

풍력발전 기술과 세라믹소재

글 _ 김세영, 한인섭, 우상국
한국에너지기술연구원

1. 서론

최근 전 세계적으로 에너지 고갈 및 지구환경 문제가 매우 심각한 당면과제로 나타나고 있다. 이에 따라 세계 각국들은 친환경적인 그린에너지 기술개발을 통하여 탄소의존형 경제 패러다임에서 벗어나고 더불어 향후 시장 선점을 위해 국가별로 전략적 대응을 강구하고 있다. 이러한 대응 전략들 중 미국의 경우, 화석연료 사용을 줄이기 위해 대체에너지 및 에너지 절약형 자동차 등의 개발에 투자하는 그린 뉴딜정책을 추진하고 있으며 EU는 신재생 에너지법을 기반으로 녹색산업경쟁력 강화를 위한 지원을 강화하고 있다. 또한 일본의 경우, 2050년까지 온실가스를 50% 감축하기 위하여 고효율 저비용 태양발전 기술 및 수소연료화 기술 등의 혁신기술개발에 관련된 구체적 실행전략을 포함한 Cool Earth 50 프로그램을 추진하고 있다.

이러한 세계적인 추세에서 우리나라 역시 신재생 에너지 기술개발에 집중하고 있으며, 특히 총 에너지의 97% 이상을 수입에 의존하고 있는 우리나라는 다른 나라보다 신속하게 기술력을 선점하는 것이 매우 중요하다. 우리나라는 세계 10위의 에너지 다소비국가로 에너지소비 증가율은 여전히 최상위에 속하고 있는 반면, 소요에너지의 전량을 수입에 의존하고 있는 실정으로 에너지의 안정적 확보, 에너지 저소비형 경제·사회구축, 기후변화협약의 효율적 대응 등 국가적인 과제를 안고 있다.

따라서 우리나라의 경우에도 환경/자원 위기에 대응하기 위하여 저탄소 녹색성장 전략이 필요하게 되었으며, 정부에서는 2009년부터 녹색성장 5개년 계획을 추진하고

있다. 이러한 저탄소 녹색성장 전략의 중심에는 신재생 에너지 산업이 자리 잡고 있다. 최근 정부가 확정 발표한 “2030 신재생에너지 보급기본계획”에 따르면 2030년까지 총 에너지 소비의 11%를 신재생에너지로 대체한다는 목표를 제시하였으며, 이에 따른 CO₂ 저감 예상량은 약 8천 1백만톤으로 국내 CO₂ 배출 저감에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 이러한 재생에너지 보급에 의한 CO₂ 저감량 중 바이오에너지에 의한 CO₂ 저감 기여율은 약 45%로 가장 큰 비중을 차지할 것으로 예상된다.

신·재생에너지는 화석연료를 변환·이용하는 신에너지나 햇빛·물·지열·강수·생물유기체 등 자연의 재생가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 재생에너지로 「신에너지 및 재생에너지개발·이용·보급촉진법」 제2조에 의거 11개 분야로 구분한다. 신에너지는 연료전지, 석탄 액화가스화 및 중질 잔사유 가스화, 수소에너지 등 3개 분야이고, 재생에너지는 태양광, 태양열, 바이오, 풍력, 수력, 해양, 폐기물, 지열 등 8개 분야이다. 이러한 신재생에너지 관련 기술은 정부의 주도 하에 저탄소 녹색성장을 이루기 위한 가장 중요한 동력원으로 추진되고 있는 기술이다. 특히 정부는 2008년 현재 2%에 불과한 신재생에너지 사용 비율을 2030년에는 11%, 2050에는 20% 이상 사용하는 것을 목표로 하고 있다.

현재 신재생에너지 투자의 45%, 전기생산량의 70% 이상을 차지하고 있는 풍력 발전은 신에너지 및 재생에너지 개발에서 가장 핵심적인 요소이며, 본고에서는 풍력발전의 기술개요, 시장 및 기술동향과 이에 관련된 세라믹 소재에 대해 간단히 기술하였다.

