

## 단일 휘트스톤 브리지 플렉서를 이용한 풍동시험에서의 힌지모멘트 측정 연구

조철영<sup>1)</sup> · 박종호<sup>\*,2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제1기술연구본부

<sup>2)</sup> 충남대학교 기계공학과

## The Study of Hinge Moment Measurement in Wind Tunnel Test Using Single Wheatstone Bridge Flexure

Cheolyoung Cho<sup>1)</sup> · Jongho Park<sup>\*,2)</sup>

<sup>1)</sup> *The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

<sup>2)</sup> *Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University, Korea*

(Received 23 December 2015 / Revised 9 March 2016 / Accepted 8 July 2016)

### ABSTRACT

In this study, a method using single Wheatstone bridge flexure has been presented to measure hinge moment acting on control surfaces of wind tunnel models. The structural simplicity of the flexure reduces difficulty regarding gauging and wire-routing, and also makes it feasible to install flexures even inside thin wings. Some flexures were designed and fabricated under typical aerodynamic loads in wind tunnel test, and the strains on the flexure according to applied loads were compared with the result of the analysis by finite element method. The relation between applied loads and output signals showed good linearity, and the standard deviation on the residual errors from linear equation obtained by least square method was within 1.0 % of the maximum design moments. In addition, the FEM analysis on the thickness of load-connecting part of the flexure showed that the sensitivity was improved as the thickness became thin as much as desired to avoid buckling.

Key Words : Hinge Moment Measurement(힌지모멘트측정), Wind Tunnel Test(풍동시험), Strain Gauge Flexure(스트레인 게이지 플렉서), Control Surface(조종면), FEM(유한요소법)

### 기 호 설 명

$M_h$  = hinge moment acting on hinge axis

$M_g$  = moment acting on strain gauge

G.F. = gauge factor

$E_o$  = output signal voltage

$E_{in}$  = input voltage into Wheatstone bridge

$h$  = height of flexure section at strain gauge position

$b$  = width of flexure section at strain gauge position

\* Corresponding author, E-mail: jhpark@cnu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

$t$  = thickness of load-connecting part on flexure

$\sigma$  = stress

$E$  = Young's modulus

$\epsilon$  = strain

## 1. 서론

비행체는 날개에 장착된 구동기나 센서 등의 장치를 활용하여 조종면의 각도를 변화시켜 자세를 제어한다.

조종면 구동장치의 조종성능과 선정에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나는 조종면에 작용하는 힌지모멘트이다. 조종면을 작동시키는데 필요한 힌지모멘트가 클수록 구동장치의 크기가 증가하고, 구동장치 설치공간, 무게 증가에 따른 공력성능의 저하 등의 문제가 발생한다. 따라서, 비행체의 활공 및 기동 시에 조종면에 작용하는 힌지모멘트의 크기를 정확히 예측하고 검증하는 것은 매우 중요하다.

최근 박 등<sup>[1]</sup>은 실제 비행시험 결과를 이용하여 힌지모멘트를 시험적으로 측정하는 방법을 제시하였으나 이는 시제품이 있는 개발단계에서만 활용이 가능하고, 수치해석적 예측 역시, 경계층 박리와 같은 비선형 효과에 기인한 해석의 어려움으로<sup>[2]</sup>, 힌지모멘트 예측은 주로 풍동시험을 통하여 이루어져 왔다. 그러나, 풍동시설의 제한된 시험부 크기로 인하여 축소모형을 이용한 시험에서는 일반적인 6성분 밸런스를 사용하는 측정방법이 비용과 설치문제로 제한을 받게 되고 스트레인게이지 부착형 플렉서(flexure)의 사용 또한, 게이징(gauging) 및 다수의 전기 신호선들과 관련된 와이어-라우팅(wire-routing)의 어려움이 따르므로, 설치와 적용이 간편한 측정방법이 요구된다.

본 논문에서는 작은 두께로 제작이 가능한 구조적 형태와 단일 휘트스톤 브리지만으로 구성되는 비교적 단순한 측정 플렉서를 이용하여 축소모형의 풍동시험에서 힌지모멘트를 측정하는 방법을 제시하였다.

