

# 한국의 대형 풍력터빈 블레이드 정적하중 및 피로하중 시험평가 설비 개발 및 구축 현황

## Development and construction of static and fatigue test system for multi-megawatt wind turbine blade in Korea

박지상 · 박중규 · 황병선

Ji-Sang Park, Joong-Kyu Park, Byung-Sun Hwang

### 1. 서 론

풍력터빈 로터 블레이드는 풍력발전기의 특징적인 구성요소로서 풍력터빈의 출력 발생원이자 하중 발생원이기 때문에 풍력터빈의 성능 및 내구성에 가장 큰 영향을 미치는 핵심부품이다. 이에 따라 로터 블레이드 업체나 풍력발전시스템 업체에서는 블레이드 구조 시험을 개발과정에서 필수요소로 고려하고 있으며, 블레이드 인증 요구조건을 만족시키기 위해서도 블레이드 구조 시험은 필수적이다.

일반적으로 풍력터빈 블레이드는 극한 하중으로 50년 주기의 돌풍과 20년 동안의 피로하중에 견딜 수 있도록 설계된다. 이와 같이 블레이드의 극한하중에 대한 안전성과 반복하중에 대한 내구성은 세계적으로 통용되는 GL 규정과 IEC WT 01 규정에서 정하는 실 규모(full-scale)의 구조 시험을 통하여 검증된다.

구조 시험은 부가되는 시험하중의 특성에 따라 정적하중 시험과 피로하중 시험으로 나눌 수 있으며 정적하중 시험을 통해 블레이드의 강도와 강성 및 좌굴안정성(buckling stability) 등을 평가하고, 피로하중 시험을 통해 설계수명동안 받게 되는 반복하중에 대해 블레이드가 충분한 강도와 강성을 유지하는지를 검증한다.

한편, 국내에는 대형 풍력발전기 블레이드의 시험이 가능한 시험장비가 갖춰져 있지 않아 인증을 위한 구조 시험에 많은 어려움이 있는 실정이다. 해외 장비 이용은 블레이드 크기로 인한 수송의 어려움과 시험기간의 장기화, 그리고 해외 시험센터의 기술유출을 우려하는 상황 등으로 인하여 구조시험을 수행하기가 쉽지 않다. 이에 따라 국내 블레이드 개발 업체나 풍력발전 시스템 기업에서는 블레이드 구조 시험 설비에 대한 요구가 계속 제기되어 왔으나, 고가의 대형 설비 구축 및 유지비용, 시험 전문 인력의

부재, 자체 시험설비의 운용에 어려움이 많아 업계 자체적인 설비 구축 및 운용은 어려운 실정이었다.

이러한 배경과 함께 최근 국내에서는 풍력 산업이 빠른 속도로 성장하고 있고, 제품개발, 설비투자 및 시장진입을 강력하게 추진하고 있는 상황과 더불어 국내 풍력산업의 성공적인 시장진입 및 지속적 발전을 위해 필수적인 기반 시설의 필요성이 제기됨에 따라 최근 전라북도 부안군에 MW급 풍력터빈 블레이드의 시험시설이 2011년 4월 말 준공을 목표로 건설되고 있다.

본 기고에서는 대형 풍력 블레이드 구조시험의 기본적인 기술적 요구도와 함께 현재 건설 중인 부안 시험동에 설치될 블레이드 시험 장비의 개발 내용을 소개한다.

### 2. 정적하중 시험

#### 2.1 개념 및 시험기술

블레이드 정적하중 시험은 시험관련 규정과 설계 극한하중에 기초를 두고 수행하게 되는데, MW급 블레이드는 길이가 30~60m에 달하며, 극한 하중하에서 10m 내외의 대변형이 발생하기 때문에 하중 부가 장치 설계에 특별한 접근이 요구된다.