2. 본 론

2.1. 풍력발전 기술

2.1.1. 풍력발전 기술의 개요

현재 전 세계 전력생산의 2%를 차지하고 있는 풍력발전은 공기흐름 에너지를 전기와 같은 사용가능한 에너지의 형태로 변화시켜 주는 변환기의 역할을 하게 되는 장치를 일컫는다. 풍력발전기는 로터의 회전축을 기준으로 수평형과 수직형 두 가지로 나눌 수 있다. 현재 가장 많이 사용되는 형태는 수평축이며, 수직축 풍력발전기의 경우 설치가 쉽고 바람의 영향을 받지 않는 장점이 있으나, 초기 구동 시 외부 에너지가 필요하고, 응력에 대한 안정성이 낮기 때문에 크게 상용화 되지 못하였다. 수평축과 수직축 풍력발전기의 형태는 Fig. 1에 나타내었다. 독일의 물리학자인 A. Betz's Law에 의하면 형태에 관계없이 풍력 발전기의 터빈 단면에 흐르는 에너지에서 최대 59%만이 전력으로 변환 가능함이 밝혀졌다.

수평형 풍력발전기는 발전기를 탑재하는 부분인 Nacelle 내의 기어 타입에 의해 세 가지로 분류되는데, Geared type, Direct-drive, Hybrid type으로 구분된다. 이는 블레이드와 발전기 사이에 기어박스의 유무에 따른

분류이며, 세계적으로 Geared-type이 약 89% 정도 생산되며, Direct-drive가 10% 정도 생산되고 있다. 이러한 기어에 의한 분류를 Fig. 2에 나타내었다.

2.1.2. 시장 및 연구개발 동향

저탄소 에너지발전 설비 중 가장 대표적인 풍력발전은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 2009년 현재 미국, 중국의 시장 확대에 따른 유럽 중심의 세계 풍력시장 구도가 변화되고 있다. 중국의 경우, 풍력발전 내수 시장을 기반으로 Sinovel, Goldwind 등 자국 풍력발전 설비기업의 시장점유율을 확대해 나가고 있으며, 미국의 경우 풍력발전 내수시장 확대에 따른 GE-wind의 시장 점유율이 점차 증



Fig. 1. 수평축 및 수직축 풍력 발전기.

Geared type WT Global market shear 89%	Direct-drive WT Global market shear 10%	Hybrid(Multibrid™) type WT
<p>로터 저속 고투크 → 기어 박스 고속 저토크 → 유도 발전기 → 전력 변환기 → 계통 연계</p>	<p>로터 저속 고투크 → 다극형 동기 발전기 → 전력 변환기 → 계통 연계</p>	<p>로터 저속 고투크 → 1단 기어 박스 → 저속 영구 자석 발전기 → 전력 변환기 → 계통 연계</p>

Fig. 2. 수평 및 수직축 풍력 발전기.

가하고 있는 추세이다. 하지만, 유럽은 경기침체의 영향으로 Vestas, Enercon, Gamesa 등의 유럽 기반의 풍력발전 설비기업의 시장 점유율이 하락하고 있는 시점이다. 이러한 세계 풍력발전 시장 상황에서 연평균 약 27%의 높은 성장률을 유지하고 있다. 이는 향후에도 연평균 10% 이상의 성장이 가능함을 나타내며, 최근 육상풍력 자원의 한계 극복 및 풍력발전 시스템 대형화에 따른 경제성 향상을 위해 해상풍력 보급이 점유율 전체 대비 20% 이상 성장하고 있다.

이러한 풍력발전의 경제성 확보를 위해서 그 효율을 높이는 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 이는 아래의 (식 1)에서와 같이 풍력발전 시스템의 회전 면적을 증가시키는 방향으로 집중되고 있다. 또한 이외에도 풍력발전 시스템의 효율 증대 및 유지보수 비용을 최소화하여 효율을 증가시키는 연구개발 역시 활발히 진행되고 있다.

