규모 : 102,637m² 정규직 : 32명



울산

- 차세대전지원천 기술센터
 - 이차전지
- 규모 : 33,000m² 정규직 : 10명



부안

- 수소 · 연료전지 산학연협력센터
 - 연료전지
- 규모 : 2,890m² 정규직 : 8명



광주

- 광주 바이오에너지 연구개발센터
 - 바이오에너지
- 규모 : 23,150m² 정규직 : 17명

제주글로벌연구센터 (JGRC)

- 위치 : 제주도 제주시 구좌읍 김녕리 9-1번지 일원
- 사업 규모 : 부지 102,637㎡ (31,048평), 건물 9,421㎡ (2,850평)
- 사업 기간 : 2006 ~ 2011년도 (6년), 2011년 11월 14일 준공
- 총 사업비 : 247억원

월령



우도
조단과
육장



제주글로벌연구센터 (JGRC)

제주글로벌연구센터

풍력연구

- 구조 진동
- 블레이드 성능 최적화
- 소음 및 하중 저감
- 상태 감시 및 유지보수
- 단지 설계 및 자원 조사
- 성능평가, 인증시험

해양에너지연구

- 염분차발전기술 개발
- 해수담수화기술 개발
- 해양핵심소재 개발
- 해수전처리기술 개발
- 폐수자원 재이용 기술 개발
- 기타 차세대 해양청정 에너지 생산기술 개발

시스템융복합연구

- 에너지통합(자립형/연계형)
- 신뢰성검증시뮬레이터
- 현장시험 및 실증 플랫폼
- 전력연계 안정화 기술
- 빅데이터 기반 SCADA
- 고장형태예측시스템

운영

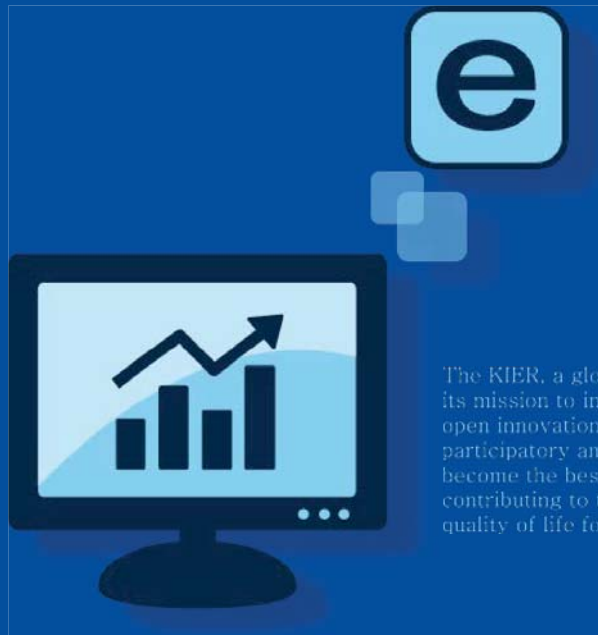
- 행정 및 운영관리
- 건축 및 시설관리
- 안전관리
- 행사 및 홍보업무
- 대민/대관 업무

Chapter
01

Chapter 02

Chapter
03Chapter
04

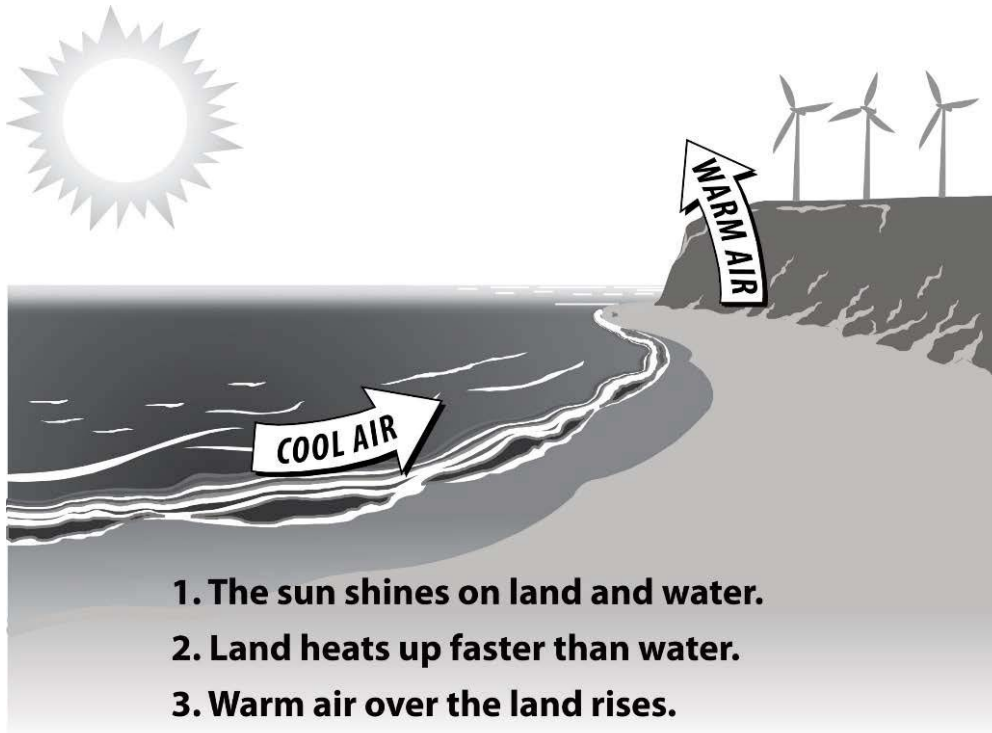
풍력발전 기본 내용



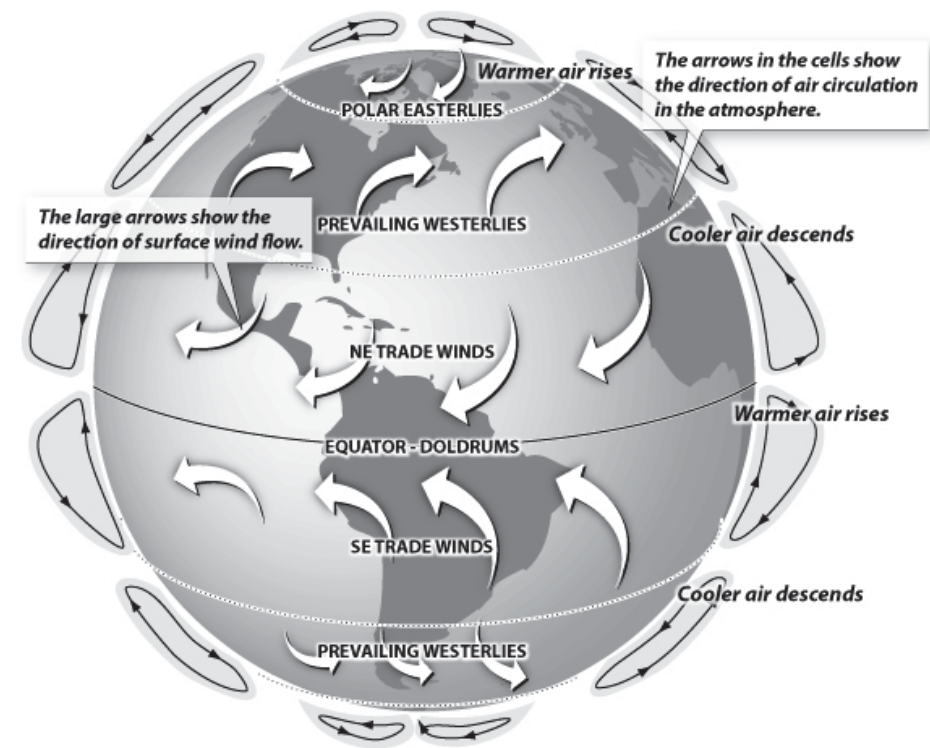
The KIER, a global energy innovator, does its best in pursuing its mission to invent world-class energy technologies based on open innovation, life-cycle research quality assurance, participatory and open communication. Therefore the KIER will become the best energy technology R&D institute in the world, contributing to the creation of wealth and improvement of quality of life for the people.

바람의 기원 (Origin of Wind)

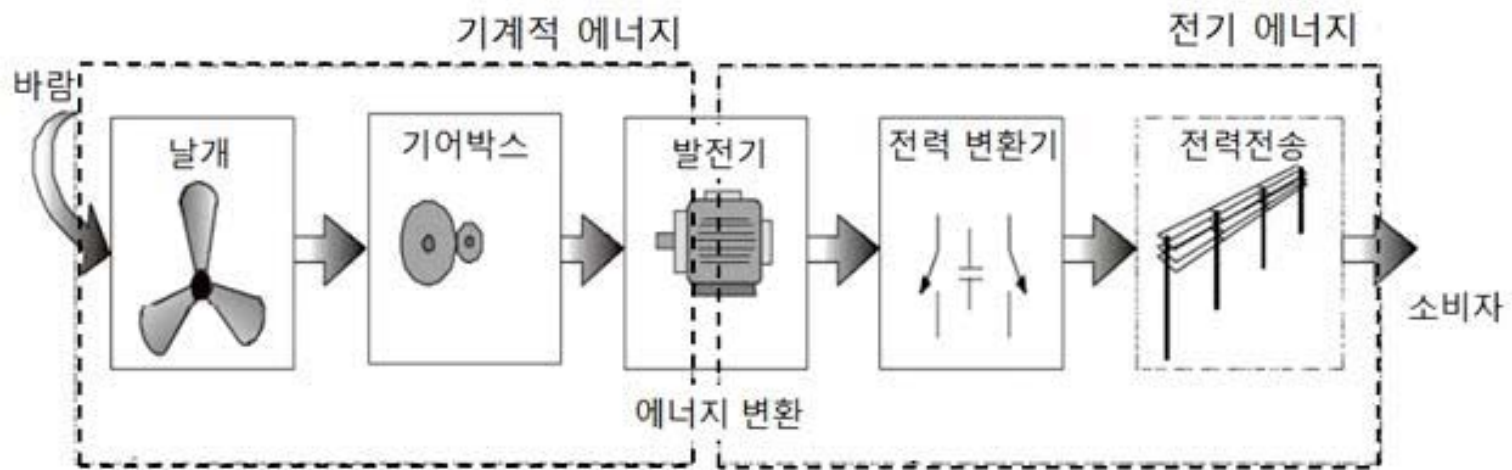
바람 (Wind): 대기중 공기의 움직임 (Atmospheric air in motion)



1. The sun shines on land and water.
2. Land heats up faster than water.
3. Warm air over the land rises.
4. Cool air over the water moves in.

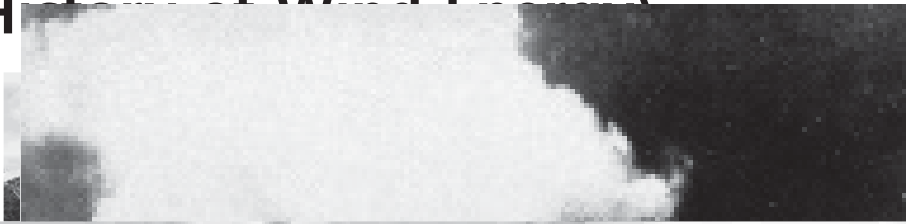


풍력발전의 개념



➔ 바람에너지를 이용하여 전기를 생산하는 발전 방식, 에너지 변환 시스템

풍력의 역사 (History of Wind Energy)



Location: Vindeby, Denmark



Location: Irish Sea
87 Wind turbines
(47 MHI Vestas turbines + 40 Siemens Gamesa turbines)
Wind farm capacity: 659 MW
(600,000 homes)



풍력발전기 분류 (용량)



소형 (Small)

- $\leq 30\text{kW}$
- 가정용
- 독립 전원용 (가로등, water pump 등)



중형 (Mid, Intermediate)

- $\leq 350\text{kW}$
- 마을 전원 공급용
- 분산 전원용



대형 (Large)

- MW급
- 발전사업
- 육해상 단지

풍력발전기 분류 (축방향)

