

< 논문 >

## 풍력발전기 주축 및 날개 부하 측정시스템의 보정 및 불확실성 해석

남윤수<sup>†</sup>, 박무열\* · 유능수\*\*

(2006년 1월 3일 접수, 2006년 3월 1일 심사완료)

### A Calibration and Uncertainty Analysis on the Load Monitoring System for a Low Speed Shaft and Rotor Blade of a Wind Turbine

Yoonsu Nam, Mooyeol Park and Neungsoo Yoo

**Key Words :** Strain Gauge Calibration(스트레인 게이지 보정), Wind Turbine(풍력발전기), Load Measurement(부하 측정), Telemetry(원격측정법)

#### Abstract

The exact load measurements for the mechanical parts of a wind turbine are important step both for the evaluation of a specific wind turbine design and for a certification process. A common method for a mechanical load measurement is using a strain gauge sensing. Two main problems ought to be answered in order for this method to be applied to the wind turbine project. These are strain gauge calibration and non-contact signal transmission from the strain gauge output to a load monitoring system. This paper suggests reliable solutions for these two problems. A Bluetooth, a short range wireless data communication technology, is used to solve the second problem. The first one, the strain gauge calibration methodology for a load measurement in a wind turbine application, is fully explained in this paper. Various mechanical loadings for a strain gauge calibration in a wind turbine load measurement are introduced and analyzed. Initial experimental results which are obtained from a 1 kW small size wind turbine are analyzed, and the uncertainty problem in estimating mechanical loads using a calibration matrix is fully covered in this paper.

#### 1. 서론

기계 장치에 대하여 에너지를 전달하는 가장 중요한 요소는 축(shaft or axle)이다. 자동차의 엔진 출력을 바퀴에 의한 차량 추진력으로 변환 시킨다든지 선박의 경우 스크류까지의 동력전달 장치 등등, 축의 쓰임새는 일일이 열거할 수 없을 정도로 많다. 에너지 전달장치인 축에는 항상

기계적인 부하가 작용된다. 이러한 기계적 부하는 반복적으로 끊임없이 작용되는 부하, 그리고 순간적인 충격에 의한 부하로 구분될 수 있다. 기계 구조물의 구조 및 작동환경에 따라서 변하는 부하의 크기가 예측되고 이를 근거로 축 설계가 진행된다. 반복적인 부하는 축의 수명과 연관되며, 순간적인 충격부하는 축의 안전설계에 영향을 미치게 된다. 따라서, 축을 대량으로 생산하기 전에 시제품을 사용하여, 축에 걸리는 부하를 측정하고 분석하는 작업은 성공적인 축 설계 및 제작에 매우 중요한 업무이다.

축에 작용하는 기계적 부하는 동력전달에 연관된 축 토크(torque), 그리고 토크 전달방향에

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부  
E-mail : nys@kangwon.ac.kr  
TEL : (033)250-6376 FAX : (033)257-4190

\* 회원, 강원대학교 대학원 메카트로닉스 전공

\*\* 회원, 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부

대한 두 직교 방향으로의 굽힘 모멘트(bending moment)로 구분될 수 있다. 축에 작용하는 3-축 방향의 부하를 측정하는 가장 보편적이면서 거의 유일한 방법은 스트레인 게이지를 부착하고 여기서 출력되는 신호를 모니터링하는 것이다. 이러한 계측 방법은 다음과 같은 두 가지 문제에 대한 해답을 제공하여야 사용 가능한 방법이 된다. 첫 번째 문제는 스트레인 게이지 회로 보정(calibration)에 관한 문제이다. 동력 전달 축에 스트레인 게이지를 부착 시키고 관련 증폭회로를 설계 제작 함으로서 축 부하에 비례하는 전기 신호를 얻을 수 있다. 이 관계를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$M = kV \tag{1}$$

여기서,

$V$ = 스트레인 게이지 증폭회로 출력전압 (volt)

$M$ = 축에 걸리는 기계적 부하 (Nm)

$k$ = 스트레인 게이지 증폭회로의 민감도 (sensitivity, Nm/volt)

식 (1)에서 측정 가능한 량은 스트레인 게이지 증폭회로 출력전압(volt)인  $V$  이다. 그러나, 민감도를 나타내는  $k$  의 값을 모르기 때문에 기계적 부하에 비례한 전기 신호를 얻는다 하더라도, 정확한 기계 부하 량을 알 수가 없다. 따라서, 식 (1)의 민감도(sensitivity) 값을 알아내는 것은 스트레인 게이지를 이용한 계측에 있어서, 항상 요구되는 매우 필수적인 단계라 할 수 있다. 이러한 작업을 스트레인 게이지 증폭회로의 보정(calibration) 이라 부른다. 두 번째 문제는 축의 회전운동에서 비롯 된다. 스트레인 게이지들은 회전하는 축 상에 설치되지만, 모니터링 시스템은 정지된 공간에 설치된다. 즉, 이 두 장치간의 직접적인 선 연결이 불가능하게 된다. 이를 해결하는 방법은 기계식 또는 전기식 방법으로 구분될 수 있다. 기계적인 방법은 슬립 링(slip ring)을 사용하는 것이다. 일반적으로 회전 축의 끝 부분이나 축 중간과 구조물의 고정 지지부 사이에 슬립 링을 설치하게 된다. 슬립 링을 설치하기 위하여는 기계 구조물의 수정 설계가 필요하다는 점, 기계적 스위칭에 의한 노이즈 문제등이 이 방법의 약점으로 알려져 있다. 전기적인 방식은 무선 통신 또는 전자기적인