유럽의 경우, 풍력발전기의 대형화 관련기술 그리고 계통연계 및 운영기술을 중심으로 EC 연구개발 자금의 집중적인 지원이 이루어지고 있으며, Vestas (덴마크)의 경우 연간 1,500억원 이상을 연구개발에 투자하고 있다. 우리나라의 경우에도 2008년 1차 국가에너지기본계획에 따라 2030년까지 신재생에너지를 총 발전량의 약 26%

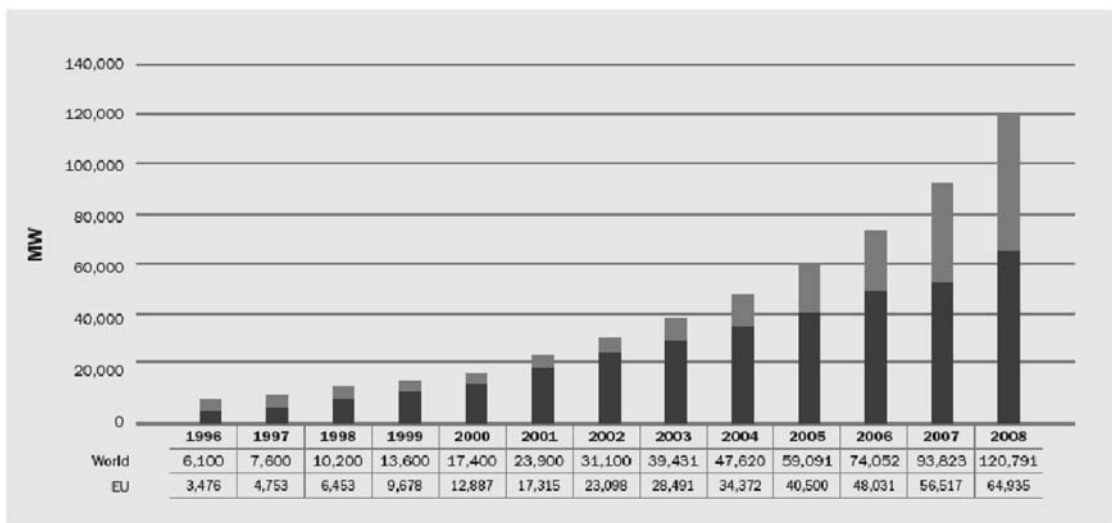
로 목표를 설정하고 있다. 정부는 이러한 신재생에너지 목표 달성을 위해 2012년 전력생산량의 3% (1.5GW/year), 2020년까지 전력 생산량의 10% (5.5GW/year)를 생산할 예정으로 있으며, 현재 가장 경제성이 있는 에너지원은 풍력발전으로 판단되고 있다. 또한 최근 풍력발전 설비에 대한 투자와 연구개발을 활발히 진행하고 있는 국내 기업으로는 효성, 유니슨, 한진, 두산, 현대로템, 삼성중공업 그리고 현대중공업 등에서 750 kW부터 3 MW의 대용량 풍력 발전기까지 제작 및 연구개발이 이루어지고 있다.

세라믹 소재는 이러한 풍력발전 시스템의 연구개발의 여러 분야에 중추적인 역할을 하고 있으며, 고효율의 시스템을 위해 적용되고 있다. 본 장에서는 풍력발전 시스템에 적용되는 세라믹 소재에 대한 소개를 간략히 하고자 한다.

$$Power\ in\ the\ wind = 1/2\rho AV^3$$

(ρ : air density, A : Area of the circle swept by rotor, V : wind velocity) (식 1)

2.2. 풍력발전 시스템에서의 세라믹 소재



Source: GWEC/EWEA

Fig. 3. 세계 풍력시장 발전 추이.