	수평축 (Horizontal-axis)	수직축 (Vertical-axis)
Type	<ul style="list-style-type: none"> - 회전축이 바람의 방향과 수평 - 맞바람 (Up wind), 뒷바람 (Down wind) 형식 	<ul style="list-style-type: none"> - 회전축이 바람의 방향과 수직 - 상용화된 대형 시스템 부재
Advantage	<p>Upwind type</p> <ul style="list-style-type: none"> - 타워로 인한 풍속 손실 없음, 풍속변동에 유리 <p>Downwind type</p> <ul style="list-style-type: none"> - 요잉 시스템 불필요, 상대적으로 저렴한 비용 	<ul style="list-style-type: none"> - 바람의 방향과 무관하게 운전 가능 - 요잉 시스템 불필요 - 증속기 및 발전기 지상 설치 용이
Disadvantage	<p>Upwind type</p> <ul style="list-style-type: none"> - 요잉 시스템 필요, 로터와 타워의 충돌 가능성 <p>Downwind type</p> <ul style="list-style-type: none"> - 타워로 인한 풍속 손실 및 변동이 큼 	<ul style="list-style-type: none"> - 낮은 효율 - 용량 대비 대형화

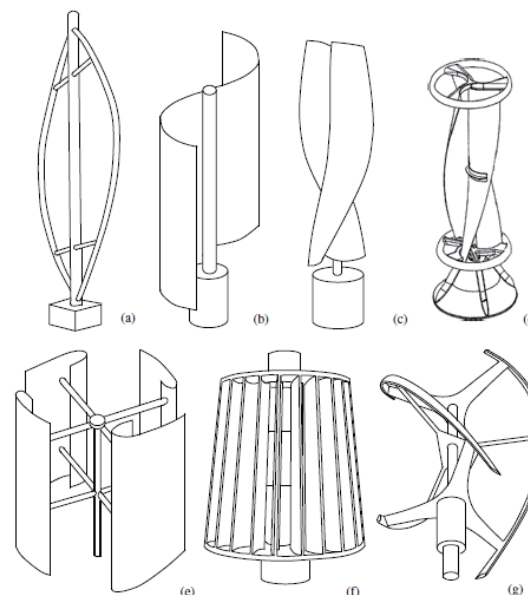
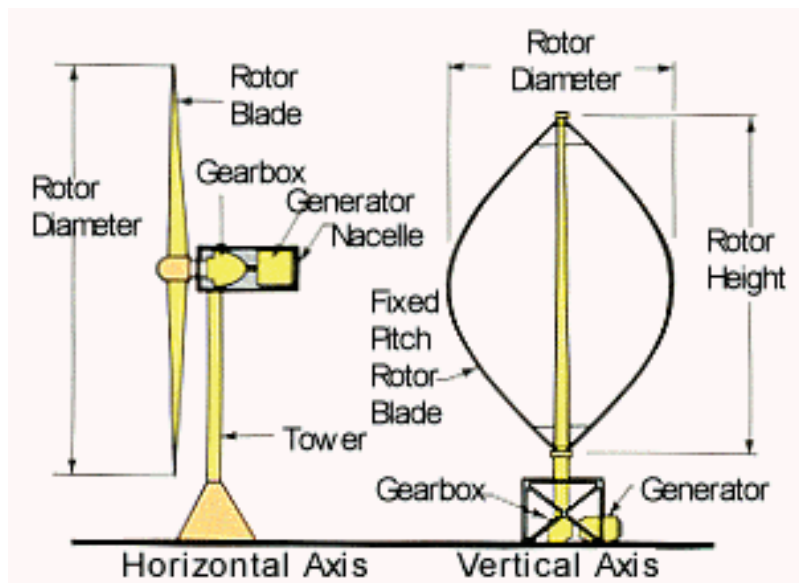
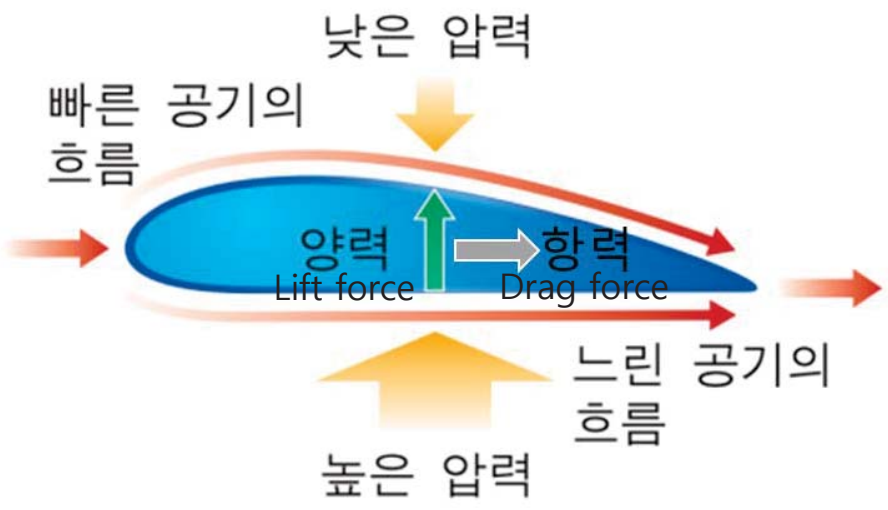
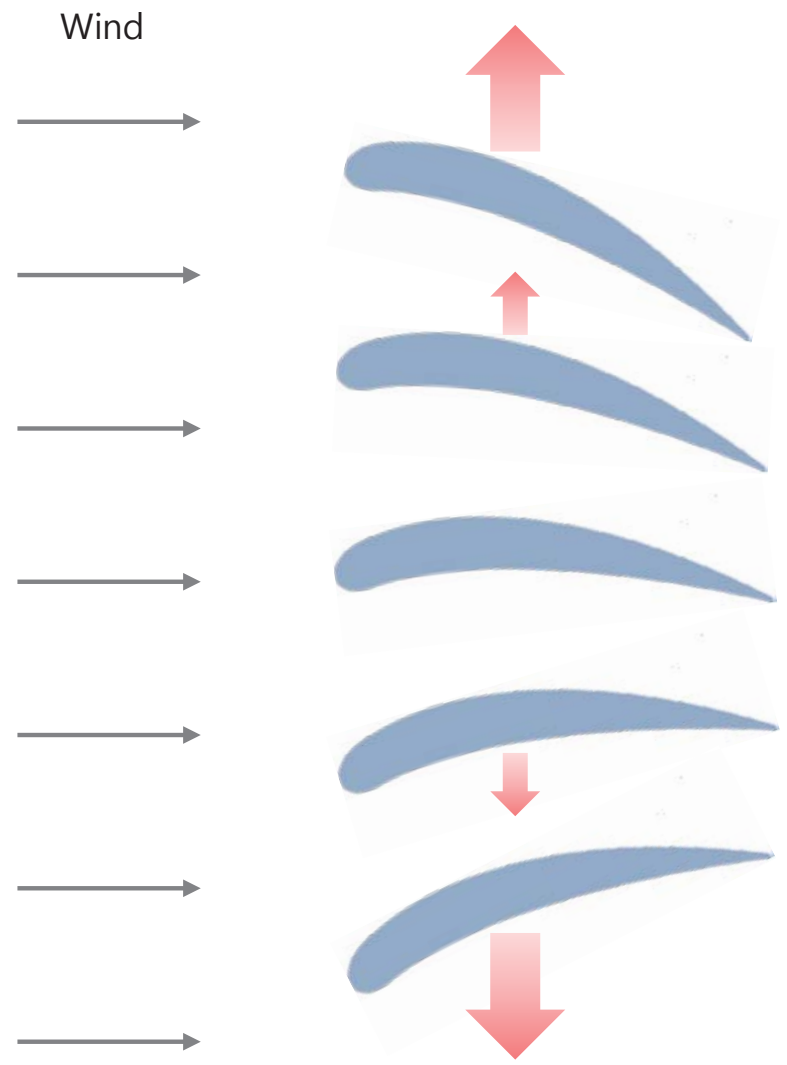


Figure 6: Several typical types of vertical-axis wind turbines: (a) Darrius; (b) Savonius; (c) Solarwind™ [36]; (d) Helical [37]; (e) Noguchi [38]; (f) Maglev [39]; (g) Cochrane [40].

공력 발생 원리

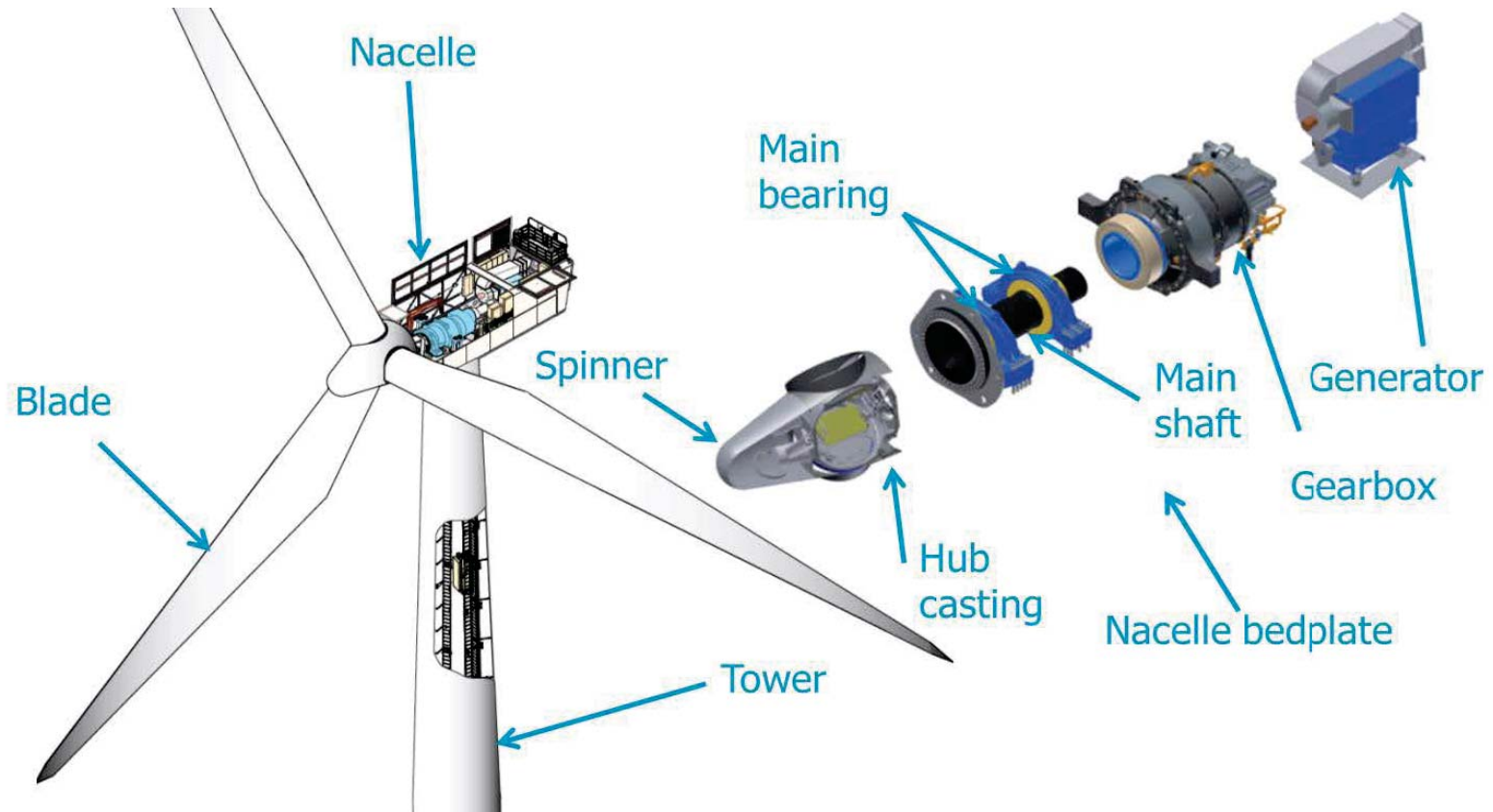


풍력발전은 로터의 형상에 따라 양력과 항력 활용!



