

<논 문>

실험계획법을 이용한 쌍안경식 6축 로드셀의 설계 및 상호간섭 오차 평가

강대임* · 김갑순* · 정수연** · 주진원***

(1997년 4월 9일 접수)

Design and Evaluation of Binocular Type Six-component Load Cell by Using Experimental Technique

Dae Im Kang, Gab S. Kim, Su Y. Jeoung and Jin W. Joo

Key Words : Six-component Load Cell(6축 로드셀), Binocular Structure(쌍안경구조), Experimental Technique(실험계획법), Coupling Error(상호간섭 오차)

Abstract

This paper presents the effective technique to design a six-axis load cell by using experimental design with an orthogonal array. A binocular structure is used as a basic sensing element for a load cell instead of the parallel plate structure. The finite element method is adopted to obtain strain distributions of the sensing element, and by doing the analysis of variances, its results are utilized in determining the factor which is more influential to the output strain. Calibration test results show that the developed six-axis load cell with the maximum capacities of 196 N in forces and 19.6 N. m in moments is evaluated to be useful with the coupling error less than 2.5%.

1. 서 론

일반적으로 로드셀은 외력에 대응하여 적절히 변형하는 탄성체의 감지부(spring element), 감지부의 기계적인 변형률을 전기적인 신호로 변환하는 스트레인 게이지 그리고 온도 등의 영향을 보상해주는 보상회로로 구성되어 있다. 대부분의 로드셀들은 한 방향의 힘성분만을 측정할 수 있으므로 로드셀을 설치할 때 로드셀의 중심축과 측정하려는 힘성분의 중심축을 일치시켜야만 한다. 그러나 기계설비의 자동화, 공작기계의 고급화 등으로 인하여 여러 방향의 힘과 모멘트를 정확하게 측정해야

할 필요성이 증가하고 있다. 특히 로봇을 이용한 정밀부품 조립의 경우 부품의 가공오차, 조립판의 설치오차, 로봇의 시스템오차 등으로 인하여 잼밍(jamming)이나 웨징(wedging)과 같은 조립불량 현상이 자주 일어나며, 이를 해결하기 위하여 다축 로드셀을 이용한 힘제어 방법이 사용된다.

다축 로드셀의 설계된 사례를 살펴보면 Ono 등⁽¹⁾은 다축 로드셀 감지부의 기본요소로 병렬평판 구조와 방사평판구조를 제시하였다. Yabuki⁽²⁾는 병렬평판구조만을 이용하여 로봇 팔에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하는 다축 로드셀을 개발하였고 이의 이용에 있어 좌표변환의 관계를 제시하였다. Hata-mura 등⁽³⁾은 다축 로드셀의 설계에 기본 모형을 제시한 후 제작과 실험을 통해 얻은 특성행렬식을 검토하여 감도가 취약한 부분에 대해 보안을 하는 방법으로 크기가 작은 다축 로드셀을 개발하여 실

*회원, 한국표준과학연구원 역학연구부

** (주)카스

***회원, 충북대학교 기계공학과

제 로드셀에 적용하였다. 김 등⁽⁴⁾은 병렬관구조를 특수하게 조합하여 3축 로드셀 감지부로 사용할 수 있는 탄성체 형상을 고안하였다. 이와 같이 개발된 다축 로드셀중 일부는 상품으로도 판매가 되고 있으나 가격이 대단히 비싸고 기술보호⁽⁵⁾ 측면에서 모방이 어렵기 때문에 새로운 형태를 갖는 6축 로드셀의 설계 및 제작에 관한 연구가 필요하다.

6축 로드셀과 같이 다축의 힘을 감지하는 로드셀의 설계에서 가장 중요한 점은 임의의 한 성분의 힘이 작용되었을 때 다른 힘성분을 감지하는 감지부에서는 신호가 나오지 않아서 힘이나 모멘트성분들 상호간의 간섭이 없도록 해야 한다는 것이다. 또한 다축 로드셀의 설계에 있어서 어려운 점은 한 축 성분의 감도(sensitivity)를 맞추기 위해 그 성분에 대응하는 감지부의 치수를 결정하면 다른쪽 감도도 변한다는 데 있다. 이러한 설계는 이론적으로 유도가 가능한 감지부의 형상에서는 변형률의 방정식을 이용하여 감도를 조절하고 결정할 수 있으나, 본 논문에서 응용하려는 쌍안경구조와 같이 이론식의 유도가 어려워 유한요소법과 같은 수치해석에 의존하는 경우는 그 설계가 곤란하게 된다. 본 논문에서는 적외열표를 이용한 실험계획법⁽⁶⁾에 따라 쌍안경구조의 탄성체에 대해 유한요소해석을 하고 이에 대한 분산분석을 행하여 각각의 감도에 대해 쌍안경의 주요 치수가 미치는 영향 정도를 판단하여 쌍안경구조에 대한 효과적인 설계방법을 제시하였다. 또한 이의 설계방법을 이용하여 6축 로드셀을 제작하여 상호간섭 오차를 평가하였다.

