풍력발전 최신기술 동향

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 장태현
(changtae@reseat.re.kr)

1. 서론

화석에너지원이 빠르게 고갈되어가고 있기 때문에 대체 에너지원의 개발이 절실히 필요하다. 동시에 에너지 수요는 급속히 증가하여, 세계는 에너지 위기에 놓여있다. 더욱이 전통적인 에너지원의 광범위한 사용은 환경을 오염시키고, 지구온난화를 야기했다. 반면에, 화석연료에 대한 깨끗한 대체 에너지원으로서, 풍력과 다른 재생에너지원은 사용이 가능하다. 낮은 운전비용과 폭 넓은 사용 가능성으로 풍력은 가장 편리하고, 효과적인 에너지원이 되었다.

에너지 요구를 위한 석유, 석탄 그리고 천연가스와 다른 유독가스 사용은 계속적으로 CO_2 배출물을 증가시켰다. 세계적인 에너지 사용과 연관된 CO_2 배출물은 2010년에 약 310억 톤에서 2020년에 360억 톤 그리고 2040년에는 450억 톤으로 증가할 것으로 예측되고, 이것은 다음 4세기 동안에 46% 이상으로 증가할 것이다.

더욱이 우주 연구를 위한 평균 지구 온도에 의하면, 지구의 온도의 형태와 강우량은 21세기 말까지 변할 수 있다. 또한 지구의 평균온도는 2100년까지 2° F에서 11° F 사이로 증가할 수 있고, 이것은 양 극지의 빙하 용해를 가속시키는 잠재력을 가지고 있어, 해수면의 증가와 바다의 산도 증가로 결국 해안가 근처에 거주하는 수백만 주민의 생활을 위태롭게 할 것이다.

재생에너지와 핵에너지는 가장 빠른 성장을 하고 있는 에너지원이고, 각 에너지는 매년 2.5%의 성장률로 증가하고 있다. 비록 핵에너지가 신뢰할 수 있고, 효과적이지만, 몇 가지 기술적인 요소뿐만 아니라 전리방사선 그리고 높은 초기비용에 문제가 있다. 반대로, 풍력, 태양열, 지열 그리고 바이오메스와 같은 재생에너지는 깨끗하고 경제적이다.

과거 30년 동안, 태양열과 풍력시스템은 성능 특성을 계속하여 향상시켜왔고, 전기 발전에 바탕으로 풍력에너지는 성숙한 기술이다. 태양에너지와 유사하게 풍력은 총에너지의 적은 량이 지구에 도달한다. 바람이 불면 태양광은 불균일하게 대기를 가열한다. 적도는 직접 태양광을 받고, 지구의 어느 다른 부분보다 더 많은 열에너지에 직면한다. 따뜻해진 적도의 공기는 상승하여 저압영역을 만든다. 불규칙한 가열지역과 "Coriolis effect"는 지표면 1km위에서 지균풍(geostrophic wind)을 만들고, 지구상 80m의 평균풍속을 이룬다.

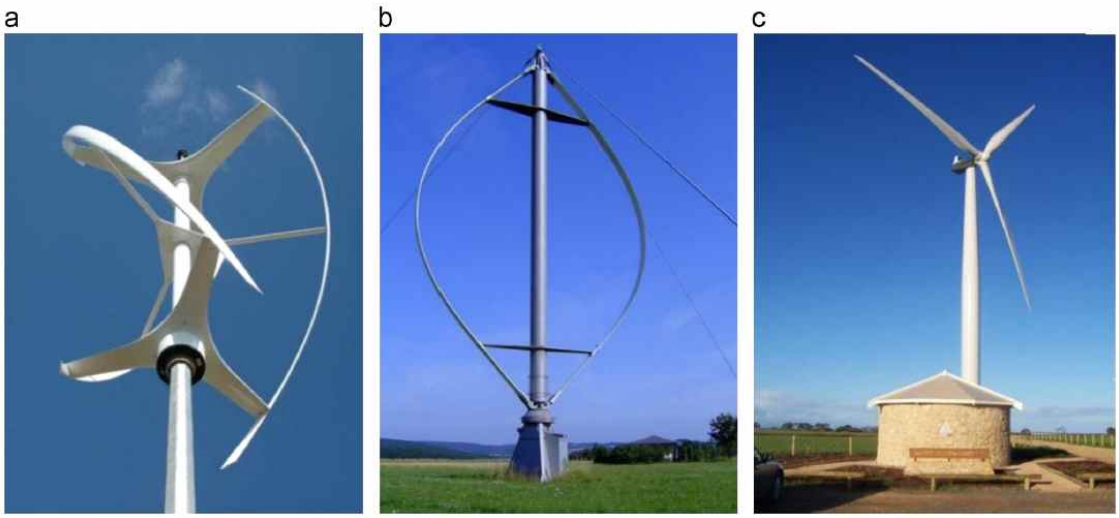
2. 풍력기술

풍력에너지는 직접적인 기계적 동력이나 간접적인 풍력의 운동에너지를 전기에너지로 전환해서 사용될 수 있다. 풍력에너지 시스템의 가장 중요한 부분은 풍력터빈이고, 이것은 풍력에너지를 여러 가지 응용에 이용할 수 있는 기계적 동력으로 전환시킨다.

2-1. 풍력터빈 설계

터빈의 설계와 크기는 발전에서 중요한 역할을 하고, 최대풍력 획득과 비용절감은 풍력터빈 연구에서 두 개의 중요한 주제이다. 오늘날 상업적으로 유용한 풍력터빈은 수 kW로부터 MW범위의 등급을 가지고 있다. 터빈의 직경은 중요한 변수이다. 현대 터빈은 두 가지 형태로 나누고, ①HAWTs(Horizontal Axis Wind Turbine)과 ②VAWTs(Vertical Axis Wind Turbine)이다. HAWTs는 VAWTs에 비교하여 높은 효율과 고출력 때문에 풍력산업에서 우위를 차지하고 있다.