## 2. 날개 조종면의 힌지모멘트 측정원리

기존에 힌지모멘트 측정 풍동시험에서 주로 사용되어 온 방법은 Fig. 1에서 보인 바와 같이, 스트레인 게이지를 부착한 측정 플렉서를 날개의 내부에 외팔보

의 형태로 장착하고, 그 반대쪽 끝단에 조종면을 부착하는 방식이다.

조종면에 작용하는 공력하중(aerodynamic load)은 조종면과 조립되어 날개 고정부에 외팔보의 형태로 결합된 측정 플렉서로 전달되고, 플렉서 상의 일정 거리를 두고 위치한 2개의 휘트스톤 브리지를 통하여 계측 가능하다.

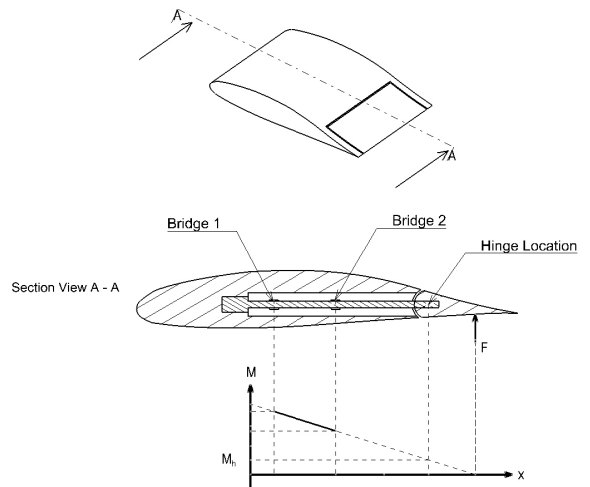


Fig. 1. Moment diagram on the flexure and section view of conventional hinge moment measurement model

Fig. 1의 모멘트 선도에 도시한 바와 같이, 각각의 휘트스톤 브리지에서 측정된 모멘트는 두 브리지 간의 거리와 이들의 상관관계에 의해 조종면에 작용하는 힘(F)과 작용점의 위치 계산에 사용된다. 이와 같은 방식에서는 주 관심사인 힌지모멘트의 크기뿐만 아니라, 등가합력 및 작용위치까지도 파악할 수 있지만, 실제의 많은 경우에는 조종면의 힌지축에 작용하는 모멘트의 크기 파악만으로도 충분하며, 측정 플렉서 당 2개의 휘트스톤 브리지 회로가 요구되는 점은 측정하고자 하는 조종면의 수가 증가함에 따라 게이징과 다수의 브리지 와이어를 계측장비로 연결해야 하는 와이어-라우팅을 용이하지 않게 한다. 또한, 구조상 스펜방향으로 긴 조종면이 중앙에 위치한 좁은 플렉서에만 부착되어 있으므로, 조종면 위의 등가합력이 작용하는 스펜방향의 위치에 따라 플렉서에 비틀림(torsion)을 유발하고 이에 기인한 비선형 간섭효과가 나타나는 단점이 있다. 이에 비해 단일 휘트스톤

브리지를 갖는 플렉서는 플렉서 상에 형성된 관통구를 힌지축으로 날개고정부에 구속함으로써 비틀림을 방지할 수 있으며, 측정에 요구되는 휘트스톤 브리지 회로의 수가 줄어드는 장점이 있다.

### 3. 단일 휘트스톤 브리지를 갖는 힌지모멘트 측정 플렉서

#### 3.1 힌지모멘트 측정 개념

Fig. 2의 단일 휘트스톤 브리지 회로 플렉서가 장착된 시험모형 날개부의 단면도에 나타난 바와 같이, 조종면은 플렉서와 연결될 뿐만 아니라, 날개의 고정부 상의 힌지축에 의해 구속된다.

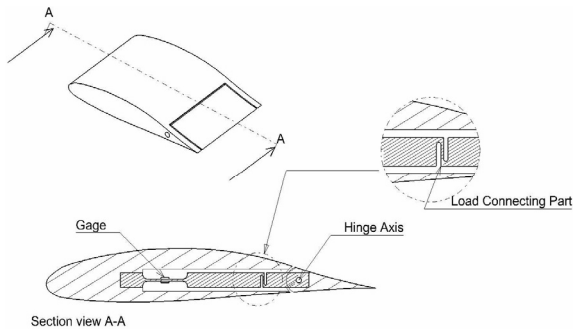


Fig. 2. Section view of the wing model using the flexure with single Wheatstone bridge

플렉서 상의 하중 작용구조와 모멘트 선도를 나타낸 Fig. 3으로부터 조종면에 작용하는 힘(F)은 조종면의 힌지축에 대하여 모멘트인  $M_h$ 로 작용하고, 이 모멘트는 힌지축으로부터 알려진 거리( $L_2$ ) 상에 위치한 점 B에 작용하는 힘과 평형을 이룬다.