2.2.1. 풍력발전 시스템의 대형화에 따른 세라믹 소재

풍력발전시스템 개발의 가장 핵심적 기술분야는 블레이드이다. 개발하고자 하는 풍력발전기의 용량 및 운전 풍속 등 기본설계가 이루어지면 다음 단계로써 블레이드의 개발이 이루어지게 되며, 이후 증속기 및 발전기 등의 시스템 통합을 위한 제어시스템 개발이 이루어지게 된다. 이러한 이유로 세계 각국의 주요 풍력발전 시스템 개발 업체 및 연구기관은 고유의 블레이드 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있으며, 이를 통해 풍력발전기의 대형화 및 고효율화가 이루어지고 있다. 그러나 우리나라는 독자적인 블레이드 개발 경험이 없음으로 인해 풍력발전 산업의 활성화에 많은 장애 요인이 되고 있었다.

풍력발전기 블레이드는 섬유강화 플라스틱 (FRP, fiber reinforced plastic)으로 제작되며, 사용되는 섬유는 주로 세라믹 계열 (glass or carbon)의 섬유가 사용되고 있다. 현재까지는 주로 유리섬유를 강화한 GFRP (Glass FRP)가 사용되고 있으나, 최근 풍력발전 시스템의 효율향상을 위해 날개의 회전반경이 매년 30%씩 증가하여 현재 약 120m에 이르고, 무게에 따른 효율 감소와 설치비용이 크게 늘어나게 되면서 유리섬유를 대체하는 탄소섬유의 사용이 점차 늘어나고 있으며, 이에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

탄소섬유는 유리섬유에 비해 비강도가 우수하여 대형 블레이드 제작의 경우 블레이드의 강성은 유지함과 동시에 그 무게를 유리섬유에 비해 줄일 수 있어 풍력발전 시스템 효율 증가에 큰 역할을 하게 된다. Fig. 4에 유리섬유와 탄소섬유의 기계적 성질 그래프를 나타내었다. 하지만, 탄소섬유의 경우 현재까지 가격이 유리섬유에 비해 매우 높기 때문에 이를 보완한 glass-carbon hybrid 섬유를 이용한 블레이드가 적용되고 있으며, 한국에너지기술연구원에서는 이에 대한 연구를 2006~2008년까지 3년간 수행하여 100 kW급 (약 11m) 크기의 풍력발전용 glass-carbon hybrid 블레이드를 개발 완료하였으며, 이미 2004년 독일 심해 풍력발전 프로젝트에서 5 MW급 hybrid 날개가 적용된 바 있다. LM Glasfiber사에서 개발한 탄소섬유 블레이드의 경우 61.5m/13,500kg의 무게를 보였으나, 유리섬유를 적용할 경우는 61.5m/19,950kg의

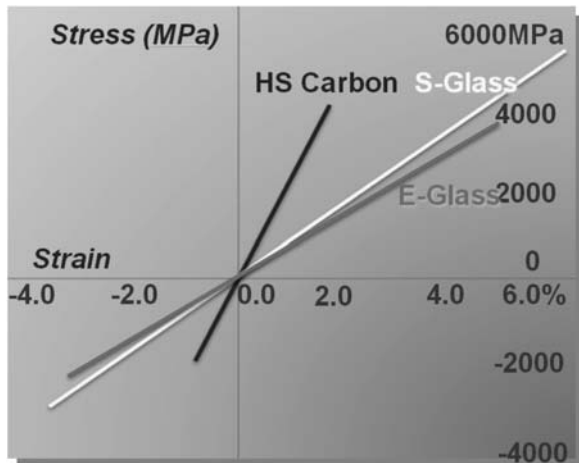


Fig. 4. 유리섬유와 탄소섬유의 기계적 성질.