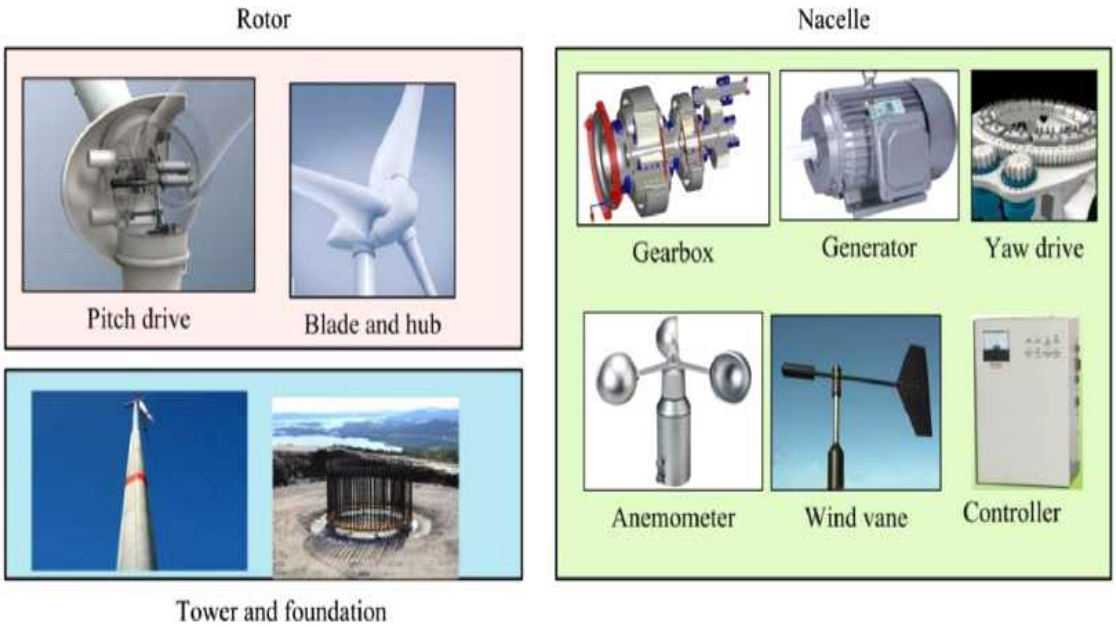
VAWTs는 지면에 가깝게 설치되어 풍력에 적게 노출되어야하는 본질적인 문제가 있어, 낮은 동력출력에 이르게 된다. HAWTs와 동일한 출력을 얻기 위해 VAWTs는 더 많은 재료와 더 큰 크기가 요구되고, 이는 현저한 큰 비용 증가를 야기 시킨다. 그러나 VAWTs는 낮은 풍속에서 얼마간의 전력을 생산할 수 있다. 또한 낮은 소음 수준을 가지고 있고, 풍력의 어느 방향으로 부터나 풍력을 획득할 수 있다. <그림 2-1>에 이들 풍력터빈을 제시한다.



<그림2-1> 풍력터빈의 종류 : (a) and (b) VAWT (left and middle panels) and (c) HAWT (right panel)[1)]

바람이 어느 면으로 불 때, 풍력은 두 종류의 공기역학적 힘을 만들고, 하나는 항력인 공기유동 방향의 힘이고, 다른 하나는 양력(lift force)이라고 알려진 공기유동

에 대해 수직력 이다. 이들 힘의 한 두 가지는 터빈 날개를 회전시키기에 필요한 구동토크를 생성하기 위해 사용될 수 있다. 풍력터빈은 날개들, 로터, 탑(tower), 기어박스 그리고 발전기로 구성되고 <그림 2-2>에 나타낸다.



<그림 2-2> 풍력터빈의 주요 부품[1)]

2-2 육상풍력 터빈(onshore wind turbine)

육상풍력 터빈은 타워 높이 50~100m로 설치되고, 로터 직경은 50~100m이다. 풍력터빈 설계에서 일반적인 경향은 타워 높이와 로터 날개 길이가 증가되고 있다. 높은 기둥과 긴 날개들의 결합은 풍력터빈이 저 풍력에너지 잠재성을 가진 지역에 설치를 가능하게 했다. 현대의 터빈은 12rpm~20rpm의 로터와 허브(hub) 조립품을 작동시키고, 1980년 대 설치된 60rpm보다 아주 낮다.

오늘날, 폭풍 제어 기술은 아주 높은 풍력조건까지도 풍력터빈을 운전가능하게 했다. 육상풍력터빈들은 함께 그룹화 되어 풍력발전소를 이루고, 일반적으로 “wind project“ 혹은 ” wind farm“으로 알려져 있다. 이들 풍력발전소는 보통 5~300MW 크기이다.

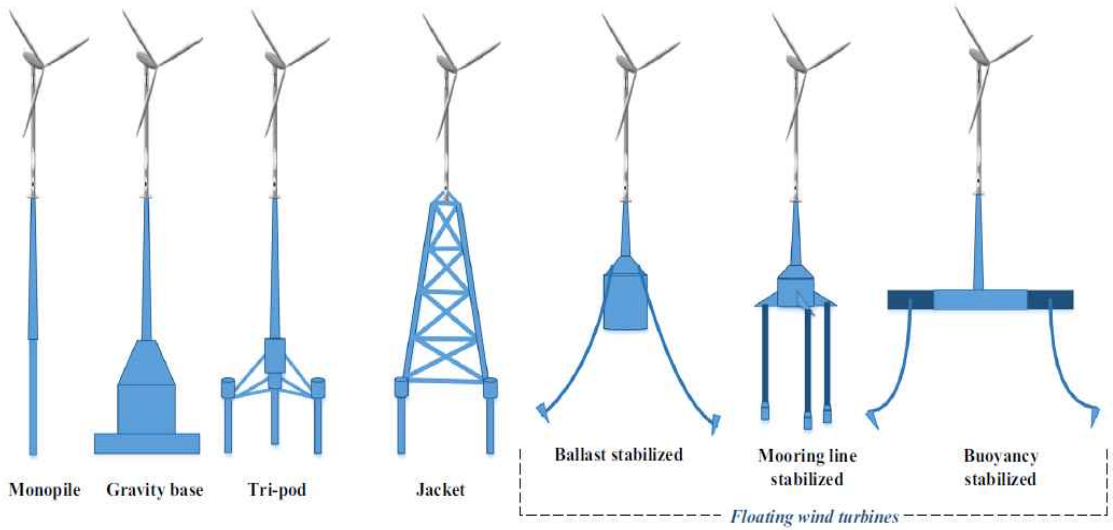
2-3 해상풍력터빈(offshore wind turbine)

해상풍력 에너지 개발은 해상위에 현저한 유용한 풍력자원 때문에 지난 몇 년 동안 가속되었다. 해상풍력은 육상풍력보다 높은 속도와 더욱 균일하다. 해상 장소는 큰 터빈을 가진 대용량 발전소를 건설할 수 있다. 해상풍력터빈은 보통 육상터빈보다 큰 첨부명판 용량(nameplate capacity)을 가진다. 세계의 가장 큰 시들은 연안 구역에 위치하고, 장거리 동력전송을 피한다. 예로, 미국의 인구의 53%는 연안 지역에 거주한다.

해상풍력의 중요한 차이는 발전소 기초 설계의 차이이다. 이는 해저타워 잠수를 고려한 부유(floating) 혹은 특수한 기초를 요구한다. 중요한 해상풍력터빈 기초는 <그림 3-1>에 나타낸다. 오늘날 많은 제작회사가 심해에 대해 부유식 터빈을 개발하였다. Norwegian 재생에너지 회사, SWAY는 100~400m 수심에서 작동할 수 있는 부유식 터빈을 개발하였고, Statoil Hydro는 700m 심해 터빈을 개발 중이다.

3. 해상풍력터빈의 안전성평가에 대한 표준과 계산 툴

해상풍력터빈은 파도, ice load, 그리고 과도한 풍력을 받으므로, 설계자는 풍력터빈의 안전성을 평가해야 된다. 풍력터빈 표준으로는 IEC61400-3 그리고 DNV-OS-J101 등 있다. 안전성, 신뢰성 그리고 성능 표준은 IEC61400-22에 포함한다.