설계하중으로부터 시험하중을 도출하여 변위와 변형률을 측정하고 블레이드의 극한강도 및 강성을 평가하고 검증한다. 시험 중에 온도, 습도, 제작 오차 등의 영향을 고려하여 블레이드의 설계하중에 안전계수를 곱한 하중으로 시험을 수행한다. 일반적인 시험하중은 식(1)로 구한다.

$$\text{Static test load} = \gamma_{su} \cdot \gamma_{tu} \cdot \text{Design load} \quad (1)$$

안전계수는 Table.1 에 적용하는 규정을 참고하여 정하게 되는데, 일반적으로는 1.1에서 1.2 사이의 값을 취한다.

Table. 1 정적하중 시험의 시험하중 인자

Standard	GL	IEC	NVN	DS
$\gamma_{su}$	1.10	1.10	N/A	1.10
$\gamma_{tu}$	1.00 at 20°C 1.10 at -30°C	N/A	N/A	Included $\gamma_{su}$

블레이드 정하중시험은 하중점의 개수에 따라 단점하중과 다점하중으로 나뉘며, 사용하는 하중 장치에 따라 윈치(Winch) 방식 또는 휘플트리(Whiffle tree) 방식이 있다. Fig. 1 과 같은 휘플트리 방식은 시험시스템을 구성하기가 간단하는 점과 시험시간이 빠르다는 장점이 있고, Fig. 2 는 윈치 방식이며 하중점의 개수를 블레이드의 길이, 요구조건에 따라 자유롭게 조절할 수 있다는 점과 각각의 윈치를 독립적으로 조작할 수 있다는 점, 그리고 블레이드에 작용하는 실 하중을 비교적 정확하게 구현할 수 있고 블레이드의 휘어짐이 커지는 경우에도 시험하중의 방향을 유지할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

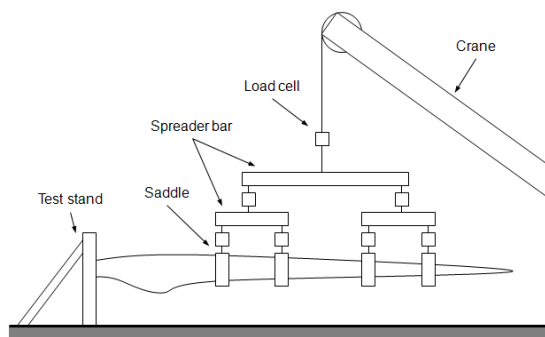


Fig. 1 Whiffle tree static test

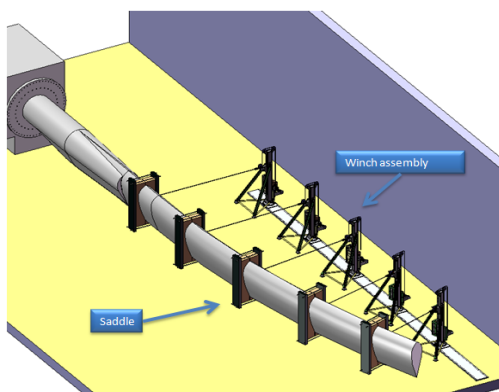


Fig. 2 Electric winch system

## 2.2 시험장비 개발

### 2.2.1 고정 장치(Test stand)

블레이드 고정 장치(Test stand fixture)는 블레이드의 루트(Root)부를 고정시켜 구조시험이 가능하도록 지지하는 역할을 한다. 고정 장치는 크게 콘크리트 구조와 철골 구조로 나눌 수 있다. 콘크리트 구조는 바닥과 직접 연결하여 고정되기 때문에 블레이드의 효과적인 지지가 가능한 장점을 가지고 있지만 반복적인 하중에 의해 파손이 생겼을 때 보수가 어렵고, 고정 장치의 설계나 시공이 어려운 단점을 가지고 있다. 반면 철골 구조는 I빔과 같은 강구조 철골을 사용하여 제작하여 블레이드 고정점의 높이변경이 가능한 점, 고정 장치의 위치이동이 가능한 점, 블레이드를 기울여 장착할 수 있는 점, 그리고 설치가 용이한 장점이 있다. Fig. 3 은 이번에 개발한 고정 장치를 나타내고 있으며 철골 구조로 설계하여 블레이드 크기 및 특성에 따라 높이 조절이 가능한 것과 경우에 따라 경사를 줄 수 있어 다양한 시험조건에 적용이 가능하도록 제작되었다. Table. 2 에 고정 장치의 제원을 나타내었다.