점 B에 작용하는 힘은 점 B로부터 거리( $L_1$ )에 위치한 스트레인 게이지에 의하여 점 A에 작용하는 굽힘 모멘트( $M_g$ )로 측정된다. 이들의 관계는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$M_h = F \cdot L_3 = F_B \cdot L_2 = M_g \cdot \left( \frac{L_2}{L_1} \right) \quad (1)$$

따라서, 점 A에서의 작용 모멘트를 측정하고, 거리  $L_1$ ,  $L_2$ 와의 관계를 이용하여 힌지축 C에 작용하는 모

멘트( $M_h$ )를 구할 수 있게 된다.

측정하고자 하는 힌지모멘트( $M_h$ )의 예상 최대치를 고려하여, 길이비  $L_2/L_1$ 를 작게 함으로써 조종면 상에 작용하는 모멘트가 작더라도, 게이지 상에서는 크게 증폭된 상태의 모멘트( $M_g$ )를 측정할 수 있으며, 이와 같은 방식으로 동일한 작용 하중에 대해서도, 센서의 출력신호가 크게 나타나도록 민감도를 증가시키는 것이 가능하다.

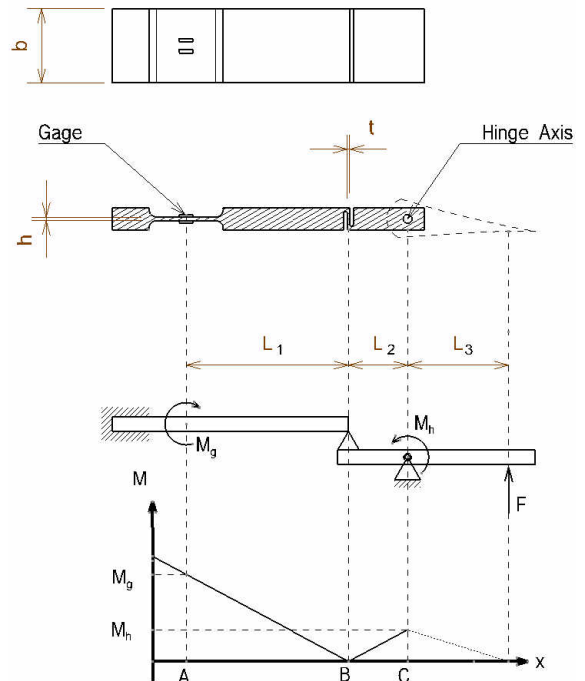


Fig. 3. Moment diagram and schematic of load acting on the flexure with single Wheatstone bridge

#### 3.2 플렉서 하중전달부(load-connecting part)의 두께(t)의 설계조건

Fig. 3의 점 B의 위치에서는 힘은 전달하되, 모멘트는 작용하지 않는 단순 지지부로 설계되어야 한다. 그러나, 날개 내부의 협소한 공간에 장착해야 하는 공간적 제약조건으로 인하여 플렉서 내에 소형 피벗(pivot) 구조를 구현하기에는 난점이 있으므로, 최대 하중조건 하에서 좌굴(buckling)이 발생하지 않는 최소 두께의 박막으로 설계한다.

좌굴이 발생하지 않는 박막의 최소두께는 양단이 고정된 경우에 대한 오일러 좌굴 방정식 식 (2)를 이

용하여 구할 수 있다.

$$F_B = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad (2)$$

여기서,  $l$ 은 박막의 높이,  $I$ 는 박막의 단면2차모멘트를 나타낸다.

박막의 두께가 모멘트의 전달을 억제할 정도로 충분히 얇지 않은 경우, 모멘트의 작용구조는 Fig. 4와 같다. 이와 같은 경우 시험 중 작용하는 모멘트가 플렉서 상에 작용하는 최대 모멘트가 되며, 민감도 증가를 위한 모멘트의 증폭은 가능하지 않다. 또한 모멘트 선도에서 보는 바와 같이, 스트레인 게이지의 부착위치에 따라, 작용모멘트의 크기가 '0'이 되는 곳도 존재하게 되므로 측정용 플렉서로 사용하기에는 적절치 않게 된다.