<그림 3-1> 해상풍력터빈 기초 구조물의 종류[1)]

3-1 부하 환경

설계자는 풍력터빈의 설계를 검토하기 위하여 여러 가지 풍력, 조파 그리고 해빙의 상태를 고려해야한다. <표3-1>에 풍력터빈 평가에 요구되는 DLSC(Design Load Cases)를 제시한다. 또한 이들 데이터는 풍속, 중요한 파고높이, 그리고 해빙의 두께 등의 환경적 상태를 포함한다.

<표3-1> 풍력터빈의 환경조건에 관한 표준 목록[1)]

Standard	Description
IEC 61400-1 [62]	Wind turbine design requirements
IEC 61400-3 [55]	Design requirements for offshore wind turbines
DNV-OS-J101 [56]	Design of offshore wind turbine structures
DNV-DS-J102 [63]	Design and manufacture of wind turbine blades, offshore and onshore wind turbines
DNV-OS-J103 [64]	Design of floating wind turbine structures
GL Guideline [65]	Guideline for the certification of offshore wind turbines

3-2 유용한 툴

<표3-2>는 풍력터빈 설계를 평가할 수 있는 유용한 소프트웨어를 포함한다. 터빈 날개와 타워 구조에 대한 입력특성은 PreComp 사용을 위해 준비해야한다.

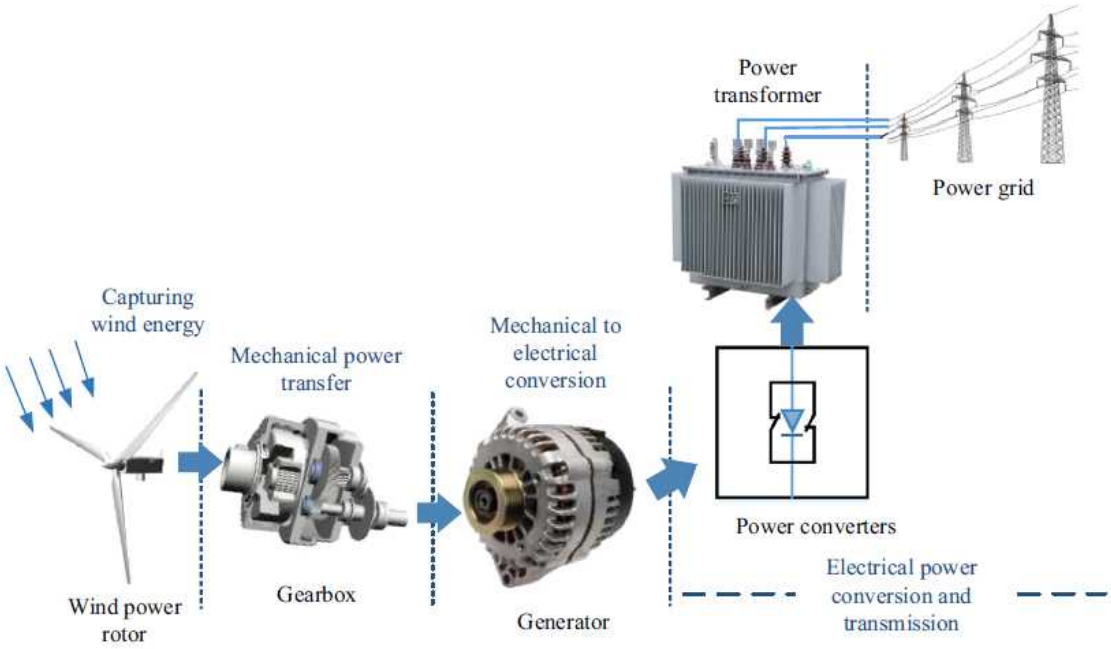
<표3-2> 풍력터빈의 평가 기준[1)]

Program		Company	Public	Description/Capability
FAST Suites	FAST [58]	NREL	Yes	Aeroelastic CAE tool for HAWT
	AeroDyn [69]	NREL	Yes	Aerodynamic analysis routines for HAWT dynamics analysis
	HydroDyn [72]	NREL	Yes	Hydrodynamics routines for offshore wind turbine analysis
	PreComp [73]	NREL	Yes	Pre-processor for computing composite blade properties
	BModes [74]	NREL	Yes	Computer code for tower and rotating blade modes
	IECWind [67]	NREL	Yes	A program to create IEC hub-height wind files for AeroDyn based simulators
	TurbSim [68]	NREL	Yes	A stochastic, full-field, turbulent-wind simulator for use with AeroDyn based simulation tools
	FAST_ICE	UT	Yes/pending	FAST module for ice impact analysis
	FAST_SM	UT	Yes/pending	FAST simulation manager. Automated execution, pre-, post-processing code for series of FAST simulations.
NuMAD [83]		SNL	Yes	Pre-processor of ANSYS for blade design
ADAMS [86]		MSC	No	Multibody dynamics simulation
Bladed [59]		DNV GL	No	Wind turbine analysis
WindFarmer [89]		DNV GL	No	Wind farm analysis
openWind [90]		AWS Turepower	Yes/No	A wind farm software that uses GIS
WindSim [93]		TUDelft	Yes/pending	A wind turbine simulation code for education
QBlade [97]		TU Berlin	Yes	A HAWT and VAWT simulation software with blade design tools

4. 풍력엔지 시스템과 이용

4-1 Wind parks

Wind parks(farm)는 풍력터빈 날개들의 그룹이 전력생산을 위해 설치된 장소이다. 어느 풍력발전시스템이나 <그림4-1>과 같이 풍력터빈, 발전기, 기계적변환기, 전력변압기 그리고 전력망(power grid)으로 구성한다.



