

750 kW급 직결형 국산화 풍력발전시스템의 기계적 보정

길 계환¹⁾, 최 효진²⁾, 김 영찬³⁾, 정 진화⁴⁾, 조 주석⁵⁾

Mechanical Calibration of 750 kW Gearless Type Wind Turbine(KBP-750D)

Kyehwan Gil, Hyo-jin Choi, Youngchan Kim, Chinwha Chung, Joo-suk Cho

Key words : Load measurement(하중 측정), Demonstration research(실증연구), Mechanical load(기계적 하중), Mechanical calibration(기계적 보정), Comparative calibration(비교보정)

Abstract : 포항공과대학교의 포항풍력에너지연구소(PoWER Center)가 개발에 참여했던 750 kW급 직결형 국산화 풍력발전 시스템의 상용화를 추진하기 위한 출력성능 및 하중 측정을 통한 실증연구가 대관령의 풍력실증단지에서 수행되었다. IEC 61400-13의 규격을 기준으로 수행된 하중 측정의 일환으로 스트레인 게이지의 기계적 하중에 대한 외부 하중부가에 의한 기계적 보정이 추진되었다. 기계적 보정의 수행 중 일부 스트레인 게이지가 단락되는 사고가 발생하였으나 비교보정을 통하여 기계적 보정작업을 완수할 수 있었다. 본 논문에서는 외부 하중부가에 의한 기계적 하중의 보정절차를 소개하고, 수행된 기계적 보정시험 과정에 대해 상세히 설명하며 기계적 보정의 결과를 보고한다.

1. 서론

KBP-750D에 대한 실증연구의 일환으로 하중 측정이 수행되었다. KBP-750D는 피치제어 방식이며, 시동풍속, 정격풍속 그리고 정지풍속이 각각, 3 m/sec, 12 m/sec 및 25 m/sec이고, 회전자 직경과 허브 높이는 공히 50 m이다.

하중 측정 작업의 목적은 풍력발전기의 주요 구조상에 가해지는 기본하중의 판정에 있으므로, IEC 61400-13의 규격에 의하면 블레이드의 플랩 방향 및 예지 방향 굽힘 모멘트, 로터 샤프트의 기울기 모멘트, 편각 모멘트 및 토크, 타워 상부의 두 직교 방향 모멘트 및 토크 그리고 타워 하부의 두 직교 방향 모멘트를 측정하여야 하고, 이들 하중의 측정 센서로서 스트레인 게이지가 권장되고 있다. 본 연구에서도 하중 측정용 센서로서 스트레인 게이지를 사용하나, 스트레인 게이지는 기계요소에 부착한 후에 그 신호값을 측정하고자 하는 하중값과 연관시키는 보정이 필요하다. 그 보정 방법 중 가장 신뢰성이 있는 방법은 스트레인 게이지가 부착되어 있는 기계요소에 그 값을 알고 있는 외부하중을 부가하고, 그때의 스트레인 게이지의 응답신호를 부가된 외부하중과 관련지어 보정식을 구하는 외부 하중부가에 의한 기계적 보정이다.

본 논문에서는 KBP-750D의 하중 측정을 위하여 수행된 기계적 보정에 대해서 기술한다.

추출하기 위하여 응답신호와 모멘트 사이의 비례 관계를 나타내는 보정식을 구하여야 한다. 부가하중과 이에 의한 스트레인 게이지 응답신호의 변화 사이에는 비례관계가 성립하므로 부가하중과 그로 인한 응답신호 변화를 측정하면 보정계수를 구할 수 있다. 그러면 별도의 시험¹⁾에서 측정된 응답신호의 영점과 함께 보정식을 구성할 수 있다.

보정식을 구하기 위한 보정절차를 순차적으로 나타내면 다음과 같다.

(1) 풍력발전기에 하중을 부가하지 않은 상태에서 측정하고자 하는 응답신호에 따라 풍력발전기의 방위각 혹은 편각을 1회 이상 회전시키며 해당 스트레인 게이지의 응답신호(v)를 그 회전각과 함께 측정한다.

(2) 측정 응답의 회전 주기 동안의 평균을 구함으로써 측정 응답의 영점(v_0)을 추출한다.

(3) 풍력발전기의 블레이드를 보정하중을 부가할 수 있는 위치로 정렬시킨다.

(4) 그 상태에서 보정하중(M_{ex})을 부가하며 그에 대응하는 스트레인 게이지의 응답신호 변화(v_{ex})를 측정한다.