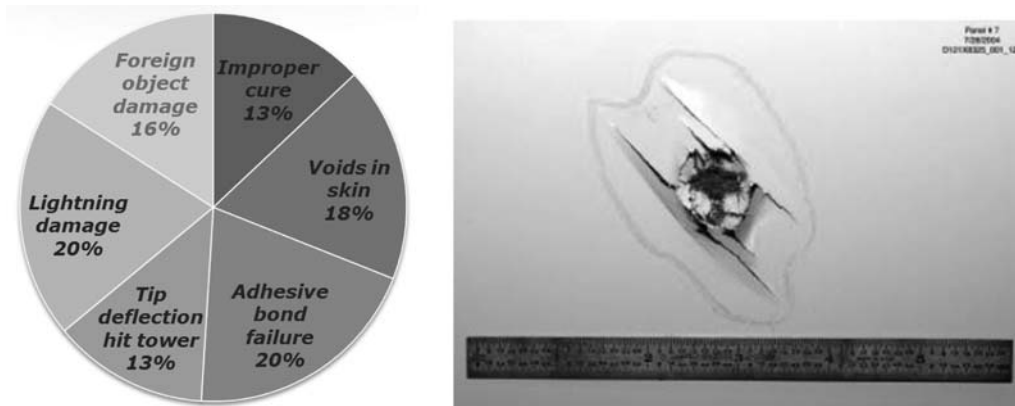


Fig. 5. 블레이드 파손의 종류와 외부 충격에 의한 파손.

무게 증가를 나타내었다.

한편, 운용 중의 풍력발전기 블레이드는 여러 원인에 의해 파손되는 현상이 발생하게 되는데 이들에 대한 비율을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 소재 내부의 결함과 번개, 타워와의 충돌 그리고 외부 물체 (조류, 우박, 눈) 등에 의해 블레이드가 파손에 이르게 된다. 특히, 외부 물체에 의한 파손이 약 16% 정도로 매우 높은 비중을 차지하고 있으며, 이는 블레이드 소재의 충격강도와 매우 밀접한 관계가 있다. 탄소섬유 강화 복합재료의 경우 충격강도가 유리섬유 복합재료에 비해 충격강도가 낮은 것으로 알려져 있으며, 하이브리드 복합재료의 경우에도 이에 대한 검증이 블레이드 적용 전에 반드시 필요하다.

Glass-carbon hybrid 복합재료의 경우 유리섬유의 함량이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났으며, 탄소섬유로만 이루어진 복합재료는 충격손상에 매우 취약한 결과를 나타내었다. Fig. 6에는 온도에 따른 glass-carbon hybrid 복합재료 종류별 Izod 충격강도 결과를 나타내었다. 결과 내의 G0는 100% carbon 섬유 강화 복합재료이며 이후 숫자의 증가는 glass 섬유분율의 증가를 의미한다. 온도에 대한 충격강도의 변화 역시 탄소섬유로만 이루어진 복합재료가 유리섬유 복합재료보다 큰 폭으로 나타났다. 소재의 노치에 대한 저항성은 유리섬유가 포함된 경우 어느 정도 높은 값을 보였으나, 탄소섬

유 복합재료는 노치에 매우 민감함을 보인다. 이러한 충격실험 결과들에 의해 100% 탄소섬유로만 이루어진 복합재료를 풍력발전기의 블레이드에 적용하게 될 경우 외부 충격에 의한 파손이 유리섬유를 적용 할 때보다 더욱 증가할 것으로 보이며, 이를 보완하기 위해서 탄소섬유 복합재료에는 반드시 일정량의 유리섬유가 하이브리드화 되는 것이 바람직하다고 판단된다.

2.2.2. 풍력발전 시스템의 효율 증가를 위한 세라믹 소재

풍력발전 시스템 내의 발전기 베어링에서 electrical pitting과 erosion은 주된 부식 파손 현상이다. 이러한 부식은 current arc를 발생시키며, 이는 금속 베어링과 이어

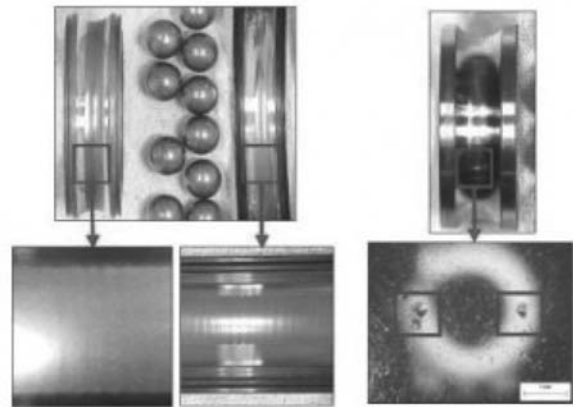


Fig. 7. 금속베어링에서 발생하는 아크에 의한 손상 예.