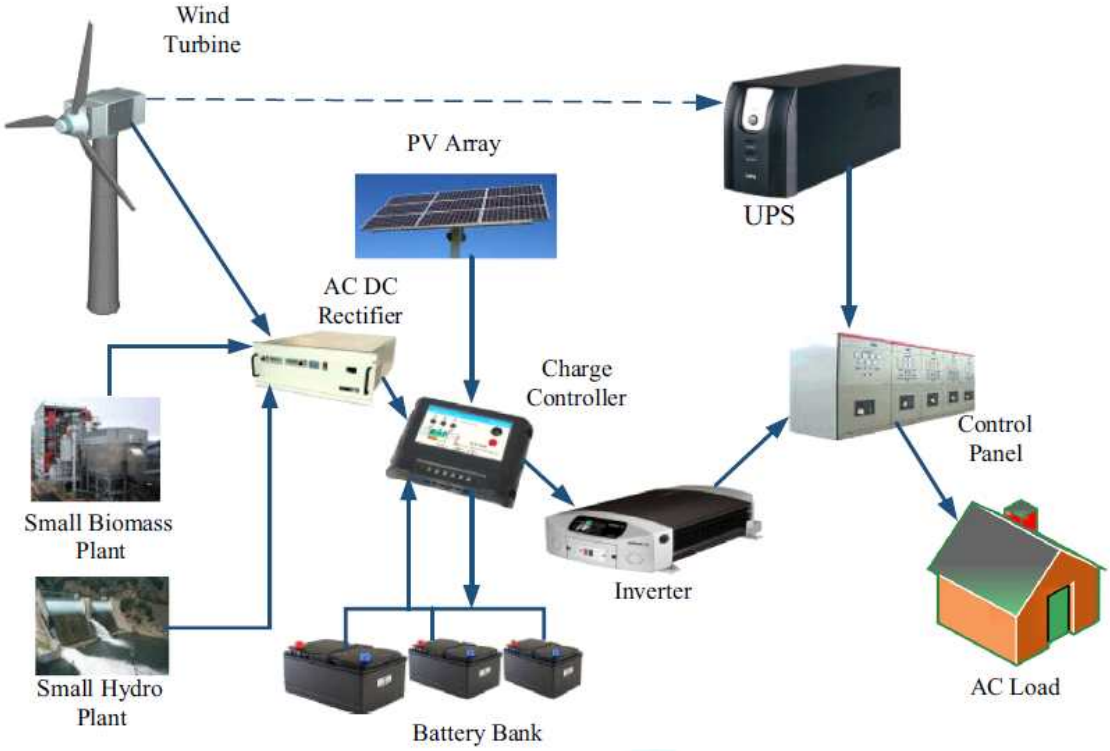
<그림4-1> 풍력발전 시스템의 대표적 구성부품[1)]

두 종류의 풍력시스템이 유용하다. ①전력망에 연결된 시스템(Grid connected system): 이 시스템은 보통 아주 큰 규모이고, 풍력발전 시스템의 여러 가지 출력 때문에, 전력망과 통합은 전압, 주파수, 전력의 질, 조화 그리고 플뤼커(flicker) 등의 기술적인 문제를 야기할 수 있다. 최근에 세계적으로 큰 wind park가 <표4-1>과 같이 성공적으로 가동하고 있다.

<표4-1> 세계 풍력발전 프로젝트[1)]

Project	Capacity in MW	Country
Alta Wind Energy Center [128]	1548	United States
Jaisalmer Wind Park [129]	1064	India
Shepherds Flat Wind Farm [130]	845	United States
London Array [131]	630	UK
Greater Gabbard Wind Farm [132]	504	UK
Anholt Offshore Wind Farm [133]	400	Denmark

②off-grid stand-alone system: 이 시스템은 가정, 학교 그리고 사무실 등에 대해 중단 없고, 비용 효과적으로 전력을 공급할 수 있는 효율적인 방법으로 풍력-광전기(photovoltaic)-수력 그리고 풍력-디젤시스템 등으로 혼성할 수 있다. 이를 <그림 4-2>에 나타낸다.



<그림4-2> 하이브리드 풍력발전 시스템 예시[1)]

5. 풍력에너지의 문제점

5-1 경제적 문제점

① 설치 용량의 고비용(MW 당): 자본비용은 모든 프로젝트 비용의 대부분을 차지하고, 터빈의 제조비용, 기초, 도로건설 그리고 풍력시스템 장소에 대한 운송 등을 포함한다.

② 투자 위험성: 투자자는 풍력에 투자가 유익한지 아닌지를 고려해야한다. 그러나 풍력발전의 시가는 점차 저하한다. 장기간에 걸쳐 모든 장려금 그리고 인센티브 등을 고려하면, 풍력발전이 투자수익률이 좋다.

5-2 기술적인 문제점

이 문제점은 전력망에 대한 큰 규모 풍력발전 시스템의 통합과 연관된다. 이들은 효율, 전력의 질, 그리고 신뢰성, 전력의 불안정, 부하관리(load management), 그리고 동력의 안전성 및 보안 등을 포함한다.

5-3 사회 및 환경적 문제점

지면에 대한 시각적인 영향, 소음공해, 레이더와 원격통신 방해, 야생동물에 대한 위험 등이 풍력터빈에 대한 제약이다.

6. 풍력터빈에서 착빙 방지 기술

6-1 풍력터빈에서 착빙 방지

북부 지역에서 풍력 터빈과 에너지 생산에서 착빙(icing)의 영향은 격심하고, 착빙 경감시스템의 개발에 대한 강조가 현저하다. 한대기후(cold climate) 수요에서 설치 용량은 2012년 말에 69GW 그리고 2017년에 50GW로 예측된다. 착빙의 결과는 이들 지역에서 자주 발생하여 통렬한 영향을 미칠 수 있다. 한대지역에서 풍력에너지는 여러 가지 직접 혹은 간접적 착빙 영향으로 증가된 부하 및 진동 그리고 소음 수준 등으로 짧은 부품 생명주기의 위협을 받을 수 있다. <그림 6-1>에 육중한 풍력터빈의 사진을 나타낸다.

<그림 6-1> 풍력터빈의 착빙[12)]

6-2 IEA의 분류

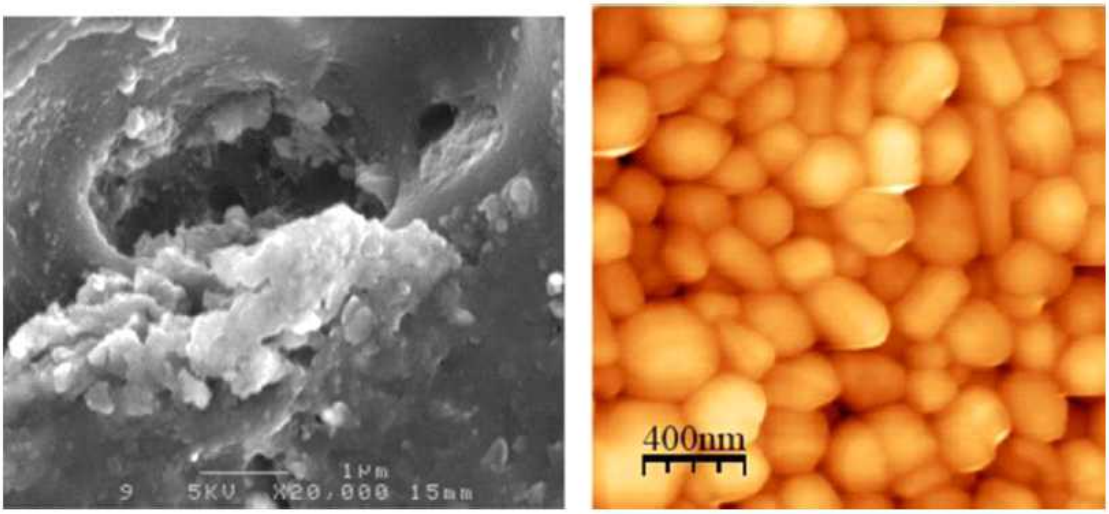
<표6-1>에 착빙 결과에 대한 IEA(International Energy Agency) 분류를 제시한다.