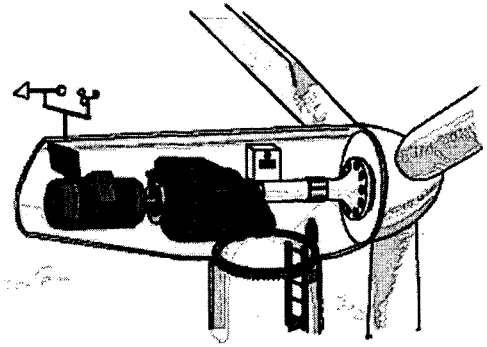


Fig. 1 Schematics of a Power Transmission Mechanism in a WT

특성을 이용한 비접촉식 통신방법(telemetry) 이다. 비교적 설치 방법이 간단하고, 디지털 통신 방식등을 이용하여 노이즈 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구는 풍력발전기의 회전축 및 회전날개에 작용하는 기계적 부하를 측정하는 모니터링 시스템을 개발하는 것을 목표로 한다. Fig. 1 은 풍력 발전기의 동력 전달계 및 발전기에 대한 개략적 구성을 보여 주고 있다. 날개에 의하여 생성된 회전 토크는 주축을 통해서 증속기에 전달되며 발전기를 회전시켜, 결국 전기 에너지로 변환된다. 본 연구에서는 축소형 풍력 발전기를 대상으로 풍력 발전기의 주축(main shaft or low speed shaft) 및 회전 날개의 부하를 측정하는 시스템을 개발한다. 앞서 제기된 2 가지 문제를 해결하는 절차가 본 논문을 통하여 자세히 소개된다. 본 논문의 구성은 아래와 같다. 제 2 장에서는 IEC-61400-13 에서 규정하고 있는 풍력 발전기 기계적 구조물의 설계 검증(design evaluation) 및 인증(certification)을 위한 부하 측정 시스템 구성에 관한 소개를 한다.<sup>(1,2)</sup> 아울러, 스트레인 게이지 회로 보정을 위한 외부하중 인가시험에 관한 논의를 한다. 제 3 장에서는 1kW 소형 풍력발전기에 대한 부하 측정 시스템에 관하여 소개하고 그 실험 결과를 정리한다. 또한 제 4 장에서는 보정 결과를 사용하여 기계요소에 발생된 부하의 량을 결정하려 할 때, 그 불확실성의 크기가 어느 정도가 되는지에 관한 해석적 연구 결과가 제시되었다.

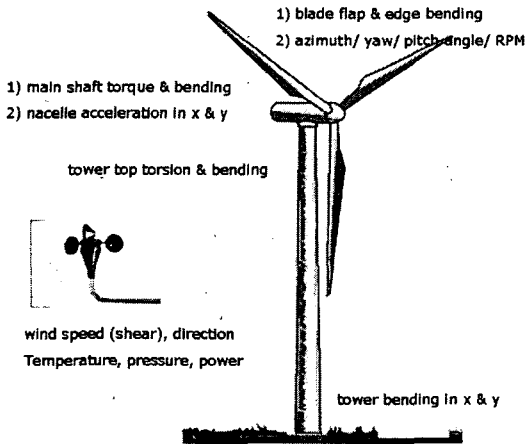


Fig. 2 Signals for a load measurement system

## 2. 풍력발전기의 부하 측정 시스템

풍력발전기에 인가되는 주된 기계적 하중은 공기역학적인 관계에 의해 발생하는 반복 피로하중이다. 즉, 풍력발전기의 날개는 헬리콥터의 날개보다 피로파괴에 이르는 반복하중 횟수가 10 배 이상 되도록 설계되어야 하는 기계적 부품이다.<sup>(3)</sup> 한편, I 등급(class 1) 풍력발전기는 50m/s 정도의 태풍에 의한 일시적인 공기역학적인 부하도 견디도록 설계되어야 한다.<sup>(1)</sup> 이러한 모든 상황을 고려하여 풍력발전기의 기계적 구조물이 설계된다. 대량 생산에 앞서, 풍력발전기에 걸리는 기계적 부하를 측정하고 분석하는 작업은 제품의 설계검증을 위하여 매우 중요한 업무이다. 또한, 공인된 시험기관으로부터 풍력발전기의 인증(certification)을 획득하기 위하여서도 위와 같은 작업은 반드시 수행되어야 한다. 이 장에서는 풍력발전기에 부하측정 시스템에 관한 구성과 스트레인 게이지 신호보정 방법에 관한 소개를 한다.