Table. 2 블레이드 고정 장치의 제원

Specification	Unit	Feature
Dimension	m	10.3(L) × 7.5(W) × 7.0(H)
Movable height	mm	2400 ~ 5000
Tilting angle	°	4.5
Moment Capability	MNm	50

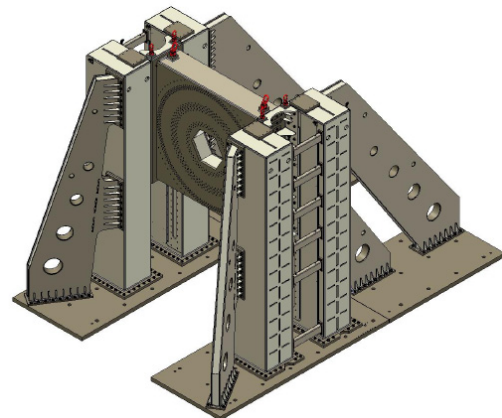


Fig. 3 Test stand fixture

### 2.2.2 윈치(Winch assembly)

Fig. 4 의 윈치는 블레이드 최대 변형 시 시험하중을 수직방향으로 부가하기 위해 윈치의 하중방향(Face direction)을 ±45°까지 조절이 가능하고, 시험도중 블레이드 굽힘 변형에 의한 회전각을 고려하여 Swing angle을 ±15°까지 움직일 수 있도록 설계하였다. 윈치의 하중점 높이는 1850mm에서

5000mm까지 조절 할 수 있어 블레이드 시험의 경우는 고정 장치의 높이에 맞춰 시험을 할 수 있게 설계하였다. 윈치의 개수는 각각 200kN과 100kN의 용량의 총 5기로 구성하였다.

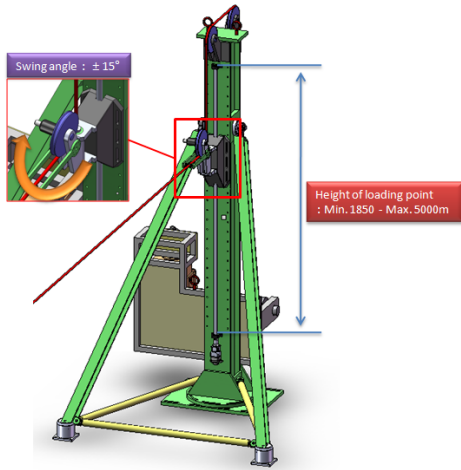


Fig. 4 Electric winch assembly

### 3. 피로하중 시험

#### 3.1 개념 및 시험기술

피로하중 시험은 DS (Danish Standard)와 IEC (International Electro technical Commission) 규정에서 요구하고 있으며, 다른 규정으로도 확대되고 있다.

피로시험의 하중도 설계하중보다 높은 하중에서 시험하게 되며, IEC와 DS규정은 식(2)와 같이 1.328의 안전계수를 적용한다.

$$Fatigue\ test\ load = 1.328 \cdot Design\ load \quad (2)$$

피로하중 시험은 설계수명동안의 반복 하중에 대해 블레이드가 충분한 강도와 강성을 유지할 수 있음을 입증하는 것으로서 블레이드에 주기적인 반복 하중을 가하면서 블레이드의 손상 여부와 변형량의 증가 여부 등을 측정한다.

