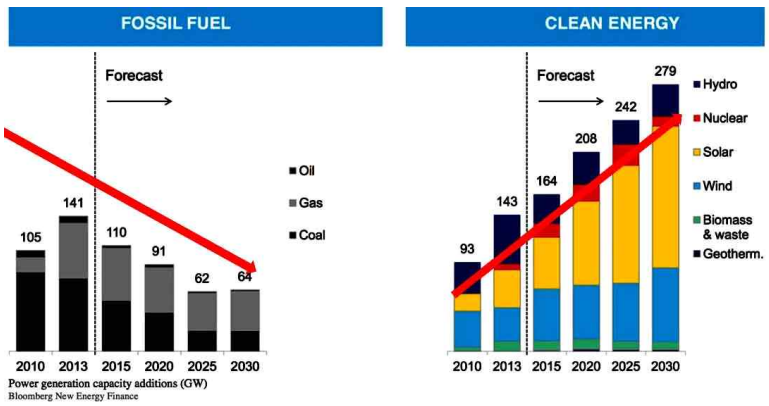
풍력발전기 유지보수 기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 백태현
(thbaek@reseat.re.kr)

1. 머리말

풍력 발전기는 바람의 운동 에너지로 날개를 회전시켜 전기에너지를 발생시키는 장치이다. 최근 저탄소 녹색성장을 위한 신재생 에너지원의 중요성이 <그림 1-1>과 같이 확대되면서 세계적으로 풍력발전기 보급도 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다.[1] 풍력발전 시스템은 전력회사와 전력구매자로부터 전력공급을 위한 신·재생 에너지원으로서 점점 더 각광받고 있으며, 풍력발전 시스템의 대형화를 통한 경제성 확보를 위해 점차 산악지역과 대규모 단지 건설이 가능한 해상 풍력시장으로 증대되고 있다.[2]



<그림 1-1> 화석연료 감소 및 신재생에너지 증가 추세[1]

그러나 풍력발전기는 바람의 급격한 변동에 민감하다는 특성과 다양한 부속 부품들의 고장으로 인한 파급효과로 운영에 있어 유지보수 비용이 증가하는 추세에 있다. 더욱이 해상이나 산악지역에 설치된 풍력발전기는 접근이 제한적이며, 고장 발생 시 부품의 교체나 수리를 위해 많은 비용이 소요된다. 이에 풍력발전기의 기계 고장으로 인한 정지를 미연에 방지하고 가동률을 향상시키기 위해 주요한 유지보수 기술인 풍력발전기 상

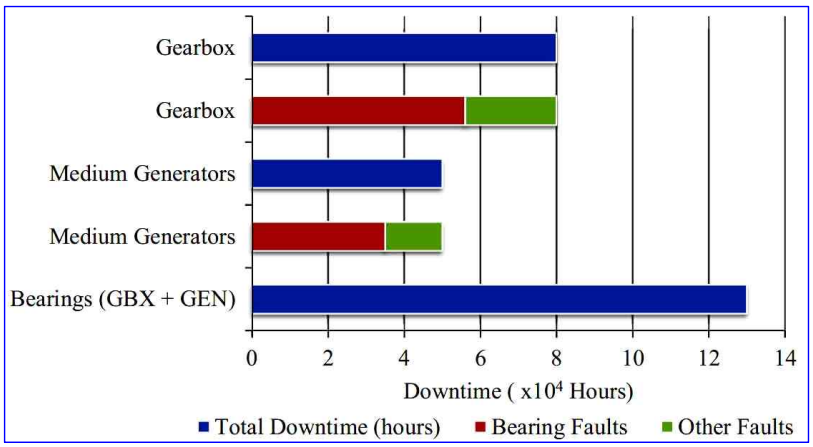
태감시 모니터링, 풍력발전 블레이드 제작 및 사용 시 신뢰성, 소형풍력발전기 기계적 안정성, 그리고 풍력발전용 증속기 신뢰성 확보 기술에 관한 사항을 소개한다.

2. 풍력발전기 상태감시(CMS) 모니터링

2-1. 풍력발전 CMS 기술 현황

풍력발전단지를 운영하는 과정에서 유지보수 관리를 소홀히 할 경우 사전에 고장을 예측한 경우보다 최대 10배 가까운 비용소모가 발생할 수도 있다는 분석이 있다. 실제로 지난 10년간의 유럽 해상풍력발전 프로젝트들을 분석한 결과 60%에서 많게는 70% 수준까지 가동률이 감소될 수 있는 상황이다. 이러한 가동률의 감소는 풍력발전단지의 심각한 수익률 저하를 가져오게 된다.[3]

상태감시 모니터링 시스템(CMS: Condition Monitoring System)이란 주요 기계요소(베어링, 샤프트, 기어, 발전기, 타워, 요 등)에 센서를 장착하여 이를 통해 수집되는 신호를 분석하고 진단하는 시스템으로 CMS를 통해 주요 부품들의 실제 상태 및 운용기록을 근거로 부품 교체 주기를 결정할 수 있으며, 결함을 조기 발견함으로써 서브 시스템의 고장 전파를 방지하고 원격상태 진단을 할 수 있으므로 운전정지에 의한 비용손실을 절감할 수 있다. 참고로 <그림 2-2>에 보인 바와 같이 베어링의 조기 크랙 발생은 기대수명의 5~10% 상태에서 또는 3년 이내 운전 중에 감지되고 있으며, 매년 145대의 터빈 중 1회 기어박스 결함이 발생하는 것으로 추정된다. 기어박스 결함의 50% 이상이 베어링에 기인하기 때문에 풍력터빈 베어링상태 모니터링(WTBCM: Wind Turbine Bearing Condition Monitoring)은 조기 결함을 방지하기 위한 우선순위에 속한다.[4]



<그림 2-2> 기어박스 및 발전기의 가동중단 시간 (1 MW<P<2 MW)[5,6]

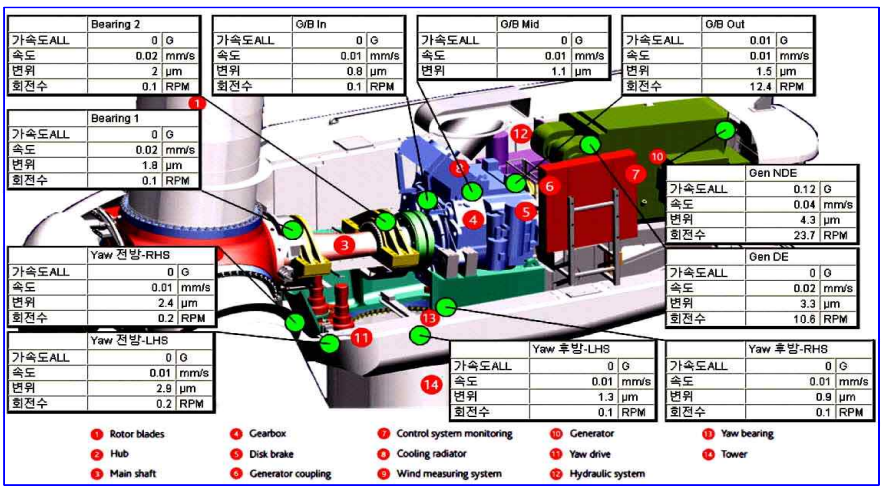
여기서는 국내·외 CMS 관련 기술 및 연구 현황을 간략히 소개하고 풍력발전기 주요 설비인 발전기, 기어박스, 베어링, 샤프트와 타워, 요 등의 상태를 감시하여 최적의 유지보수 조건의 결정을 위해 개발 중인 CMS 및 데이터 취득에 획득에 관한 사항을 소개한

다.[7]

2-2. 국내·외 CMS 기술 및 연구개발 현황

국외의 경우 풍력발전기의 대형화 및 신뢰성 확보 차원에서 O&M(Operation and Maintenance)과 CMS기술 개발이 일찍부터 이뤄지고 있다. 또한, 여러 분야에서 활용가치가 매우 높은 기술로 인식되어 활발하게 연구개발 되고 있다. 다국적 대기업들이 CMS 제품을 개발하고 있는 중소 전문기업을 인수 및 합병하여 시장에 진출하고 있는 추세이다. CMS 시장은 미국의 GE 자회사인 벤츄리 네바다 사와 스웨덴의 베어링 전문회사인 SKF사가 국내 진동모니터링 시스템 및 유지보수 시장을 선도하고 있다. 현재 스웨덴과 덴마크 등 유럽의 풍력발전업체들이 자국의 CMS 개발업체들의 제품을 2000년 초부터 발전기에 적용하고 있으며, 해상풍력으로 관심을 돌리고 있는 유럽은 CMS 제품을 적극적으로 설치하여 운용하고 있다. 핵심부품이면서 진동에 취약한 기어박스, 베어링, 축, 발전기에서 진동 데이터를 수집하고 분석 및 진단하여 큰 고장을 미연에 방지는 것으로 운영 및 유지보수 비용을 절감하고 있다.[8]

국내에서도 풍력발전기의 기계 고장으로 인한 정지를 미연에 방지하고 가동률을 향상시키기 위한 CMS의 연구 및 상용화가 지속적으로 이루어지고 있다.[7,9] 몇몇 기업에서는 CMS 기술을 이용하여 시작품을 출시하였지만, 테스트 및 실증 단계에 있는 것으로 파악되고 있으며, 발전기 업체들은 해외 CMS 제품을 들여와 발전기 개발 및 발전기 테스트에 적용하고 있다. 철강, 화학, 발전, 제지 및 자동차 회사들도 진동 모니터링을 활용하여 제품 개발 및 유지정비를 운영하고 있다. 국내 기업체 중에서 LS전선에서는 풍력발전기 CMS개발을 위해 저주파 대역 신호처리를 위한 기능 개선 및 풍력발전 적용을 위한 기능을 추가하여 실증 시험을 진행하고 있으며 이에 대한 국제 인증을 준비하고 있다.[7] <그림 2-1>은 CMS 데이터 정보를 얻기 위한 풍력발전기의 주요 설비 모니터링을 위해 설치된 센서 위치를 나타낸다.