2. 쌍안경구조와 상호간섭 오차

다축 로드셀은 하나의 몸체에서 여러 방향의 힘과 모멘트를 동시에 측정하는 센서이다. 이 경우 한 방향의 힘만이 가해질 때 다른 방향들의 힘을 감지하는 출력값이 모두 0이 되어야 하는데, 이 출력값이 0이 되지 않을 때 생기는 오차를 상호간섭 오차(coupling error)⁽⁷⁾라 한다. 다축 로드셀에서는 상호간섭 오차가 비직선성, 재현도, 하중이력 등에 비해 상당히 크므로 다축 로드셀의 설계에서는 가장 중요하게 고려되어야 한다. 이를 최소화하기 위해서는 한 방향의 힘이 작용될 때 변형률 값이 가장 큰 지점을 그 축의 스트레인 게이지 부착위치로 선정하고, 변형률 값이 0이 되는 지점을 다른 모든

축의 스트레인 게이지 부착위치로 선정하는 방법을 사용한다. 그러나 여러 축의 힘 및 모멘트를 측정하는 센서에서 그러한 위치를 선정하는 것은 사실상 불가능하며, 재료역학적으로 탄성체는 포아송 비로 인하여 변형률분포는 아주 복잡한 형태를 나타내게 된다. 따라서, 감지부의 형상 및 스트레인 게이지로 구성된 브리지회로는 신중하게 결정되어야 하며, 이를 위한 변형률 해석이 우선되어야 한다.

Fig. 1은 본 논문에서 이용하려고 하는 쌍안경구조의 기본모델을 보여주고 있다. 쌍안경구조는 이중 외관보 혹은 병렬평관구조와 변형거동이 비슷하나, 같은 변형률이 발생될 때 치짐이 더 작게 나타나므로 센서의 고유진동수가 높아 안정성의 관점에서 유리한 구조이다. 변형률의 분포는 병렬평관구조의 경우 일반적으로 적선적으로 변하다가 불려부에서 급격하게 감소하나, 쌍안경구조의 경우 두께가 최소인 부분에서 변형률이 최대값을 가지면서 완만히 분포하여 스트레인 게이지의 부착위치를 결정하기가 쉽고 게이지의 면적(grid area)에 걸치는 변형률의 분포도 심하게 변하지 않아서 센서의 기본특성인 하중이력, 크리프 특성이 우수한 장점을 가지고 있다. 쌍안경구조가 갖는 가장 중요한 장점은 가공의 용이성에 있다. 즉, 병렬평관구조의 가공에서는 중간부분의 사각부분을 제거해야 하고 평판의 두께를 대단히 얇게 가공해야 하므로 방전가공이나 와이어 커팅기를 이용해서 가공하여야 하나, 쌍안경구조의 가공은 드릴링가공과 밀링가공만으로도 제작할 수 있는 이점이 있다.

쌍안경구조에 Fig. 1의 힘 F_y 와 모멘트 M_z 가 가해질 때, 이중외관보 구조의 변형해석과 같은 방법⁽⁸⁾으로 상호간섭 오차를 줄일 수 있다. 즉, x축을 따라서 표면에 발생하는 변형률의 분포와 브리지회로의 스트레인 게이지 구성법을 잘 이용하여 각각의 스트레인 게이지에 발생하는 상호간섭 변형률을

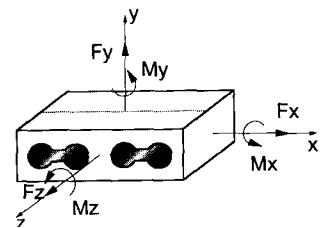


Fig. 1 Binocular structure for measuring 2-component force and moment

서로 상쇄시킴으로써 상호간섭 오차를 이론적으로 0으로 할 수가 있다. 이를 위해서는 변형률 분포에 대한 해석이 선행되어야 한다.

3. 유한요소해석

제작하려는 6축 로드셀의 최대용량은 각각의 힘에 대해 196 N이며, 각각의 모멘트에 대해 19.6 N.m이다. 개발하려는 6축 로드셀의 구조는 Fig. 1과 같은 쌍안경구조를 기본으로 조합하여 구성하므로 기본설계를 위해서 힘 F_y 와 모멘트 M_z 만을 받는 2차원 모델에 대하여 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 2는 해석에 사용한 유한요소 격자와 힘 및 모멘트가 가해졌을 때의 변형형태를 보여주고 있다. 문제는 평면응력상태로 해석하였고 사용한 요소는 8절점 2차원 요소이다. 유한요소해석은 여러 가지 치수의 형상에 대하여 각각 수행하여야 하므로 형상을 결정하는 인자들을 유한요소 프로그램 안에서 변수로 지정한 후 임의의 치수에 대해서도 항상 그림과 같은 격자형태를 갖게 하였다. 다른 축의 힘 및 모멘트를 측정하는 감지부는 기본적으로 이 모델을 90°돌려서 배치하므로 감지부의 높이와 폭을 같게 하도록 제한조건을 주었다. 경계조건으로는 양단에 있는 모든 절점의 x, y방향을 구속하였다. F_y 는 모델의 중앙점에서 y방향으로 196 N/두께의 힘을 주었고 M_z 는 모멘트 암을 추가하여 상하점에 힘을 가하여 19.6 N.m/두께만큼의

모멘트가 가해지도록 하였다. 제작하려는 다축 로드셀의 재질이 알루미늄 2024-T351이므로 종탄성계수는 68.6 GPa로, 푸아송의 비는 0.3으로 하였다.