바람 받음각(Angle of Attack)을 변화시켜 양력의 크기와 방향을 조절

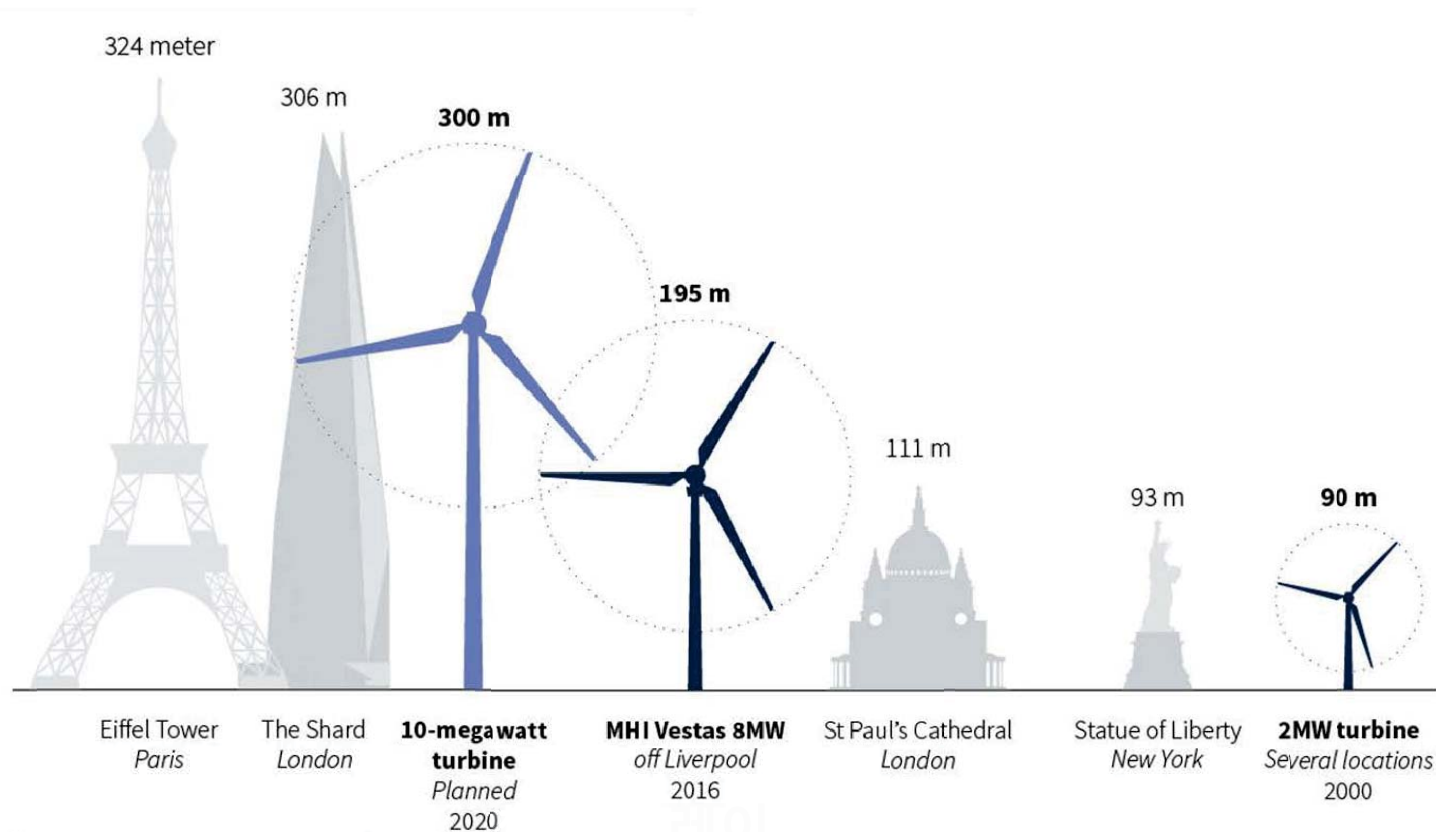
풍력발전기 구성 (수평축)



풍력발전기 구성

블레이드 (Blade)

- 바람의 운동에너지를 회전력으로 변환
- 블레이드 길이가 길수록 효율, 출력 증가 (출력은 반지름의 제곱에 비례)
- 피치각 조절로 출력 제어



풍력발전기 구성

타워 (Tower)

- 블레이드 & 나셀 지지 구조물
- 대형 풍력발전기 경우 높이 80 ~ 100m, 하부 지름 6 ~ 8m

육상 (Onshore)



스틸 파이프 구조

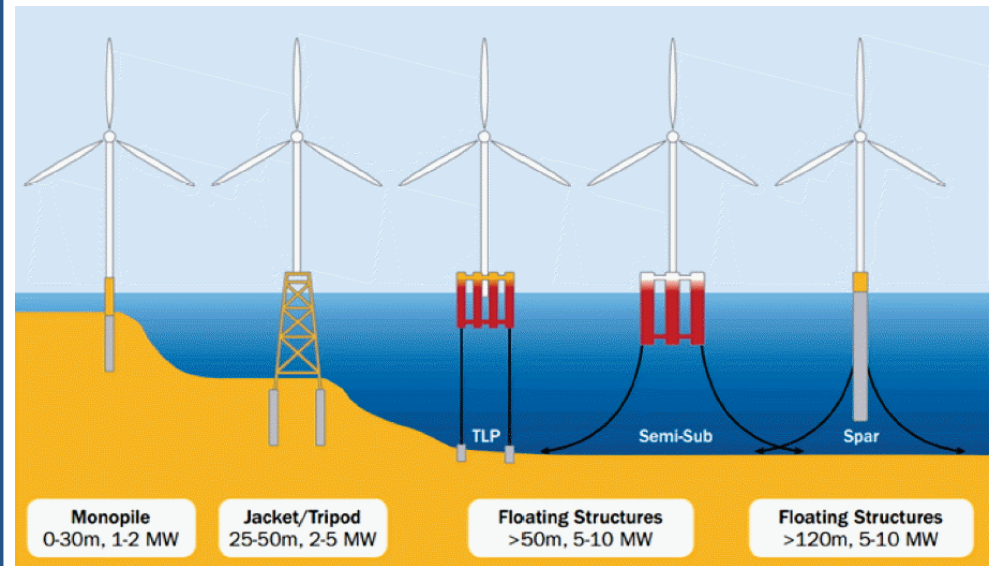


격자 구조



가이 와이어 구조

해상 (Offshore)



Monopile
0-30m, 1-2 MW

Jacket/Tripod
25-50m, 2-5 MW

Floating Structures
>50m, 5-10 MW

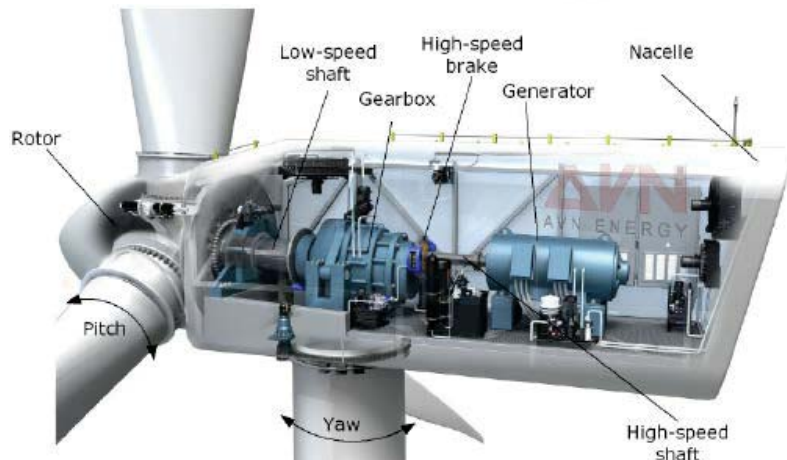
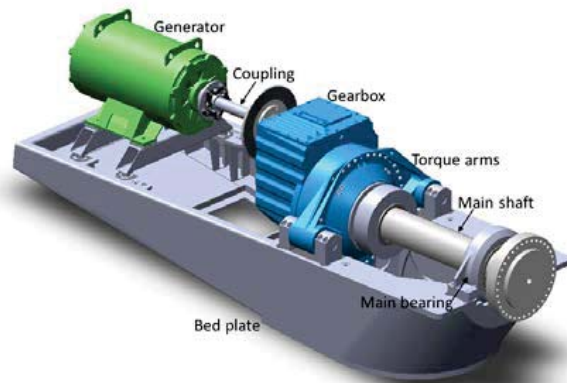
Floating Structures
>120m, 5-10 MW

풍력발전기 구성

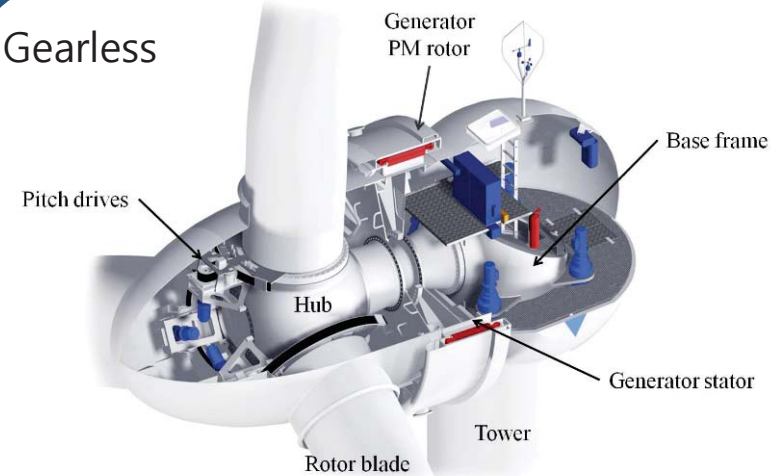
나셀 (Nacelle)

- 로터에서 얻은 회전력을 전기로 변환하는 모든 장치들이 들어 있는 상자과 같은 케이스
- 회전축 (rotor shaft), 변속기어 (gearbox), 브레이크 시스템, 요잉 시스템 (yawing system), 피치각 구동 시스템, 발전기 등이 들어있음
- 타워 상부에 설치

Geared



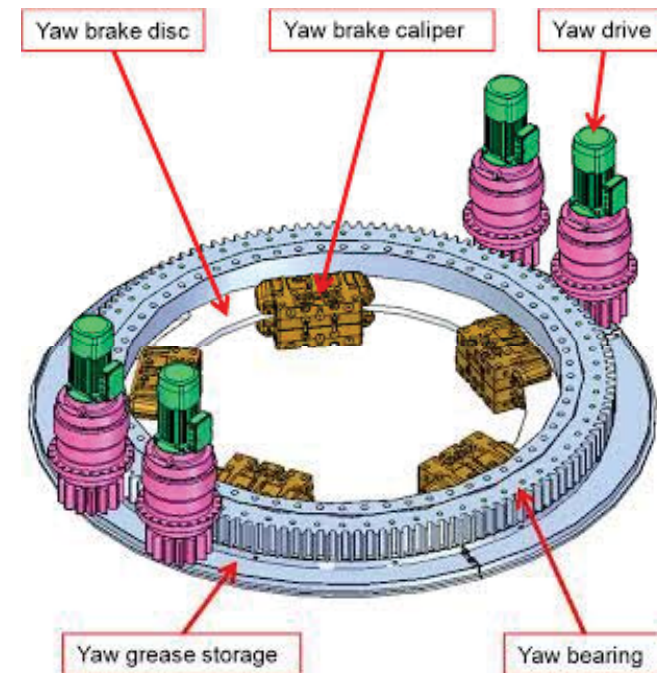
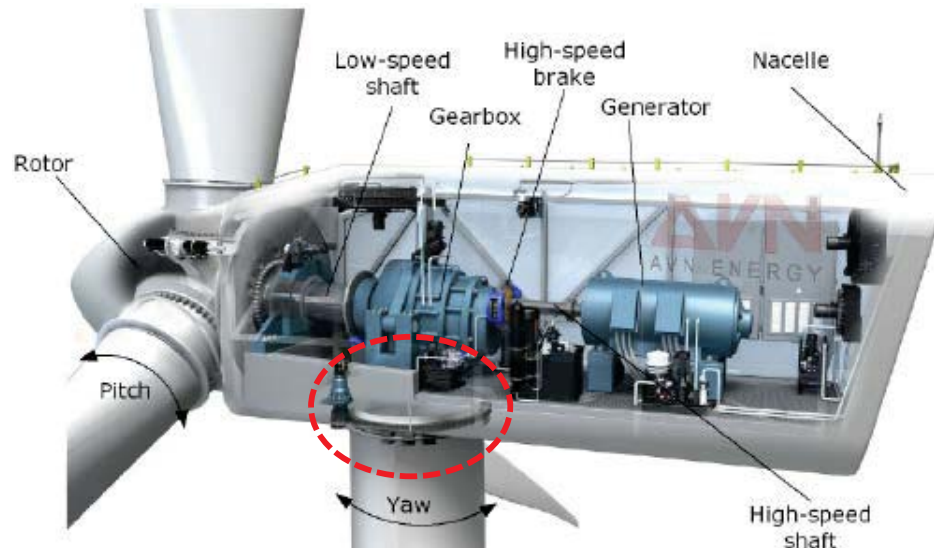
Gearless