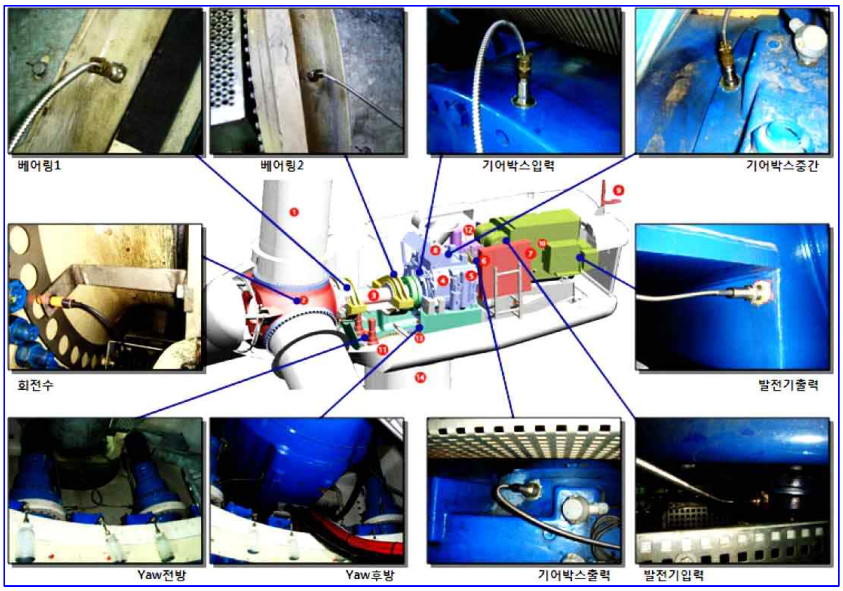
<그림 2-1> 센서 설치위치 및 정보[7]

그러나 국내시장 확대가 매우 한정적이고 기술개발 능력이 부족하여 대부분 해외 제품에 의존하고 있다. 앞으로 풍력발전 시장이 확대되면 국내 발전기 제조사들은 해외 진출을 위한 경쟁이 불가피 할 것으로 사료되며 이와 같은 현재 상황에서는 국내 업체들이 개발, 인증 획득 및 track record를 쌓아서 해외로 진출하여야 할 것이다. 발전사업은 기간산업이라는 특성상 매우 높은 신뢰 및 안전을 요하기에 적극적인 관심과 역량 집중이 필요하다.

2-3. 진동해석과 CMS 데이터 분석

CMS의 주요 상태분석에 속하는 진동 해석(VA: Vibration Analysis)은 국부적 또는 분산된 형태의 서로 다른 손상, 마모, 그리고 예상할 수 있는 결함에 의해 발생된 유용한 정보를 탐지하여 추출해 낼 수 있는 다용도 도구이다.[10~12] 베어링 손상의 초기 단계에서는 높은 주파수 신호를 생성하며 결함주파수는 잡음 플로어(noise floor)에 가까우므로, 베어링 결함에 관한 진동 스펙트럼은 이 단계에서 효율성이 저하될 수 있다. 그러나 베어링의 결함 주파수, 그리고 결함의 종류와 위치를 분명하게 식별하는 고주파 성분(high frequency content)에 적용되는 고체 인벨로핑(solid enveloping) 및 복조기법(demodulation method) 등이 있다.[10,13,14]

진동레벨을 관찰할 수 있는 또 다른 방법은 웨이블릿 변환(wavelet transformation)을 통해서 이루어 질 수 있다. 이 기법은 베어링 결함및 정렬(조정) 불량에 성공적으로 적용되고 있다. 이 기법은 풍력 터빈에서 생성된 결함을 감지하는 일반적인 지표로 사용될 수 있으며, 다른 시스템 환경에서 시험 및 평가 중인 현대적인 식별 도구이다.[15-18]

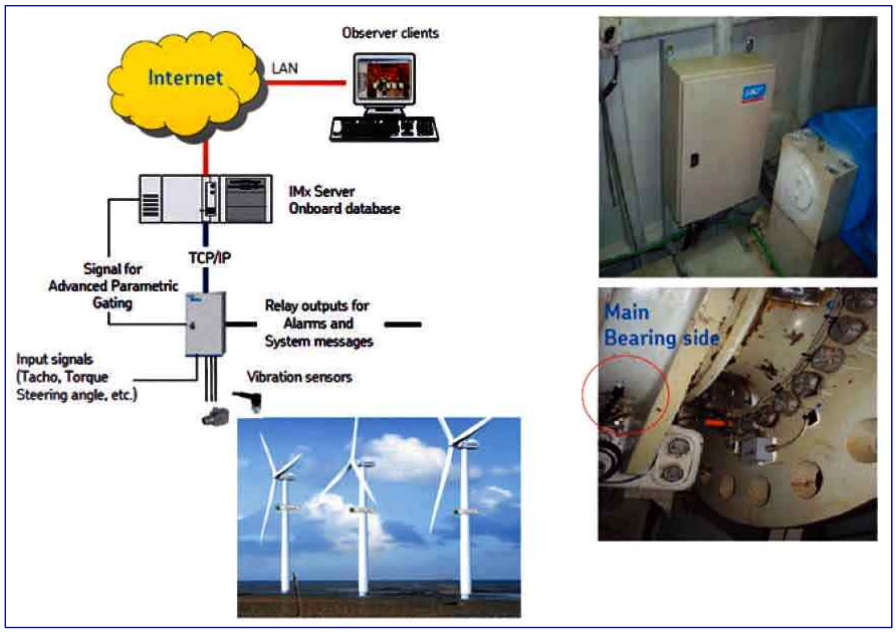


<그림 2-2> 주요설비 센서 설치위치[7]

진동 상태 감시를 위한 센서로는 가속도계(accelerometer)를 선택하며, 가속도계의 사양, 개수 및 장착 위치는 풍력 발전 상태감시시스템의 국제 인증 규격인 GL Guideline에 의거하여 선정한다.[19] 데이터 획득을 위해 CMS 시스템 Hardware는 풍력발전기 너셀 안에 설치한다.[7] <그림 2-2>는 CMS 측정을 위해 개발한 풍력발전기의 상태감시를 위한 센서 설치 사진으로 메인베어링, 기어박스 입력/중간/출력, 발전기 DE/NDE, Yaw 전/후방 측 좌측과 우측에 설치된 진동 센서 11개와 회전수 측정을 위한 센서 1개를 보여준다.[7]

이들 센서로부터 진동 및 RPM 데이터를 취득하고 있으며 보다 세밀한 분석을 위하여 발전기 고속 축에 RPM 측정 센서를 추가로 설치한다. 풍력발전기의 특성상 각 주요 설비로부터 취득되는 진동 데이터는 가변적이고, 진동 데이터가 RPM의 변화에 따라 변화되므로 진동 데이터와 발전기입력단의 RPM 데이터를 취득하여 데이터를 분석한 후, RPM별 또는 구간별로 진동 데이터의 주의 및 위험 레벨을 선정한다.

<그림 2-3>은 풍력발전시스템의 CMS 구성체계를 나타낸 것으로서 풍력발전시스템 주요 구성요소에 장착된 각종 센서와 이를 이용하여 계측된 물리 신호의 처리, 전송 및 운영자 감시 구성요소를 종합적으로 제어할 수 있다.[8]



<그림 2-3> 풍력발전시스템 CMS 구성체계[8]

2-3. CMS 기술적, 경제적, 그리고 운영상 관련사항

풍력발전 수요가 증가하고 시스템이 대형화 되어감에 따라 풍력발전기 주요 설비의 점검 및 교체에 대한 유지보수 비용이 증가하고 있다. 풍력발전기는 발전비용에 비해 유지보수 비용이 많이 지출되는 시스템이므로 고장정비, 예방정비, 상태 기반 정비를 결정하여 효율적이고 경제적으로 유지 보수하여야 한다. CMS를 포함한 유지보수 비용은 육상설치 시 수명 주기 비용의 20-30%, 그리고 해상설치 시 최대 30%의 비용을 차지하는

것으로 알려져 있다.