Fig. 3은 Fig. 4에서 표시된 치수를 $t=2$ mm, $a=4$ mm, $b=8$ mm, $c=5$ mm, $d=10$ mm, $g=15$ mm로 가정하고 힘 F_y 와 모멘트 M_z 를 각각 가했을 때, 위 표면을 따라 변하는 길이방향 변형률의 분포를 보여주고 있다. 밑 표면의 변형률 분포는 두 경우 모두 부호만 반대이므로 표시하지 않았다. 그림에서 보는 바와 같이 힘 F_y 를 가했을 때는 모델의 중심점을 중심으로 선대칭의 형태로 변형률이 발생하였고 보의 두께가 가장 얇은 곳에서 바깥쪽에는 최대 인장변형률이 안쪽에는 최대 압축변형률이 발생하였고 그 절대값은 거의 같게 나타났다. 모멘트 M_z 를 가했을 때에는 모델의 중심점을 중심으로 점대칭의 형태로 분포하였고 안쪽 구멍의 보가 얇은 부분에서 최대의 인장변형률과 압축변형률이 발생하였다. 바깥쪽 부분에서는 발생하는 변형률의 절대값이 작았다.

이와 같은 결과를 이용하여 스트레인 게이지의 위치를 선정하고 각 힘에 대하여 스트레인 게이지 4개로 브리지회로를 적절히 구성함으로써 각 힘에 대한 출력을 크게 하고 상호간섭 오차를 이론적으로 0으로 할 수 있다.⁽⁷⁾ 본 논문에서는 치수설계를 위하여 수직 힘이 가해졌을 때는 왼쪽 쌍안경구조의 왼쪽 구멍 윗면의 길이방향 변형률값을, 모멘트

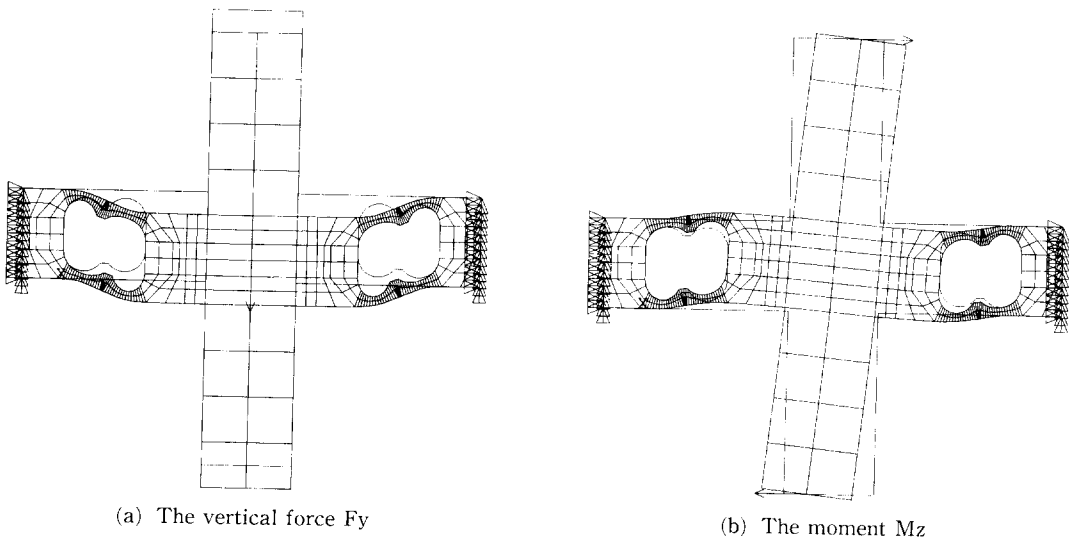


Fig. 2 Finite element mesh and deformed shapes of binocular structure by

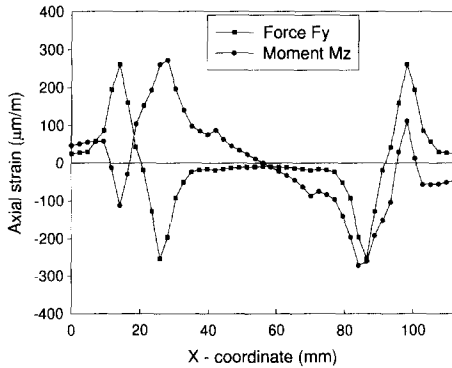


Fig. 3 Axial strain distributions on the upper surface of the binocular structure

가 가해졌을 때는 왼쪽 쌍안경구조의 오른쪽 구멍 윗면의 길이방향 변형률 값을 유한요소해석에 의해 구하고 그 값을 설계에 이용하였다.

