

# 풍동용 3축 로드셀의 구조최적설계

## Optimum Structural Design of a Triaxial Load Cell for Wind Tunnel Test

이재훈<sup>1</sup>, 송창곤<sup>2</sup>, 박성훈<sup>1,✉</sup>

Jae-Hoon Lee<sup>1</sup>, Chang-Kon Song<sup>2</sup> and Seonghun Park<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

<sup>2</sup> ㈜에스엔티 (SNT)

✉ Corresponding author: paks@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-2330

Manuscript received: 2010.11.8 / Accepted: 2010.12.13

*In this study, an optimized design of a triaxial load cell has been developed by the use of finite element analysis, design of experiment and response surface method. The developed optimal design was further validated by both stress-strain analysis and natural vibration analysis under an applied load of 30 kgf. When vertical, horizontal, and axial loads of 30 kgf were applied to the load cell with the optimal design, the calculated strains were satisfied with the required strain range of  $500 \times 10^{-6} \pm 10\%$ . The natural vibration analysis exhibited that the fundamental natural frequency of the optimally designed load cell was 5.56 kHz and higher enough than a maximum frequency of 0.17 kHz which can be applied to the load cell for wind-tunnel tests. The satisfactory sensitivity in all triaxial directions also suggests that the currently proposed design of the triaxial load cell enables accurate measurements of the multi-axial forces in wind-tunnel tests.*

Key Words: Triaxial Load Cell (3축 로드셀), Finite Element Analysis (유한요소해석), Design of Experiment (실험계획법), Optimum Design (최적설계), Response Surface Method (반응표면법)

### 1. 서론

로봇팔, 공작기계, 항공분야 등의 영역에서 여러 방향에서의 힘과 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 다축 로드셀의 수요가 증대하고 있으며, 특히 항공기, 풍동과 같은 회전부의 동체 실험에서는 축을 삽입하여 함께 거동이 가능한 로드셀이 필수적으로 요구된다. 초기의 다축 로드셀은 외부에 사용되는 단축 로드셀을 조합하는 방식으로 설계되었다.

다축 로드셀은 크게 내부 삽입형(internal balance)과 외부 감지형(external balance)으로 분류되는데, 내부 삽입형은 제트엔진이나 미사일의 거동 파악을 위한 분야에 주로 사용되고, 외부 감지형

은 선박이나 대형 구조물의 축소모형을 이용한 실험에 사용된다.<sup>1,4</sup>

각각의 용도에 맞는 단축, 다축, 저용량에서 고용량에 이르기까지 로드셀의 감지부 설계나 센서의 간섭오차를 줄이기 위한 다양한 연구들이 이루어지고 있다.<sup>5-10</sup> 본 연구는 기존에 수행되지 않았던 단순 빔 형상으로 3축에 대한 하중을 동시에 측정할 수 있는 풍동용 로드셀의 형상을 실험계획법과 유한요소해석을 이용하여 설계하였다.

### 2. 로드셀 형상 및 설계변수

다축 로드셀을 설계하기 위해서 고려할 사항은 첫째, 측정하고자 하는 최대 하중을 고려한 로드

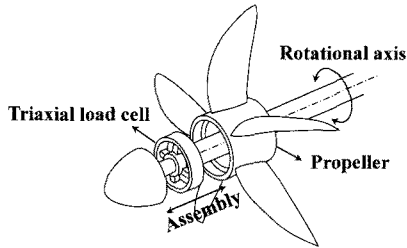


Fig. 1 Application of a triaxial load cell

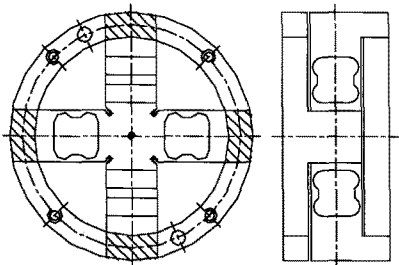


Fig. 2 Commercial multi-axial load cell

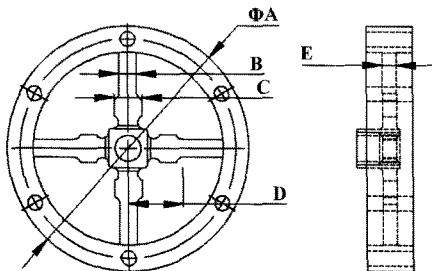


Fig. 3 Schematic of the load cell and design parameters

셀의 용량 설정, 둘째, 로드셀의 정밀도와 정확도를 높이기 위하여 가해지는 하중에 대하여 최소의 변형 범위, 셋째, 로드셀의 공진을 피할 수 있는 고유진동수와 로드셀의 내구력이라고 할 수 있다.