국내에서도 베스타스시스템, 지오멘토, 대신풍력(주), 휴니텍, 한국에너지종합기술(주), 로맥스 테크놀로지 등은 풍력발전단지에 대한 진단, 수리, 모니터링, 긴급보수, 부품 수급 등 통합 솔루션을 제공하고 있다. 이들 업체는 소음, 진동, 육안 검사뿐 아니라, CMS를 포함한 유지보수 이력, SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 분석, 내시경 검사 등 발전기의 데이터와 통합 진단 등을 하고 있다.[20]

유지보수 및 수리를 위해 풍력 단지를 직접 방문하는 것은 풍력 발전소의 원격 위치, 나셀(nacelle)의 수직 높이 등을 고려해볼 때 많은 비용이 소요된다. 결함과 유지보수 조건을 미리 예측하는 저비용 온라인상태 모니터링 시스템을 갖추면 유지보수 작업 뿐 아니라 더욱 낮은 비용으로 유지보수가 가능할 것이다. 이러한 풍력발전 시스템의 CMS에 대한 연구는 풍력발전기의 대형화 및 신뢰성 확보 차원에서 적극적으로 수행되고 있다. 아울러, 여러 분야에서 활용가치가 높은 기술로 앞으로도 지속적인 연구개발이 추진되어야 할 것이다.

3. 풍력발전기 블레이드 신뢰성과 유지보수

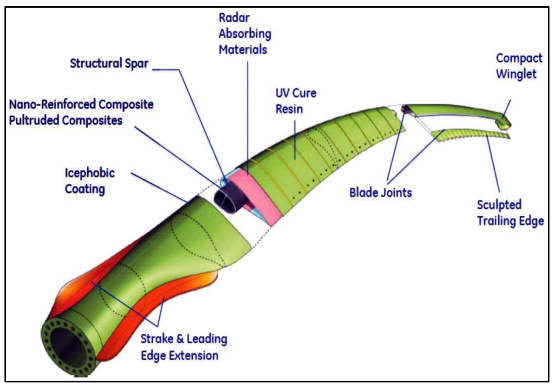
3-1. 풍력발전기 블레이드 기술

풍력발전 블레이드는 공역학적으로 최적화된 유선형의 단면 형상으로 블레이드에 작용하는 공력 하중에 충분히 강하고 안전하도록 설계되어야 하며, 블레이드 각 부분의 공력 하중에 적합한 강성과 경량의 재료로 제작되어야 한다. 블레이드에 작용하는 풍하중은 블레이드의 각 부분에 플랩 방향(flapwise)과 에지 방향(edgewise)의 굽힘모멘트, 자중, 축 방향의 인장, 압축 등을 발생시키고 블레이드는 이러한 응력을 지지할 수 있는 외부 셸(shell)과 박스 빔(box beam)과 같은 스파(spar)로 구성된다. 이러한 기본 구조로 만들어지는 블레이드가 장대화되기 위하여 효율적인 비용-품질을 확보하는 것이 필요하며 블레이드 설계, 재료 및 생산에 대한 기술적 향상이 요구된다. 공역학적 성능 향상, 블레이드 길이 및 재료 기술에 의하여 에너지 비용(LCOE: Levelized Cost of Electricity)과 직접적인 재료비용 저감, 실제 에너지생산량 향상, 소음감소, 그리고 내구성 향상 등을 이룰 수 있는 설계기술, 무게 대 비용의 효과적인 성능을 향상시킬 수 있는 재료기술, 그리고 자동화 및 몰드 비용의 저감 등을 통한 생산 기술 향상 등이 연구되고 있다.

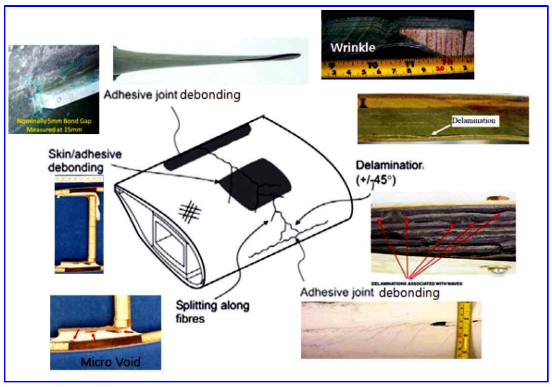
3-2. 블레이드 파손 유형

복합재료 블레이드의 제작과 접합(bonding) 공정에서는 다양한 유형의 제작 결함이 발생할 수 있으며, 이는 블레이드 하중지지 능력의 저하를 유발하게 된다. 블레이드를 구성하는 복합재료의 주요 공법으로는 주입(infusion), 진공레진 전이몰딩(VARTM: Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding)과 프리프레그 수제 적층(hand layup prepreg)

등이 있다. <그림 3-1>은 이러한 블레이드 기술을 고려한 첨단 기술이 포함된 블레이드 개념의 한 예를 나타낸다.



<그림 3-1> 첨단기술 블레이드 개념도[21]

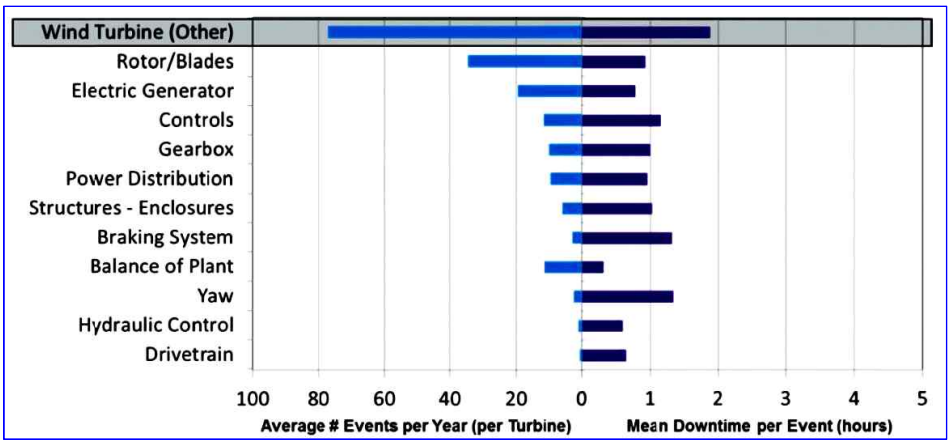


<그림 3-2> 블레이드의 손상유형[21]

블레이드 복합재료의 제작공정과 접합공정 과정에서 발생하는 일반적인 제작 결함은 <그림 3-2>와 같은 층간분리(delamination), 접착이 이루어지지 않는 부분 혹은 기공, 불완전한 경화, 복합 층간의 주름, 강화 섬유 결함, 섬유방향의 오류, 접착분리, 섬유 방향을 따르는 모재 균열 등이 발생할 수 있다. 또한, 사용 중에는 이물질의 충돌, 낙뢰 등에 의한 손상이 발생하고, 블레이드의 대 변형으로 타워와의 충돌에 의한 손상, 블레이드 표면의 침식 그리고 과하중 혹은 주기적인 하중에 의한 복합재료의 계면손상 등이 발생하게 된다. 이와 같은 블레이드의 제작 및 사용 중 발생하는 손상 유형의 50% 이상이 제작상의 결함으로 발생된 것으로 알려져 있다.

3-3. 블레이드 신뢰성 기술

풍력발전 기술의 방향이 대형화 및 해상 풍력으로 전개됨에 따라 풍력발전 블레이드를 포함한 시스템의 신뢰성은 세계 시장 경쟁력 확보를 위해서 가장 중요한 요인으로 등장하고 있다. 유럽(EU)에서도 2030 Vision을 실현하기 위해서 발전시스템의 신뢰성 극대화는 풍력발전 기술의 전략적 연구 분야에서 주 연구 분야로 설정하고 있다. 미국에서도 2008년도부터 신뢰성과 증가하는 유지 관리 비용 등에 의한 산업체 위기에 특별히 관심을 가지게 되어 DOE 협력 프로그램이 시작되었다. 이는 DOE지원 CREW(Continuous Reliability Enhancement for Wind) 데이터베이스 사업이 Sandia 국립 연구소 중심으로 시작되어 미국 내 풍력발전기 신뢰성 성능 기준을 설정하고 부분품 수준의 파손과 정지 시간에 대한 주요 요인을 찾고자 신뢰성이 가능한 풍력발전소 운영 데이터의 국가 신뢰성 데이터베이스를 구축하고 있다. <그림 3-3>은 2012년 미국 내 풍력발전기 기준에 따른 비이용률(unavailability)을 분포를 나타낸다. 풍력발전기 블레이드는 발전기, 제어시스템과 함께 2012년에 미국 내 비이용률이 높은 3대 부품으로 인식되어 신뢰성을 지속적으로 향상시켜야 하는 부품으로 알려져 있다.