<표6-1> 착빙에 관한 IEA 분류[12)]

IEA Ice class	Meteorological icing (% of year)	Instrumental icing (% of year)	Production loss (% of annual production)
5	> 10	> 20	> 20
4	5–10	10–30	10–25
3	3–5	6–15	3–12
2	0.5–3	1–9	0.5–5
1	0–0.5	< 1.5	0–0.5

6-2-1 수동시스템

이 시스템은 부가적인 에너지원이 없이, 축척된 얼음을 막는데 사용된다. 얼음의 표면 부착강도를 저하시키는 몇 가지 방법이 있다. 가장 일반적인 방법은 표면에 얼음이 들러붙지 않는 코팅제(icephobic)를 설치하는 것이다. 이 방법에 대한 금속으로서는 PDMS(Poly dimethylsiloxane), PTFE(Polytetrafluor-ethylene)와 Wearlon이 있다. <그림6-2>에 Polytetrafluor ethylene를 나타낸다.



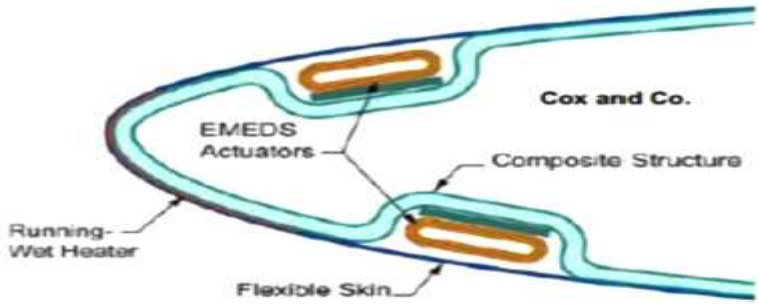
<그림6-2> 날개표면의 SEM 이미지(Virgin blade surface, left); 날개표면에 코팅된 PTFE의 AFM이미지[12)]

1)화학적 방법 : 코팅은 착빙 점을 저하시키기 위해 화학물질을 병행하여 사용한다. 이들 재료는 용융점과 결빙점사이에서 열적 히스테리시스를 형성하고, 생화학적 물질을 사용하여 달성한다.

2)기계적인 방법 : 이 방법은 깎는 도구를 사용하거나 구조물의 운동 그리고 진동에 의해 얼음을 물리적으로 부순다. 다른 기계적인 방법으로 제빙(de-icing) 그리고 방빙(anti-icing) 방법이 있다.

①pneumatic 기술 : 공기방법(pneumatic method)은 보통 소형 항공기 날개의 전연부(leading edge)를 방빙(de-icing)하기 위해 사용되고, 압축된 공기 펄스를 사용하거나 공기를 빼낸다.

②Expulsive 기술 : 이 방법은 얼음을 제거하기 위해 전자석 혹은 압전펄스(piezoelectric pulse)를 사용하고, 금속판 내부표면 근처에 나선형 코일을 설치하여 사용하고 <그림 6-3>에 나타낸다. 이때 코일에 전류를 가하면 자장이 형성되어 금속을 변형시켜 얼음을 제거시킨다.



<그림 6-3> 착빙 제거, 출처: 8th Polar Technology Conference[12)]

③Ultrasonic de-icing : 이 기술은 두 표면사이에 밀착된 얼음을 제거하는 방법으로 광범위하게 이용되고, 두 금속의 접착부에 초음파를 사용하여 응력을 형성한다. 이 기술은 적은 비용으로 순간적으로 방빙(de-icing)시킨다.

3)열적 방법

①뜨거운 공기 주입 : 가장 일반적인 항공기의 착빙방지 기술 중의 하나는 착빙 영역의 인접한 표면으로 따뜻한 공기를 닥트로 보내는 방법이다. 이 기술은 Fig.10과 같이 2009년에 Enercon에 의해서 풍력터빈에 이용되다.

②저항 히터(resistive heater) : 날개 외부의 표면에 접합시키고, 배치성능은 히터의 열적 저항과 기계적 성질에 연관된다. ⓐ내부 수지(resin) : 현존 풍력터빈 날개에는 적용할 수 없다. ⓑ외부 수지 : 이 방법은 뜨거운 공기 시스템보다 더욱 효과적이고,

③극초단파 가열 : 이는 극초단파 전자기 에너지를 작은 방울에 전달하여 과냉각된 물방울을 가열하는 방법이다. 극초단파 주파수는 액상의 물의 흡수 성질에 따라 선택한다.

④자외선 가열 : 이 기술은 전력 원으로 부터 먼 목적물에 에너지를 공급하여 사용한다. 이 방법의 주 이점은 에너지가 공기를 통하여 공기를 통하여 전달되고, 풍력터빈 날개 위에 어떤 설치물이 없다.

4) 최적화

①기술의 결합 : 다른 기술들의 결합으로부터 얻은 공동상승은 보다 좋은 성능을 얻을 수 있다. Missan은 검은 페인트와 함께 '아이스포빅 코팅(Icephobic Coation)을 결합하였다. 아이스포빅 코팅은 풍력터빈 날개의 착빙을 방지하는 대는 비효과적이라고 알려져 있다. 그러나 검은 페인트는 착빙이 빈번하지 않은 장소에서 명확하게 성능에 영향을 미쳤고, 온도 변화가 0° 이상 혹은 높은 태양열 강도에서 추종되었

다.

더욱 최근에 hydrophobic coating이 electrothermal resistive heater 시스템과 결합하여 사용되었다. 동결방지 모드에서 hydrophobic coating은 에너지 소비를 7%까지 줄었다. 반면에 superhydrophobic coating은 50%까지 줄었다.

7. 풍력 터빈용 기어박스의 윤활유 테스트 기술

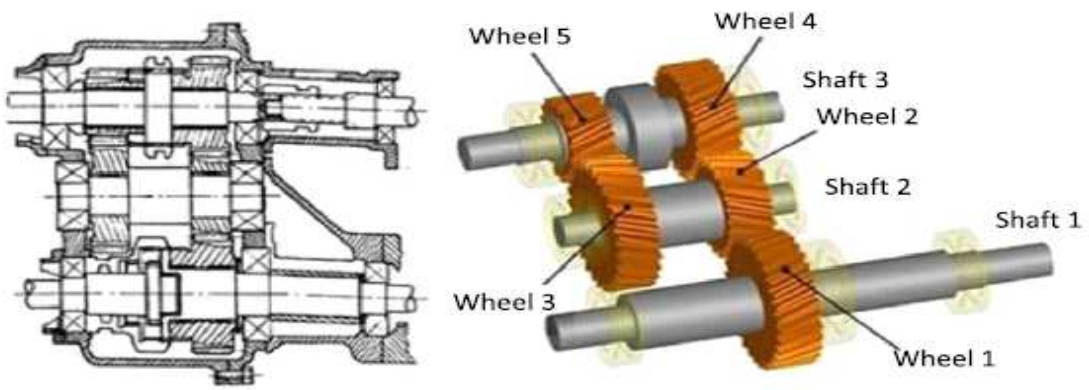
7-1 기어박스용 윤활유

공식화된 네 개의 풍력터빈용 기어오일은, 광물성오일(MINR), PAMA이 약 40%와 혼합된 광물성오일(MINE), Polyalkylene Glycol(PAGD)과 Poly-α-olefin(PAOR)을 선택하였다. 이들 기어오일의 기본 물리적 성질은 점도와 밀도로 결정되고, <표7-1>에 나타낸다. 동점성 계수는 ASTM 35N에 의해 Engler viscometer를 사용하여 40, 70, 100℃에서 계측하였다.