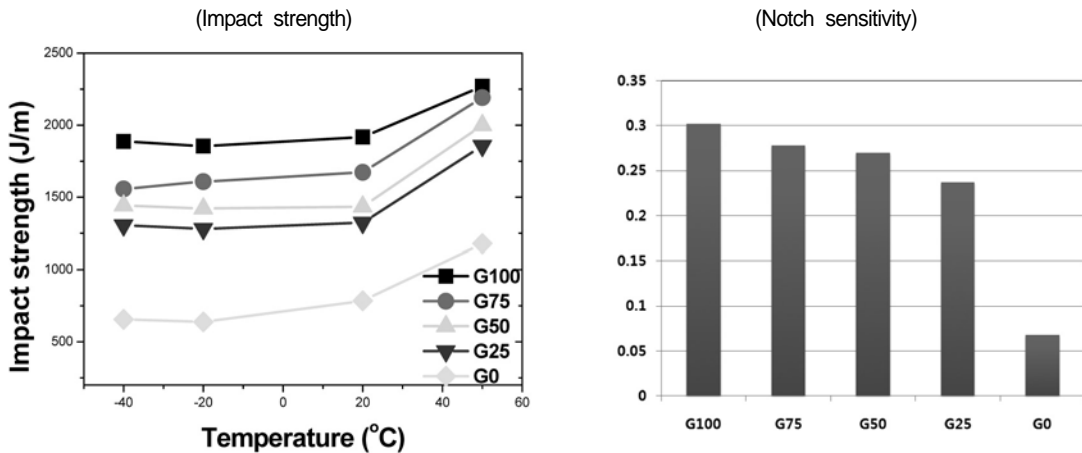


Fig. 6. Glass-carbon hybrid 복합재료의 충격강도 결과.

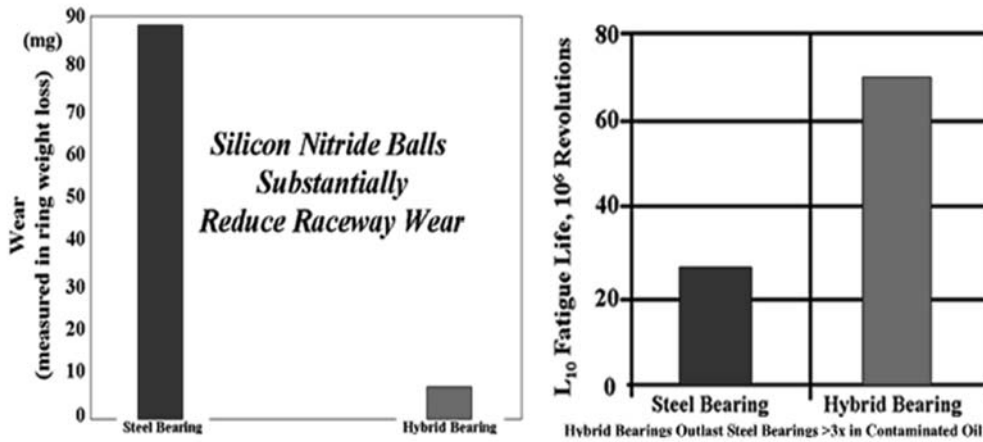


Fig. 8. Saint-Gobain사의 CERBEC (hybrid bearing) 수명 비교 실험 결과.