4. 실험계획법

4.1 직교배열표에 의한 유한요소해석

쌍안경 구조와 같이 이론적인 변형해석이 난해한 경우에는 유한요소해석을 이용하는 것이 편리하고 신뢰성 있는 해를 구할 수 있다. 그러나 이 경우에는 계산되는 변형률에 대한 각 설계변수의 영향을 알아내기 어렵거나 많은 해석과정이 필요하게 되므로 체계적이고 계획적인 해석과정을 거쳐야 한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 실험조건을 계획적으로 결정하여 각 인자들의 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 직교배열표를 이용한 실험계획법을 사용하였다.

직교배열표에 의한 실험계획의 원리는 다음과 같다. 가령 27형 요인실험(인자가 7개이고, 수준이 2인 실험)의 경우 실험횟수는 128개가 되고 얻을 수 있는 정보(자유도)는 127이 되며, 주효과의 개수는 7개, 2인자 교호작용의 개수 21개, 3인자 교호작용의 개수 35개, 4인자 교호작용의 개수 35개, 5인자 교호작용의 개수 21개, 6인자 교호작용의 개수 7개, 7인자 교호작용의 개수 1개가 된다. 교호작용(interaction)이라 함은 2인자 이상의 특정한 인자 수준의 조합에 의해 일어나는 효과를 말한다.⁽⁸⁾ 예를 들어 인자 A의 효과가 인자 B의 수준의 변화에 따라 변화하는 경우에 “A, B 인자간에 교호작용 A×B가 존재한다.”라고 말한다. 직교배열에

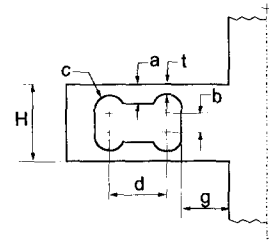


Fig. 4 Geometric factors of binocular structure for design

Table 1 Levels of factors for the binocular structure (unit : mm)

Factor \ Level	t	a	b	c	d	g
1	1.5	4	5	5	15	10
2	2.0	5	10	7	20	20

의한 실험계획에서 주인자의 영향이 전체변동에 85%를 차지하고 2인자 교호작용이 10%정도, 3인자 이상 교호작용의 영향은 5%정도 차지한다고 알려져 있다.⁽⁹⁾ 따라서 128회의 실험을 실시하여 불필요한 3인자 이상의 교호작용을 구하는 것은 비효율적이다. 불필요한 3인자 이상의 교호작용을 주효과와 같이 나타나도록 하면, 즉 교락을 시켜 적은 실험횟수로 주효과를 구하는 것이 바로 직교배열표이다. 따라서 해석하고자 하는 모델에 적합한 직교배열표를 선정하면 최소한의 경우의 수만을 유한요소 해석에 의하여 계산한 후 분산분석을 통해 상대적인 인자의 영향을 알아낼 수 있다.

Fig. 3과 같은 쌍안경 기본구조에서 감지부의 변형률 값에 영향을 주는 인자들 t, a, b, c, d, g 6개의 치수로 하였다. 각 인자는 2개의 수준(two-level)으로 하였고, 전체 다축 로드셀에서 차지하는 쌍안경요소 하나의 크기와 이론적인 기본 계산에 의하여 예상되는 치수를 고려하여 각 수준에서 인자의 값을 Table 1과 같이 미리 선정하였다.

여기서는 인자의 수가 6개이고, 인자의 수준이 모두 2수준일 때 주인자의 영향만을 구하는데 있어 직교배열표의 원리상 교호인자의 영향이 끼여들 수 있다. 이때 2인자 교호작용이 주인자의 영향에 끼여들지 않게 하고 3인자 이상의 교호작용은 무시할 때 선택되는 직교배열표는 L16이고 각 인자는 배열표의 1, 2, 4, 7, 8, 11열에 배치된다. 이에 따라

Table 2 Strains of binocular structure by FEM on L16 array

Trial	Factor (mm)						Strain ($\mu\text{m}/\text{m}$)	
	t	a	b	c	d	g	Fy	Mz
1	1.5	4	5	5	15	10	807	493
2	1.5	4	5	5	20	20	1057	508
3	1.5	4	10	7	15	10	548	194
4	1.5	4	10	7	20	20	712	194
5	1.5	5	5	7	15	20	676	327
6	1.5	5	5	7	20	10	871	293
7	1.5	5	10	5	15	20	631	297
8	1.5	5	10	5	20	10	817	263
9	2.0	4	5	7	15	20	370	247
10	2.0	4	5	7	20	10	476	220
11	2.0	4	10	5	15	20	345	222
12	2.0	4	10	5	20	10	447	190
13	2.0	5	5	5	15	10	433	364
14	2.0	5	5	5	20	20	568	377
15	2.0	5	10	7	15	10	301	146
16	2.0	5	10	7	20	20	391	148

Table 3 ANOVA summary for the force Fy

Factor	SS ($\times 10^5$)	f	V ($\times 10^5$)	F	P
t	4.86	1	4.86	183.45	67.9%
a	0.00342	1	0.00342	0.13	-0.3%
b	0.71	1	0.71	26.82	26.82%
c	0.361	1	0.361	13.63	13.63%
d	0.942	1	0.942	35.59	35.59%
g	0.00156	1	0.00156	0.06	0.06%
Error	0.238	9	0.0265		
Total	7.115	15			

각 경우에 따라서 수직 힘과 모멘트를 가했을 때의 유한요소해석을 하여 변형률 값을 보면 Table 2와 같다.