<그림 3-3> 풍력시스템의 비이용률 데이터(발생빈도수와 정지시간)[21]

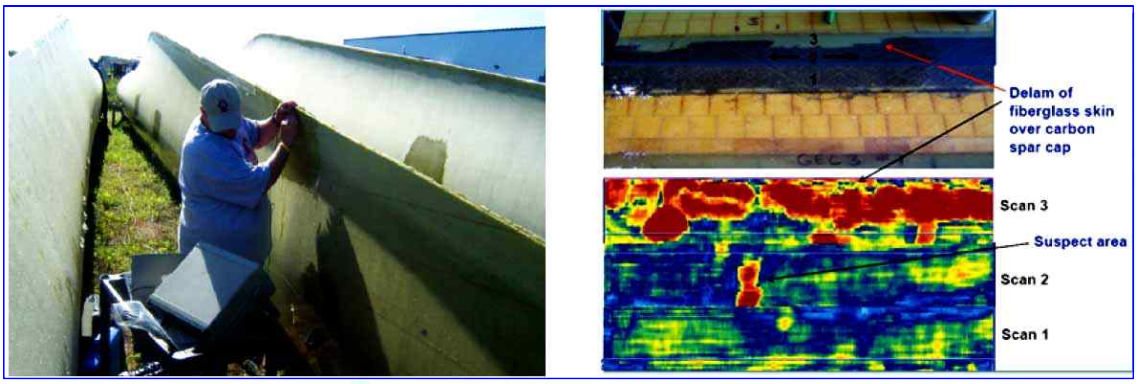
또한 미국에서는 블레이드 신뢰성 협력 프로그램(BRC: Blade Reliability Collaborative)을 SNL(Sandia National Laboratories), ANDIA International, NREL(National Renewable Energy Laboratory), MSU(Michigan State University) 등 대학, 정부기관, 그리고 산업체 등이 참여하여 진행하고 있다. 이로부터 풍력발전 현장에 도달되는 블레이드의 신뢰성 향상에 요하는 기술을 조사하며, 주요 신뢰성 인자로서는 수지 주입 품질, 검사 능력, 접합 품질, 환경 보호, 조립 라인, 인증 및 기술 피드백 등에 대한 데이터를 확보하고 있다. 독일의 Fraunhofer WKI(Wilhelm-Klauditz-Institut)에서는 복합재 풍력발전 블레이드에서 결함허용 설계개념을 정립하고 있으며, 제작에서부터 결함을 검사하는 단계적 방법과 함께 이에 대한 신뢰성 모사 및 해석을 진행하였다.[22]

3-4. 블레이드 손상 검출 기술

블레이드 제작 결함 탐지 및 결함 발생 영향을 포함하는 신뢰성 정량화를 위하여 스마트 측정 기술개발이 진행되고 있다. 블레이드 제작 품질 및 성능을 향상시킬 수 있는 공정상의 결함 탐지 능력, 이에 따른 성능의 향상을 측정할 수 있는 기술 그리고 공정 연계기술의 개발이 이루어지고 있다. 블레이드 설계를 시작으로 생산, 검사, 손상 임계 하중 이하에서 시험, 그리고 인증절차의 단계로 이루어진다. 이런 절차 거친 후 블레이드는 풍력발전에 사용되고 각 단계에 서는 블레이드의 신뢰성을 확인하기 위한 각각의 검사 기법이 활용되도록 제안되고 있다. 블레이드 결함은 제작 공정상에서 일차적으로 검사 할 수 있는 공정 내(in-process) 검사 기법으로 탐지하고 최종 검사 단계에서는 초음파(UT: Ultrsonic Technology) 및 열화상(IRT: Infrared Thermography)등의 검사기법, 그리고 일반 하중에 의한 시험에서는 음향방출(AET: Acoustic Emission Technolgy) 시험으로 나타나지 않은 결함을 검사하는 등의 일련의 종합적인 품질 관리 체계로 진행된다.

이들 검사기법 중, <그림 3-4>에 나타낸 초음파 기술은 블레이드 표면 밑의 공기 틈이나 작은 결함들에서는 반사되어 돌아오는 원리를 이용하여 결함의 크기, 형태 등에 대

한 정보를 얻을 수 있으므로 비파괴검사 중 대표적인 정량적인 기술로 사용되고 있고, 제작 결함 및 사용 중 발생한 결함을 모니터링하는 기술로 사용하고 있다. 레이저 초음파 기술(LUT: Laser Ultrasonic Technology)은 레이저빔 조사(impinging)에 의해 발생하는 초음파를 이용하며 비접촉 원거리 고속 스캐닝이 가능하여 자동으로 공정 중에 결함을 검출하고 영상화할 수 있는 비파괴 검사 신기술로 개발되고 있다. 이외에도 한국표준과학연구원, 덴마크 RISO 등에서는 디지털 이미지 상관 기법(DIC: Digital Image Correlation)을 적용한 결함 정량화 검출기술을 개발하고 있다. 사용 중의 결함 혹은 손상을 상시적으로 모니터링하기 위하여 스마트 구조 건전 모니터링(SHM: Structural Health Monitoring) 시스템 기법에 대한 연구가 블레이드 제작시 광섬유의 삽입 혹은 임피던스 센서, 음향방출 센서 등을 블레이드 재료내부에 함침(embedding)의 방법으로 진행되고 있다.[21]



<그림 3-4> 초음파 검출법에 의한 (a) 현장검사, (b) 결함검출(SNL, USA)[21]

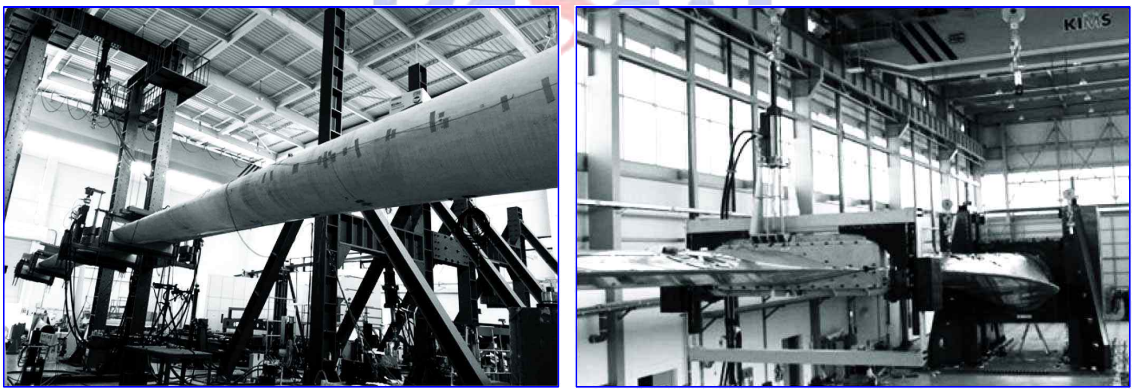
블레이드에 존재하거나 발생하는 손상에 대한 구조 임계성은 해석적, 실험적 및 통계적 접근 방법으로 평가하고 있다. 블레이드 손상에 대한 해석적 모델은 손상의 발생, 유형, 성장 그리고 최종 파단 등을 예측할 수 있도록 이루어지며 파손 기준, 손상 논리 그리고 손상 거동을 포함한다. 손상 모델링은 손상을 모사하는 재료 열화를 고려하는 연속체 손상 모델링(CDM: Continuum Damage Management)과 실제 손상을 모델링하는 분산형 손상 모델링(DDM: Distributed Data Management)이 개발되고 있다. 통계적 신뢰성 평가에서는 블레이드에 작용하는 하중, 재료 거동, 구조적 특성에 대한 통계적 분석 데이터와 사용 중 평가에 의해 얻어진 손상의 통계적 분석을 기반으로 통계적 구조 해석을 하게 되고 이로부터 신뢰성/위험평가 사용 수명추정이 이루어지도록 하고 있다.

3-5. 블레이드 구조 시험 및 평가 기술

블레이드의 구조적 건전성을 평가하거나 인증 성능을 평가하기 위한 시험규격으로 IEC61400-23이 있다.[23] 최근 풍력발전기의 신뢰성 문제가 깊이 고려되면서 일반적으로 블레이드의 정적 및 피로 성능을 같이 평가한다. 실제 규모 블레이드의 정적 성능은 블레이드의 플랩 방향과 에지 방향, 그리고 비틀림 방향으로 평가한다. 대형 블레이드에서

정적 및 피로 하중 부하는 기술적 어려움을 가지고 있으나, 설비 및 기법의 개발로 제한적이지만 정적 및 피로 성능을 평가하는 시험설비 및 기법들이 개발되어 많은 시험평가기관에서 2축 정적하중과 피로하중 부하능력을 향상시키고 있다. 대표적으로 미국의 NREL은 <그림 3-5>에서 보인 바와 같이 2축 정적시험 시스템과 2축 피로시험 시스템을 포함하여 대형 풍력블레이드의 피로시험을 수행할 수 있는 기반시설을 구축하고 있으며, 덴마크의 RISO에서도 대형 블레이드 실규모 시험을 위한 정적 및 피로시험 장비를 구축하고 있다.

<그림 3-5> 미국 NREL의 (a) 대형 블레이드 정적 시험 설비, (b) 2축 피로 공진 시험 시스템



<그림 3-6> 국내에서 구축된 (a) 블레이드 이축 공진형 피로시스템(한국표준과학연구원), (b) 대형 블레이드 정적 및 피로 시험시스템(재료연구소)

국내에서도 <그림 3-6>에 보인 바와 같이 정적 및 2축 피로성능을 측정할 수 있는 기반 기술을 확립하고 있다. 한국표준과학연구원에서는 2축 피로 공진시험 설비를, 그리고 재료연구소에서는 2 MW급 이상의 블레이드에 대한 정적 및 피로성능을 평가할 수 있는 기반 시험설비를 구축하여 대형 블레이드 연구 및 개발 시험을 지원하고 있다.