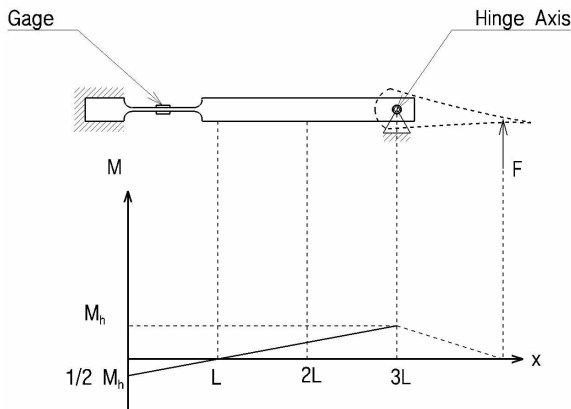


Fig. 4. Moment diagram in the case of the flexure without load connecting part

#### 4. 단일 휘트스톤 브리지 플렉서 설계/제작

이론해석과의 검증을 위해 단일 휘트스톤 게이지 플렉서를 설계 및 제작하고 게이지화하였다.

일반적인 스트레인 게이지 부착면에서 허용되는 변형률의 한계는 2,000  $\mu\text{m}/\text{m}$ 이나, 시험 중 측정기구가 받게 되는 축력, 비틀림, 횡력 등 모든 하중 성분에 의해 발생하는 기계적인 변형률들을 고려하여 측정하고자 하는 하중 성분의 최대 하중조건에서 변형률을 500~1,000  $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 설계하는 것이 타당하다<sup>[3]</sup>.

$n$  개의 스트레인 게이지를 갖는 브리지 출력전압은 입력전압에 대하여 다음과 같은 관계가 있다<sup>[3]</sup>.

$$E_o = E_{in} \cdot \left(\frac{n}{4}\right) \cdot (G.F.) \cdot \epsilon \quad (3)$$

식 (3)로부터 게이지계수 2.0의 스트레인 게이지 4개로 구성되는 휘트스톤 브리지는 1 V의 단위 입력전압에 대하여 변형률이 1,000  $\mu\text{m}/\text{m}$  일 때, 2 mV(millivolt)의 출력값을 나타내게 된다.

각 스트레인 게이지 브리지에 작용하는 굽힘모멘트에 의한 응력  $\sigma$ 는 폭  $h$ , 높이  $b$ 인 사각단면에 대하여, 식 (4)의 관계가 있다.

$$\sigma = \frac{6 \cdot M_y}{b \cdot h^2} = \epsilon \cdot E \quad (4)$$

조종면의 힌지모멘트는 시험속도, 받음각, 조종면의 크기 및 각도 등의 조건에 따라 다양한 값을 가진다. 본 연구에서는 활공하는 소형 비행체의 힌지모멘트 측정과 관련한 박 등<sup>[11]</sup>과 이 등<sup>[14]</sup>의 연구와 통상적인 축소모형의 조종면 면적과 평균시위 및 시험속도를 고려하여, Table 1과 같이 2 종류의 최대 힌지모멘트 조건을 가정하였으며, 각각 Type A와 Type B로 구분하였다.

Table 1. Estimation of the maximum hinge moments for control surfaces of model

	Type A	Type B
Maximum hinge moment(Nm)	0.099636	0.049818

예상되는 최대힌지모멘트 조건하에서 게이지 상에 작용하는 응력에 의한 변형률이 500~1,000  $\mu\text{m}/\text{m}$  이내에 유지되도록, 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 게이지 부착단면의 폭과 높이를 결정하였다.

주요 설계 치수를 Table 2에 정리하였다.

플렉서의 재료는 기본적으로 하중에 대한 변형률이 선형적이고 반복 하중 후의 무부하에서 원점으로 복귀되어야 한다<sup>[5]</sup>. 또한, 탄성한도가 크고 탄성계수가 작은 재료가 요구되므로 선형 탄성재료인 SUS630을 플렉서 제작용 가공소재로 선정하였다. 재료의 물성치는 Table 3과 같다<sup>[6]</sup>.