4.2 분산분석

실험계획법에 따른 결과를 토대로 각 인자의 영

향을 파악하기 위해서는 통계적인 방법의 하나인 분산분석 (analysis of variance, ANOVA) 을 수행해야 한다. 다음은 분산분석을 수행하기 위한 공식들이다.⁽⁶⁾

$$f_T = N - 1 \quad f_A = k_A - 1$$

$$f_e = f_T - (f_A + f_B + \dots)$$

Table 4 ANOVA summary for the moment Mz

Factor	SS ($\times 10^5$)	f	V ($\times 10^5$)	F	P
t	0.268	1	0.268	20.32	13.9%
a	0.00176	1	0.00176	0.13	-0.6%
b	0.863	1	0.863	65.39	46.4%
c	0.558	1	0.558	42.29	29.8%
d	0.588	1	0.588	0.45	-0.4%
g	0.0154	1	0.0154	1.17	0.1%
error	0.119	9	0.0132		
Total	1.831	15			

$$SS_T = \sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{T^2}{N} \quad SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} \frac{A_i^2}{n_{Ai}} - \frac{T^2}{N}$$

$$S_e = SS_T - (SS_A + SS_B + \dots)$$

$$V_A = \frac{SS_A}{f_A} \quad F_A = \frac{V_A}{V_e}$$

$$P_A = \frac{(SS_A - V_e \times f_A)}{SS_T} \times 100\%$$

여기서,

- T : 관찰된 모든값의 합
- A_i : A인자의 i수준에서의 값들의 합
- N : 관찰된 모든값의 갯수
- n_{Ai} : A인자의 i수준에서의 값들의 갯수
- k_A : A인자의 수준의 수
- f_A : A인자의 자유도
- y_i : 관찰된 값
- SS : 제곱의 합(sum of squares)
- V_A : A인자의 분산(variance)
- F_A : A인자에 대한 F-검정값
- P_A : A인자에 대한 기여율
- e : 에러항을 각각 의미

앞에서 얻어진 유한요소 해석결과를 공식들을 이용하여 분석하여, 수직힘이 가해졌을 때는 Table 3에, 모멘트가 가해졌을 때는 Table 4에 결과를 나타내었다.

이상의 결과에서 살펴보면 오차항의 자유도가 9이고, 각각의 인자들의 자유도가 1이므로 통계표에서 오차의 자유도가 9이고, 인자의 자유도가 1인 경우의 F-검정값을 찾아보면 95%의 신뢰도 구간에서의 F-검정값은 5.12이고 90%의 신뢰도 구간에서의 F-검정값은 3.36이다. 인자들의 F값이

F-검정값보다 큰 값을 가질 때, 그 인자가 유의(significance)하고 변형률에 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 수직힘이 가해졌을 때는 t, b, c, d 인자들이, 모멘트가 가해졌을 때는 t, b, c인자들이 변형률에 영향을 준다고 할 수 있다. 한편 각 인자들의 상대적 기여율을 살펴보면 수직 힘이 가해졌을 때는 t>d>b>c의 순으로 변형률 값에 크게 영향을 주고 모멘트가 가해졌을 때는 b>c>t의 순으로 스트레인 값에 영향을 준다. 그러나 실제로는 각 인자들의 수준 사이의 변동이 틀리기 때문에 단위 변동당 기여율로 환산해서 비교해야 한다. 단위 변동당 기여율은 기여율을 수준간의 차로 나눈 값으로 정의된다. 힘이 가해졌을 때 단위 변동당 기여율로 환산하면 t, b, c, d가 각각 135.8, 1.92, 2.35, 2.58이 되고 모멘트가 가해졌을 때 t, b, c는 각각 27.8, 9.28, 14.9가 된다. 따라서 힘이 가해졌을 때는 t≫d>c>b의 순으로, 모멘트가 가해졌을 때는 t>c>b의 순으로 변형률에 영향을 준다.

5.6 축 로드셀의 치수 선정

앞의 분석에서 보는 바와 같이 a인자와 g인자는 힘과 모멘트 모두에 대한 감도에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났고, d인자는 힘에 대한 감도에는 영향이 크나 모멘트에 대한 감도에는 영향을 거의 주지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 설계에서는 먼저 t, b, c인자를 조절하여 모멘트 검출부위의 감도를 맞춘 후, d인자를 조절하여 힘 검출부위의 감도를 맞추는 과정을 수행하였다. 설계순서는 감도에 영향이 작은 인자로부터 결정해 나가도록 하였다. 이것은 만일 영향이 큰 인자부터 결정

Table 5 Design Process for determining dimensions of the binocular structure

Case	Dimensions(mm)						Strain($\mu\text{m}/\text{m}$)	
	t	a	b	c	d	g	Force	Moment
1	2	4	5	5	15	15	435	382
2	2	4	10	5	15	15	343	217
3	2	4	8	5	15	15	375	268
4	2	4	8	7	15	15	325	182
5	1.5	4	8	5	15	15	692	361
6	1.9	4	8	5	15	15	418	283
7	1.9	4	8	5	10	15	291	299

이 되면 정해진 출력값을 맞추기 위하여 영향이 작은 인자의 변동폭이 커져야 하고 그 경우 미리 정해 놓은 치수 범위를 넘어서 설계 및 제작이 불가능해질 수 있기 때문이다.