풍력발전기 구성

요잉 시스템 (Yawing system)

- 바람 방향을 추적하여 바람 방향으로 나셀을 회전시키는 시스템
- 기어 및 브레이크로 구성
- 요 브레이크는 자동차 디스크 브레이크와 유사



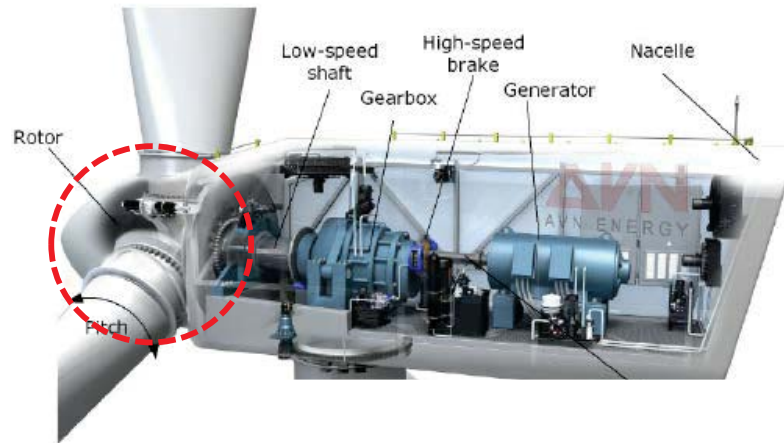
풍력발전기 구성

허브 (Hub)

- 블레이드를 로터축에 설치하는 고정 장치

로터축 (Rotor shaft)

- 로터에서 전달되는 회전력을 증속기에 전달하는 장치



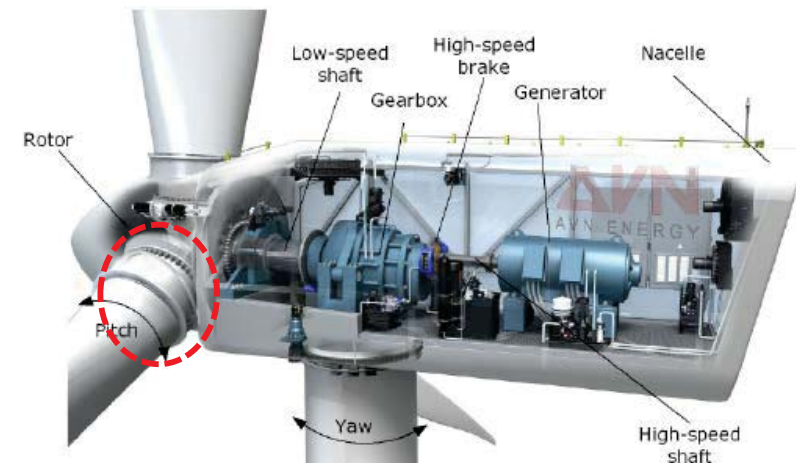
풍력발전기 구성

기어박스 (Gearbox)

- 로터축의 회전수(=블레이드 회전수)를 발전에 적합한 회전수로 전환하는 장치
- 풍력발전의 용량과 제어방식을 결정하는 중요 장치
- 동력 전달 손실 존재

피치각 구동 시스템 (Pitch control system)

- 바람의 속도에 따라 블레이드의 경사각(Pitch angle)을 조절하여 출력을 제어하는 장치



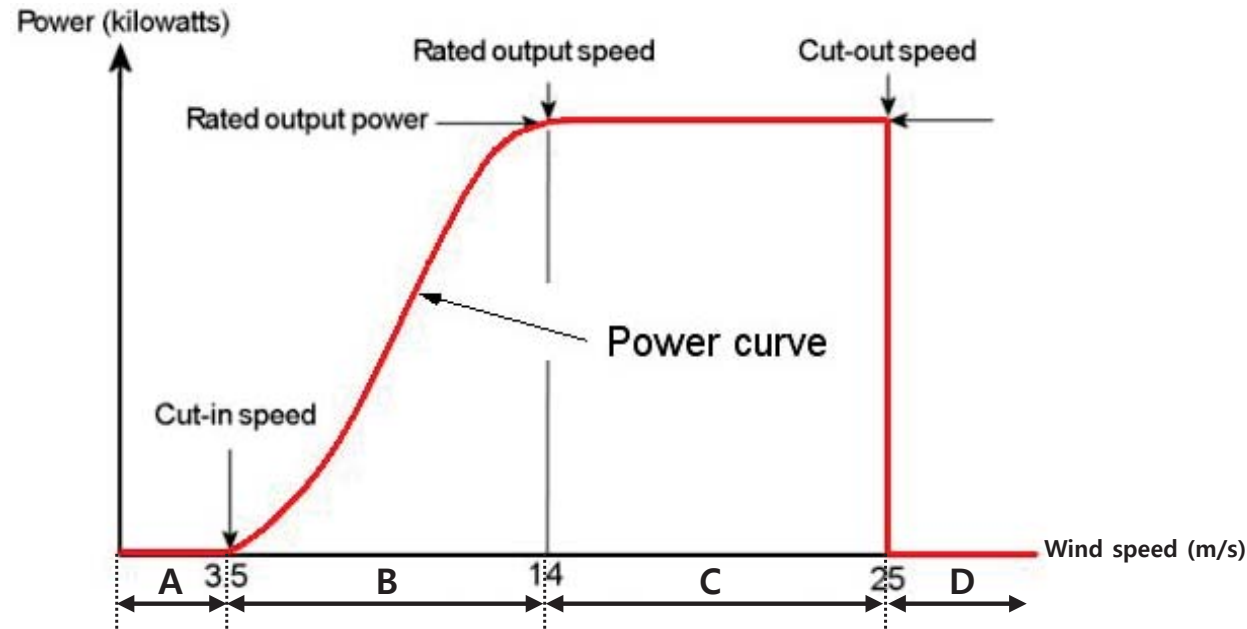
주요 용어

- 연간발전량 (Annual Energy Production, AEP): 1년간 생산한 발전량 (MWh)
- 출력 (Output power)
 - 정격출력 (Rated power): 정격 풍속 운전상태에서의 출력값 (W, kW, MW)
 - 최대출력 (Maximum power): 정상운전 상태에서 계통으로 전달되는 정격출의 최대값
- 풍속 (Wind speed)
 - 정격풍속 (Rated wind speed): 정격출력일 때 바람의 속도 (약 12 ~ 15 m/s)
 - 시동풍속 (Cut-in wind speed): 전력생산을 시작하는 최소 풍속 (약 3 m/s)
 - 종단풍속 (Cut-out wind speed): 설계된 풍력발전기의 최대 풍속 (약 25 m/s)
- 아이들링 (Idling): 전력을 생산하지 않고 저속 회전하고 있는 상태
- 가동률 (Availability): 풍력발전기의 연간 실제 가동시간 비율 (일반적으로 90% 이상)

$$\text{가동률} = [\text{연간가동시간(h)} / \text{연간시간(8,760h)}] \times 100 (\%)$$
- 이용률 (Capacity factor): 정격출력에서 연간발전량 대비 실제 연간발전량을 비율 (약 25 ~ 40%)

$$\text{이용률} = \{ \text{연간발전량(MWh)} / [\text{정격출력(MW)} \times \text{연간시간(8,760h)}] \} \times 100 (\%)$$

- 출력곡선 (Power curve): 풍속 구간별 발전량, 제작사가 제공



구간 A

- 풍속이 시동풍속보다 작아 발전하지 못함

구간 B

- 풍속이 시동풍속보다 크므로 발전 시작하나, 생산하는 출력이 정격출력보다 작음
- 최대의 출력을 생산하도록 제어

구간 C

- 정격출력보다 더 많은 출력 가능하나, 설계에 적용된 정격출력만 생산하도록 제어
- 토크는 일정하게 유지하면서 피치각을 제어하여 출력 및 회전수를 정격으로 일정하게 유지

구간 D

- 풍속이 종단풍속보다 크므로 작동을 중지하고 출력을 생산할 수 없는 상태
- 구조적 손상을 피하기 위해 피치각을 조절하여 페더(feather) 상태 유지

Chapter
01Chapter
02

Chapter 03

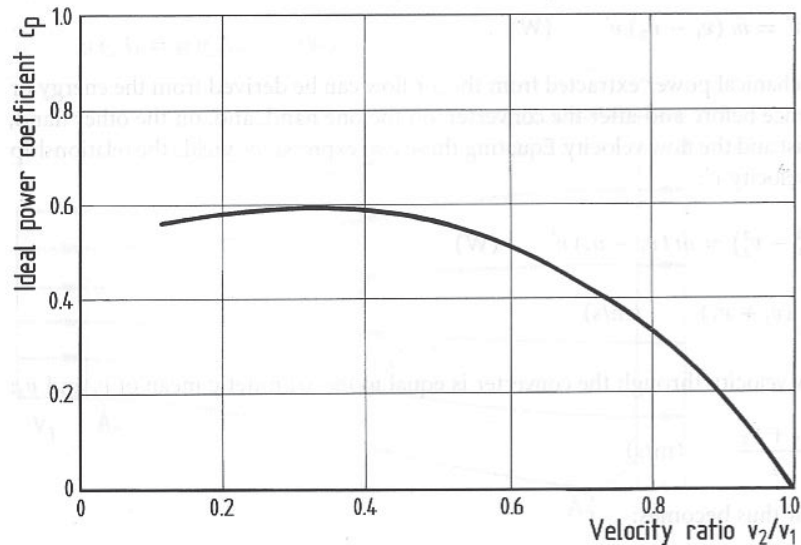
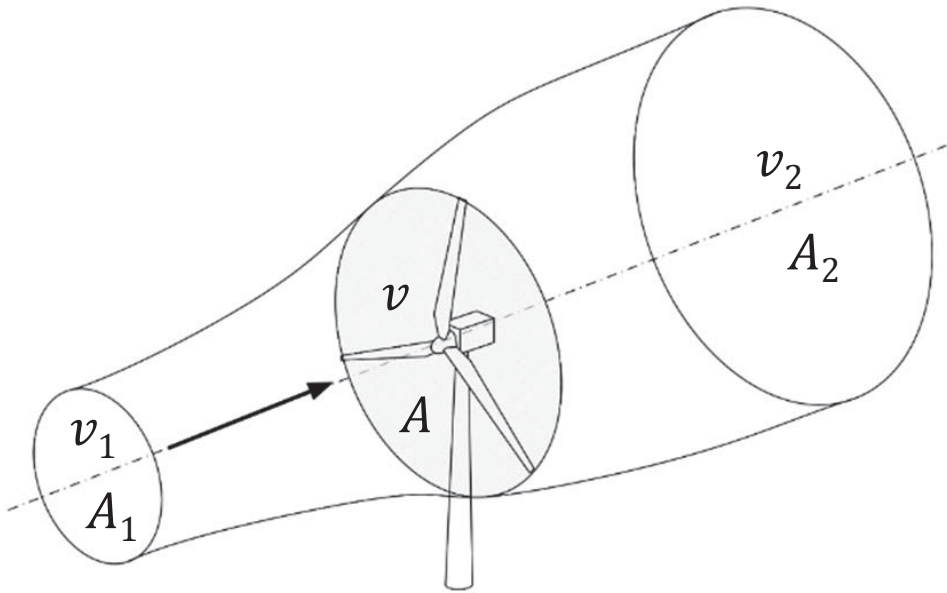
Chapter
04

풍력발전 원리



The KIER, a global energy innovator, does its best in pursuing its mission to invent world-class energy technologies based on open innovation, life-cycle research quality assurance, participatory and open communication. Therefore the KIER will become the best energy technology R&D institute in the world, contributing to the creation of wealth and improvement of quality of life for the people.