4. 소형 풍력발전기 기계 안정성 평가 및 유지보수 기술

4-1. 소형 풍력발전 시스템의 신뢰성

소형 풍력발전시스템은 대형 풍력발전시스템과 비교하여 다양한 형태를 가지고 있으며 이의 핵심 설계 기술에 대한 내용 및 절차는 일부 구성품(대형 증속기, pitch 제어기 등)이 생략된 것을 제외하면 거의 동일하다. 따라서 대형 풍력발전시스템의 신뢰성 확보를 위한 설계·생산기술과 CMS 기술을 대부분 그대로 사용할 수 있다. 특히, 소형 풍력발전시스템의 경우, 인간의 생활공간 내에 설치되는 경우가 대부분이므로 이의 안전성 및 신뢰성 향상에 대한 투자가 지속적으로 필요하다. 그러나 소형 풍력발전기는 자중 및 바람 등으로 인한 기계적 하중이 상대적으로 작고, 시장상황이 비용에 매우 민감하므로 신뢰성 향상에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 다음은 소형 풍력발전기의 안전성 및 신뢰성과 관련된 국내외 규격 및 연구 동향에 관한 내용이다.[8]

4-2. 소형 풍력발전시스템 관련 국내외 규격 분석

소형 풍력발전시스템 관련 규격으로는 IEC 61400-2(Design requirements for small wind turbine), AWEA(Small wind turbine performance and safety standard), BWEA(Small wind turbine performance and safety standard) 및 국내의 WT101(신재생에너지 설비심사 세부기준-소형 풍력발전시스템) 등이 있다. 소형 풍력발전시스템 규격에서 기계적 안전성 및 신뢰성 관련 내용은 내구성 시험(duration testing) 및 기계부품 시험(mechanical component testing)으로 구분할 수 있다.

4-4. 풍력발전시스템 내구성 시험

내구성시험의 목적은 소형 풍력발전시스템이 최소한의 신뢰성을 보유하고 있는지 확인하기 위한 시험으로 구체적인 목적은 다음의 항목을 확인하고 조정하는 데 있다.

- 구조의 완전성 및 재료의 열화(부식, 균열, 변형)
- 풍력발전시스템의 환경보호에 대한 질
- 풍력발전시스템의 동적거동

이의 확인을 위한 내구성시험은 해당 소형 풍력발전시스템을 시험 사이트에 설치 후 ① 일정기간 동안의 운전, ② 일정시간 동안의 발전, 그리고 ③ 특정 풍속 이상에서 특정시간 이상의 발전을 규정하고 있다. 이러한 내구성시험의 구체적인 내용은 규격별 일부 상이한 내용이 존재하지만 국내의 WT101규격을 바탕으로 구체적인 내용을 설명하면 다음과 같다.

- 시험기간 중 확실한 운전(reliable operation)
- 적어도 6개월의 운전
- 풍속에 의존하지 않은 적어도 2,500시간의 발전
- 1.2 V_{ave} 이상의 풍속에서 적어도 250시간의 발전

- 1.8 V_{ave} 이상의 풍속에서 적어도 25시간의 발전

여기서 확실한 운전(reliable operation)의 정의는 다음과 같다.

- 적어도 운전 시간율 90%
- 풍력발전시스템 시스템 또는 구성요소에 주요한 고장은 없다.
- 풍력발전시스템의 구성요소에 큰 마찰, 부식 또는 손상은 없다.
- 유사한 풍속에서 발전풍력에 큰 저하는 없다.

이러한 내구성시험은 0.5 Hz 이상의 샘플링속도(sampling rate)에서 측정한 10분 평균 풍속(10-min average wind speed)을 기준으로 수행되어야 한다. 내구성시험 항목에는 위에서 설명한 특정기간 및 특정 속도에서의 운전 또는 발전조건 외에도 풍력발전시스템이 과도하게 진동하지 않음을 증명하기 위한 동적거동(dynamic behavior) 관련 평가 내용 역시 포함되어있다. 풍력발전시스템의 동적 거동은 시동 풍속으로부터 20 m/s 풍속의 바람에서 모든 운전조건(예를 들어 부하의 유무 상태)에서 관측해야 한다. 약 5, 10, 15 및 20 m/s의 풍속에서 5분간, 그리고 전체에서 적어도 1시간은 풍력발전시스템을 관측해야 한다. 이러한 내구성시험은 각 규격에서 대부분 동일한 내용을 규정하고 있으나 일부 항목은 약간씩 상이하다. <표 4-1>은 각 규격별 내구성시험 조건을 정리하여 나타낸 것이다.

<표 4-1> 소형 풍력발전시스템 각 규격별 내구성시험 조건

구분	IEC 61400-2	AWEA 9.1	BWEA	WT 101
Operation	>6 months 10min average	>6 months 10min average	>6 months 10min average	>6 months 10min average
Air Speed	>2500 hr	>2500 hr	>2500 hr	>2500 hr
>1.2* V_{ave}	>250 hr	>250 hr	>250 hr	>250 hr
>1.8* V_{ave}	>25 hr	>25 hr	>25 hr	>25 hr
≥15 m/s	-	>25 hr	>25 hr	-
Operation Time	90% 이상	90% 이상	90% 이상	90% 이상

단, WT101에서는 1 kW 미만의 초소형 풍력발전시스템의 경우 내구성 시험을 요구하지 않음.

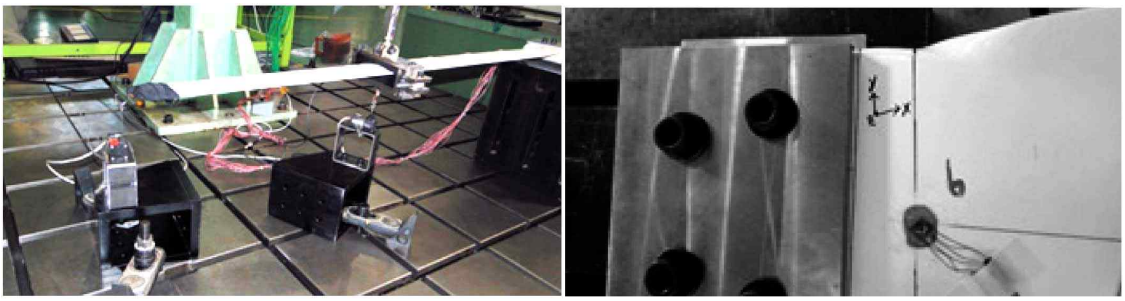
4-5. 풍력발전시스템 기계부품 시험

내구성시험이 소형 풍력발전시스템 자체의 신뢰성검증을 목표로 하고 있음에 비하여, 기계부품시험(mechanical component testing)은 풍력발전시스템의 주요 구성요소 수준에서의 신뢰성 및 안전성을 확보하기 위하여 필요한 시험이다. 따라서 기계부품시험은 부품(구성요소)단위에서 실험실 수준에서 수행된다. 기계부품시험의 경우, IEC 61400-2 및 WT101에서 규정하고 있다. 양 규격의 내용은 동일하며 다음은 이에 대한 자세한 내용이다.

1) 블레이드 시험

블레이드의 정적 하중시험에서 인가하중은 플랩 방향의 휨모멘트와 원심력의 조합이어야 한다. 블레이드는 허브 접속부와 같이 시험해야 한다. 모델 또한 실측에 의해 예측되

는 최대 운전하중까지 안전율을 포함하여 시험하중에서 손상이 일어나서는 안 된다. <그림 4-1>에 나타낸 블레이드에 대한 정적 하중 부하 방법으로는 규정된 설계하중에서의 파손 여부를 확인하는 하중기반 방법(load based method)과 블레이드가 파괴될 때까지 하중을 가하는 강도기반 방법(strength-based method)이 있다. 일반적으로 설계하중과 실제 블레이드 파손하중 간의 강도 여유를 결정할 수 있는 강도기반 방법을 사용하도록 권고하고 있다.



<그림 4-1> 블레이드 정적 하중시험(군산대학교 KATIC)[8]

블레이드에 대한 정적 하중시험은 반드시 수행해야 하는 사항임에 반하여 블레이드의 피로시험은 현재 권고사항으로 규정되어 있으며 이의 시험조건은 IEC61400-23(Full-scale structural testing of rotor blades)에 의거하여 수행하도록 되어 있다.[23]

2) 허브 시험

허브 시험(hub test)은 블레이드가 결합되는 허브구조물의 구조적 안전성을 검증하는 시험으로서, 허브는 날개의 모든 접속점에서 원심력과 플랩 방향의 휨에 의해 정적으로 시험해야 한다. 허브는 허브 축 접속부를 함께 시험해야 한다. 최대 계산하중에 의거한 설계 시험하중(안전율 포함)에서 손상이 일어나서는 안 된다.

3) 너셀 구조시험

너셀 구조시험(nacell frame test)은 발전기 등이 설치되는 허브구조물의 구조적 안전성을 검증하는 시험으로서, 너셀 구조는 축을 기울였을 때에 발생하는 휨모멘트, 방향 블레이드 하중 및 중력도 함께 정적으로 시험해야 한다. 최대 계산하중에 의거한 설계 시험하중(안전율 포함)에서 손상이 일어나서는 안 된다.