### 2.1 풍력발전기의 기계적 부하 측정시스템

풍력 발전기의 주요 기계요소는 회전 날개 (blade), 주축(low speed shaft), 그리고 발전기 타워 (tower)로 구성된다. 이 구조물에 걸리는 기계적 하중은 스트레인 게이지 회로에 의하여 측정된다. 풍력 발전기의 기계적 부하 측정을 위하여, IEC 61400-13 에서 요구하고 있는 최소한의 신호들을 Fig. 2 에 도시하였다. 주로 3 가지 신호들로 구성

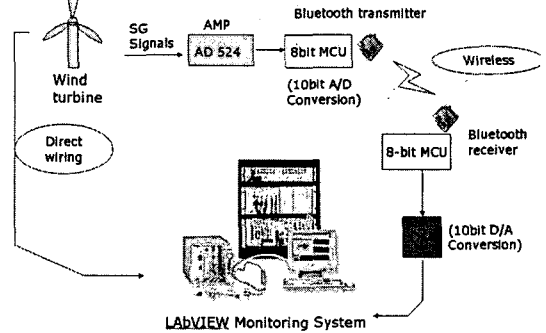


Fig. 3 Schematics of a DDV actuator loop closure

되어 있음을 볼 수 있다. 스트레인 게이지 회로로 측정되는 기계 구조물의 부하 신호, 바람의 상태를 측정하는 풍향 관련 신호, 그리고 발전기의 운전 상태를 나타내는 신호들로 구성된다. 이 신호들 중에서 발전기 날개 및 주축에 설치되는 총 5 개의 스트레인 게이지 회로들은 회전하는 기계 요소 위에 존재한다. 이 신호들을 LabVIEW 모니터링 시스템에 접속시키기 위하여, Fig. 3 에 도시된 바와 같이 블루투스(Bluetooth) 근거리 통신 기술이 사용되었다. 스트레인 게이지 출력신호는 증폭되어 A/D 변환된 후 8-비트 마이크로프로세서인 ATmega128 의 UART 레지스터에 순차적으로 입력되어 블루투스 송신모듈로 전송된다. 데이터 수신부는 송신부의 역순으로 기능하며, 최종 변환된 아날로그 신호는 LabVIEW 모니터링 시스템으로 입력된다. 이 시스템의 데이터 샘플링 속도는 블루투스 통신 기술에 의하여 제한된다. 본 시스템에서는 안정적인 데이터 송수신을 위하여 9600 bps 의 통신속도를 사용하므로, 대략 109Hz 의 샘플링 속도로 날개 및 주축에 발생하는 5 개 채널의 기계적 부하 정보를 수집하게 된다.

### 2.2 스트레인 게이지 증폭회로 보정 방법

풍력 발전기 날개 및 주축에 설치된 스트레인 게이지 증폭회로의 보정(calibration)을 위하여 다음과 같은 3 가지 종류의 실험이 필요하다.