피로시험은 하중이 부가되는 축에 따라 단축하중과 다축하중으로 구분된다. 단축하중은 단일 하중원(Source)을 사용하여 블레이드를 한 방향으로만 가진시키는 것을 말하며 하중을 부가하는 것이 단순하지만 하중방향을 변화시킬 수 없고, 피로하중 성분을 분리하여 하나씩 시험을 하거나 각각의 하중을 하나의 합성하중으로 조합하여 작용하는 특징이다.

다축하중 방식은 플랩(Flap)방향과 리드-래그

(Lead-sag) 혹은 에지(Edge)방향으로 복합하중을 가하는 방식이다. 두 방향으로 분리된 하중장치를 사용하여 독립적으로 하중이 가해진다. 이 방법은 시험이 진행되는 동안 하중성분 간의 위상 관계를 제어해야 한다. 하중 장치는 크게 편심회전체와 유압작동기로 구분할 수 있다. 편심회전체는 모터(Electric motor)에 질량을 달아 회전을 시킴으로써 상하 가진력을 얻는 장치이다. 이 방식은 시험장치의 가격이 비교적 싸고, 시스템을 구성하기가 쉽다는 장점을 가지고 있지만 회전운동으로 인해 불필요한 수평방향의 하중이 발생하는 단점이 있다. 유압작동기 방식은 소형 유압작동기를 장착하여 직접 상하 가진력을 발생시키는 장치이다. 가진시키는 수직축 하중만 있기 때문에 정확한 응답을 기대할 수 있다는 장점이 있으나, 장치의 가격이 비싸고 시험시스템의 구성이 복잡하다는 것이 단점이다.

#### 3.2 시험장비 개발

개발하는 피로시험 설비는 블레이드 플랩방향과 에지방향 동시에 피로시험이 가능하도록 설계하였다. Fig. 5 와 같이 플랩방향 가진기를 블레이드 70% 지점에 설치하고 에지방향 가진기는 블레이드 40% 지점에 설치하였다. 하중점을 다르게 설정한 이유는 각 하중방향에 의한 간섭을 최소화하기 위해서이다.

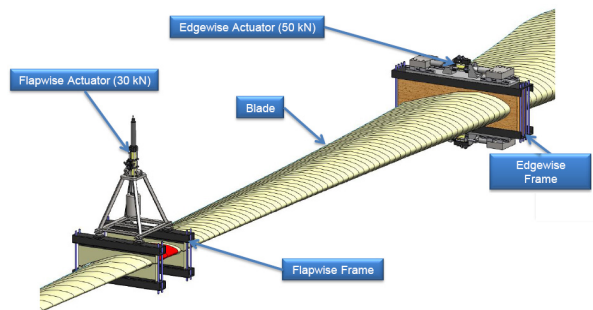


Fig. 5 Resonance fatigue test system

##### 3.2.1 Flapwise fatigue test equipment

블레이드 전체길이의 70% 지점에서 소형 Actuator와 Resonance adjuster로 Fig. 6 과 같이 구성하였다. 블레이드 1차 고유진동수 근처에서 가진하는 resonance excitation 방식으로 설계하여 작은 하중으로도 충분한 변위가 발생하도록 하였다. Table. 3에 시험장치의 특성값을 정리하였다.

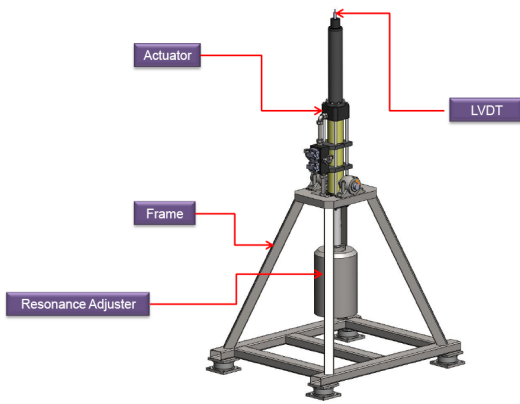


Fig. 6 Flapwise resonance fatigue test system

Table. 3 Flapwise resonance test equipment spec.