4) 요 기구시험

요 기구시험(yaw mechanism test)은 풍향에 따라 너셀을 회전시키는 요 기구의 구조적 안전성을 검증하는 시험으로서, 요 기구는 너셀 구조시험 항목에서 언급한 하중을 추가하여 시험해야 한다. 요 기구는 적절하게 작동하고 있음을 나타내야 한다.

5) 기어박스 시험

기어박스 시험(gearbox test)은 요구되지 않지만, 국제규격인 AGMA/AWEA 921-A97 규격에 준거한 시험을 수행하도록 권고하고 있다.

4-5. 상태감시 모니터링

소형풍력발전 시스템에 관한 CMS는 군산대학교를 중심으로 제한적인 연구 및 실용화가 이루어지고 있다.[8,9] 예를 들어, 본격적인 진동기반 CMS구축이 아니라 주로 발전량 모니터링을 위하여 지그비등의 상용 무선통신 기술을 기반으로 소형 풍력 발전시스템의 대표적인 예인, 풍력 가로등을 대상으로 원격 발전량 모니터링 시스템에 대한 연구가 일부 수행되고 있다. 또한 인버터 및 게이트 등의 전기 장치의 고장 모니터링을 위하여 소형 풍력발전시스템에 널리 적용되고 있는 영구자석형 동기 발전기(PMSG)와 연계하여 계통에 전력을 공급하는 3상 인버터에서 발생되는 고장의 검출 및 진단을 수행할 수 있는 고장 검출 및 진단기법역시 제안된 바 있다. 그러나 풍력발전시스템의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 위에서 설명한 전기장치에 대한 모니터링뿐만 아니라 블레이드, 기어박스 등의 주요 기계적 구성요소에 대한 진동 기반 CMS가 반드시 요구됨에도 불구하고 현재까지 소형 풍력발전시스템의 기계적 구성요소에 대한 CMS는 국내 · 외를 막론하고 상당히 미미한 실정이다.

5. 풍력발전 시스템용 증속기 신뢰성 및 유지보수 기술

5-1. 풍력발전용 증속기 특징 및 구조

풍력발전 시스템에서 증속기의 경우 고장 빈도가 높은 편에 속하며, 또한 고장발생 운전이 정지되는 등 심각도도 높아 신뢰성이 절실히 요구된다. 최근 증속기의 신뢰성을 확보하기 위한 연구 개발에서 수명에 가장 영향을 크게 미치는 조건으로 적용하중 영향에 대한 비토크 하중(nontorqueload)과 유성기어열의 설계 인자로 취급되는 하중 분할(load sharing), 치면 하중 분포(face-load distribution), 그리고 필수적으로 요구되는 시험/평가 기술에 대하여 소개한다.[24,25] 풍력발전시스템용 증속기는 <그림 5-1>에 보인 바와 같이 저회전, 고토크를 갖는 입력동력을 고회전, 저토크의 출력동력으로 변환하는 역할을 한다.

<그림 5-1> 풍력발전시스템용 증속기 동력변환[25]

입력동력은 바람에 날개가 회전하면서 얻게 되는 가변 동력으로 날개의 유연성 및 타워 등 외부 구조물의 불안정성에 따른 동적 거동(dynamic motion)이 증속기에 크게 영향을 준다. 이는 회전에 의한 토크 외에 블레이드 자중 및 바람 변동 하중에 의한 비토크 하중이 작용한다고 보고되고 있다. 따라서 비토크 하중을 고려하지 않을 경우 증속기의 고장에 주요 원인이 되므로 비토크 하중(non-torque load)을 고려한 연구 개발이 수행되고 있다.

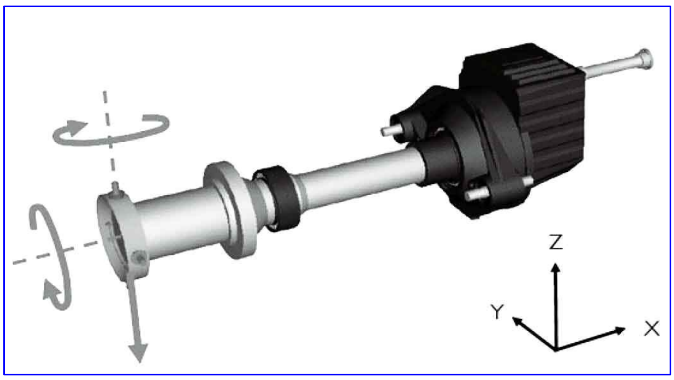
풍력발전시스템용 증속기는 소형화와 경량화가 요구되는데 이는 풍력발전시스템 나셀의 무게와 부피를 최적화하므로 경제성을 확보할 수 있기 때문이다. 따라서 증속기의 구조는 <그림 5-2>와 같이 동력 밀도(power density), 회전 강성(rotational stiffness)이 크며, 관성(inertia)이 작도록 2단의 유성 기어열과 평행 치차열을 이용하여 구성한다.

<그림 5-2> 유성기어 및 증속기 기어 트레인 구조[25]

유성 기어열의 가장 중요한 설계 인자는 다수의 유성기어에 작용하는 하중이 균일하게 전달될 수 있도록 하중을 분산하는 유성기어간의 하중 분할과 기어에 작용하는 하중이 치면에 균일하게 분포되도록 하는 치면하중 분포이다. 또한 풍력발전시스템이 20년 이상의 긴 수명을 요구함에 따라 신뢰성을 확보하고 이를 입증하는 것이 필요하다. 따라서 위에 언급된 증속기의 설계인자와 하중 특성을 고려한 시험/평가 및 인증이 요구된다.

5-2. 비토크 하중 적용 기술

비토크 하중은 <그림 5-3>에 보인 바와 같이 로터 무게와 공력(aerodynamic force)에 의해 5자유도로 발생한다. 5자유도 비토크 하중 중에서 굽힘 모멘트와 축방향 하중이 가장 중요하다.



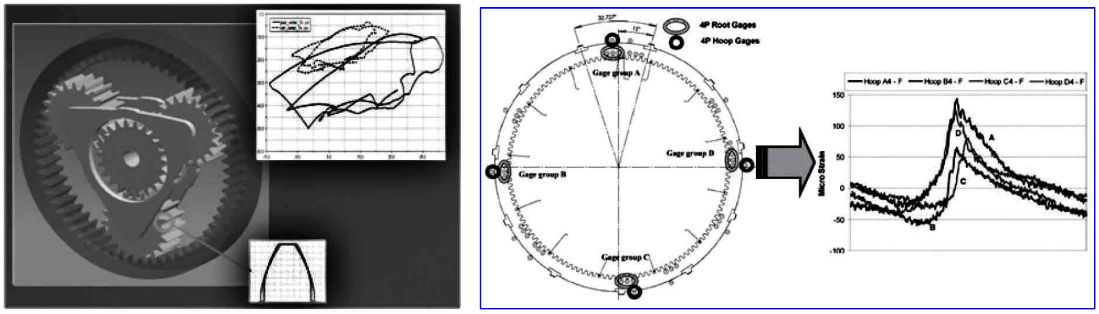
<그림 5-3> 비토크하중 발생 개념

비토크 하중은 기어의 이끝 하중(gear tooth edge loading)을 증가시키고, 유성기어의 불균등(unequal) 하중 분할을 유발한다. 이끝 접촉(edge contact)에 의해 기어의 마이크로 피팅(micropitting)이 발생할 수 있다. 굽힘 모멘트의 증가는 하중 분할 계수(load sharing factor)를 증가시킨다. 입력 토크가 작을 때에는 굽힘 모멘트가 증속기 거동(response)에 주요한 역할을 한다. 굽힘 모멘트는 정격 토크와 같은 차수(order)의 크기를 가진다.

입력 토크가 정격 토크보다 매우 작을 경우, 예를 들면, 입력토크가 정격토크의 10%(입력토크=10%×정격토크)일 경우에는 로터 무게가 하중 분할 계수에 미치는 영향이 작은 입력 토크보다 더 크므로 10% 토크에서 하중 분할 계수가 정격 토크에서의 하중 분할 계수보다 더 크게 나타난다. 따라서 비토크 하중을 고려한 설계와 시험/평가가 증속기 신뢰성 확보 연구 개발에 적용되고 있다.

5-3. 하중 분할 적용 기술

증속기의 유성기어열은 소형, 경량화에 장점이 있는 반면 하중을 적절히 분배하는 유성축의 하중 분할(load sharing)이 일정하지 않을 때 설계 수명에 비하여 짧은 시간에 손상 및 파손이 발생하게 된다. 유성 기어열에서 선기어(sun gear)와 유성기어(palnetary gear)가 궤적에 따라 임의로 움직일 때 각 유성기어는 일정한 하중을 받지 못한다. 4개의 유성기어를 갖는 유성기어열의 링기어에 이뿌리 및 림 부분에 스트레인 게이지를 부착하여 부하에 따른 하중 변화를 측정하면 각 위치에서 유사한 하중 패턴을 보여주나, 일정하지 않은 하중 분할에 따라 <그림 5-4>와 같이 큰 하중이 걸리고 가장 적은 하중이 걸리는 위치가 다름을 확인할 수 있다.