로드셀의 형상은 풍동용 프로펠러에 설치와 운용이 적합하고 제작의 편리성과 실용성이 향상될 수 있도록 결정하는 것이 중요하다. 본 연구의 로드셀은 프로펠러 내부에 설치(Fig. 1 참고<sup>11)</sup>될 수 있어야 하며 로드셀의 용량은 수직, 수평, 축 방향에서 각각 최대 30 kgf 이어야 한다. 전체적인 형상은 현재 기계가공에서 많이 사용되고 있는 Fig. 2와 같은 쌍안경식 로드셀 모델보다 높은 제작용이성을 가지는 방향으로 결정하였다.<sup>5</sup>

기존의 쌍안경식 로드셀은 다축에 대한 하중을 측정하기 용이하고 높은 선형적 특성을 나타내지만 복잡한 형상의 구멍으로 인하여 가공의 어려움

이 뒤따른다. 또한 풍동용으로 사용하기 위해서는 중심부에 축이 설치될 공간이 필요하나 이를 만족하지 못하고 있다. 그러므로 원형의 지지부를 가지며, 중심부에 축이 삽입될 수 있는 홈, 그리고 축을 지지하는 수직 및 수평 방향의 십자형태의 빔을 가진 형태로 로드셀의 형상을 결정하였다. 최종적으로 선택된 로드셀의 형상과 함께 3 축의 하중에 대해 감지부의 민감성이 높을 것으로 판단되어 선정된 5 가지 설계변수를 Fig. 3에 나타내었다. 선정된 설계변수는 로드셀의 직경(A), 십자형 빔의 폭 2 가지(B, C)와 빔의 넓은 폭 부분의 길이(D)와 빔의 두께(E)이다.

로드셀 감지부의 재료는 기본적으로 하중에 대한 변형률이 선형적이고 반복 하중 후의 무부하에서 원점으로 복귀되어야 한다. 또한 탄성한도가 크고 탄성계수가 작은 재료가 요구되므로, 본 연구에서는 저용량 로드셀에 많이 사용되며, 선형 탄성적인 재료인 알루미늄 2024-T를 선정하였으며 재료 물성치는 Table 1과 같다.<sup>12</sup> 스트레인 게이지의 상수(gage factor)가 2.0 일 경우를 기준으로 로드셀의 설계 변형률을  $500 \times 10^{-6} \pm 10\%$ 으로 설계하여 출력값  $1 \text{ mV/V} \pm 10\%$ 를 만족하도록 설계하고자 한다.

Table 1 Material properties of AL2024-T4

Properties (unit)	Value
Young's modulus (GPa)	72.4
Poisson's ratio	0.33
Density (kg/m <sup>3</sup> )	2780
Tensile yield strength (MPa)	325
Compressive yield strength (MPa)	280

Table 2 Levels of design parameters

Design parameter	Level (mm)	
	Min	Max
A (radius)	Ø70	Ø80
B (width 1)	4	7
C (width 2)	6	10
D (length)	16	18
E (thickness)	4	6

### 3. 유한요소해석

실험계획법을 기반으로 선정된 설계변수를 변

Table 3 Experimental models by DOE

No.	Design parameter				
	A	B	C	D	E
1	70	4	10	16	4
2	70	7	6	18	6
3	80	4	6	16	4
4	70	7	10	16	4
5	80	7	6	18	4
6	70	7	10	18	6
7	80	4	10	16	4
8	80	4	10	16	6
9	80	7	10	16	4
10	70	7	6	16	4
11	80	7	6	18	6
12	80	4	6	18	6
13	70	7	10	16	6
14	80	4	10	18	6
15	80	7	10	18	6
16	70	4	10	18	6
17	80	4	6	18	4
18	80	4	10	18	4
19	80	7	6	16	4
20	70	7	6	16	6
21	70	7	6	18	4
22	70	4	6	18	4
23	70	4	6	16	6
24	80	4	6	16	6
25	70	4	10	16	6
26	70	4	6	18	6
27	80	7	10	18	4
28	70	7	10	18	4
29	80	7	10	16	6
30	70	4	10	18	4
31	70	4	6	16	4
32	80	7	6	16	6