Specification	Unit	Feature
Size	mm	1343(L), 1620(W), 2995(H)
Weight	ton	0.9
Load Capacity	kN	30
Stroke	mm	± 300
Resonance adjuster weight	ton	0.5
Oscillation type		Resonance-Oscillation

### 3.2.2 Edgewise fatigue test equipment

Fig. 7 은 Edge방향 시험장비로서 소형 Actuator 와 Mass를 사용하여 Resonance type으로 설계하였다. Table. 4 에 장비에 대한 특성값을 정리하였다.

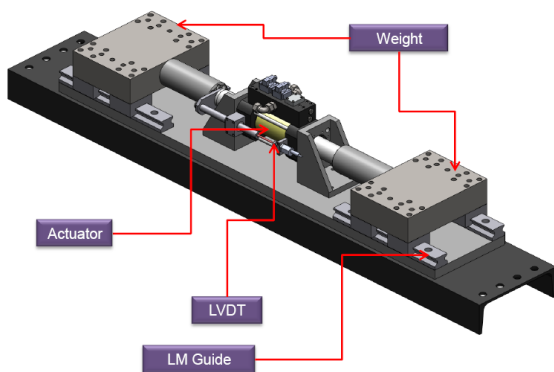


Fig. 7 Edgewise resonance fatigue test system

Table. 4 Edgewise resonance test equipment spec.

Specification	Unit	Feature
Size	mm	3700(L), 620(W), 2348(H)
Weight	ton	2.7 × 2set
Load Capacity	kN	50
Stroke	mm	± 125
Resonance adjuster weight	ton	0.3 + α
Oscillation type		Resonance-Oscillation

피로시험 설비는 일반적으로 피로하중을 받게 되는 블레이드의 누적 데미지를 분석하여 설계하게 된다. 20년의 피로수명동안의 누적 데미지를 계산하고 이 데미지를 바탕으로 3D FE Blade model에서 피로응력을 산출한다. 이 피로응력과 블레이드 피로 해석을 통해 나온 피로 특성값들을 사용하여 천이 응답해석을 수행하면 최종적인 블레이드 시험가진력을 얻을 수 있다.

3MW급, 길이 44m 블레이드를 예로 설명하면, 플랩방향, 에지방향을 동시에 가진하고 두 방향 모두 Resonance 방식으로 시험하기 때문에 가진주파수를 플랩방향 1차 고유진동수 0.9Hz와 에지방향 고유진동수 1.4Hz로 설정하고, 시험가진력을 계산한 결과 플랩방향의 가진력은 ±30kN, 에지방향의 가진력은 ±100kN로 산출하였다 이 결과 값을 가지고 천이 응답해석을 수행하여 각 방향에 대한 변위 응답을 Fig.8~9 와 같이 출력하였다. 이로부터 설계 누적 데미지를 일으키는 블레이드의 변위가 나타남을 확인할 수 있다.