#### 2.2.1 엣지(edge) 방향 하중인가 시험

Fig. 4 는 발전기 날개의 엣지(edge) 방향으로 기계적 하중(F)을 가하면서 데이터를 얻는 실험을

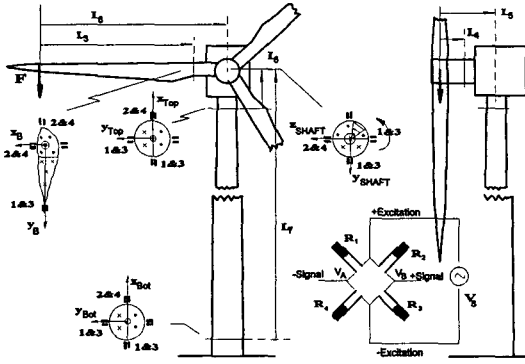


Fig. 4 Schematics of a blade edgewise loading

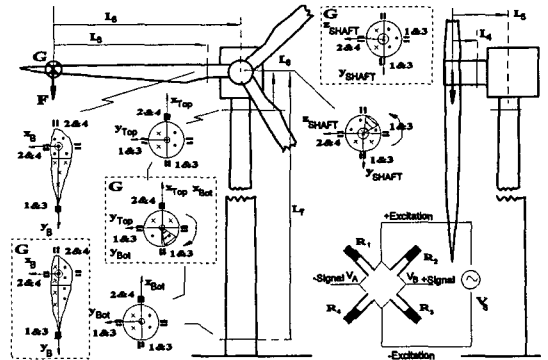


Fig. 6 (a) Schematics of a blade edge and flapwise loading

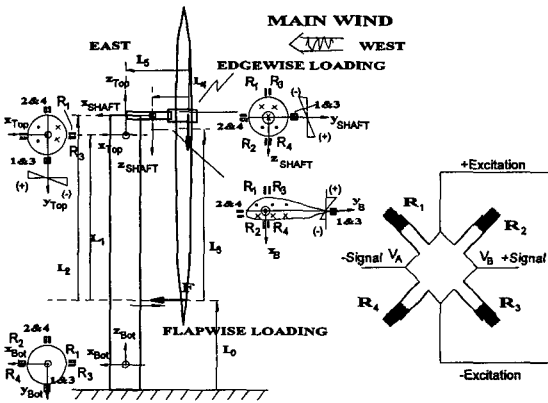


Fig. 5 Schematics of a blade flapwise loading

개략적으로 나타낸다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 스트레인 게이지가 설치된 날개에 지면 방향으로  $F$ 의 힘을 가하면, 발전기 기계 구조물의 각 단면에서는 그림에 그려진 것과 같은 응력분포가 발생된다. 여기서, ‘.’으로 표기된 부분은 인장응력, 그리고 ‘x’로 표시된 부분은 압축 응력을 받게 된다. 여기서 사용된 좌표계는 IEC61400-13에서 정의한 것을 그대로 사용하였다.<sup>(1)</sup> 외부에서 가해진 하중,  $F$ 에 의하여 발전기 주축에 걸리는 모멘트는 아래의 식으로 주어진다.

$$M_{x\_shaft} = -F \times L_3 \quad M_{y\_shaft} = 0 \quad M_{z\_shaft} = -F \times L_4 \quad (1)$$

위 식에서  $x$ -축 방향 모멘트는 축의 회전 토크이며, 나머지 두 모멘트는 각 직교 축으로의 굽힘 모멘트이다. 동일한 하중,  $F$ 에 대하여 날개에 걸리는 모멘트는 아래와 같다.

$$M_{x\_blade} = -F \times L_3 \quad M_{y\_blade} = 0 \quad (2)$$

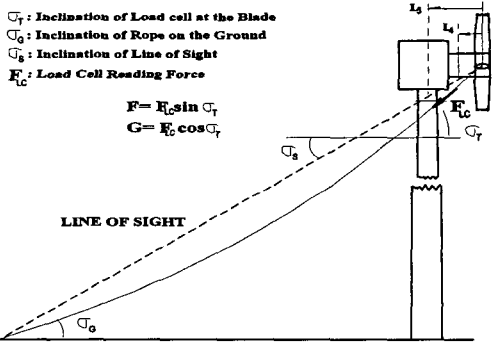


Fig. 6 (b) Side view of a blade edge and flapwise loading

날개의 엣지 방향으로 강성이 크므로, 외부 하중 ( $F$ )에 의한 처짐량은 작을 것이라 예상된다. 따라서, 식 (1)과 (2)에서  $L_3$ 이나  $L_4$ 또한  $L_3$ 의 값은 외부 하중,  $F$ 의 크기 변화에 대하여 거의 변하지 않는다.

### 2.2.2 플랩(flap) 방향 하중인가 시험

발전기 날개 플랩 방향으로 하중을 인가한 경우 각 기계 요소에 발생한 응력 분포가 Fig. 5에 도시되어 있다. 이 때 주축 및 날개에 걸리는 모멘트는 식 (3)과 (4)로 표현된다.

$$M_{x\_shaft} = 0 \quad M_{y\_shaft} = F \times L_2 \quad M_{z\_shaft} = 0 \quad (3)$$

$$M_{x\_blade} = 0 \quad M_{y\_blade} = F \times L_3' \quad (4)$$

날개를 회전시켜 가면서 동일한 실험을 수행하면 정확한 보정을 위한 더 많은 정보를 얻을 수 있다. 특히, 주축에 설치된 각 스트레인 게이지 출력신호간의 간섭(crosstalk) 크기를 결정하기 위하여는 이러한 실험은 부가적으로 수행되어야 한다.

2.2.3 플랩 엷지 방향 복합 하중인가 시험

스트레인 게이지가 설치된 날개에 Fig. 6 과 같 이 하중을 가한다. 가한 하중의 크기를  $F_{LC}$  라 할 때, 날개에 작용하는 엷지 방향 하중,  $F$ , 그리고 플랩 방향 하중,  $G$ ,는 아래의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} F &= F_{LC} \sin \sigma_T \\ G &= F_{LC} \cos \sigma_T \end{aligned} \quad (5)$$

따라서, 이 실험은 날개에 엷지 그리고 플랩 양방 향으로 동시에 하중을 가할 수 있고, 특히, 타워 축에 회전 모멘트(torsion)을 인가할 수 있는 실험 이다. 이 실험에서 주축 및 날개에 걸리는 모멘트 는 식 (6)과 (7)로 표현된다.

$$\begin{aligned} M_{x\_shaft} &= -F_{LC} \sin \sigma_T \times L_8 = -F \times L_8 \\ M_{y\_shaft} &= F_{LC} \cos \sigma_T \times L_8 = G \times L_8 \\ M_{z\_shaft} &= -F_{LC} \sin \sigma_T \times L_4 = -F \times L_4 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} M_{x\_blade} &= -F_{LC} \sin \sigma_T \times L_3 = -F \times L_3 \\ M_{y\_blade} &= F_{LC} \cos \sigma_T \times L_3' = G \times L_3' \end{aligned} \quad (7)$$

지금까지 풍력 발전기의 주요 기계요소 에 설치된 스트레인 게이지 증폭회로를 보정하기 위한 실험 방법 에 대한 간략한 소개를 하였다. 다음 장에서

는 1 kW 풍력 발전기를 대상으로 실험한 결과를 논의한다.