Table 4 Finite element analysis results by DOE

No.	Axial		Horizontal
	Strain ( $\times 10^{-6}$ )	Deflection(mm)	Strain ( $\times 10^{-6}$ )
1	480.9	0.04284	324.8
2	206.0	0.01286	91.0
3	910.2	0.07785	449.8
4	398.8	0.03199	129.9
5	531.6	0.05823	273.2
6	213.4	0.01225	76.0
7	789.4	0.07605	448.5
8	399.3	0.02763	219.6
9	548.4	0.05564	243.8
10	374.4	0.03325	187.9
11	229.0	0.02131	142.0
12	454.4	0.02777	189.1
13	209.3	0.01234	78.6
14	441.5	0.02709	174.8
15	240.7	0.02034	116.9
16	309.1	0.01588	116.9
17	925.0	0.07675	381.1
18	891.0	0.07353	353.4
19	509.3	0.05815	294.0
20	200.5	0.01281	96.5
21	376.0	0.03338	195.6
22	640.7	0.04342	253.8
23	317.4	0.01663	147.4
24	402.2	0.02815	216.1
25	328.5	0.01630	146.7
26	315.2	0.01644	168.1
27	506.1	0.05525	224.1
28	393.6	0.03180	146.3
29	231.0	0.02048	126.1
30	678.2	0.04171	229.7
31	669.1	0.04388	312.6
32	243.1	0.02127	141.4

경하여 모델을 생성하고 유한요소해석을 실시하였다. 우선 각 설계변수의 범위를 Table 2 와 같이 결정하였으며 5 인자 2 수준의 요인배치법(factorial design)에 의해서 총 32 가지의 실험 모델들을 Table 3 과 같이 생성하였다.<sup>13</sup> 그리고 Fig. 4 에 나타난 하중 및 경계조건으로 상용 FEM 해석기인 ANSYS<sup>14</sup> 를 통해 수평/수직 및 축방향의 하중에 대한 변형률과 처짐량 값을 도출하였다.