다축 로드셀의 설계에서는 단축 로드셀에서와 달리 응력이 최대값을 갖는 지점을 스트레인 게이지의 감지 지점으로 할 수 없는 경우가 많기 때문에 출력을 낮게 설계하는 것이 보통이다. 스트레인 게이지의 회로구성을 완전결선 브리지(full bridge)로 할 때 0.5 mV/V의 정격출력이 나오게 하기 위해서는 각각의 스트레인 게이지에서 발생하는 변형률 값이 대략 250 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이 되도록 설계하여야 하나, 스트레인 게이지의 부착오차, 가공오차나 변형거동의 차이때문에 생기는 4개 스트레인 게이지의 상이한 출력 등으로 인한 출력감소와 감도에 대한 온도 보상 게이지의 삽입으로 인한 출력감소를 고려하여 280~300 $\mu\text{m}/\text{m}$ 를 목표치 감도로 선정하였다.

앞에서 설명한 바와 같이 단위 쌍안경의 위치를 나타내는 g인자와 쌍안경의 두꺼운 부분의 두께를 나타내는 a인자는 감도에 거의 영향을 주지 않으므로 g인자는 앞의 변동의 중간값인 15 mm로, a인자는 4 mm로 고정하였다. 모멘트쪽의 감도를 맞추기 위해 t=2 mm, c=5 mm, d=15 mm로 고정하고 b인자의 치수를 추정해 보면, Table 5의 Case 1 및 2에서 보는 바와 같이 b=5 mm일 때와 b=10 mm일 때의 출력이 각각 382 $\mu\text{m}/\text{m}$ 와 217 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이므로 이를 선형보간하여 b=8 mm로 결정하였다. 다음에 c인자를 결정하기 위하여 c가 5 mm일 때와 7 mm일 때의 출력을 계산하면 각각 268 $\mu\text{m}/\text{m}$ 와 182 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이므로 같은 방법으로 결

정된 c인자의 값은 4.6 mm이다. 이를 정수값인 5 mm로 결정하고 t인자를 변화해 보면, 표의 Case 3과 Case 5에서 t=1.5 mm일 때와 t=2 mm일 때의 출력으로부터 t=1.9 mm로 결정한다. 이때 유한요소 해석 결과의 힘쪽 감지부의 경우 418 $\mu\text{m}/\text{m}$, 모멘트쪽 감지부의 경우 283 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이었다.

다음에 힘에 대한 감도를 맞추기 위해 d인자를 변화해 보면 Table 5의 Case 6과 Case 7과 같이 계산되므로 d=10 mm로 선정한다. 이 때, 모멘트쪽의 감도는 약간 증가되었다. 최종적으로 결정된 치수는 t=1.9 mm, a=4 mm, b=8 mm, c=5 mm, d=10 mm이고, 이 때 힘쪽 출력은 291 $\mu\text{m}/\text{m}$, 모멘트 쪽 출력은 299 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이다. g인자는 어느 쪽에도 둔감하므로 설계된 쌍안경구조를 6축 로드셀의 기준 축에서 어느 정도 떨어지게 배치하여도 원하는 감도를 유지한다는 것을 알 수 있다.

앞에서 결정된 치수의 쌍안경요소를 결합하여

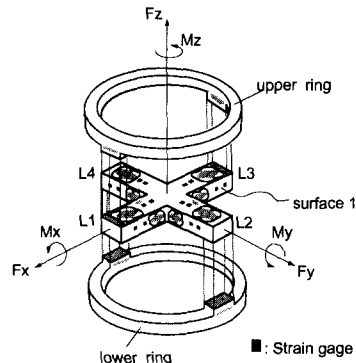
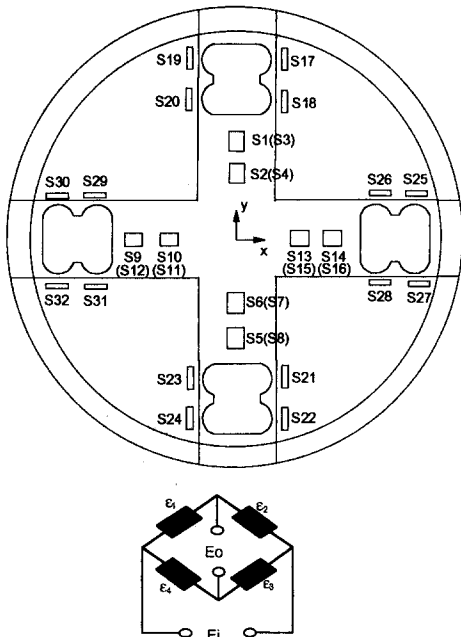