<표7-1> 선택된 풍력터빈용 기어오일의 물리적 특성[13)]

Parameter	Unit	MINR	PAOR	MINE	PAGD
Base oil	-	Mineral	Poly-α-olefin	Mineral+PAMA	Polyalkylene Glycol
Density at 15 °C	g/cm^3	0.902	0.859	0.893	1.059
Thermal expansion coefficient ($\alpha_t \times 10^{-4}$)	-	−5.8	−5.6	−6.7	−7.1
Viscosity at 40 °C	cSt	319.25	324.38	328.59	290.26
Viscosity at 70 °C	cSt	65.87	87.92	92.72	102.33
Viscosity at 100 °C	cSt	22.41	35.27	37.88	51.06
VI	-	85	155	166	241

<그림7-1>에 기어박스의 사진과 단면도를 나타낸다. 이 기어박스는 세 개의 축을 가지고, 5개의 기어가 장착되어있다. <표7-2>에 기어박스의 기어의 기하학적 변수들을 제시한다.



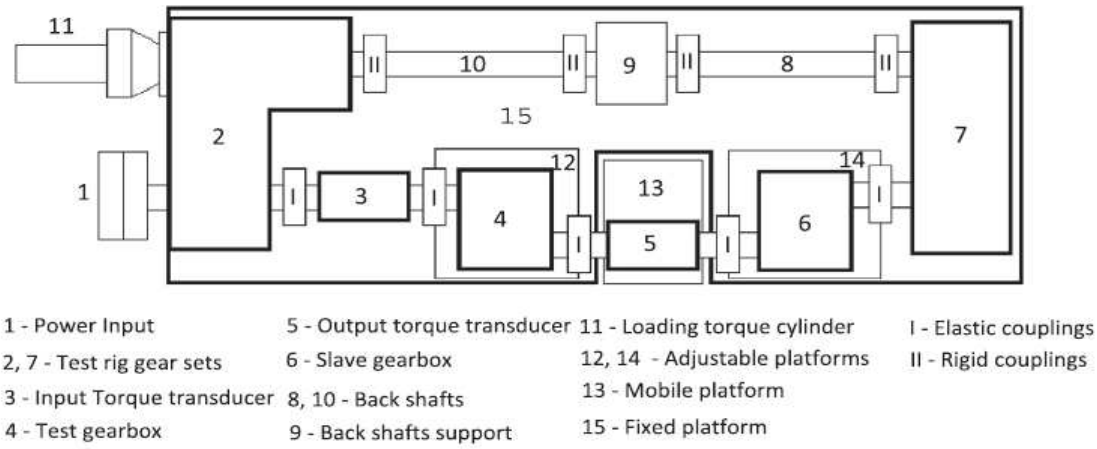
<그림 7-1> 테스트 기어박스[13)]

<표 7-2> 테스트 기어박스에서 기어의 기하학적 변수들[13)]

Parameter	Units	Gear				
		1	2	4	3	5
Modulus (m)	mm	3.5	3.5	3.5	4	4
Pressure angle (α)	°	20	20	20	20	20
Helix angle (β)	°	20	20	20	20	20
Number of teeth (z)	–	32	23	27	28	17
Addendum modification (x)	–	0.381	0.415	0.161	– 0.240	0.051
Tip diameter (d_a)	mm	128.6	95.3	108.4	125.2	80.7
Face width (b)	mm	35	35	35	33.5	35
Arithmetic mean roughness value (Ra)	μm	0.4				
Gear ratio ($u = z_2/z_1$)	–	0.7188			0.6071	

7-2 기어박스의 윤활유 실험

기어박스 테스트 장치를 <그림 7-2>에 나타낸다. 이 기어박스 테스트 장치는 입력 회전수 범위가 100-1900rpm이고, 입력토크는 100-1300Nm이다.



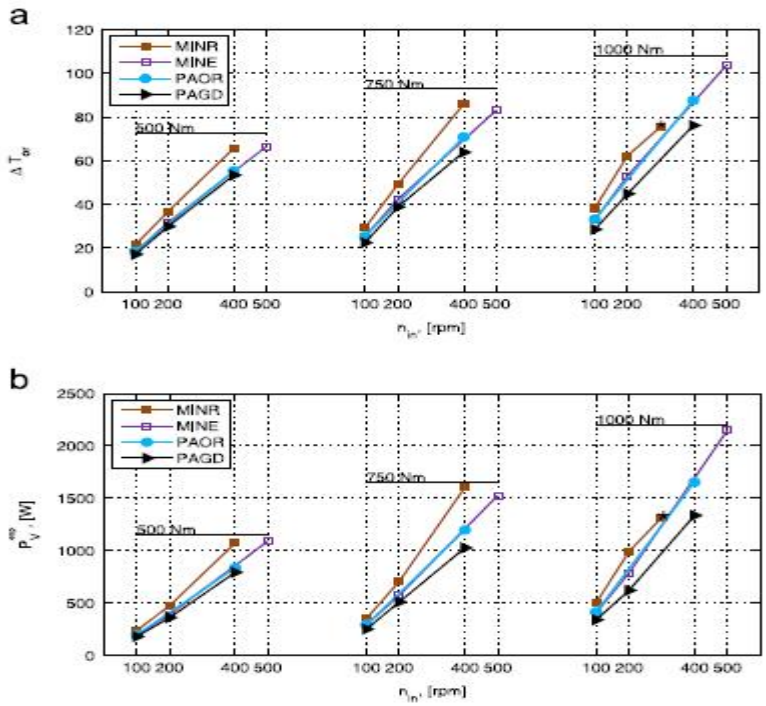
<그림 7-2> 기어박스 테스트 장치의 설계도[13)]

이 기어박스 테스트 장치는 입력/출력 토크, 속도, 실내온도, 윤활유 집수장치의 온도, 그리고 테스터기와 기어박스의 제어장치의 틀(housing)의 외부 벽 온도를 관찰할 수 있다.

7-3 실험 결과

7-3-1 열적 평형 온도

열적안정 온도는 연속적으로 계측하였고 기록되었다. <그림7-3> (a)는 윤활유 집수장치의 안정화 온도, (b)는 실험 결과로부터 동력손실을 나타낸다.