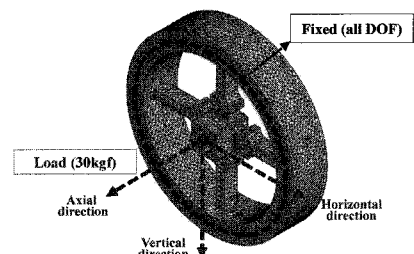


Fig. 4 Load and boundary conditions for FE analysis

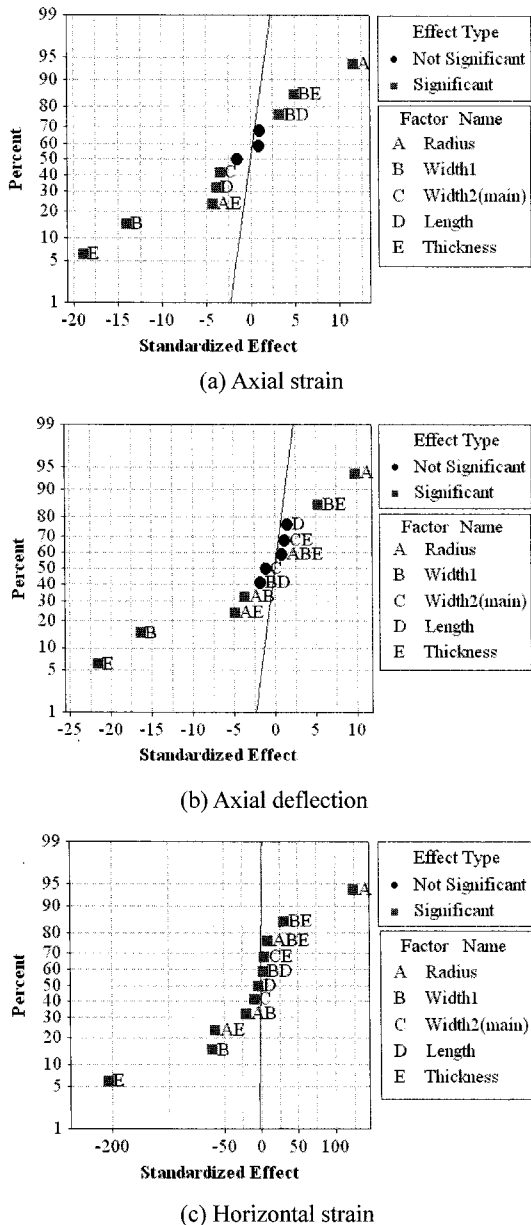


Fig. 5 Normal probability plots of the standardized effects

로드셀이 대칭적인 형상을 가지므로 수평 및 수직의 두 방향에 대한 해석은 둘 중 한쪽만 수행하는 것으로도 충분하다. Table 4 와 같이 축방향과 수평방향 하중에 대해서 스트레인 게이지 부착위치의 변형률과 처짐량을 도출할 수 있었다. 높은 성능의 로드셀을 만들기 위해서는 하중에 대한 전체적인 처짐량은 적고 스트레인 게이지 부착부위에 대한 변형률은 높은 것이 유리하다.

#### 4. 설계 최적화

실험계획법에 따라 도출된 결과값을 이용하여 축방향에 대한 변형률과 처짐량에 대하여 유의한 효과를 정규성 그래프와 주효과도에 의해 통계적으로 파악하였다.<sup>15</sup> 결과적으로 Fig. 5 와 같이 표준화된 효과의 정규확률도를 통해서 축방향 변형률에 대해서는 반경(A), 폭 1(B), 두께(E)가 유의함을 알 수 있었으며, 처짐량에 대해서는 반경(A), 폭 1(B), 폭 2(C), 길이(D), 두께(E) 모두가 유의한 효과로 나타났다. 반응표면법을 이용하여 기계가공이 가능한 범위에서 설계변수를 최적화할 때, 직선에서 멀리 떨어져서 유의한 효과를 가지는 설계변수들을 먼저 조정하고 난 후에, 다른 설계변수들을 미세 조정하여야 하지만, 본 연구에서는 수평방향 변형률에 대하여 모든 설계변수들이 유의한 효과를 주기 때문에, 모든 설계변수들의 상관관계를 고려하여서 설계변수들을 조정하였다(Fig. 6).

축방향 변형률과 처짐량, 그리고 수평방향 변형률에 대한 주효과와 교호효과에 대하여 검정통계량을 통해 통계적 모형이 데이터를 잘 표현하고 있는지 확인하였으며, 결정계수(R-sq)가 97%이상으로 모형이 적합하다는 것을 알 수 있었다. Fig. 6(a) 는 축방향 변형률에 대한 주효과 분석 그래프로 주효과의 기울기가 클수록 유의한 인자임을 나타내기 때문에, 본 연구의 로드셀 설계에서는 반경과 폭 1, 그리고 두께의 효과가 유의하다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 6(b)의 교호효과 분석 그래프에서는 두 직선의 기울기 차이가 클수록, 그리고 서로 간격이 멀수록 유의한 교호효과라고 할 수 있다. 이러한 분석을 통해 Fig. 5 의 표준화된 주효과에 대한 그래프 분석과 그 경향이 동일한 경향이 나타남을 확인할 수 있다.

주요한 인자를 바탕으로 설계변수를 기계가공이 가능한 수준을 고려하여 반응표면법에 의해 설계 최적화하였다. 반응표면법에 의해 계산된 초기의 최적설계값은 반경, 폭 1, 폭 2, 길이, 두께가 각각 74.7933mm, 5.2775mm, 8.5547mm, 16.9781mm, 4.5308mm 으로 나타났다. 그러나 이러한 미소단위까지 포함하는 설계 치수는 기계가공에 있어서 많은 어려움 뿐만 아니라 가공단가를 상승시키는 요인이 될 수 있으므로 각 설계변수의 치수들을 정수값에서 0.5mm 간격으로 조정하여 최적치수의 모델과 큰 차이가 발생하지 않는 한도 내에서 근접

한 설계변수 값들을 취하였다.

최종적으로 결정된 최적설계 모델은 Fig. 7 에 나타난 바와 같이 반경 75mm, 폭 1 5.5mm, 폭 2 8.5mm, 길이 17mm, 두께 4.5mm 이다.