Table 2. Dimensions of flexures

	Type A	Type B
Maximum strain( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	751.2	912.7
Maximum output signal(mV/V)	1.50	1.83
Gauge section height, h(mm)	0.9	0.5
Gauge section width, b(mm)	10	10
Load connecting part(L.C.P.) thickness, t(mm)	0.2	0.2
Length between L.C.P and gauge section, $L_1$ (mm)	20	15
Length between L.C.P. and hinge axis, $L_2$ (mm)	10	10

Table 3. Material properties of SUS630

Properties(unit)	Value
Young's Modulus(GPa)	196
Poisson's ratio	0.272
Density( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7750
Tensile strength(GPa)	1105

5. 유한요소해석 및 플렉서 계측결과분석

단일 휘트스톤 브리지 플렉서(Type A)와 기존 2개의 휘트스톤 브리지 플렉서(Fig. 5참조)에 대하여 ANSYS<sup>®</sup> [7]를 이용한 유한요소해석을 실시하였다.

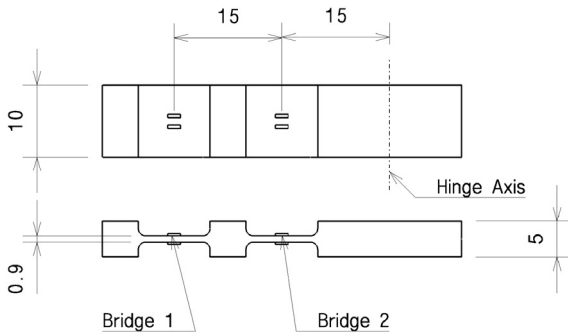


Fig. 5. Dimension of a conventional 2 Wheatstone bridge flexure

주어진 모멘트 조건 하에서 계산된 게이지 부착위치에서의 변형률들을 각각 Fig. 6에 그래프로 나타내었으며, 모멘트와 변형률 사이의 관계를 선형 일차식으로 함께 표시하였다. 실제 시험에서는 이들의 선형관계를 이용하여 측정된 전기신호로부터 작용모멘트를 계산하게 된다.

기존 측정방법과의 비교검증을 위하여, Table 1의 Type A와 Fig. 5의 기존 플렉서를 대상으로 다수의 힌지모멘트 조건들에 대한 게이지 부착위치에서의 변형률을 계산하였다. 계산된 변형률과 각 게이지의 특성인 선형관계식(Fig. 6참조)을 이용하여 각 게이지에서의 모멘트로 환산하였으며, 앞서 설명한 각 플렉서의 작동원리(Fig. 1과 Fig. 3)를 활용하여 힌지축에 작용하는 힌지모멘트로 환산하였다. 변형률 계산의 기준값인 모멘트에 대하여 각 브리지의 모멘트로부터 환산되어 구해진 힌지모멘트의 오차를 플렉서 설계 최대모멘트의 백분율로 Fig. 7에 나타내었다.

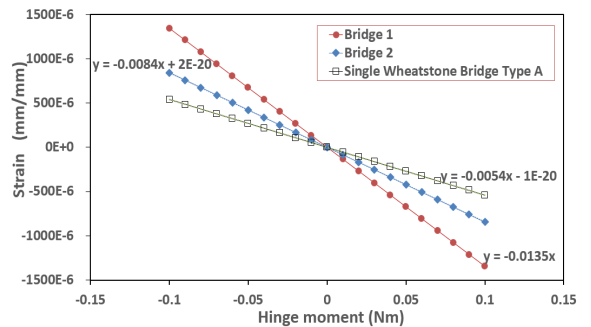


Fig. 6. FEM result of strains on moments at the gauge positions on flexures

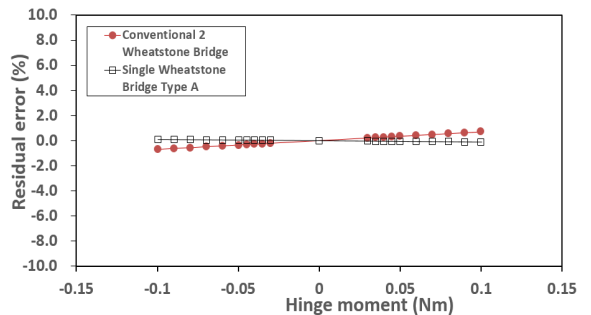


Fig. 7. Residual errors of the moments evaluated from the linear equation of each flexure using strains by FEM