3. 스트레인 게이지 회로 보정 실험결과

1 kW 소형 풍력발전기의 회전 날개 루트(root)부 에 2 개, 주축 부위에 3 개, 그리고 타워에 3 개, 총 8 개의 풀 브리지(full bridge) 스트레인 게이지를 부착하였다. Fig. 7의 우측 상단에 있는 사진은 실험에 사용된 1kW 풍력 발전기이다. Fig. 7의 또 다른 사진은 주축에 걸리는 3 개 방향 모멘트를 측정하기 위한 스트레인 게이지 설치 모습을 보여준다. Fig. 8 은 플랩 방향 하중인가 시험에 대한 그림이다. 턴 버클(turnbuckle)을 사용하여 와이어의 길이를 조절 함으로서 인가 하중( $F$ )의 크기를 변화시켰다. 와이어의 장력( $F$ )은 실험실에서 자체 제작한 로드 셀에 의하여 측정되며, Fig. 8 의 중간 부분이 이를 보여주고 있다. 하중( $F$ )의 크기를 변화시켜 가면서, 앞서 설명된 총 8 개의 스트레인 게이지 출력신호의 값을 기록하였다. 엷지 그리고 플랩 엷지 방향 복합 하중시험도 마찬가지로 방법으로 수행 되었다.

본 논문에서는 발전기 날개에 한정하여 스트레 인 게이지 회로 보정 실험결과를 소개하기로 한다 3 가지 하중 시험에 있어서, 발전기 날개에 대한 실험결과 는 Fig. 9 에 정리되었다. 위에서부터 순차 적으로 엷지, 플랩, 그리고 플랩 엷지 방향 복합

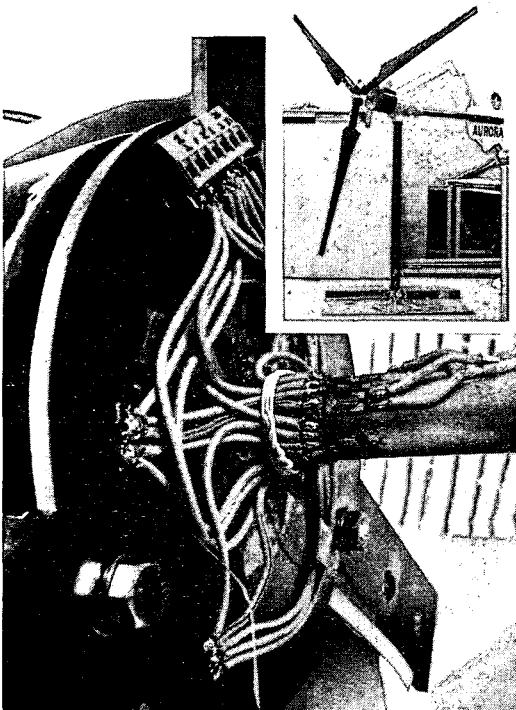


Fig. 7 1kW wind turbine and strain gauge installation on a low speed shaft



Fig. 8 A blade flapwise loading for a 1kW wind turbine

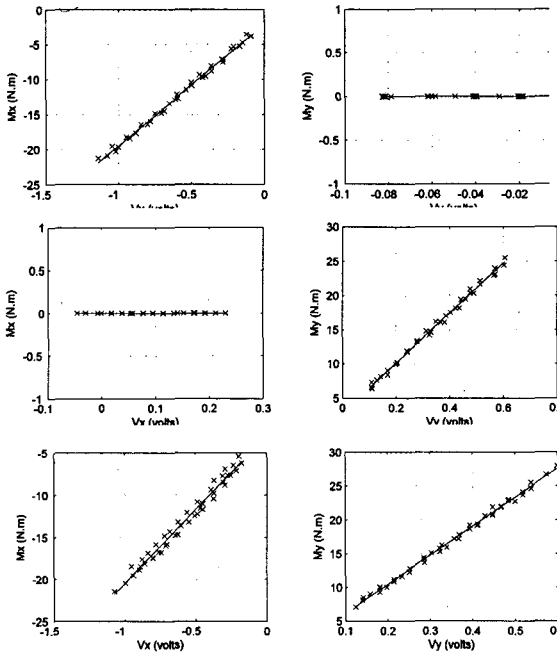


Fig. 9 Experimental data for various loading

하중시험에 대한 결과를 나타낸다. 위 그림에서 직선은 최소 오차 자승법(least square error method)으로 결정되었으며, 모멘트의 단위는 Nm 이고 전압의 단위는 volts 이다. 엣지 방향 하중 실험 결과를 보면, 가해진 기계적 하중(F)에 의하여 x-축 방향 (edgewise direction)으로 설치된 스트레인 게이지 증폭회로 출력전압이 주로 변화되지만, y-축 방향(flapwise)으로 설치된 스트레인 게이지 회로 출력전압도 작은 량이긴 하지만 변화됨을 관찰할 수 있다. 모든 조건이 이상적이라면, 엣지 방향 하중에 의하여는 x-축 방향 회로에 대한 출력전압만이 발생되어야 한다. 그러나, 90° 간격으로 설치되어야 하는 두 축 스트레인 게이지의 설치 오차, 또는 하중시 발생하는 블레이드의 휨 등으로 인한 불 완전성으로, 즉 두 축 방향으로 동시에 하중을 인가하게 되는, 문제 등으로 인하여 y-축으로도 전압이 발생된다. 플랩 방향 하중 인가시험에 있어서도 동일한 현상이 관찰된다. 이제 얻어진 실험 데이터를 바탕으로 발전기 날개에 형성되는 굽힘 모멘트와 스트레인 게이지 출력전압 간의 관계식을 구하여 보자.