Fig. 5 Configuration of binocular type 6-component load cell developed



	E1	E2	E3	E4
Fx	S19	S17	S24	S22
Fy	S30	S32	S25	S27
Fz	S12	S9	S16	S14
Mx	S2	S6	S7	S4
My	S11	S10	S13	S15
Mz	S20	S23	S21	S18

Fig. 6 Positions of strain gages and Wheatstone bridge circuit with strain gages for sensing 6-component forces and moments

Fig. 5와 같은 모양의 6축 로드셀을 설계하였다. 설계된 6축 로드셀은 위와 아래 2개의 링 사이에, 크게 보아 쌍안경요소 4개가 십자모양으로 배치되어 있는 형태를 하고 있다. 앞에서 중심축으로부터 쌍안경요소까지의 거리를 나타내는 g인자는 힘과 모멘트의 출력에 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석 되었으므로, 안쪽에 배치되어 있는 2개의 요소는 Fz, Mx, My를 검출하는 요소로 사용되고 밖의 쪽에 배치되어 있는 2개의 요소는 Fx, Fy, Mz를 검출하는 요소로 사용하도록 하였다. 감지부의 재료로는 저용량 힘센서의 재료로 많이 사용되는 알루미늄 2024-T351을 사용하여 한 몸체로 가공하였다.

6. 특성시험 및 결과

제작된 감지부에 Fig. 6과 같이 스트레인 게이지

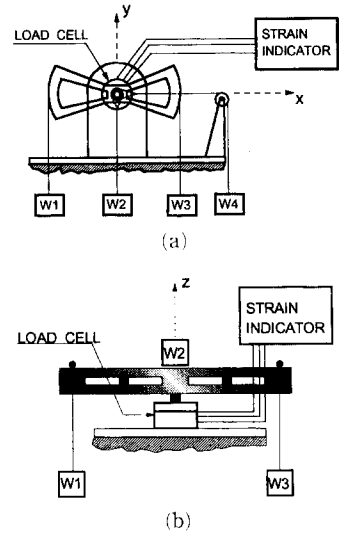


Fig. 7 Experimental set up for the calibration of 6 component load cell

24개를 부착하여 6축 로드셀을 제작하였다. 쌍안경 구조는 각각의 힘 또는 모멘트가 가해졌을 때 최대 변형률을 나타내는 지점이 보의 두께가 가장 얇은 지점에서 약간 벗어나 있으므로 각각의 하중에 대하여 최대 변형률을 나타내는 지점을 스트레인 게이지의 부착지점으로 하였다. 사용한 스트레인 게이지는 센서용 게이지인 MM-N2A-13-T001N350이었다. 한 하중에 대하여 4개의 스트레인 게이지로 Fig. 6과 같이 완전결선 브리지를 구성하였다. 이때 스트레인 게이지 각각의 상호간섭 오차가 브리지를 구성함으로써 적절히 상쇄되도록 스트레인 게이지의 위치를 선정하여 제작된 로드셀의 상호간섭 오차가 최소가 되도록 하였다.

제작된 6축 로드셀의 출력 및 상호간섭 오차를 평가하기 위하여 특성시험을 수행하였다. 특성시험은 Fig. 7과 같이 토크 압과 표준주로 특별히 제작된 6축 특성시험장치를 이용하여 각각의 하중에 대하여 수행하였다. 힘 Fx, Fy와 모멘트 Mz를 측정하기 위해서 Fig. 7(a)와 같은 실험지그를 이용하였고 힘 Fz와 모멘트 Mx, My를 측정하기 위해서는 Fig. 7(b)와 같은 지그를 이용하였다. 먼저 로드셀을 고정하고 추걸이를 달아낸 다음 변형률 측정기를 초기화한 후에 추를 올려놓고 발생하는 변형률을 측정하였다. Fig. 7(a)와 같이 시험할 때에는 로드셀의 축과 시험에서의 축이 차이가 날 수 있기 때문에, 모멘트 Mx 및 My를 감지하는 상호 영향 오차가 커질 수 있다. 이 영향을 제거하기 위

Table 6 Calibrated strain output of 6-component load cell developed ($\mu\text{m}/\text{m}$ FS)

Sensitivity \ Load	Load					
	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z
S _{F_x}	1109	4	1	-5	21	-9
S _{F_y}	5	1116	-3	21	1	28
S _{F_z}	-12	6	887	-15	9	3
S _{M_x}	-3	5*	-2	1677	-1	-8
S _{M_y}	-18*	0	-1	-14	1644	10
S _{M_z}	10	11	-16	13	-1	1171

Table 7 Coupling errors of 6-component load cell developed (% FS/FS)

Sensitivity \ Load	Load					
	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z
S _{F_x}	—	0.36	0.09	0.45	1.89	0.81
S _{F_y}	0.45	—	0.27	1.88	0.09	2.51
S _{F_z}	1.35	0.68	—	1.69	1.01	0.34
S _{M_x}	0.18	0.32*	0.12	—	0.06	0.48
S _{M_y}	1.08*	0.00	0.06	0.85	—	0.61
S _{M_z}	0.85	0.94	1.37	1.11	0.08	—

하여 M_x 및 M_y의 특성시험 결과를 이용하여 출력값을 보정하였다.