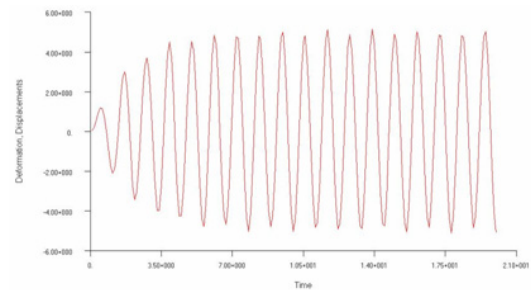


Fig. 8 Flapwise transient dynamic response

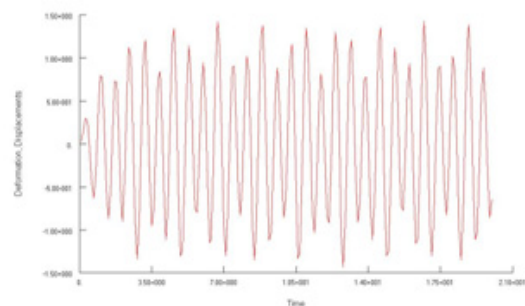


Fig. 9 Edgewise transient dynamic response

## 4. 결 론

본 기고에서는 현재 국내에 건설 중인 대형 풍력 블레이드 시험 설비의 개발 내용을 간략히 소개하였다. 풍력터빈의 대형화와 해상 풍력발전의 대두로



풍력터빈의 신뢰성은 더욱 중요한 요소로 부각되고 있다. 이에 따라 블레이드 인증시험에서 정하중시험 뿐만 아니라 피로시험에 대한 요구도 커지고 있으며, 향후에는 모든 블레이드 인증에 피로시험이 필수시험으로 요구될 것으로 예상된다. 그러나 풍력 선진국인 유럽에서도 대형 블레이드에 대한 피로시험 기술은 아직 확립되어있지 못한 상황이고 이 부분에 대한 기술 개발과 시험 장비 개발에 더 많은 노력과 재원이 투입되어야 할 것으로 생각된다.

본 시험설비가 준공되면 이를 기반으로 대형 블레이드에 대한 다양한 시험 기술이 체계적으로 연구되어 보다 신뢰성 있고 경제적인 시험 기술의 개발이 본격화될 것이다. 또한 공공 시험 공간 및 시험 설비 제공으로 국내 풍력터빈 핵심 부품 개발 및 상용화에 중요한 역할을 수행하여 국내 풍력산업의 발전과 세계시장 선도에 크게 기여할 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- 1) IEC/TS 61400-23 : Full-scale structural testing of rotor blades, 2001-04
- 2) IEC WT01 : IEC System for conformity testing and certification of wind turbines. 2001-04
- 3) Scott Hughes, "Wind Turbine Blade Testing at NREL", Proceedings of 2008 Wind Turbine Blade Workshop, May 12-14, 2008 Albuquerque, NM, U.S.A
- 4) Load and Safety of Wind Turbine Construction, Danish Standard DS 472, Edition 1992
- 5) Sara Black, "Static and fatigue testing prove out durability", High Performance Composites, Jan 2003
- 6) IEC 61400-1, "Wind turbine generator systems-Part 1: Safety Requirements", International Electrotechnical Commission, Edition 2005
- 7) 황병선 외, "최신 풍력터빈의 이해", 아진, 2009
- 8) Germanischer Lloyd, "Guideline for the Certification of Wind Turbines", 2003
- 9) Danish Energy Agency, "Type Approval Scheme for Wind turbines Recommendation for Design Documentation and Test of Wind Turbine Blades", 2002

### [저자 소개]

#### 박 지 상(책임저자)



한국기계연구원 부설 재료연구소  
책임연구원  
E-mail : jspark@kims.re.kr  
Tel : 055-280-3316  
1967년 6월 16일생.  
1995년 KAIST 항공우주공학과 박사과정 졸업. 1995년 한국항공우주산업(주) 입사, 2001년 재료연구소 입사, 풍력학회, 한국복합재료학회, 대한기계학회 등의 회원, 공학박사.

의 회원, 공학박사.

#### 박 중 규



한국기계연구원 부설 재료연구소  
연구원  
E-mail : raramith@kims.re.kr  
Tel : 055-280-3885  
1981년 7월 17일생.  
2011년 경상대학교 항공특성화대학원 기계항공공학과 석사과정 졸업. 2008년 재료연구소 입사, 한국에너지풍력학회 회원.

#### 황 병 선



한국기계연구원 부설 재료연구소  
책임연구원/풍력핵심기술연구센터장  
E-mail : hbs@kims.re.kr  
Tel : 055-280-3311  
1955년 1월 13일생.  
1994년 Univ. of Dayton 기계공학과 박사과정 졸업. 1978년 국방과학연구소 입사, 1994년 한국기계연구원 입사, 풍력학회, 한국복합재료학회, 대한기계학회 등의 회원, 공학박사.

등의 회원, 공학박사.