$$V_x = a_{11}M_{x\_blade} + a_{12}M_{y\_blade} = 0.0575M_{x\_blade} + a_{12}M_{y\_blade} \tag{8}$$

$$V_y = a_{21}M_{x\_blade} + a_{22}M_{y\_blade} = a_{21}M_{x\_blade} + 0.0273M_{y\_blade}$$

위 식에서  $a_{11}$  와  $a_{22}$  는 Fig. 9 의 엣지 그리고 플랩 방향 실험 데이터를 이용하여, 최소 오차 자승법으로 각각 구한 것이다. 또한,  $a_{12}$  와  $a_{21}$  은 두 축 간의 간섭(crosstalk)을 표현하는 계수이며, 다음과 같이 결정된다. 먼저,  $a_{12}$  는 플랩 하중 시험 데이터를 사용하여 구할 수 있다. 즉, Fig. 9 의 좌측 중간 데이터는 플랩 방향 시험에 의한 데이터이며, y-축으로 가해진 외부 모멘트에 의하여 발생한 x-축 방향으로의 스트레인 게이지 전압( $V_x$ )을 나타낸다. 이 값( $V_x$ )은 0 이 되어야 하지만, 간섭 효과에 의하여 0 이 아닌 값을 갖게 되며, 다음의 관계식으로 표현된다.

$$V_x = a_{12}M_{y\_blade} \tag{9}$$

최소 오차 자승법에 의한 해는 다음과 같이 주어진다.

$$a_{12} = (M_{y\_blade}^T \times M_{y\_blade})^{-1} \times M_{y\_blade}^T \times V_x = (M_{y\_blade})^\dagger V_x \tag{10}$$

마찬가지 방법으로  $a_{21}$  을 결정할 수 있으며, 여기서 사용되는 데이터는 엣지 방향 하중시험에 대한 실험결과가 사용된다.

위의 논의를 종합하면 스트레인 게이지 출력전압과 발전기 날개에 걸리는 모멘트간의 보정(calibration) 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{x\_blade} \\ M_{y\_blade} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0575 & 0.0079 \\ 0.0040 & 0.0273 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{x\_blade} \\ M_{y\_blade} \end{Bmatrix} \tag{11}$$

또한, 식 (11)로부터 아래의 식 (12)가 유도된다.

$$\begin{Bmatrix} M_{x\_blade} \\ M_{y\_blade} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 17.7508 & -5.1002 \\ -2.6250 & 37.3329 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} \tag{12}$$

이제 플랩 엣지 방향 복합 하중 실험 데이터를 사용하여 위 해석에 대한 타당성 검토를 하여 보자. 아래 그림 Fig. 10 에서 좌측 2 개 그림은 이 실험으로 얻은 각 축으로의 전압과 모멘트를 다시 그린 것이다. 보는 바와 같이 데이터의 분산 정도가 상당히 큼을 볼 수 있다. 이와 같은 데이터의

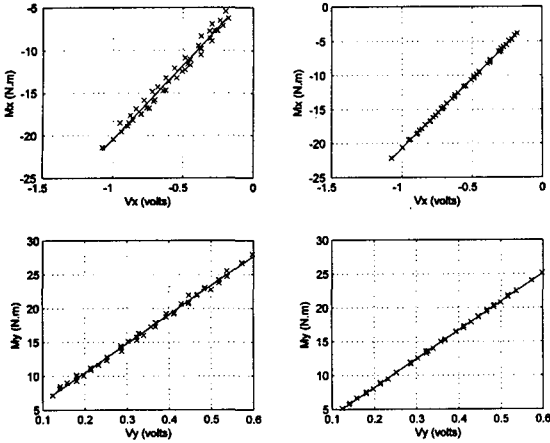


Fig. 10 Data correction based on the calibration relation

분산은 두 축에 설치된 스트레인 게이지 회로 사이에 상당한 크기의 간섭이 존재 함을 의미하는 것이다. 한편, 우측 2 개 그림은 이 실험에서 얻어진 데이터를 식 (12)을 사용하여, 각 축으로의 모멘트를 다시 계산한 후,  $V_x$  와  $V_y$  의 함수로 그린 것이다. 데이터의 상관관계가 매우 향상되었음을 확인할 수 있다.