출력계수(C_p)와 Betz Limit



$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A_1 v_1^3$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

$$C_P = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$C_{Pmax} = 0.593 @ v_2 = \frac{1}{3} v_1$$

$$P_e = P_0 C_P \eta_r \eta_t \eta_g$$

출력 \propto 풍속의 세제곱 (풍속이 10% 증가하면 출력은 33% 증가)

공기 밀도

날개 반경의 제곱 (반경이 10% 증가하면 출력은 21% 증가)

C_p (속도비의 함수)

이론적으로 바람 운동에너지의 약 60%만 출력으로 얻을 수 있다 \rightarrow Betz Limit

석유 에너지 변환 효율: 약 42 ~ 45%

태양광발전 변환 효율: 63.7% (카르노 사이클)

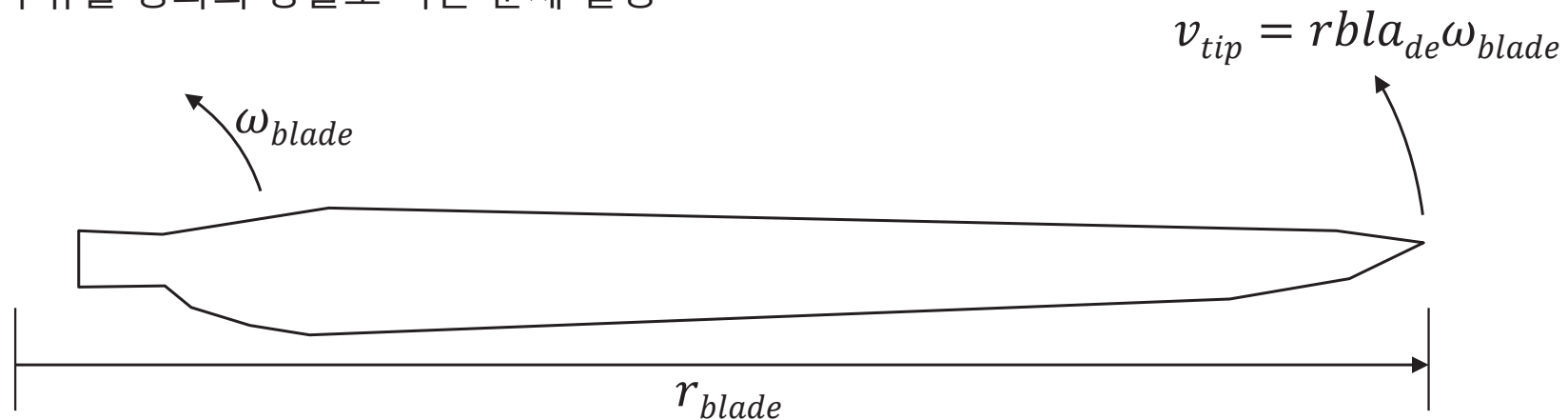
그러나 실제로 풍력발전 설비의 효율은 날개 모양, 받음각 및 터빈 배열, 기어 박스 손실, 발전기 손실 등에 따라 달라지며 Betz Limit에 미치지 못함.

실제 변환한 전기에너지, $P_e = P_0 C_p \eta_r \eta_t \eta_g$

수평형 대형 풍력발전기 효율: 약 30 ~ 45%

주속비 (Tip Speed Ratio: TSR, λ)

- 블레이드 설계 시 성능 지표
- 블레이드 끝단의 회전 방향 속도와 풍속의 비
- 블레이드 고속 회전 시 소음 발생
- 조류, 부유물 등과의 충돌로 파손 문제 발생

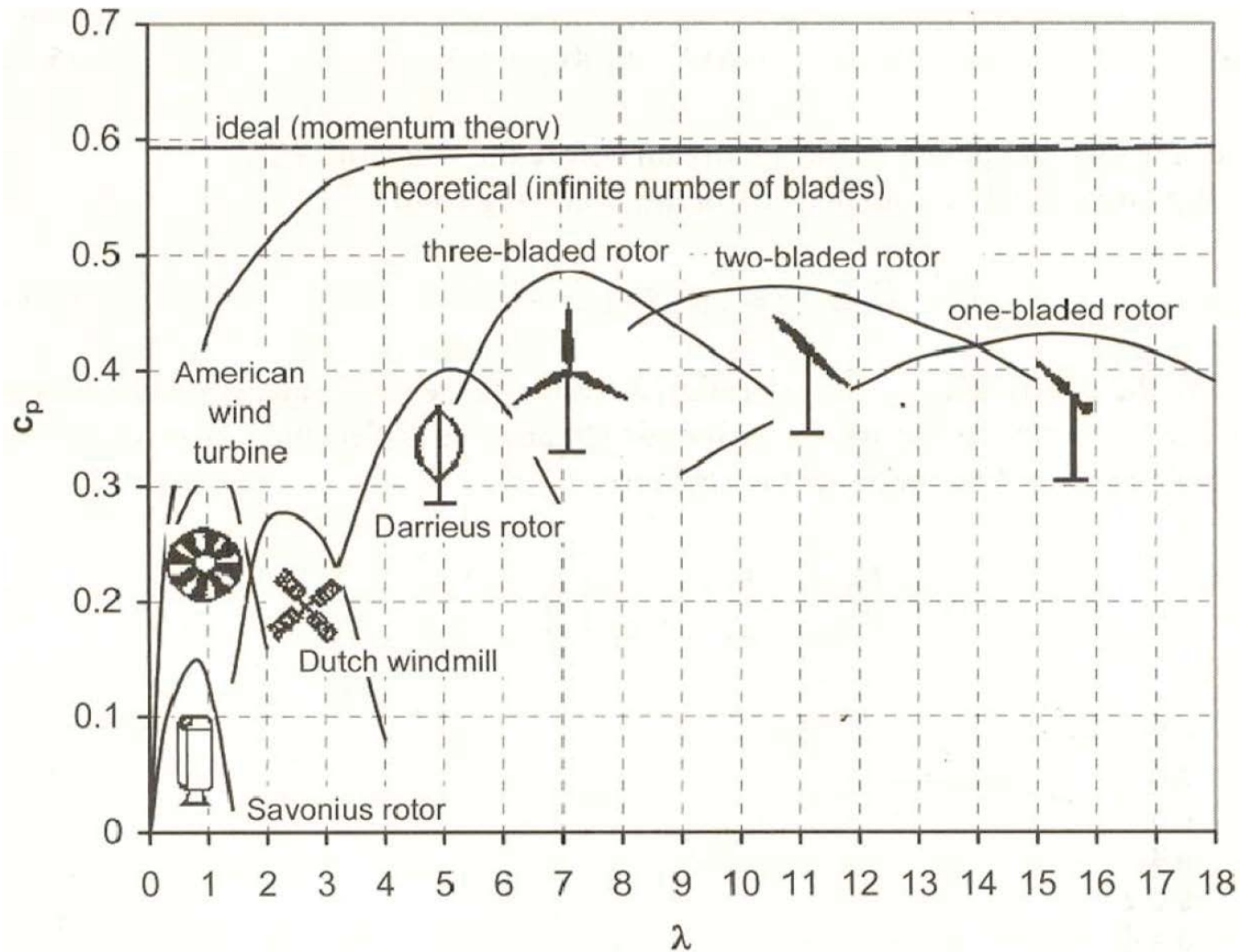


$$\lambda = \frac{v_{tip}}{v_{wind}} = \frac{r_{blade}\omega_{blade}}{v_{wind}}$$

Example) 블레이드 반경 60 m, 회전수 12 rpm, 풍속 13 m/s

$$\lambda = \frac{r_{blade}\omega_{blade}}{v_{wind}} = \frac{60 \times 12 \times 2 \times 3.14 / 60}{13} = 5.8$$

출력계수(C_p)와 주속비(λ)



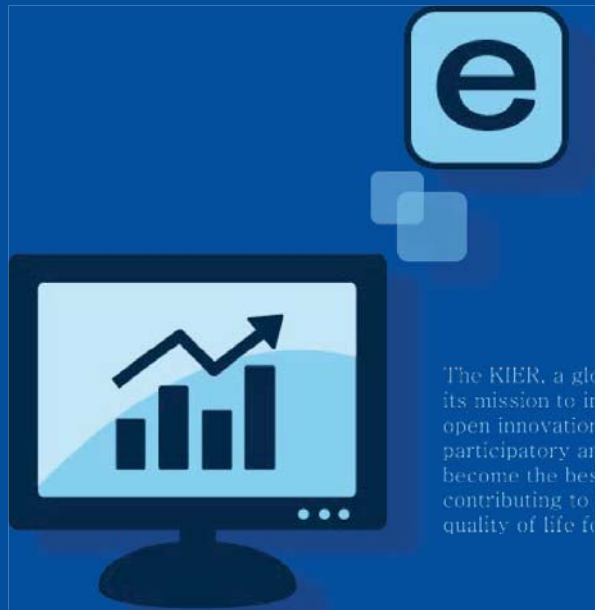
Chapter
01

Chapter
02

Chapter
03

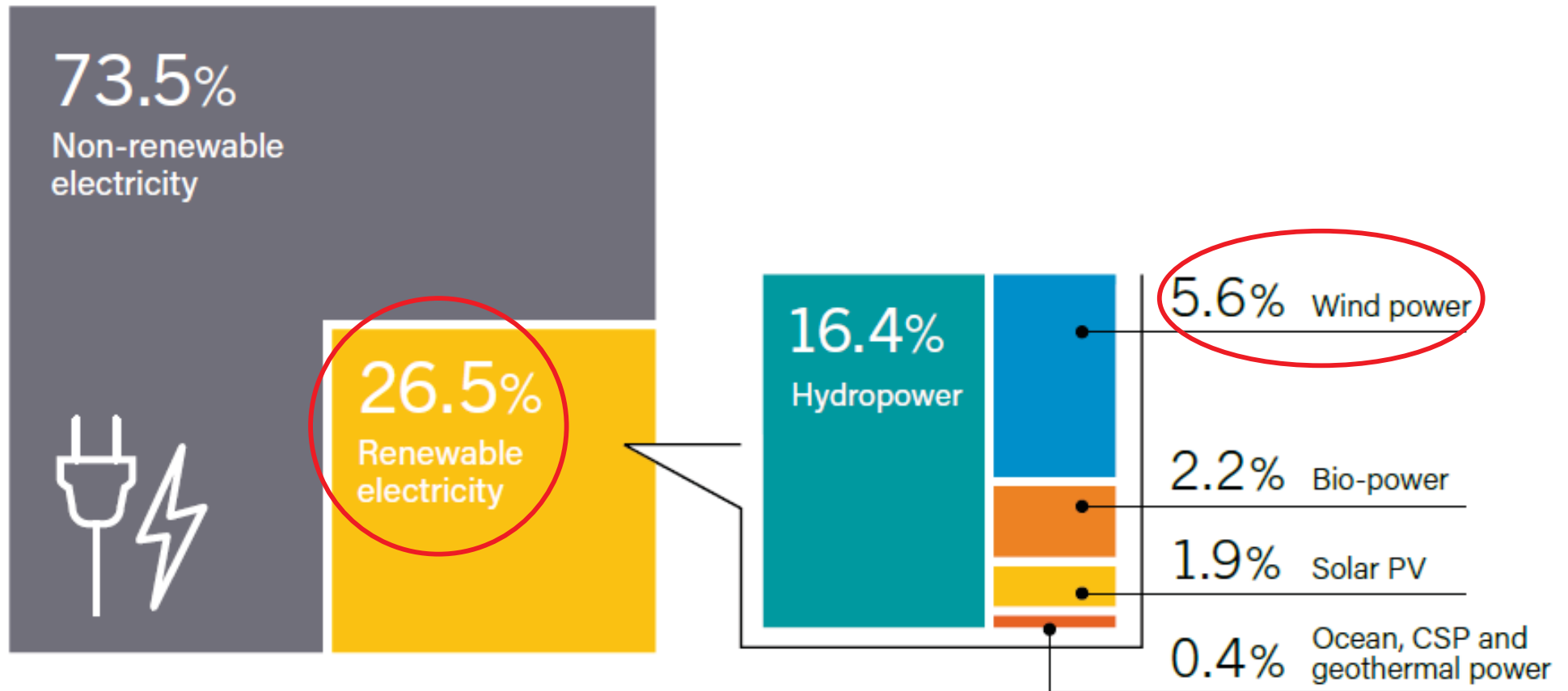
Chapter 04

기술적 과제

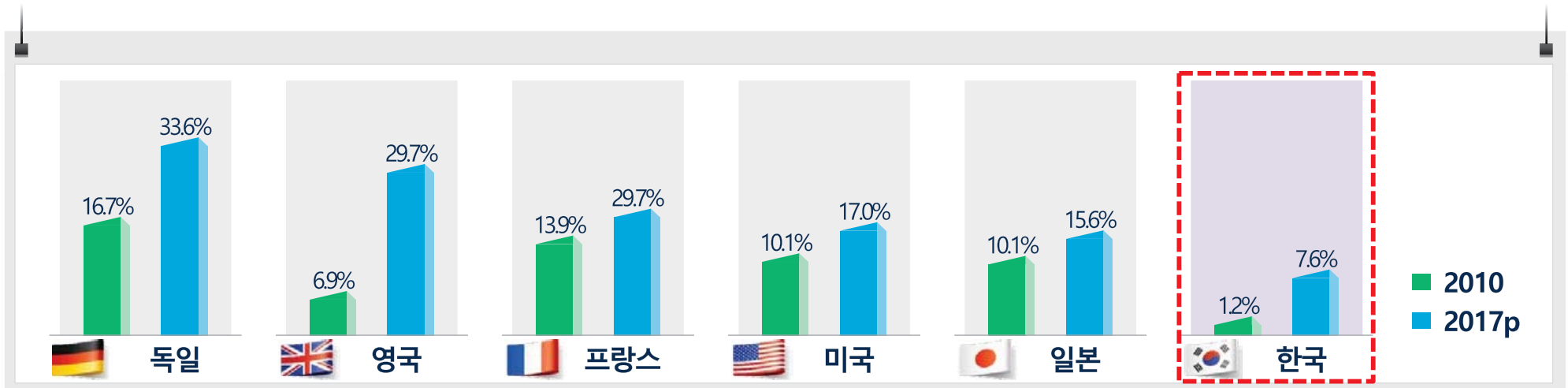


The KIER, a global energy innovator, does its best in pursuing its mission to invent world-class energy technologies based on open innovation, life-cycle research quality assurance, participatory and open communication. Therefore the KIER will become the best energy technology R&D institute in the world, contributing to the creation of wealth and improvement of quality of life for the people.