특성시험 결과를 Table 6에 나타내었다. 표에서 S_{F_x}는 각 축의 하중이 각각 가해졌을 때 F_x를 감지하는 브리지회로의 변형률 출력값을 의미한다. 따라서 표의 대각선 값은 정격 힘 196 N·m 및 정격 모멘트 19.6 N·m이 가해졌을 때의 정격 출력값을 나타내고 그 밖의 값은 상호간섭 영향에 의하여 발생하는 변형률을 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 F_x, F_y, M_z에 대한 정격 출력값은 예상했던 대로 1100 $\mu\text{m}/\text{m}$ 에서 1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ 정도의 값이 출력되었으나, 안쪽에 배치되었던 F_z, M_x, M_y에 대한 정격 출력값은 이보다 훨씬 크거나 작게 출력되었다. 이것은 본 논문의 목적상 2차원 해석결과를 설계에 이용했기 때문으로 판단되며 상하의 링이 해석에서와는 달리 강체의 역할을 못하고 회전하였으며 안쪽 쌍안경구조가 너무 중심축에 가까이 배치되었기 때문으로 판단된다. 그러나 6축 로드셀에서 이 정도의 정격 출력값 차이는 실용화에 큰 문제가 되지 않는 것으로 판단되나 좀 더 정확한 설

계를 위해서는 쌍안경 구조 전체에 대한 3차원 유한요소해석이 필요하다고 생각된다. 상호간섭 변형률은 28 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이하로 발생되었다.

위와 같은 특성시험 결과로부터 상호간섭 오차를 계산하여 Table 7에 나타내었다. 표에서 오차는 한축의 감지부에 다른 축의 하중들이 가해졌을 때 발생하는 출력의 그 축의 정격 출력에 대한 비율을 나타내는 상호간섭 오차를 의미한다. 여기서, *표시는 앞에서 설명한 바와 같이 실제 축과 시험에서의 축 사이의 거리를 고려하여 보정한 값을 의미한다. 표에서 보는 바와 같이 최대 상호간섭 오차는 M_z에 의한 S_{F_y}쪽의 상호간섭 오차로 2.51% 이고 그 이외에는 모두 1.9% 이내의 상호간섭 오차를 보여서 개발된 6축 로드셀은 매우 실용성이 있음을 보였다.

7. 결 론

본 논문에서는 일방향 힘을 측정하는 로드셀의 감지부로 많이 사용되는 쌍안경구조를 기본으로 하

여 6축 로드셀 감지부를 설계하고 특성시험을 수행하여 상호간섭 오차를 평가하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 직교배열표를 이용한 실험계획법을 응용하여 선택된 2축의 쌍안경구조에 대한 유한요소해석 및 분산분석을 실시하여 스트레인 게이지가 부착될 지점에서의 변형률분포에 대한 쌍안경의 각 치수의 기여도를 구하였고, 이를 이용하여 체계적으로 쌍안경 기본구조를 설계할 수 있음을 보였다.

(2) 쌍안경 기본구조를 조합하여 6축 로드셀을 설계하고 제작하여 기본 특성시험을 수행한 결과, 최대용량 196 N의 힘과 19.6 N.m의 모멘트에서 상호간섭 오차가 2.5% 이하로 나타나 개발된 6축 로드셀의 정밀도는 현재 외국에서 개발된 로드셀과 거의 대등한 성능을 보이고 있다. 본 연구에서 고안한 감지부 구조는 기존 외국에서 개발한 감지부 구조에 비해 가공이 용이할 뿐만 아니라 스트레인 게이지의 부착이 용이하여 실용성이 매우 높은 것으로 평가된다.

참고문헌

- (1) Ono, K. and Hatamura, Y., 1986, "A New Design for 6-component Force/ Torque Sensors," *Proceedings of the 11th International Conference on Measurement of Force and Mass*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 39~48.
- (2) Yabuki, A., 1990, "Six-axis Force/ Torque Sensor for Assembly Robots," *FUJITSU Sci. Tech. J.*, 26, 1, pp. 41~47.
- (3) Hatamura, Y., Matsumoto, K. and Morishita, H., 1989, "A Miniature 6-axis Force Sensor of Multilayer Parallel Plate Structure," *Proceedings of the 11th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation (IMEKO)*, Houston, Texas, USA, pp. 567~582.
- (4) 김갑순, 강대임, 정수연, 주진원, "병렬판 구조를 이용한 3분력 로드셀 감지부의 설계," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제11호, pp.
- (5) Hatamura, Y., 1987, "Multi-axis Load Sensor," United States Patent Number; 4, 712, 431.
- (6) Ross, P. J., 1989, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw- Hill.
- (7) 주진원, 김승환, 김갑순, 이경원, 1996, "VCR 주행장치의 2축 플렌지 반력 측정장치 개발," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2213~2222.
- (8) 박성현, 1992, *현대실험계획법*, 민영사, 서울, pp. 150~151.
- (9) 황농문, 한준희, 1990, "Taguchi 방법에 의한 실험계획," 한국표준연구소, 대전, p. 8.