진 곳으로 이동하여 부식 현상을 심화시키게 된다. 이러한 부식 현상을 Fig. 7에 나타내었다. 특히, 최근 해상 풍력발전이 크게 성장함에 따라 금속 베어링의 부식 현상은 큰 문제로 떠오르게 되었다. 이를 해결하기 위해 많은 풍력시스템 업체들은 세라믹 베어링, 세라믹 하이브리드 베어링 (steel races with ceramic bearing) 또는 세라믹 코팅 베어링을 적용하기 시작했다. 세라믹 베어링은 current arc가 발생하지 않으며, 작은 입자가 존재하거나 고온의 환경에서 금속 베어링 보다 우수한 수명을 나타내며, 그 윤활 특성을 잃지 않는 장점이 있다. 또한, 낮은 열팽창과 고른 표면 조도, 높은 경도와 강성 그리고 비강도와 부식저항성에도 매우 우수함을 나타내므로 그 적용 분야가 매우 넓다. 한편 세라믹 베어링은 금속 베어링에 비해 수명이 길기 때문에 노후 베어링 교체에 따른 비용 절감에 큰 효과가 있다. 1회의 베어링 교체에는 약 \$10,000의 비용이 크레인과 인력사용에 따라 소요되기 때문이다.

현재 Saint-Gobain사에서 silicon nitride 베어링인 CERBEC을 생산하고 있으며, Fig. 8에 기존 금속 베어링과 비교한 수명예측 실험 결과를 나타내었다. 이외에도 풍황에 따라 날개의 형상을 변화 시켜주는 smart actuator의 역할을 하는 ferroelectric 소재인 piezoelectric, electrostrictive 그리고 magnetostrictive 소재들이 사용되고 있다.

3. 결론

최근 큰 증가를 보이는 해상 풍력발전 분야는 저탄소 에너지생산에 가장 부합되는 기술 분야이며, 이에 대한 발전효율 증가를 위한 많은 요소기술에 세라믹 소재가 점차 그 응용 범위를 넓혀 가고 있다.

현재 우리나라의 풍력발전 기술 수준은 해외로부터 기술자립 및 산업화 구축의 단계이며, 주요 설계 및 해석 기술을 확보하여 기반기술을 높이고 있는 수준이다. 그러나 우리나라의 풍력발전 관련 대부분의 지표가 큰 성장세를 뚜렷이 나타내고 있으며, 선진국과의 격차를 차츰 줄여나가고 있는 추세이다.

현재는 상용 풍력발전 분야에 세라믹 부품 소재가 큰 비중을 차지하고 있지는 않지만, 시장의 증가를 고려할 때 현시점에서의 기술 확보는 향후 세계 풍력발전 시스템 시장을 선점하는 계기가 될 것으로 예상된다.

감사의 글

본고는 지식경제부 소재원천기술개발 사업의 지원을 받아 작성되었음에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. T. K. Barlas, G. A. M. van Kuik, "Review of State of Art in Smart Rotor Control Research for Wind Turbines", *Progress in Aerospace Science*, **46** 1-27 (2010).
2. Karan Mason, "Carbon/glass Hybrids used in Composite Wind Turbine Rotor Blade Design", *Composites technology* (2004).
3. Paul Dvorak, "Ceramic Coated Bearing Handles Stray Current", *Windpower Engineering* (May 29, 2009).

●● 한인섭



- 1985. 명지대학교 무기재료공학과 학사
- 1987. 명지대학교 무기재료공학과 석사
- 1995. 명지대학교 무기재료공학과 박사
- 2007. 한국에너지기술연구원 융복합재료연구센터 센터장
- 현재. 한국에너지기술연구원 반응분리소재 연구센터 책임연구원

●● 김세영



- 2003. 한국항공대학교 항공재료공학과 학사
- 2005. 한국항공대학교 항공재료공학과 석사
- 2006. 하이닉스반도체 공정연구원
- 현재. 한국에너지기술연구원 반응분리소재연구센터 연구원
KAIST 신소재공학과

●● 이상국



- 1978. 연세대학교 요업공학과 학사
- 1987. 한국과학기술원 무기재료공학과 석사
- 1994. 한국과학기술원 무기재료공학과 박사
- 2004. 한국에너지기술연구원 에너지신소재 연구부 부장/센터장
- 2005. 한국에너지기술연구원 에너지재료연구센터 센터장
- 2007. 한국에너지기술연구원 융복합재료연구센터 책임연구원
- 현재. 한국에너지기술연구원 선임연구본부장