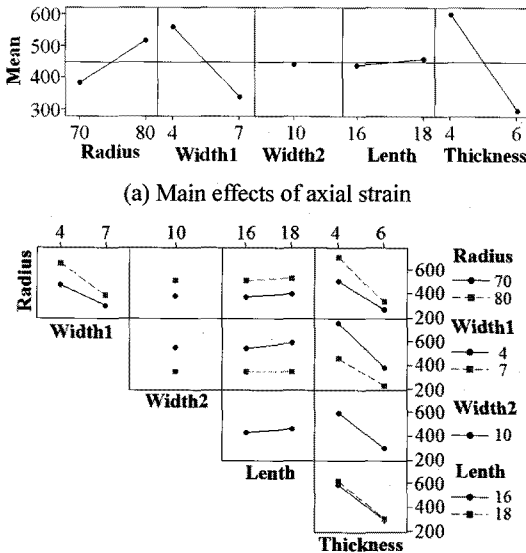


Fig. 6 Statistical evaluation of axial strain

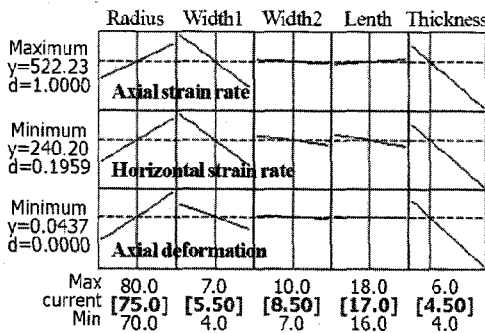


Fig. 7 Optimization results

5. 최적설계안의 검토

5.1 변형률 및 응력해석

최적화 된 설계변수 값을 이용하여 FE 모델을 생성하고 3 축 방향의 하중에 대한 전산해석을 수행하여 스트레인 게이지가 설치되는 지점들의 변형률과 최대응력 및 최대 변위를 해석하였다. 해석모델은 실험계획법에 의한 해석 모델들과 동일한 수준의 절점과 요소가 생성되도록 하였으며,

마찬가지로 동일한 경계조건과 30 kgf 의 하중조건이 적용되었다.

Fig. 8(a), (b)는 수평방향과 축방향의 하중 하에서 변형률과 응력 분포 해석결과를 보여준다. 해석 결과에서 스트레인 게이지의 부착 위치에 발생하는 변형률의 크기는 수평/수직 및 축방향에 대해 각각  $452 \times 10^{-6}$  과  $519 \times 10^{-6}$  을 나타내어 설계목표 변형률인  $500 \times 10^{-6} \pm 10\%$  범위 내에서 안정적으로 작동할 것으로 판단된다.

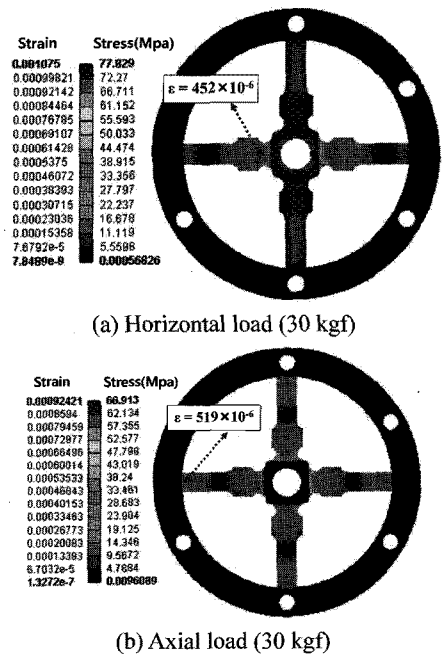


Fig. 8 Strain and stress contours for the optimum model

또한 극한의 하중이 걸릴 경우를 고려하여 수평, 수직, 축방향에 대해 각 30 kgf 의 복합하중이 작용할 때의 구조해석을 수행하였다. 3 축 방향의 복합하중은 30 kgf 의 약 1.7 배 정도인 52 kgf 의 값을 가지며, 이때 수평/수직 및 축방향 로드셀 부착 위치의 변형률은 각각  $660 \times 10^{-6}$  과  $770 \times 10^{-6}$  로 나타나서 변형률 목표치인  $500 \times 10^{-6} \pm 10\%$  를 벗어났다. 그러나 일반적인 단축 로드셀의 경우 변형률을  $1,000 \times 10^{-6}$  이내에서 설계를 하는 것에 비교하여 보면, 양호한 수준의 변형률 해석치가 나왔다. 그리고 Von-Mises 응력은 수평, 수직 방향의 스트레인 게이지 부착 위치에서 48 MPa, 축 방향의 스트레인 게이지 부착 위치에서 55 MPa 의 응력을 보였다.