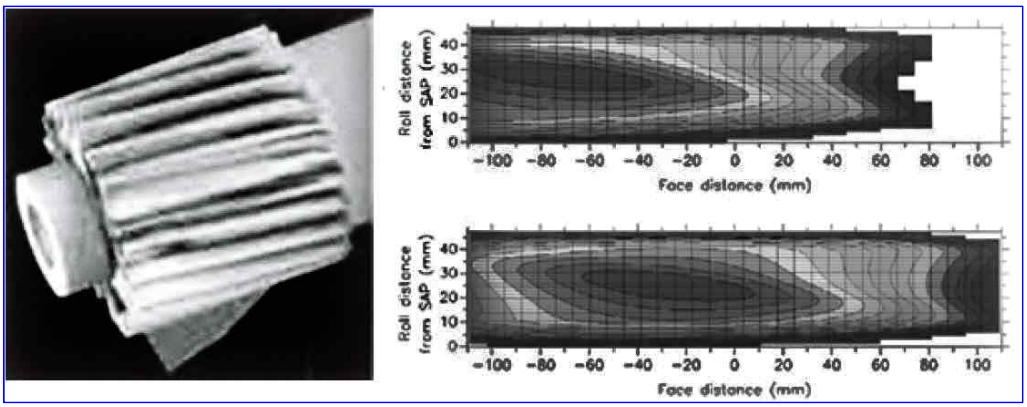
<그림 5-4> 동특성에 따른 유성기어 중심축 변위특성

하중 분할이 일정하지 않으면 일부 유성기어에 하중이 집중되는 현상이 발생할 수 있는데 이 경우 기어나 베어링 표면에 부하증가로 손상 및 파손의 원인이 되고 이는 수명의 감소로 이어질 수 있다. 따라서 하중 분할이 균일하도록 기어의 정밀도 및 조립오차를 최소화하여야 하며 비토크 하중인 입력하중에 의하여 발생하는 축 정렬오차(mis-alignment) 등을 고려한 베어링 선정과 기어 강도 설계 등이 수행되어야 한다.

5-4. 치면 하중 분포 적용 기술

기어 치면에 하중이 균일하게 분포하면 기어 강도 및 피로 한도 내에서 기어 트레인이 작동되어 설계 수명을 유지할 수 있다. 치면 하중 분포는 기어 치폭에 걸친 불균일한 하중 분포가 치면 응력 분포에 미치는 영향을 고려하여 계수로 나타내고, 치면 하중 분포 계수가 1에 가까울수록 치면의 하중 분포가 균일함을 의미한다. 치면 하중 분포(face load distribution) 계수는 ISO standard의 계산식(ISO 6336: method C)을 이용하거나 접촉 패턴 분석(contact pattern analysis) 방법인 ISO 6336의 method B을 이용하여 구할 수 있다.

기어의 각 물림에 의한 치면에 하중 분포가 불균일하면 <그림 5-5>와 같이 하중이 큰 부분을 나타낸 검정색 부분이 기어 치면에 한쪽으로 집중되고, 하중이 균일하면 중앙에 집중하여 분포하는 접촉 특성을 나타낸다. 치면 하중이 불균일하게 분포하는데 영향을 미치는 인자들은 기어 이의 정밀도, 축의 정렬오차, 기어의 탄성 변형, 베어링의 내부 틈새와 변형 등이 있다. 따라서 베어링의 내부 틈새와 변형을 조정하고 치형 수정 등을 통하여 축 정렬오차 등을 최적화하는 방법으로 치면 하중 분포를 보다 균일하게 할 수 있는 방법도 개발되었다.[25]

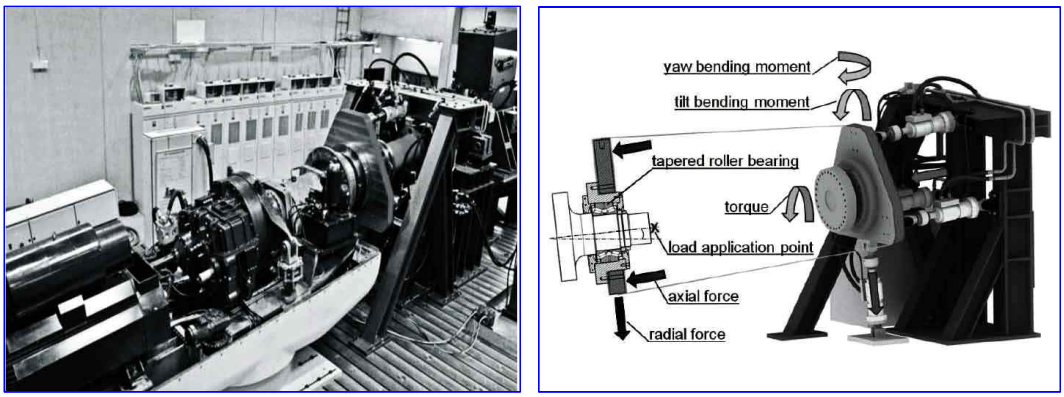


<그림 5-5> 치면하중 분포 및 접촉패턴 분석

치형 수정은 치선 방향과 치폭 방향으로 나눌 수 있으며, 치선 방향 치형 수정은 주로 tip relief와 root relief, 그리고 치폭 방향치형 수정은 lead slope modification, crowning을 의미한다. 치폭 방향 치형 수정은 기어에 작용하는 불균일한 하중 분포와 기어 모서리의 응력 집중을 감소시켜주는 역할을 한다. 따라서 기어트레인이 치면 하중 분포를 균일하게 갖도록 설계해야 하고 작동 시에도 설계 값과 같이 하중 분포가 이루어지고 있는지 입증하는 시험/평가도 필수적으로 수행되어야 한다.

5-5. 신뢰성 확보 시험 및 평가 기술

증속기의 신뢰성 확보에는 시제품 증속기에 대한 시험/평가는 매우 중요하다. 특히 산업용 기어박스에 비하여 긴 수명은 20년 이상의 성능과 수명을 요구하는 풍력발전용 증속기의 경우 이를 입증하는 것이 필수적이다. 그러나 풍력발전시스템용 증속기의 경우 시험장비는 그 용량이 MW 단위이므로 장비의 규모가 크고 시험/평가 비용이 많이 드는 어려움이 있다. 또한 풍력발전용 증속기의 특성을 반영한 시험/평가를 위하여 일반적인 기어박스에 대한 시험장비에 추가하여 진행된다. 가급적 풍력발전 시스템의 증속기에 작용하는 힘과 모멘트 성분을 모두 적용하는 비토크하중을 고려한 시험/평가를 하는 것이 필요하다. 실제 부하 재현은 다이나모식(dynamometer type) 시험장비에 힘과 모멘트를 가할 수 있는 5 DOF 운동이 가능한 다수의 유압식 액추에이터를 이용하여 부하를 가하는 방식이다. 그리고 시험장비는 풍력발전시스템에 증속기가 설치되는 것을 고려하여 일정 각도를 갖도록 하면 실제 부하 운용 조건을 재현할 수 있다. <그림 5-6>은 독일 Aachen대 비토크 하중 재현 시험장비 및 개략도를 나타낸다.

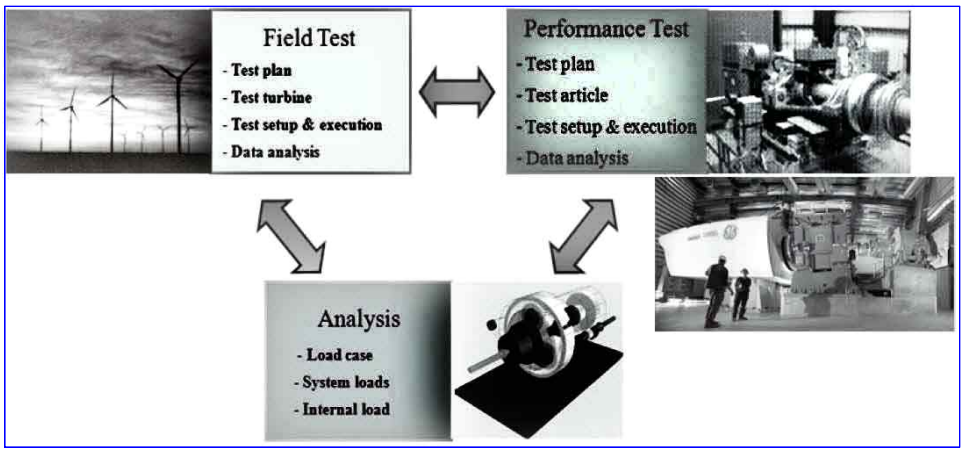


<그림 5-6> 독일 Aachen대학 비토크 하중 재현 시험장비 및 개략도

증속기 유성기어열의 하중 분할과 기어 치면 하중 분포는 설계 시 고려한 계수 값이 시험/평가를 통하여 측정된 값과 비교하여 적정한가를 확인하여야 한다. 이를 위하여 <그림 5-7>과 같이 각 유성기어열의 링기어와 유성기어 이뿌리에 스트레인 게이지를 부착하여 증속기 성능시험 시 각 유성기어와 치면에 가해지는 하중을 계측하여 확인하여야 한다.