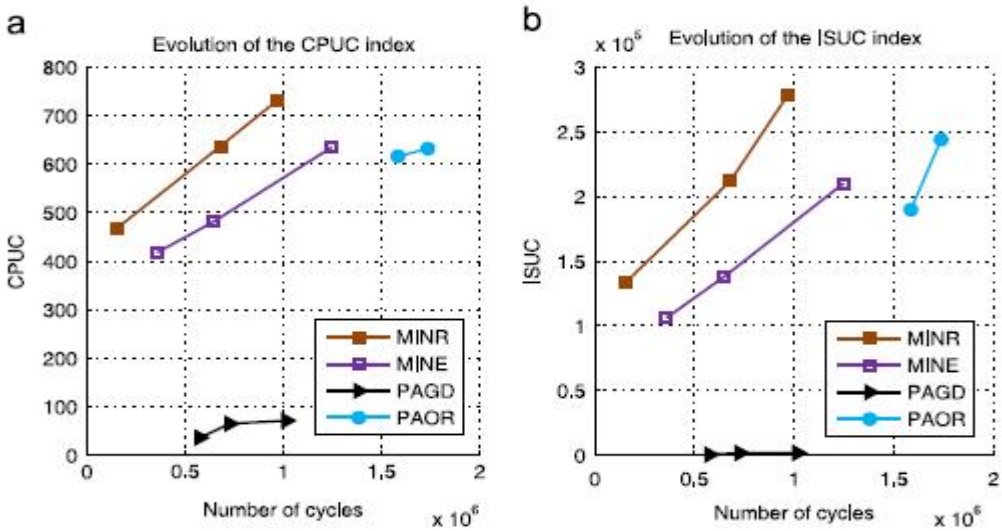


<그림7-3> 안정화된 운전온도와 실험적 동력손실 결과:(a) ⊿Tor -안정화된 운전온도, (b)Pexp V-계측된 동력 손실, 400rpm/1000Nm 대신 n-300rpm/800Nm[13)]

이 <그림7-3>에서 PAGD(Polyalkylene Glycol)가 낮은 안정오도와 낮은 동력손실을 향상 시켰고, MINR은 가장 나쁜 결과를 보였다.

7-3-2 마모지수(CPUC, ISUC)

<그림7-4>에서 PAGD와 다른 풍력터빈 기어오일 사이의 현저한 차이를 나타낸다. 이 결과에서, PAOR는 다른 어느 기어오일 보다 더 많은 사이클을 거쳤다.



<그림7-4> 사이클 수에 따른 마모지수의 평가 :(a)CPUC, (b)ISUC.[13)]

7-3 동력손실 모델

이 동력 손실모델에서 기어, 구동베어링, 그리고 밀봉 손실을 고려하였고, 식(1)로 나타낸다.

$$Pv = \sum Pvzo + \sum Pvp + \sum Pvlp + \sum Pvd \qquad (1)$$

이 식에서, z, l, d는 기어, 구동베어링 그리고 밀봉을 나타낸다. O와 P는 무부하 손실과 부하손실이다.

7-3-1 기어마찰 동력 손실

기어의 마찰 동력손실은 전달동력(P_{in}), 기어의 평균마찰계수(μ), 그리고 기어 손실인자(H_V)에 의존되고, 식(2)로 제시된다.

$$P_{VZP} = P_{in} \cdot \mu \cdot H_V \qquad (2)$$

7-3-2 구동베어링 동력 손실

이 손실계산은 SKF 모델을 이용하였고, 다음식(3)으로 나타낸다.

$$M = Mrr + Msl + Mdrag + Mseal \qquad (3)$$

이식에서 Mrr은 구동마찰 토크, Msl은 미끄럼마찰 토크, Mseal은 밀봉장치의 마찰 토크, Mdrag는 드래그 손실(drag loss)이다.

7-3-3 밀봉 동력손실

이 손실은 아래 식(4)와 같이 Freudenberg 식을 사용하였다.

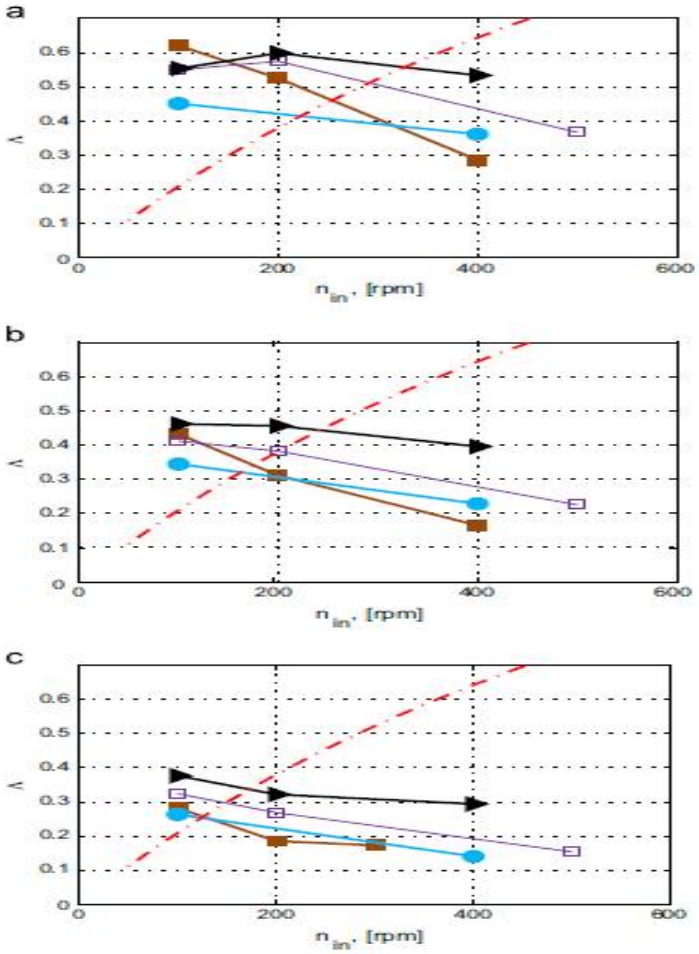
$$PVD = 7.69 \times 10^{-6} \cdot d_{sh}^2 \cdot n \qquad (4)$$

이 식에서 d_{sh}는 축 직경(mm), n은 기어수이다.

8. 수치해석 결과

8-1 마찰계수와 비 유막(specific film)

비 유말(specific film) 두께는 <그림7-5>와 같이 Λ=0.15-0.65로 경계막윤활을 나타내었다.