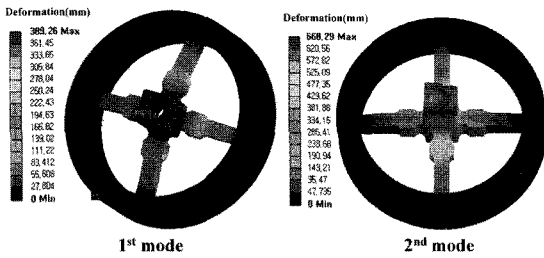


Fig. 9 Mode shapes of the optimum load cell model

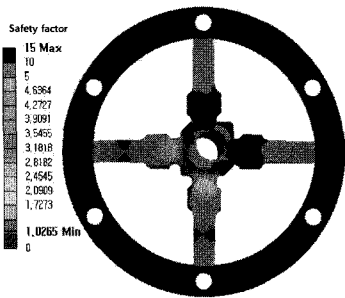


Fig. 10 Safety factors calculated from fatigue analysis (factor 1 =  $1 \times 10^8$  cycles)

**5.2 고유진동해석**

풍동용 로드셀은 프로펠러의 회전에 의한 반복적인 가진 하에 놓여 있으므로 고유진동수의 값이 회전기기의 운용구간을 벗어나도록 공진회피 설계를 고려하여야 한다. 단순히 선박의 경우 프로펠러의 회전속도는 최대 1,000 RPM, 프로펠러 항공기의 경우 최대 3,000 RPM 내외라고 알려져 있고 대부분의 풍동실험에서 회전속도는 최대 10,000 RPM 을 넘지 않는다.

Fig. 4 의 구조해석과 동일한 경계조건 하에서 고유진동해석을 실시하였으며 구조해석에 사용되었던 유한요소모델의 요소정보를 그대로 이용하였다. Table 5 에 로드셀이 가지는 5 차까지의 고유진동수를 나타내었다. 1 차 고유진동수 5.56 kHz 로 Fig. 9(a)와 같이 축방향의 모드를 보였으며, 2 차고유진동수는 12.0 kHz 로 Fig. 9(b)와 같이 수직방향의 모드형상을 나타냈다. 최적설계안의 로드셀이 작동환경 하에서 충분히 공진을 회피하고 있음을 알 수 있다.

**5.3 피로강도 해석**

반복적인 하중을 받는 로드셀의 특성으로 볼 때 피로파괴에 대해서 고려할 필요가 있다. 그러므로 수평, 수직, 축방향의 세 방향에서 30 kgf 의

Table 5 Modal analysis result

Mode	Frequency [Hz]
1st	5,555
2nd	12,012
3 <sup>rd</sup>	12,198
4 <sup>th</sup>	18,320
5 <sup>th</sup>	19,860

복합하중 상태에서의 반복적 하중이 작용할 때, 본 모형의 피로수명을 검토하였다.

하중은 통상적으로 가장 많이 사용되는 사인과 하중이 한 사이클 동안 0 kgf 에서 30 kgf 사이에서 반복되는 것으로 가정하였으며, 피로파괴에 대한 평균 응력(mean stress)이론은 Goodman 방식을 이용하였다.<sup>16,17</sup> 그리고 설계 수명은  $1 \times 10^8$  회를 기준으로 안전계수를 계산하였다. Fig. 10 은 피로해석에 의한 로드셀 구조물의 안전계수를 나타낸다. 피로해석으로부터 계산한 안전계수의 최소값이 1.026 이기 때문에, 본 연구에서 제시한 기준 설계수명을 만족하고, 이 기준 설계수명 내에서는 피로로 인한 손상이 발생하지 않을 것으로 예측되었다.

**6. 결론**

본 연구에서는 풍동용 3 축 로드셀을 설계함에 있어서 기존에 주로 연구된 쌍안경식이 아니라, 경량화와 가공성을 향상시키는 단순 빔 형태의 로드셀 구조를 제시하였다.