Fig. 7의 그래프에서 보는 바와 같이, 두 가지 방법 모두  $\pm 0.7\%$  이내의 작은 오차를 보였으며, 이로써 단일 휘트스톤 브리지 플렉서 측정방법을 통하여 힌지모멘트 측정이 정밀하게 이루어질 수 있음을 알 수 있다. 또한 단일 휘트스톤 브리지 플렉서의 오차는  $\pm 0.1\%$  이내로 기존 방법에 비해서도 더 작은 수준의 오차를 나타냈다. 이는 기존 방법에서는 2개의 브리지로부터 얻어진 모멘트 값이 힌지모멘트 계산에 관여하므로 각 브리지의 모멘트 환산 오차가 합성된 결과로 나타날 수 있다.

유한요소해석을 통하여 얻어진 결과를 실제로 구현하고 이들 결과를 비교검증하기 위해 Table 3에 정의된 2가지 형태의 플렉서를 제작하고 게이지하였다. 플렉서의 기계가공오차나 게이지에 따른 영향도 살펴볼 수 있도록 Type B는 동일한 크기와 외형으로 3개를 제작하였으며, 각각 Type B-1, -2, -3로 구분하였다.

제작된 플렉서에 대하여 다양한 조건의 모멘트를 인가하고 이때 출력되는 전기신호를 계측하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 플렉서에 하중을 인가한 후 계측한 결과와 유한요소 해석결과를 함께 보여준다.

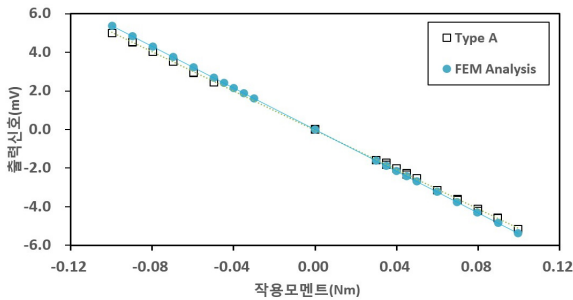


Fig. 8. Comparison between FEM result and measurement on Type A flexure

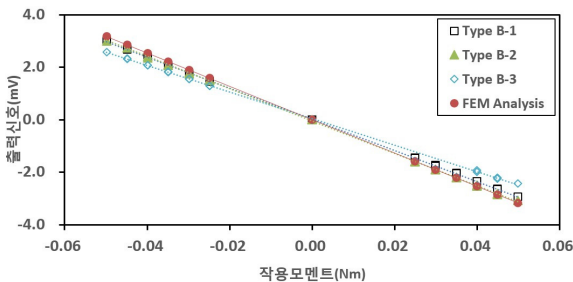


Fig. 9. Comparison between FEM result and measurement on Type B flexures

유한요소해석에서는 먼저 스트레인 게이지 부착부위의 변형률을 계산하고, 식 (2)의 관계로부터 출력신호로 환산하여 표현하였다.

그래프의 가로축은 하중 인가에 따라 조종면의 힌지축에 작용하는 모멘트를, 세로축은 작용모멘트에 대한 출력신호를 나타낸다.

각각의 그래프에서 계측된 출력신호와 작용모멘트의 관계는 좋은 선형성을 나타내고 있다.

유한요소 해석결과와의 비교에서 계측데이터들이 공통적으로 낮은 기울기를 보이고 있어, 작용모멘트에 대해 상대적으로 낮은 전기신호 출력값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 스트레인 게이지 부착위치 오차와 조종면 힌지축에서의 마찰력, 그리고 플렉서 하중전달부의 두께 영향 등에 기인한다.

계측데이터를 비롯한 유한요소 해석 결과는 공통적으로 설계 이론치에 비하여 작은 변형률을 보였다. 이는 Fig. 3의 플렉서 구조상 점 B에서의 단순지지부 역할을 하고 있는 하중전달부의 박막이 충분히 유연하지 않은 점에서 비롯된 결과로, 박막의 두께를 줄여감에 따라 게이지 부착위치에서의 변형률이 점차 설계 이론치에 근접함을 Fig. 10의 박막 두께에 따른 게이지 부착위치에서의 변형률 해석결과 그래프로부터 볼 수 있다. 이로부터 박막의 두께는 설계 최대모멘트 조건에서 좌굴이 발생하지 않는 최소 두께로 선정하는 것이 타당함을 알 수 있다.