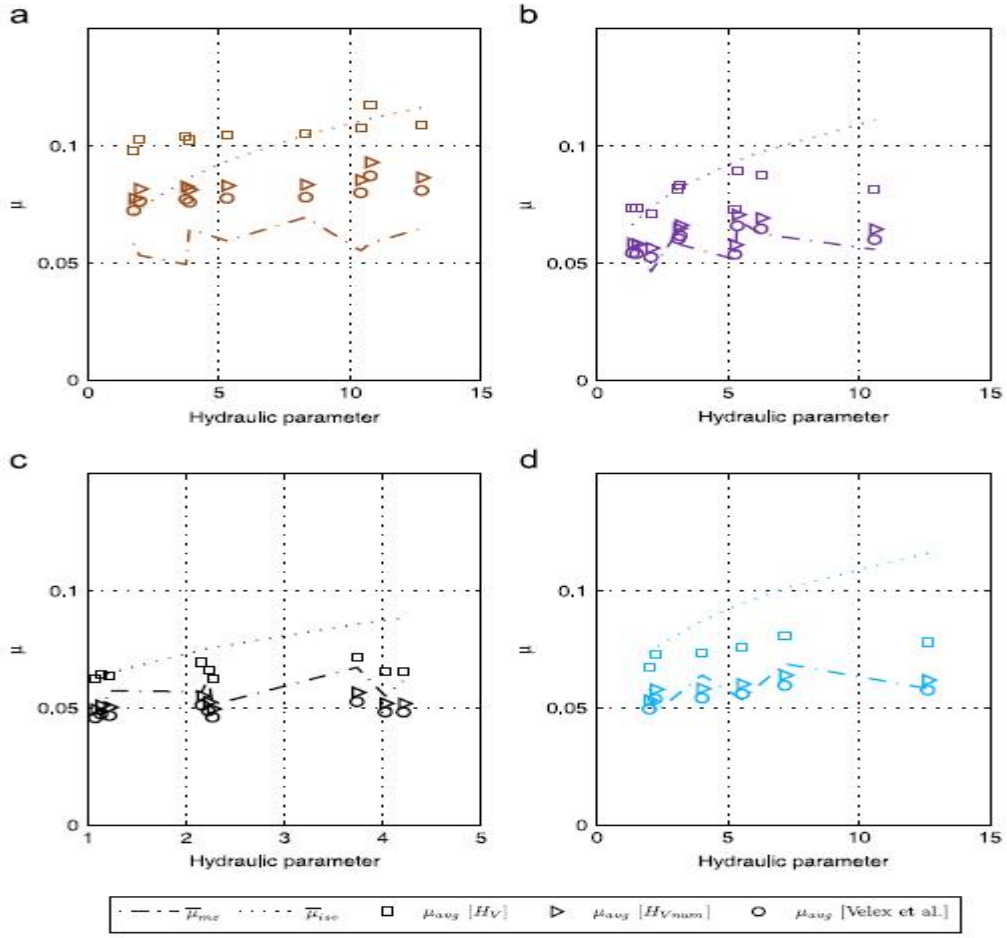
<그림 7-5> 다른 운전 조건에서 비 유막 두께 :(a)500Nm, (b) 750Nm,(c)1000Nm[13)]

8-2 평균마찰계수

각 기어오일에 대한 식(2)에서 평균 마찰계수값(μ_{avg})은 다른 수식을 이용한 것보다 높았다.이를 <표 8-1>과 <그림8-1>에 나타낸다.

<표8-1> 기어오일의 평균 μ_{avg}

Method	MINR	MINE	PAOR	PAGD
μ_{avg} (H_V)	0.1057	0.0793	0.0746	0.0655
μ_{avg} (H_{Vnum})	0.0837	0.0628	0.0591	0.0519
μ_{avg} (Velex et al.)	0.0784	0.0585	0.0550	0.0482



<그림8-1> 테스트된 기어오일의 마찰계수 : (a) MINR, (b)MINE, (c)PAGD, (d)PAOR[13]

9. 결론

증가하는 에너지 수요와 환경을 파괴하지 않고 이용할 수 있는 재생에너지의 연구는 촉진되어야한다. 풍력은 깨끗하고, 자연적이고, 그리고 높은 지구온난화지수(global warming potential)를 가진 풍부한 재생 에너지원이다.

해상풍력원은 육상 풍력과 비교하여 더욱 유망하고, 열효율과 출력에서 화석연료를 사용하는 발전소와 경쟁할 수 있다. 그러나 이들 잠재력의 실현은 향상된 설치

기술과 대규모의 광범위한 송전회로망의 완성이 요구된다.

풍력에너지와 PHEVs와 PEVs와 같은 스마트 그리드(smart grid)를 갖춘 여러 가지 재생에너지와의 결합은 전력출력을 증가시킬 수 있을 것이다.

풍력터빈의 코팅은 지탱하기가 쉽고, 번개 보호 장치가 요구되지 않는다. 그러나 착빙(icing)을 단독으로 방지할 수 없고, 가열시스템과 결합해야한다. 화학약품은 타당하나, 그들의 효과는 시간과 설계시스템에 제한된다.

외부 저항히트는 날개의 전 연부(leading edge)에 혹은 때로는 후연부(trailing edge)에 설치한다. 이 설계는 에너지 소비를 고려하지 않은 경우, 방빙(icing)에 효과적이지만, 제빙(de-icing)은 효과가 적다.

설계자는 공정을 향상시키기 위해, active pitch(수지), 검은 페인트, 혹은 햇빛에 날개 위치 등과 같은 다른 기술과 결합해야한다.

기어박스 오일의 테스트에서 Polyalkylene Glycol(PAGD)가 다른 어느 광물성 기어오일 보다 약 30%의 낮은 동력손실을 나타내었고, 운전 온도뿐만 아니라 낮은 마모지수도 향상되었다.

<참고문헌>

1. Wind energy:Trends and enabling technologies, Yogesh Kumar a,n, Jordan Ringenberg a, Soma Shekara Depuru a, VijayK. Devabhaktuni a, Jin WooLee b, Efstratios Nikolaidis b, Brett Andersen b, Abdollah Afjeh b, Renewable and Sustainable Energy Reviews 53(2016) 209 - 224
2. 신회성, 태양에너지 담수화장치의 풍력발전이용, 알제리의 경우, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2009
3. 신회성, 태양광발전과 풍력발전을 새우양식장에 활용, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2016
4. 김영철, 태양광발전과 풍력발전개발을 통한 화력발전소의 냉각수 소비량 감소, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2014
5. 김평수, 최근풍력에너지 기술 발달과 경향, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2013
6. 조홍곤, 풍력발전의 착빙 영향과 대책, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2012
7. 박장선, 유럽의 풍력발전용 롤러베어링 기술 동향, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2012
8. 신회성, 풍력발전시스템의 에너지 및 신뢰도 분석, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2011
9. 김호근, 풍력에너지 전환 장치, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2011
10. 김영식, 풍력발전 구조물용 용접재료와 용접법, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석물, 2010
11. 조홍곤, 풍력발전에 대한 수소저장과 축전지 수명주기 CO_2 배출분석, 한국과학기술정보연구연 RESEAT 분석, 2010
12. Olofemi Fakorede, Zoe Feger, Hussen Ibrahim, Adrian IIrian, Jean Perron, Christian Masson, "Ice protection systems for wind turbines in cold climate : characteristics, comparisons and analysis", Renewable and Sustainable Energy Reviews65(2016)662 - 675
13. Pedro M.T.Marque, CarlosM.C.G. Fernandes, Ramiro C.Martins a, Jorge H.O. Seabra, Efficiency of a gear box lubricated with wind turbine gear oils, Tribology Internationa l71(2014)7–16

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.