(5) 보정계수(α)를 다음 식으로부터 계산한다.

$$\alpha = M_{ex}/v_{ex} \tag{1}$$

(6) 다음과 같은 보정식을 구성한다.

2. 기계적 보정 방안

스트레인 게이지의 응답신호로부터 모멘트를

1) 포항공과대학교 / 포항가속기연구소
E-mail : khgil@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1366 Fax : (054)279-1599

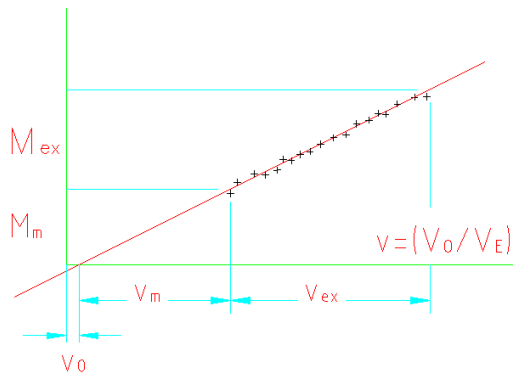


Fig. 1 하중부가에 따른 응답신호의 변화

$$M = \alpha(v - v_0) \quad (2)$$

(7) 하중을 부가하지 않은 상태에서 측정하고자 하는 응답신호에 따라 방위각 혹은 편각을 1회 전시키며 기준 모멘트 응답신호를 검출한다.

3. 기계적 보정시험

기계적 보정시험에서 로터 중심으로부터 20 m 지점의 블레이드 외면에 하중을 부가하기 위하여 그 지점의 블레이드 외면 형상에 맞춰 리그를 설계하였다. 알루미늄 각형합금관을 사용하여 제작함으로써 전체 무게가 61.5 kg인 경량의 리그를 제작할 수 있었다. 직접 블레이드와 접촉하는 부위에는 5 mm 두께의 고무판을 대어 하중을 가할 때 블레이드에 집중하중이 가해지지 않도록 고려하였다.

리그를 블레이드에 설치하는 작업은 두 크레인을 동원하여 한 쪽 크레인으로 가조립된 리그를 들고, 맞은 편 크레인에 탄 작업자들이 리그를 조정하여 블레이드에 끼우고 볼트를 체결하여 고정하는 방식으로 수행하였다. 그림 2의 (a)는 제작된 리그의 모습을 보여주고, 그림 2의 (b)는 블레이드에 리그를 설치하는 모습을 보여주고 있다.

풍력발전기의 블레이드 외면에 설치된 리그에 와이어를 연결하여 지면으로 연장한 후, 로드셀을 거쳐 중단이 크레인 본체에 고정된 체인블록과 연결하였다. 체인블록을 이용하여 와이어에 하중을 증가시켜 블레이드 뿌리 및 로터 샤프트 등에 모멘트를 인가하면서 로드셀의 하중과 스트레인 게이지의 응답신호를 기록하였다.

기본하중 전체에 대해서 기계적 하중의 보정시험을 수행하기 위하여 표 1과 같이 네 차례의 하중부가 시험을 수행하였다. 1차와 2차 하중부가에서는 풍력발전기를 정서 방향으로 회전시킨 후, 블레이드 #2의 방위각을 270°로 맞춰 각각 수직 하방과 수평 방향으로 하중을 부가하였다. 1차 하중부가에서는 타워 상부 N-S 모멘트와 타워 하부 N-S 모멘트에 대한 기계적 보정이 가능하고, 2차 하중부가에서는 타워 토크와 샤프트 평행 모멘트에 대한 기계적 보정이 가능하다. 3차와 4차 하중부가에서는 풍력발전기를 정북 방향으로 회전시킨

후, 블레이드 #1의 방위각을 270°로 맞춰 각각 수직 하방과 수평 방향으로 하중을 부가하였다. 3차 하중부가에서는 블레이드 #1의 플랩 방향 모멘트, 타워 상부 E-W 모멘트 및 타워 하부 E-W 모멘트에 대한 기계적 보정이 가능하고, 4차 하중부가에서는 블레이드 #1의 에지 방향 모멘트에 대한 기계적 보정이 가능하다.

기계적 보정은 공력이 하중으로서 작용하지 않도록 시동풍속 미만의 저풍속에서 수행되어야 하는 것이 원칙이나,²⁾ 실제 기계적 보정이 수행되었을 때의 허브 높이의 시험 풍속은 2.5 - 4.38 m에 이르렀다.