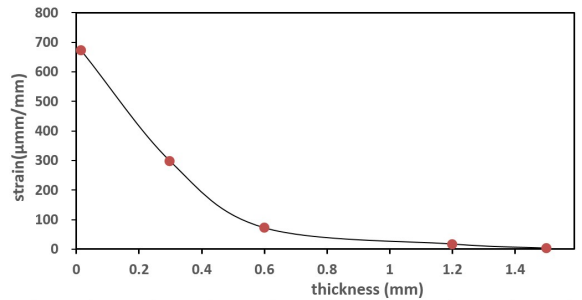


Fig. 10. Strain estimation according to the thickness variation of load connecting part of the flexure

작용모멘트에 대한 출력신호의 계측데이터로부터 최소자승법으로 선형관계식을 구한 후 이로부터 계산된 값과 계측데이터와의 차이인 잔차(residual error)를 구하고, 잔차의 산포 정도를 나타내는 표준편차를 계산

하였다.

각 플렉서에 대한 계측데이터의 잔차는 Table 4에 나타낸 바와 같이 설계 최대모멘트에 대하여 1% 미만의 표준편차를 나타내었다.

Table 4. Standard deviation of residual error on measurement data for each flexure

	Type A	Type B-1	Type B-2	Type B-3
Standard deviation(%)	0.959	0.689	0.797	0.759

## 6. 결론

얇은 날개를 갖는 모형의 조종면 힌지모멘트 측정을 위하여 단일 휘트스톤 브리지를 갖는 플렉서를 이용한 방법을 제시하였다.

소형 활공비행체의 풍동시험 하중조건 하에서 단일 휘트스톤 브리지 플렉서와 기존 2개의 휘트스톤 브리지 플렉서에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 단일 휘트스톤 브리지 플렉서를 이용한 측정방법이 2개의 휘트스톤 브리지 플렉서보다 힌지모멘트를 더 정확히 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한, 유한요소 해석결과를 검증하기 위하여 설계 최대모멘트가 다른 2가지 종류의 플렉서를 제작하고, 이들에 대한 작용모멘트 대 출력신호를 계측하였다. 계측된 결과는 유한요소 해석결과와 유사하게 나타났다.

플렉서의 하중전달부 두께 변화에 따른 스트레인 게이지 변형률 해석 결과는 좌굴이 발생하지 않는 수준의 최소 두께가 민감도를 향상시키는 것으로 나타났다.

플렉서의 계측결과로부터 작용모멘트에 대한 출력

신호는 우수한 선형성을 나타내었으며, 설계하중 범위 내의 다양한 하중 조건에서 계측된 데이터의 표준편차 분석을 통하여 제시한 방법으로 정밀한 힌지모멘트 계측이 가능함을 보였다.

## References

- [1] J. Park and S. Jung, "The Study on Experimental Measurement Method of Hinge Moment Acting on Control Surface of Air Vehicle," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science, Vol. 40, No. 2, pp. 165-170, 2012.
- [2] M. J. Grismer, D. W. Kinsey, and D. S. Grismer, "HINGE MOMENT PREDICTIONS USING CFD," AIAA 2000-4325, 18<sup>th</sup> AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2000.
- [3] R. C. Mcwherter, A. M. Jr. Hill, and J. G. McClure, "Wind Tunnel Model Design Handbook," Fludyne Co., 1975.
- [4] J. Lee, S. Oh, Y. Lee and S. Kim, "Hinge Moment Measurements of Model Control Surface Using a Servo Motor," Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Science, No. 11, pp. 1037-1040, 2013.
- [5] J. Lee, C. Song, and S. Park, "Optimum Structural Design of a Triaxial Load Cell for Wind Tunnel Test," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 226-232, 2011.
- [6] Y. Moon, S. Lee, S. Ryu, and S. Choi, "The Silicon Type Load Cell with SUS630 Diaphragm," Journal of Sensor Science and Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 213-218, 2011.
- [7] ANSYS, <http://www.ansys.com>