글로벌 재생에너지 발전량 비중 ('17 기준)

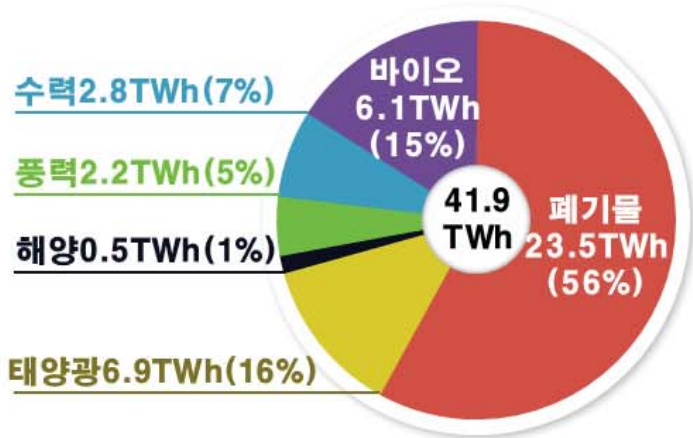


국내 재생에너지 발전량 비중

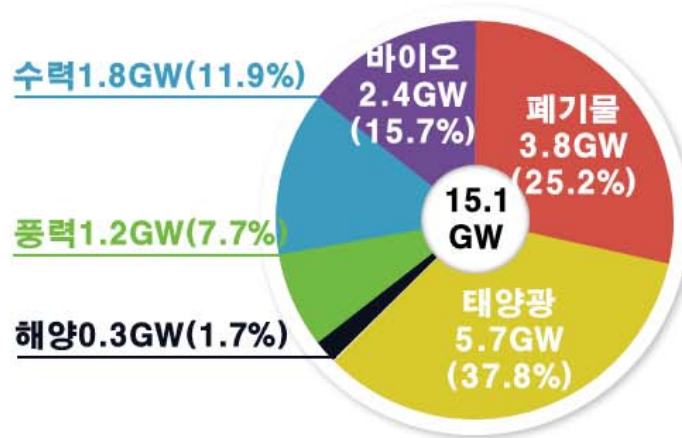


* Source : IEA(2018) / KEA(2018)

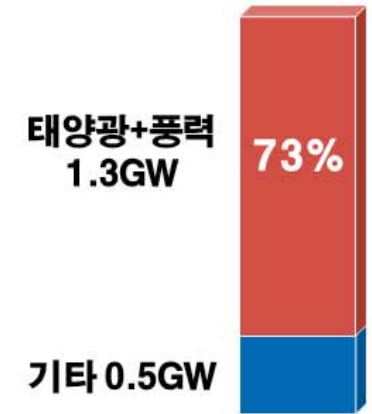
원별 발전량 비중(' 17(잠정))



원별 누적 설비용량(' 17(잠정))

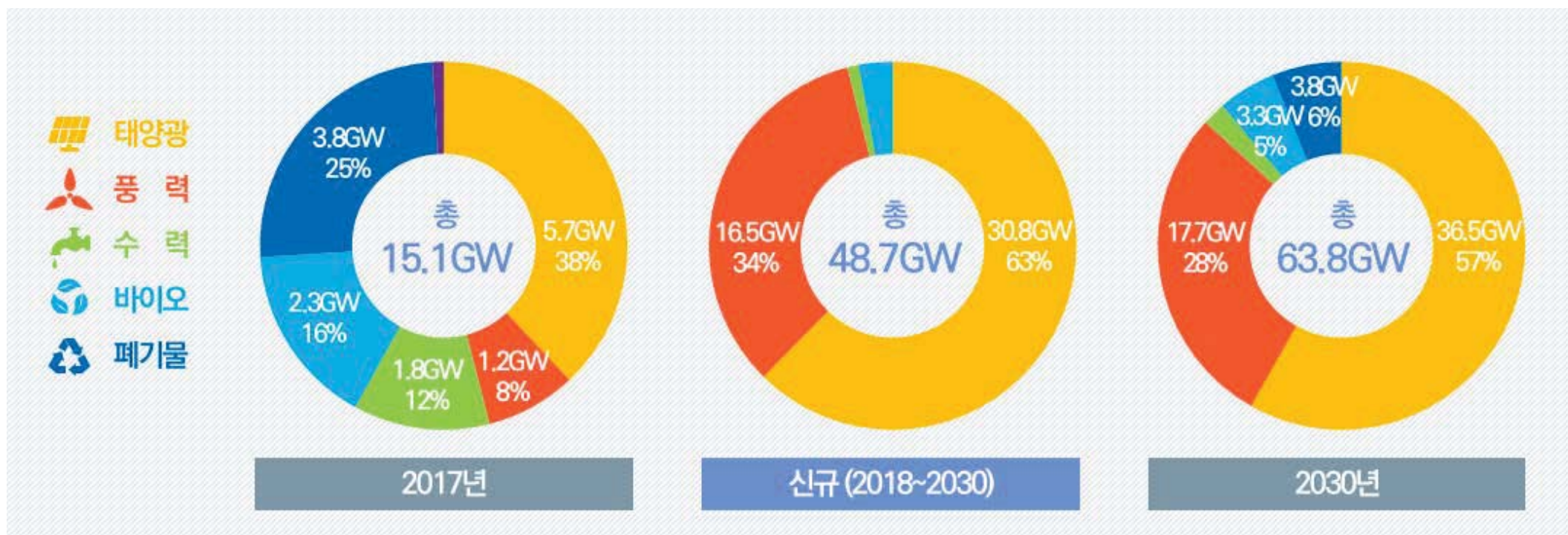


신규 설비용량(' 17P(잠정))



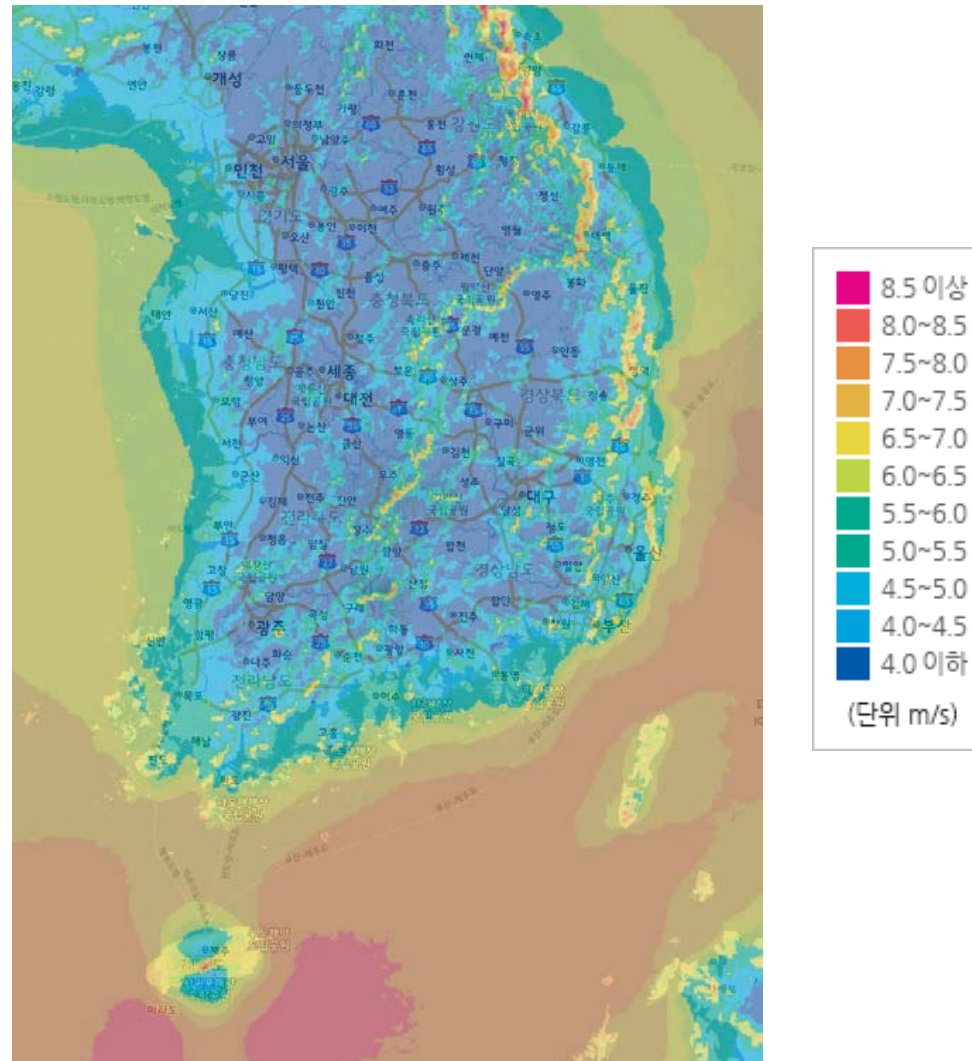
재생에너지 3020 이행계획

- 2030년 재생에너지 발전량 20%(63.8GW), 그 중 17.7GW(28%) 풍력 보급
- 육상풍력(3GW) 보다 해상풍력(14GW, 80%) 중심 보급
- 목표 달성을 위해서는 기술개발, 지자체 및 지역주민의 적극적 참여 필수



이용률

- 우리나라에서 육상 풍력발전단지 평균 이용률 20~25% 수준 (제주, 경북, 강원 등 일부 지역은 30% 수준)
- 저풍속 지역에 적합한 풍력 발전기모델이 개발 필요



운송 및 설치



풍력발전기 설치선 (Wind Turbine Installation Vessel, WTIV) 'PACIFIC ORCA'
 3.6MW급 풍력발전기 12기 동시 운반 및 설치 가능 (2011년 기준 세계 최대)
 최대 수심 60m 해상에서 설치 가능
 10MW급 이상 초대형 풍력발전기 설치 가능

주민 수용성 - 소음



뉴스 > 사회

"풍력발전기 저주파 발생하면 사람은 살수 없습니다"
 풍력발전소 반대 범시민대책위회 · 반대 서명운동 동참호소

경북동부 관리자 기자 / d3988100@hermail.net | 입력 2016년 06월 06일(토) 14:50 | [정보복사](#)

공유

녹색평론 독자모임 등 시민 사회단체로 구성된 영천초대형풍력발전소 반대 시민대책위원회(이하 반대 대책위)가 영천의 진산인 보현산과 기룡산 등지 풍력발전단지 반대 서명운동에 동참하는 시민 호소문을 내고 동참을 촉구했다.