4. 날개부하 측정 불확실성에 관한 해석

어떤 량,  $y$  의 값이 임의의 변수  $x_1, x_2, \dots, x_n$  에 의해 결정된다면, 즉  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  의 표현에서, 독립변수  $x_i$  의 불확실성(uncertainty)에 의한  $y$  의 불확실성의 정도는 아래의 식으로 표현된다.

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} \text{cov}(x_i, x_j) \quad (13)$$

여기서, 임의의 변수,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  들이 모두 서로 독립적(independent) 이라면, 식 (13)의 좌측에서 두 번째 항은 0 이 된다.<sup>(4)</sup> 한편, 식 (12)에 의하여 엿지 방향으로의 하중은 아래의 식으로 결정된다.

$$M_{x\_blade} = d_{11}V_x + d_{12}V_y \quad (14)$$

논의의 간결을 위하여  $V_x, V_y, d_{11}$ , 그리고  $d_{12}$  는 서로 독립적이라고 가정한다. 이 조건하에서  $M_{x\_blade}$  의 불확실성은 아래와 같이 주어진다.

$$u_{M_x}^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial M}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 = V_x^2 u_{d_{11}}^2 + V_y^2 u_{d_{12}}^2 + d_{11}^2 u_{V_x}^2 + d_{12}^2 u_{V_y}^2 \quad (15)$$

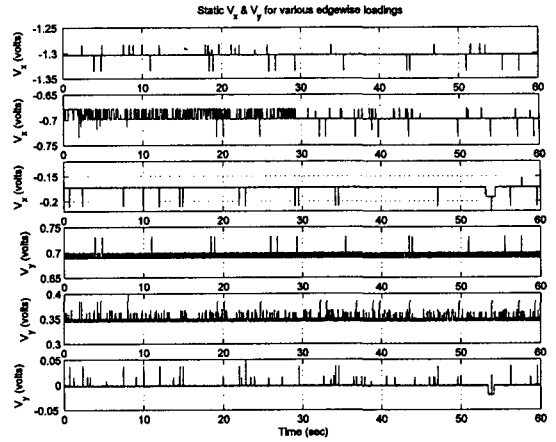


Fig. 11 Strain gauge outputs in x- and y-direction for a static edgewise loading

식 (15)의 우측 식에서 처음 두 항들은 스트레인 게이지 보정 작업(calibration process)에 의한 불확실성을 나타내며, 나머지 두 항은 스트레인 게이지 출력 신호의 노이즈 성분에 의한  $M_{x\_blade}$  계측 불확실성을 각각 나타낸다. 이제 식 (15)의 각 항의 크기를 결정하여 보자.

4.1  $u_{V_x}^2$  와  $u_{V_y}^2$  의 결정

Fig. 4 에 설명된 바와 같이, 엿지 방향으로 정적인 하중(static loading)을 걸었을 때, 엿지 그리고 플랩 방향의 스트레인 게이지 증폭회로의 출력 전압은 Fig. 11 과 같이 나타난다. 이 실험 데이터로부터 각 데이터의 분산 값을 구할 수 있으므로,  $u_{V_x}^2$  와  $u_{V_y}^2$  를 실험적으로 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} u_{V_x} &= 0.0084 \text{ volts} \\ u_{V_y} &= 0.0063 \text{ volts} \end{aligned} \quad (16)$$

4.2  $u_{d_{11}}^2$  와  $u_{d_{12}}^2$  의 결정

식 (12)에서  $d_{11} = \frac{a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}$  이므로,  $d_{11}$  에 대한 불확실성은 다음 식으로 결정된다.

$$\begin{aligned} s_{d_{11}}^2 &= \left( \frac{\partial d_{11}}{\partial a_{11}} \right)^2 u_{a_{11}}^2 + \left( \frac{\partial d_{11}}{\partial a_{12}} \right)^2 u_{a_{12}}^2 + \left( \frac{\partial d_{11}}{\partial a_{13}} \right)^2 u_{a_{13}}^2 + \left( \frac{\partial d_{11}}{\partial a_{14}} \right)^2 u_{a_{14}}^2 \quad (17) \\ &= \frac{a_{12}^4 u_{a_{11}}^2 + (a_{21}a_{22})^2 u_{a_{12}}^2 + (a_{12}a_{22})^2 u_{a_{21}}^2 + (a_{12}a_{21})^2 u_{a_{22}}^2}{(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^4} \end{aligned}$$

또한,  $d_{12} = \frac{-a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}$  이므로

$$s_{d_{12}}^2 = \left(\frac{\partial d_{12}}{\partial a_{11}}\right)^2 u_{a_{11}}^2 + \left(\frac{\partial d_{12}}{\partial a_{12}}\right)^2 u_{a_{12}}^2 + \left(\frac{\partial d_{12}}{\partial a_{13}}\right)^2 u_{a_{13}}^2 + \left(\frac{\partial d_{12}}{\partial a_{14}}\right)^2 u_{a_{14}}^2 \quad (18)$$

$$= \frac{(a_{12}a_{22})^2 u_{a_{11}}^2 + (a_{11}a_{22})^2 u_{a_{12}}^2 + a_{12}^4 u_{a_{21}}^2 + (a_{11}a_{12})^2 u_{a_{22}}^2}{(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})^4}$$