<그림 5-7> 하중 분포 및 하중 분할 측정시험

이때 증속기에 작용하는 각 부하 조건은 시험 절차에 따라 산정하여 적정한 시험/평가를 실시한다. 풍력발전시스템용 증속기의 신뢰성 확보는 위에서 언급한 설계와 시험/평가 기술만을 통해 확보하기는 어렵다. 증속기의 신뢰성은 설계, 제작, 시험/평가 및 실증운용을 통한 전주기적인 단계에서 필수적으로 고려되어야 한다. 따라서 증속기의 신뢰성 확보를 위한 연구개발은 <그림 5-8>와 같이 연구실의 설계, 해석과 시험실의 비토크 하중 등이 고려된 시험/평가, 환경의 영향을 받는 풍력 발전단지의 실증연구 결과 등을 서로 주고받으며 유기적으로 연동하여 연구개발이 수행되어야 한다.



<그림 5-8> NREL 증속기 유집수 및 신뢰성 확보 연구 체계

풍력발전시스템이 대형화되고 해상용으로 개발되면서 증속기는 보다 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 증속기의 특성과 이에 대한 신뢰성 확보를 위해 로터 무게와 공력에 의한 비토크 하중과 정밀도, 조립오차, 비토크 하중 등에 의하여 발생하는 유성기어의 하중 분할, 기어 이의 정밀도, 축의 정렬오차, 기어의 탄성 변형과 치면 하중 분포(face-load distribution) 기술, 그리고 5 DOF 부하 재현 시험장비 등을 이용한 시험/평가 기술에 관한 사항을 소개하였다.

6. 맺음말

풍력발전기의 기계 고장으로 인한 정지를 미연에 방지하고 가동률을 향상시키기 위하여 유지보수 기술과 신뢰성을 확보하기 위한 주요 기술로 풍력발전기 기계상태 CMS, 풍력발전 블레이드 제작 및 사용 시 신뢰성, 소형풍력발전기 기계적 안정성, 그리고 풍력발전용 증속기의 신뢰성과 유지보수 기술에 대해 다음 사항을 소개하였다.

1) 풍력발전 단지는 종종 육상 및 해양에서 접근이 곤란한 경우가 많으므로 조기 경보와 아울러 문제 식별 및 지속적인 모니터링이 주요 특징이다. 학계 및 산업체에서 주요 연구 분야추세는 CMS의 확장성, 응용성 및 자동화, 조기 탐지를 위한 알고리즘과 기법, 스마트 진단 온라인 CMS, 잔존 수명 연구 등이 있다.

2) 풍력 블레이드는 풍력발전시스템에서 고장 빈도가 높고, 고장 발생 시 심각도도 상대적으로 높아 신뢰성을 고려해야 하는 부품이다. 블레이드 제작 생산 과정과 사용 중에 발생하는 손상 및 결함은 신뢰성의 심각성에 큰 영향을 미치므로 블레이드에서 발생할 수 있는 결함 유형, 결함을 탐지하는 기술 그리고 신뢰성을 평가하는 시험/평가 기술에 대한 연구 개발이 필요하다.

3) 소형 풍력발전기는 자중 및 바람 등으로 인한 기계적 하중이 상대적으로 작고, 비용에 매우 민감한 시장 상황 등으로 인하여 신뢰성 향상에 대한 연구는 미미한 실정이다. 그러나 소형 풍력발전시스템의 경우, 인간의 생활공간 내에 설치되는 경우가 대부분이

므로 이의 안전성 및 신뢰성 향상에 대한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.
4) 풍력발전기의 증속기는 고장 빈도도 높고, 고장 발생 시 작동이 중지될 수 있으므로 높은 신뢰성이 요구된다. 최근 증속기의 신뢰성을 확보하기 위한 연구 개발에서 수명에 가장 영향을 크게 미치는 조건으로 적용하중 영향에 대한 비토크 하중과 유성기어열의 설계 인자로 취급되는 하중 분할, 치면 하중 분포, 그리고 이를 입증하기 위한 시험/평가 기술에 관한 연구가 이루어지고 있다.

7. 후 기

본 보고서는 KISTI ReSEAT 프로그램에서 지원하는 중소기업 기술멘토링 공동관심기술(풍력분과)의 한 과제로 군산대학교 복합재료연구실의 장윤정 박사과정이 제공한 자료를 참고하여 작성하였으며 이에 감사드린다.

<참고문헌>

1. Bloomberg New Energy Finance Summit 2015, BNEF_Summit.pdf, New York, 14 April, 2015, https://about.bnef.com/
2. Renewables 2016 Global Status Report, Paris: REN21 Secretariat, ISBN 978-3-9818107-0-7, http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/05/GSR_2016_Full_Report_lowres.pdf
3. 투데이에너지, [신년기획] 풍력 유지보수-선택 아닌 필수, http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=110416
4. Henrique Dias Machado de Azevedo, Alex Maurício Araújo, Nadège Bouchonneau, “A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 56(2016), pp. 368 - 379
5. Sheng S, Keller J, Glinsky C. “Gearbox reliability collaborative update. Sandia Reliability Workshop Albuquerque. August 13-14; 2013. NREL/PR-5000-60141.
6. Whittle M. Wind Turbine Generator Reliability: An Exploration of the Root Causes of Generator Bearing Failures, Durham theses, Durham University. 2013 Available at Durham E-Theses Online, http://etheses.dur.ac.uk/9422/.
7. 김영기, 변재희, 최태식, 소철호, 풍력발전기 기계 상태 모니터링에 대한 연구, 2010년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2010. 7. 14 - 16, pp. 1247~1248.
8. 강기원, “소형 풍력발전기의 기계적 안전성 및 신뢰성 평가 기술”, 기계저널, Vol. 54, No. 7, 2014. 7, pp. 34-39.
9. 문대선, 김성호, “지능형 풍력발전 기계적 요소 고장진단 시스템 개발”, Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 24, No. 1, February 2014, pp. 078-083
10. Márquez FPG, Tobias AM, Pérez JMP, Papaelias M. Condition Monitoring of Wind Turbines: Techniques and Methods. Renewable Energy 2012; 46: 169 -

78. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.003.
11. Koulocheris D, Gyparakis G, Stathis A, Costopoulos T. Vibration Signals and Condition Monitoring for Wind Turbines. Engineering 2013; 5: 948 - 55. http://dx.doi.org/10.4236/eng.2013.512116, Published Online December 2013, http://www.scirp.org/journal/eng.
12. Shakya P, Darpe AK, Kulkarni MS. Vibration-based fault diagnosis in rolling element bearings: ranking of various time, frequency and time-frequency domain data-based-damage identification parameters. Int J Cond Monit 2013; 3(2) October.
13. Siegel D, Ly C, Lee J. Evaluation of Vibration-Based Health Assessment and Diagnostic Techniques for Helicopter Bearing Components AIAC14 Fourteenth Australian International Aerospace Congress. Seventh DSTO International Conference on Health Usage Monitoring. 2011.
14. Sheng S. Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring Round Robin Study - Vibration Analysis National Renewable Energy Laboratory. Technical Report NREL/TP-5000-54530. July; 2102.
15. Pérez JMP, Asensio ES, Márquez FPG. Economic Viability Analytics for Wind Energy Maintenance Management. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland; http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-11415-6_3 Advanced Business Analytics.
16. Liu X, Leimbach KR, Hartmann D, Höffer R. Signal analysis using wavelets for structural damage detection applied to wind energy converters. In: Proceedings of the 14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Moscow, Russia. 27 - 29 June; 2012.
17. Yang Q, An D. EMD and Wavelet Transform Based Fault Diagnosis for Wind Turbine Gear Box Hindawi Publishing Corporation. Advances in Mechanical Engineering Volume 2013. http://dx.doi.org/10.1155/2013/212836, Article ID 212836, 9 pages.
18. Al-Ahmar E, Benbouzid M, Turri S. Wind Energy Conversion Systems Fault Diagnosis Using Wavelet Analysis. Int Rev Electric Eng 2008; 3(4): 646 - 52 <hal-005265074>.
19. GL, Guideline for the certification of condition monitoring systems for wind turbines, Germanischer Lloyd, Hamburg, May 2007.
20. 백태현, 풍력터빈 베어링 상태 모니터링 최신기술고찰 및 도전 과제, 한국과학기술정보연구원 ReSEAT 첨단기술정보분석, 2016.
21. 허용학, “풍력발전 블레이드 제작 및 사용에서의 신뢰성 기술”, 기계저널, Vol. 54, No. 7, 2014. 7, pp. 28-33.
22. Kyle K. Wetzel, Defect-Tolerant Structural Design of Wind Turbine Blades, 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and

Materials Conference, AIAA 2009-2409, 4-7 May 2009, Palm Springs, California.
23. IEC 61400-23:2014(EN), Wind turbines-Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades, https://webstore.iec.ch/publication/5436
24. 이근호・박영준・송진섭, 풍력발전용 증속기 개발 기술 소개, 유공압시스템학회지, 제8권, 제1호, 2011. 3, pp. 55-59.
25. 이근호, 박영준, 풍력발전시스템용 증속기 신뢰성확보 기술, 기계저널, Vol. 54, No. 7, 2014. 7., pp. 40-45.

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.