반대 대책위는 2일 진산인 보현산과 기룡산 영천의 기

'웅~소음 싫어'...장성 태청산 풍력발전 개발 주민 반대

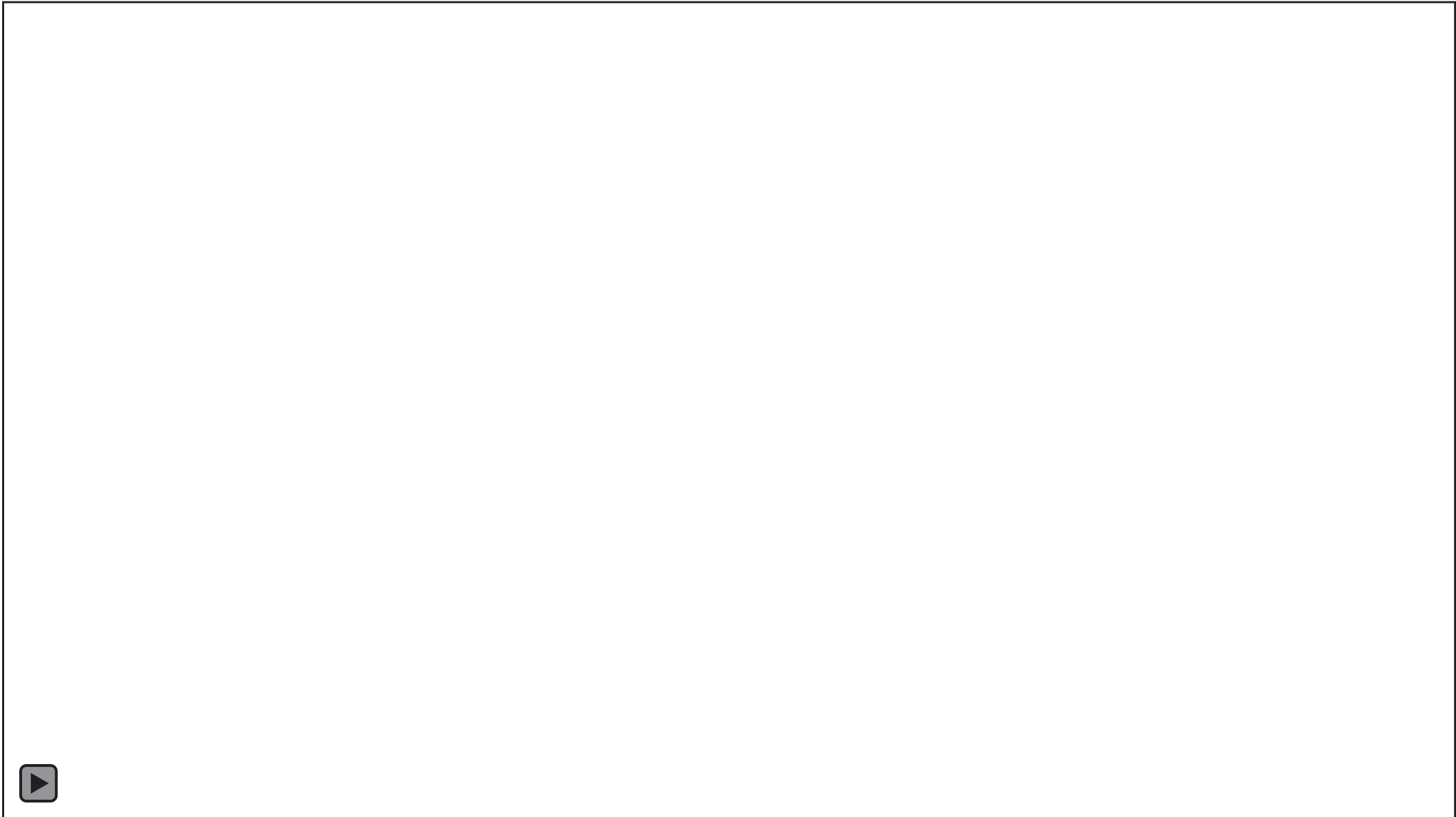
송고시간 | 2016/05/24 07:00

YONHAP NEWS

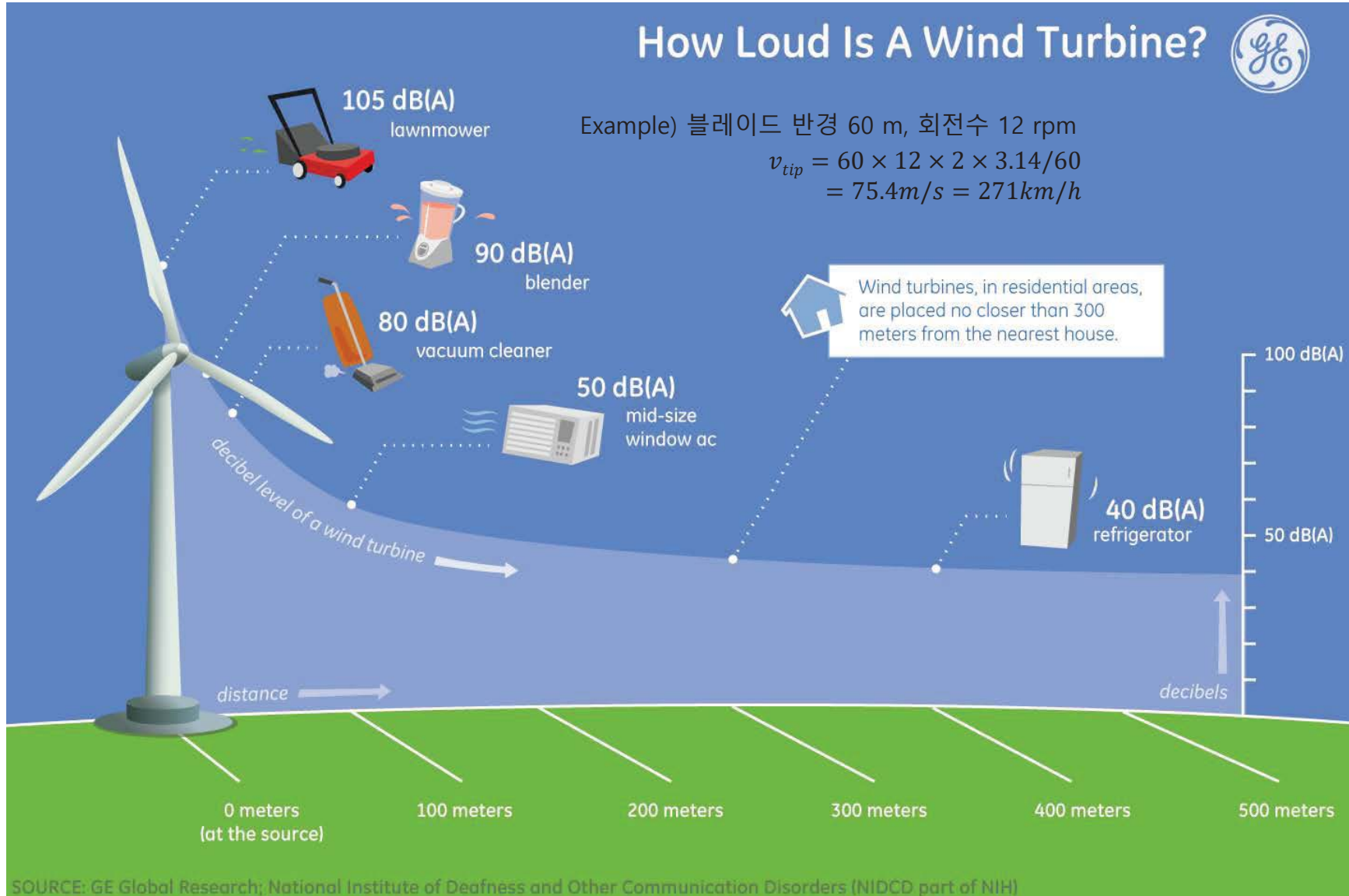
풍력발전기
[연합뉴스TV 캡처]

주민 "소음 피해, 저주파로 생태계 교란 우려"
 장성군 "중요한 것은 주민의사, 법 절차에 따라 진행할 터"





How Loud Is A Wind Turbine?



SOURCE: GE Global Research; National Institute of Deafness and Other Communication Disorders (NIDCD part of NIH)

표 1 덴마크의 소음한도 규제

지역	풍속 6 m/s	풍속 8 m/s
Open countryside	42 dB(A)	44 dB(A)
Noise sensitive land use	37 dB(A)	39 dB(A)

표 2 독일의 소음한도 규제

Area	Limit at night
Heartland, villages, mixed areas	45 dB(A)
General residential areas, small urban areas	40 dB(A)
Purely residential areas	35 dB(A)

표 3 여타 주요국의 소음한도 규제

국가	측정 기준	시골 지역	주거 전용지역
캐나다	연방정부 차원의 규제는 없으며, 각 주정부가 자체 기준 적용		
핀란드	L_{Aeq}	주간 45 dB(A), 야간 40 dB(A)	
프랑스	L_{Aeq}	주간: 기준 배경 소음 + 5 dB(A) 야간: 기준 배경 소음 + 3 dB(A)	
노르웨이	L_{den}	L_{den} 47 dB, L_{night} 41 dB	
스웨덴	L_{Aeq}	35 dB(A)	40 dB(A)
영국	$L_{A90(10 min)}$	주간: 배경 소음 + 5 dB(A) (최저 한도 35 dB(A) ~ 40 dB(A)) 야간: 배경 소음 + 5 dB(A) (최저 한도 43 dB(A))	
미국	연방정부 차원의 규제는 없으며, 각 주정부가 자체 기준 적용		

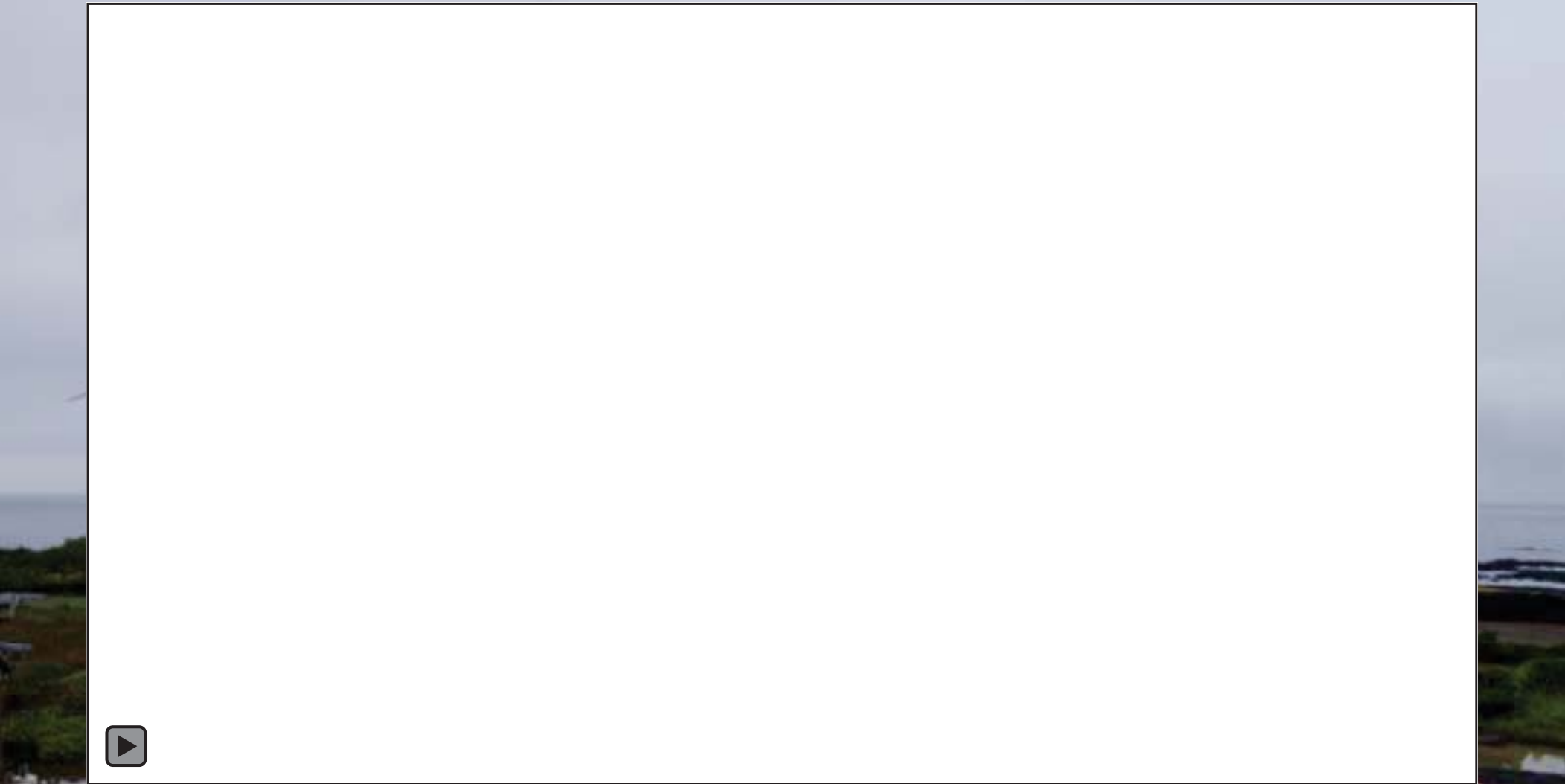
- 풍력발전기와 인접 주거지와의 최소 이격 거리는 (타워 높이 + 회전자 반경)의 4배
- 6배 이내의 위치에 설치될 경우에는 이로 인한 재산상의 피해를 감정하여 보상토록 규정