위에서 유도된 식 (17), (18)을 계산하기 위하여는  $u_{a_{11}}, \dots, u_{a_{22}}$  의 값을 결정하여야 한다. 앞 절에서도 설명되었지만,  $a_{11}$  과  $a_{21}$  은 엣지방향 하중시험 (edgewise loading)에 의해, 그리고  $a_{12}$  과  $a_{22}$  는 플랩방향 하중시험 (flapwise loading)에 의해 결정된다. 즉,  $a_{11} = \frac{V_x}{M_{x\_blade}} = -\frac{V_x}{F \times L_3}$  이므로  $a_{11}$  의 불확실성 크기는 아래의 식으로 결정된다.

$$u_{a_{11}}^2 = \left(\frac{\partial a_{11}}{\partial V_x}\right)^2 u_{V_x}^2 + \left(\frac{\partial a_{11}}{\partial F}\right)^2 u_F^2 = \left(\frac{1}{F \times L_3}\right)^2 u_{V_x}^2 + \left(\frac{V_x}{F^2 L_3}\right)^2 u_F^2 \quad (19)$$

마찬가지 방법으로  $u_{a_{12}}, u_{a_{21}}, u_{a_{22}}$  의 값들도 모두 구할 수 있다. 위 식에서  $u_F$  의 값은 로드 셀 특성에서 얻을 수 있다. 실험적으로 결정된 이 값은 아래와 같다

$$u_F = 0.02 \text{ kg}_f = 0.1962 \text{ N} \quad (20)$$

### 4.3 $V_x$ 와 $V_y$ , 그리고 $F$ 의 결정

식 (19)에서  $u_{a_{11}}$  을 결정하기 위하여는  $V_x$  ( $V_y$ ), 그리고  $F$  의 값들을 알아야 한다. 스트레인 게이지 증폭회로 보정(calibration)시 이들의 값은 반복적인 실험에 의하여 결정되므로 하나의 값이 될 수 없다. 식 (19)를 최악의 조건으로 계산한다면, 이 값들을 엣지 및 플랩 방향 하중 시험 데이터에서 최대값들로 선정하여야 한다. 즉,

$$V_x = 1.17 \text{ volts}, F = 31.17 \text{ N} \quad (21)$$

$$V_y = 0.62 \text{ volts}, F = 40.3 \text{ N}$$

위의 결과를 모두 종합하면, 스트레인 게이지 증폭회로를 사용하여 계측되는 발전기 날개 루트 부에서의 기계적 하중,  $M_{x\_blade}$  그리고  $M_{y\_blade}$  의 불확실성 크기는 아래의 식으로 결정된다.

$$u_{M_x} = \sqrt{V_x^2 s_{d_{11}}^2 + V_y^2 s_{d_{12}}^2 + d_{11}^2 s_{V_x}^2 + d_{12}^2 s_{V_y}^2} = 0.2283 \text{ Nm} \quad (22)$$

$$u_{M_y} = \sqrt{V_x^2 s_{d_{21}}^2 + V_y^2 s_{d_{22}}^2 + d_{21}^2 s_{V_x}^2 + d_{22}^2 s_{V_y}^2} = 0.4858 \text{ Nm}$$

## 5. 결론

기계요소에 인가되는 기계적 하중을 측정하려 할때, 스트레인 게이지 증폭회로를 사용하는 계측 방법이 가장 보편적이다. 이 계측 방법의 실제적 적용을 위하여는 스트레인 게이지 회로 보정 작업 (calibration process)이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 소형 풍력발전기를 대상으로 발전기의 주축 및 날개에 걸리는 기계적 하중을 측정하는 시스템에 대한 논의를 하였다. 비접촉식 통신방법으로서 폴 브리지형 스트레인 게이지 신호 5 개 채널 데이터를 110 Hz 까지 송수신할 수 있는 블루투스 근거리 통신기법이 사용되었다. 한편, 풍력발전기의 주요 기계요소에 설치된 스트레인 게이지 출력 신호를 보정하기 위한 여러 하중시험에 대한 논의 후, 최소 오차자승법을 사용하여 보정 매트릭스 (calibration matrix)를 유도하는 방법을 제시하였다. 마지막으로, 보정 매트릭스를 사용한 기계요소의 부하 계측에 있어서 그 불확실성 정도가 얼마나 되는가에 대한 해석적 연구가 수행되었다.

## 후기

본 연구는 에너지관리공단의 풍력실증연구사업 지원연구비로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) IEC 61400-1, 1999, "Wind Turbine Generator Systems - Part 1: Safety Requirements," *International Electrotechnical Commission*.
- (2) IEC 61400-13, "Wind Turbine Generator Systems - Part 13: Measurements of Mechanical Loads," *International Electrotechnical Commission*.
- (3) Sutherland, H.J., 1999, "On the Fatigue Analysis of Wind Turbines," Sandia National Laboratory, SAND99-0089.
- (4) Doebelin, E.O., 1990, "Measurement Systems Application and Design," McGraw-Hill Publishing Company, pp. 58~64