1차 하중부가와 2차 하중부가는 블레이드 #2에 대해서 수행되었으며 3차 하중부가와 4차 하중부가는 블레이드 #1에 대해서 수행되었다.



(a) 제작된 리그



(b) 리그 설치작업

Fig. 2 제작된 리그와 리그 설치작업 광경

4. 기계적 보정의 해석 및 비교보정

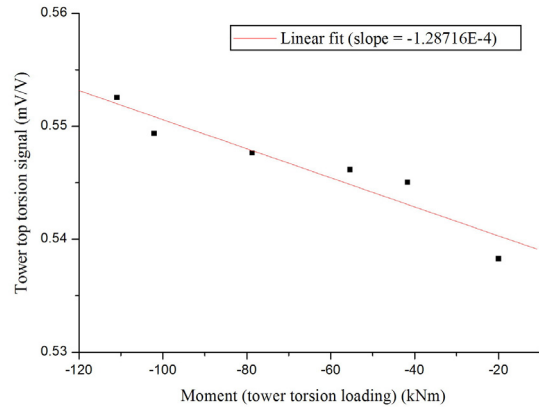
그림 3에 대표적인 기계적 보정시험 결과의 그래프가 나타나 있다. x-축은 모멘트의 축이고 y-축은 그에 대응하는 스트레인 게이지의 응답신호이다. 각 그래프에는 1차 근사된 실선의 기울기가 나타나 있는데, 그것의 역수가 추후 측정된 스트레인 게이지의 응답신호에 곱해질 보정계수가 된다.

Table 1 기계적 보정시험의 사양

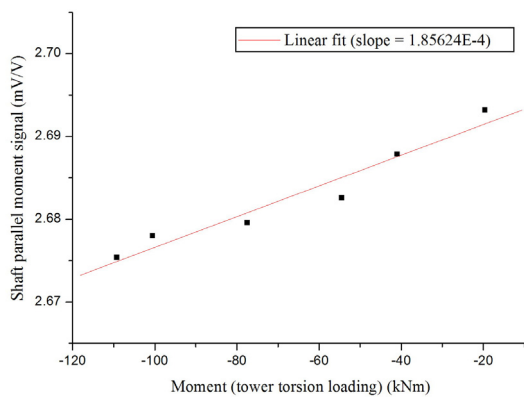
하중부가 유형	1차 (N-S)	2차 (Tower torsion)	3차 (Flapwise)	4차 (Edgewise)
피치각	90°	90°	90°	90°
편각	270° (정서상태)	270° (정서상태)	0° (정복상태)	0° (정복상태)
방위각	270°	270°	270°	270°
하중 방향	수직 하방	수평 방향	수직 하방	수평 방향
부가하중 (하중 증가량)	0.0 - 1.4 ton (0.1 ton)	0.0 - 0.8 ton (0.1 ton)	0.0 - 1.4 ton (0.1 ton)	0.0 - 0.8 ton (0.1 ton)
시험 풍속 (m/sec)	4.38	4.38	3.13	2.50
하중부가 블레이드	블레이드 #2	블레이드 #2	블레이드 #1	블레이드 #1

1차 근사에 의한 직선과 측정점 간 편차는 시험 풍속이 낮아지는 4차 하중부가에 의한 기계적 보정시험에서 작아지는 것을 관찰할 수 있으나, 샤프트나 타워의 응답신호의 편차는 블레이드에 가해지는 부가하중이 여러 기계요소를 거쳐 해당 위치에 전달되는 것에도 원인이 있을 것이다.

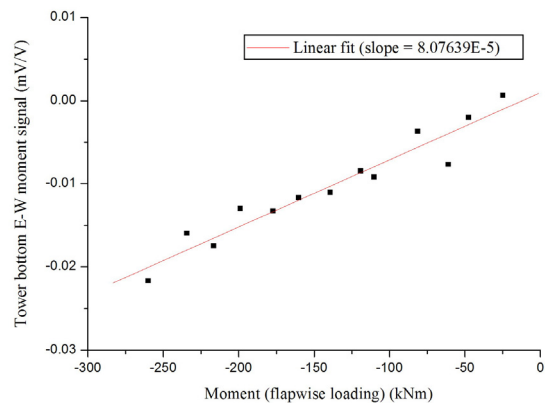
블레이드의 기계적 보정에 있어서 시험 환경이 여의치 않을 경우 모든 블레이드에 대해서 기계적 보정을 수행하는 대신, 기준 블레이드에 대해서만 기계적 보정시험을 수행한 후, 그것을 기준으로 다른 블레이드에 대해서 비교보정을 수행할 수 있다.²⁾ 또한, 샤프트의 평행 스트레인 게이지와 직교 스트레인 게이지는 그 위치가 90°의 각도 차이만 있으므로, 하나의 스트레인 게이지에 대해서 기계적 보정시험을 수행하고 그 결과를 기준으로 다른 스트레인 게이지에 대해서 비교보정을 수행하는 것이 가능하다.²⁾