- 풍력발전기와 인접 주거지와의 최소 이격 거리는 대부분 주에서 750 ~ 1000m 요구

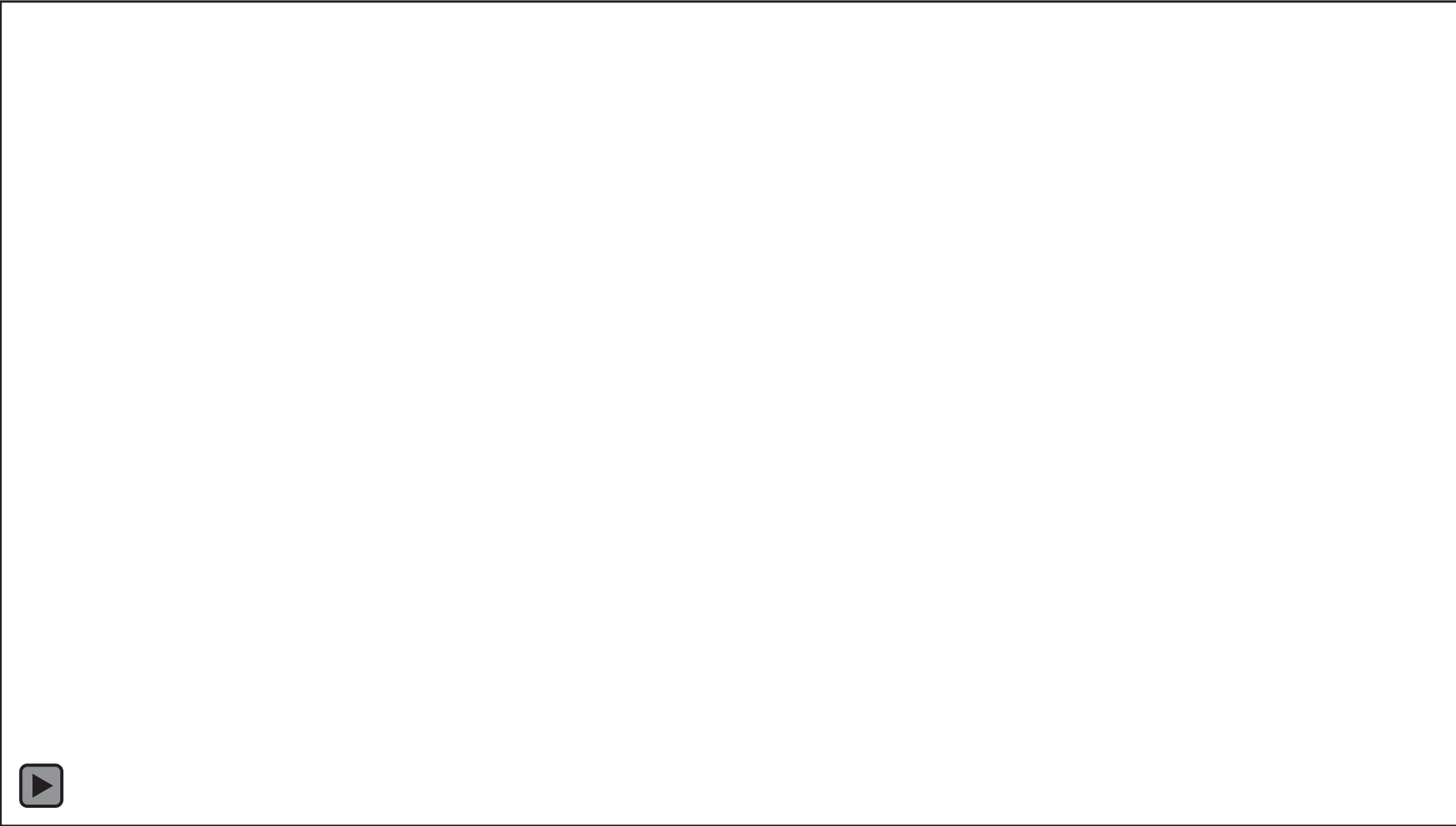
구 분	이격거리
주거시설 및 500m 학교(정온시설)	이내 이주 대책 수립
	500m 이상 ~ 1.5km 미만 주민과의 협의(기존시설) 가장 가까운 풍력발전기에서 1500m 이상(권장)
가축 및 사육시설 (초지 제외)	500m 이내 이주 대책 수립
	500~1000m 미만 주민과의 협의(기존시설) 1000m 이상(권장)

<풍력발전소-정온시설간 이격거리 권장 내용 자료:환경정책평가연구원(2011년)>

제주 탐라해상공력



제주 탐라해상공력

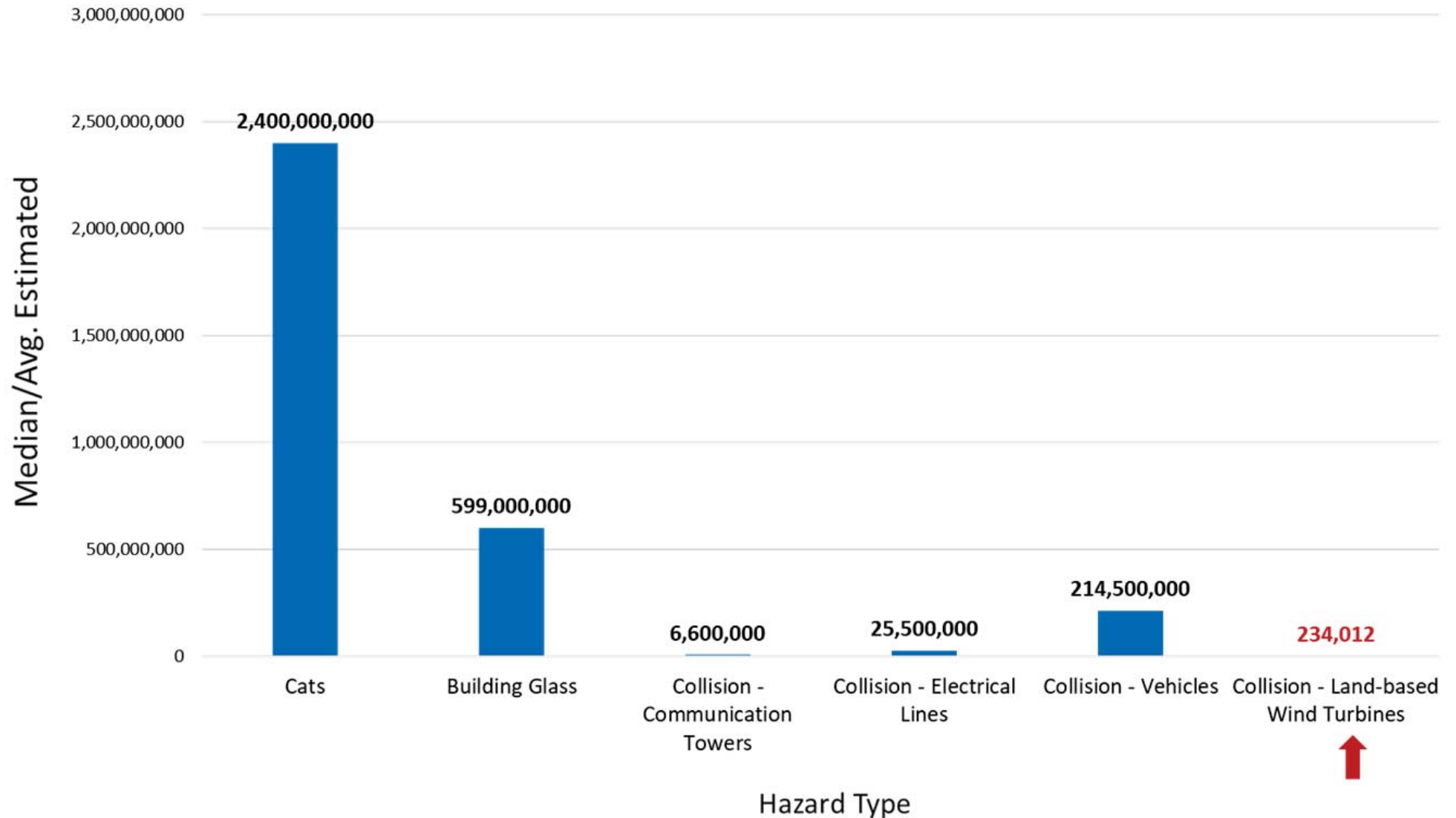


제주 탐라해상풍력



주민 수용성 - 생태계 파괴

Top Common Human-caused Threats to Birds



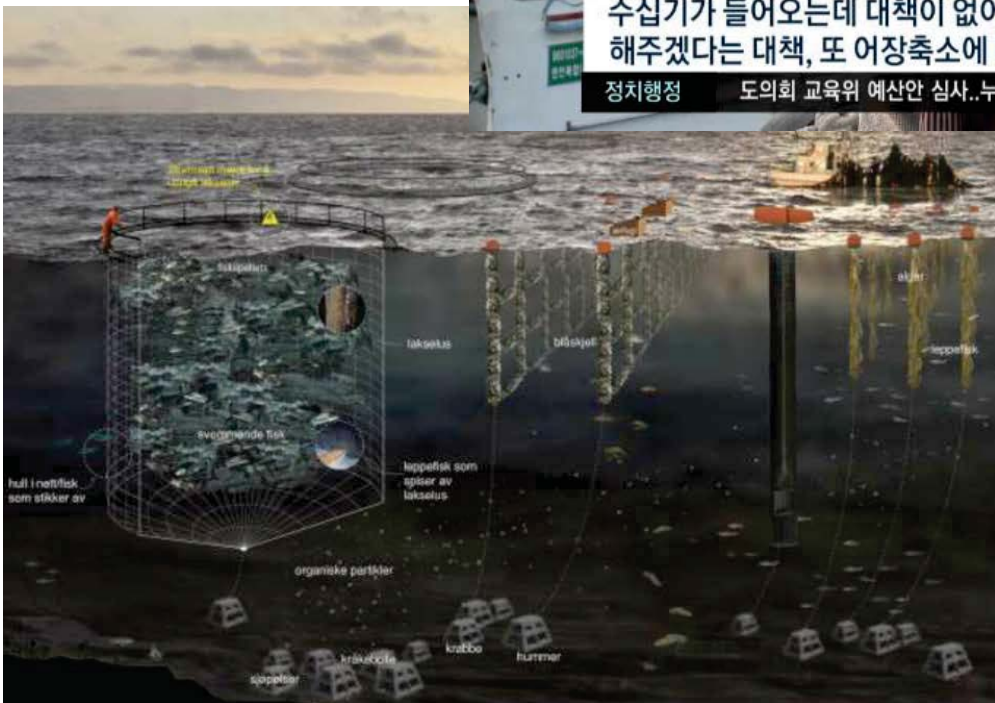
Source: U.S. Fish and Wildlife · U.S. only, as of 2017

주민 수용성 - 생업과 공존 방법?



8 찬반 갈등 확산

한 석 부 수산경영인제주도연합회 수석부회장
 수집기가 들어오는데 대책이 없어요. 그것에 대한 이걸 어떻게 해주겠다는 대책, 또 어장축소에 대한 대책.
 정치행정 도의회 교육위 예산안 심사..누리과정 도마, 학교 설립기금 축소 제안



시범풍력발전단지의 수산양식과 자원조성 복합단지 조감도



감사합니다



The KIER, a global energy innovator, does its best in pursuing its mission to invent world-class energy technologies based on open innovation, life-cycle research quality assurance, participatory and open communication. Therefore the KIER will become the best energy technology R&D institute in the world, contributing to the creation of wealth and improvement of quality of life for the people.

황성목
sm.hwang@kier.re.kr