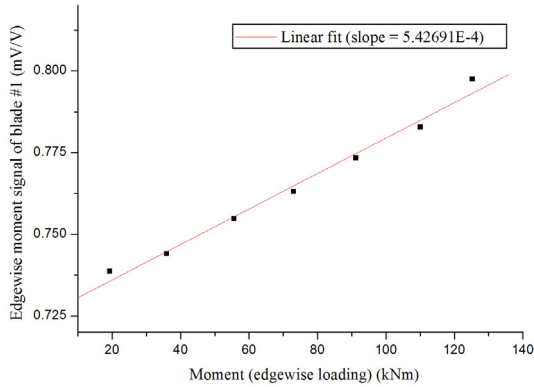
(b) 타워 토크 (2차 하중부가)



(a) 샤프트 평행 모멘트 (2차 하중부가)



(c) 타워 하부 E-W 모멘트 (3차 하중부가)



(d) 에지 방향 모멘트 (4차 하중부가)

Fig. 3 각 하중부가에 의한 기계적 보정의 결과

본 연구의 기계적 보정시험에서도 시험 기간 중에 급작스런 사태가 발생하여 일부 스트레인 게이지의 신호는 측정할 수 없는 상태가 되었다. 따라서 일부 블레이드의 스트레인 게이지와 샤프트의 직교 스트레인 게이지에 대해서는, 그 보정계수(α)를 대응하는 스트레인 게이지의 회전응답 사인곡선¹⁾의 진폭(A_c) 및 보정계수(α_c)와 자신의 회전응답 사인곡선의 진폭(A)을 이용하여 다음 식과 같은 비교보정으로 구하게 되었다.

$$\alpha = \alpha_c A_c / A \quad (3)$$

이때, 대응하는 두 회전응답은 동일한 조건에서 측정되어야 한다. 기계적 보정시험과 비교보정을 통하여 구해진 전체적인 보정계수를 정리하면 표 2와 같다. 표 2에서 밑줄 친 보정계수는 비교보정에 의해서 계산된 것이다.

Table 2 기계적 보정시험에 의한 보정계수

기계적 하중	보정계수 ($\frac{kNm}{mV/V}$)
블레이드 #1의 플랩 방향 모멘트	346.8
블레이드 #1의 에지 방향 모멘트	<u>331.8</u>
블레이드 #3의 에지 방향 모멘트	<u>283.0</u>
샤프트 평행 모멘트	5300.0
샤프트 직교 모멘트	<u>5319.2</u>
타워 상부 E-W 모멘트	-2988.5
타워 상부 N-S 모멘트	-3849.6
타워 상부 토크	10901.7
타워 하부 E-W 모멘트	13566.4
타워 하부 N-S 모멘트	-15263.4

5. 결론

IEC 61400-13의 규격에 따라서 KBP-750D에 대한 출력성능 및 하중 측정을 통한 실증연구를 수행하였다. 하중 측정용 스트레인 게이지의 보정을 위해서 외부 하중부가에 의한 기계적 보정 작업 중, 예기치 않은 사고 발생으로 블레이드 #1의 플랩 방향 스트레인 게이지만이 작동가능한 상태가 되었지만, 비교보정을 통하여 기계적 보정 작업을 수행할 수 있었다. 기계적 보정시험으로부터 구해진 보정계수를 각 스트레인 게이지의 응답신호에 적용함으로써 KBP-750D 풍력발전기의 전체 기본하중에 대한 하중 측정을 수행할 수 있었다.

References

- [1] 류지윤, 길계환, 김석현, "750 kW Gearless형 국산화 풍력발전시스템 실증연구," 2004-N-WD11-P-03, 산업자원부, pp. 4/3/1-4/3/63, 2004.
- [2] IEC/TS 61400-13:2001(E), Wind Turbine Generator Systems - Part 13: Measurement of Mechanical Loads, IEC, 1st ed., 2001.