또한, 통상적으로 로드셀의 설계에서 주요한 인자 및 치수의 결정이 설계자의 경험과 감각에 의존하여 평가하고 수정되어 온데 비하여, 본 연구에서는 설계자 의존적인 방식을 배제하여 체계적이고 합리적인 방식으로 개선하기 위하여 유한요소해석과 실험계획법을 이용하여 통계적인 기법으로 주요 설계인자들을 선정하였다. 최적의 설계값은 반응표면법에 의해 도출되었으며, 선정된 설계안의 타당성을 검증하기 위하여 실제 풍동용 실험에서 가해질 수 있는 최대 크기의 외부하중에서의 변형률을 조사하였고, 적절한 스트레인 게이지 출력을 갖는 기하학적인 형상이라는 것을 확인할 수 있었다. 더불어 고유진동해석과 피로해석을 통하여 구동조건에 대한 공진을 피할 수 있고 설계수명 내에서 안정적으로 구동될 수 있는 모델임을 확인하였다.

본 연구에 의해 설계된 로드셀은 상용화의 측

면에서 볼 때, 기존에 출시되어 있는 상용 쌍안경식 다축 로드셀(외곽 반경 130~165mm, 높이 70mm)보다 크기를 크게 감소시켜서 1/10 의 작은 체적을 가지며, 단순 빔과 가공성을 고려한 최적 설계로 가공시간과 제작 비용을 크게 감소시킬 수 있다. 이에 따라 기존의 다축 하중의 측정에서 사용된 쌍안경식 또는 다수의 단축 로드셀을 겹쳐서 사용하는 방식을 대체할 수 있고, 로드셀의 경량화를 통하여 초기의 사용목적이었던 풍동실험뿐만 아니라, 조이스틱과 회전체 등에서도 축과 함께 조립하여 다축 하중을 정밀하고 편리하게 측정할 수 있다.

## 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Karkehabadi, R., Rhew, R. D. and Hope, D. J., "Study and Analyses on the Structural Performance of a Balance," NASA TM-213263, 2004.
2. Erm, L. P., "Development of a Two-Component Strain Gauge Balance Load Measurement System for the DSTO Water Tunnel," Air Vehicles Division Defence Science and Technology Organization, DSTO-TR-1835, 2006.
3. Norman, T. R., Shinoda, P. M., Kitaplioglu, C., Jacklin, S. A. and Sheikman, A., "Low-Speed Wind Tunnel Investigation of a Full-Scale UH-60 Rotor System," NASA Ames Research Center, 2002.
4. Vos, H. B., "Strain Gauge Balance Development at NLR," National Aerospace Laboratory NLR, 1996.
5. Kang, D. I., Kim, G. S., Jeoung, S. Y. and Joo, J. W., "Design and Evaluation of Binocular Type Six-component Load Cell by Using Experimental Technique," Trans. of the KSME A, Vol. 21, No. 11, pp. 1921-1930, 1997.
6. Kang, D., Shin, H., Kim, J. and Park, Y., "Design and Analysis of Column Type Sensing Element for Large Compact Load Cell," Trans. of the KSME A, Vol. 27, No. 4, pp. 601-607, 2003.
7. Lee, T. H., Lee, T. H., Byun, C. W. and Park, J. K., "Optimal Design of High-Capacity Column-Type Load Cell Using Response Surface Method," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 754-758, 2002.
8. Lee, M. J., Ham, D. S., Lee, S. W. and Han, G. J., "Shape Design of Indirect Adhesion type Load cell for Container Crane," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 401-402, 2007.
9. Joo, J. W., Na, K. S. and Kang, D. I., "Design and fabrication of a six-component force/moment sensor," Measurement, Vol. 32, No. 2, pp. 125-133, 2002.
10. Kim, G., Kang, D. and Rhee, S., "Design and evaluation of a six-component load cell," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 77, No. 3, pp. 209-220, 1999.
11. Zwemmer, R., Quartel, A. and Veltman, D. L., "Development and Operational Aspects of a Signal Transfer System for Use in Wind Tunnel Propeller Models," 19th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, pp. 353-359, 2001.
12. Rhew, R. D., "A Fatigue Study of Electrical Discharge Machine (EDM) Strain-Gage Balance Materials," International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, pp. 477-487, 1989.
13. Park, S. H., "Modern design of experiments," Minyoung-Sa, pp. 413-435, 2003.
14. ANSYS, <http://www.ansys.com/>
15. Seo, S. K., "MINITAB Reliability Analysis," Eretec, 2009.
16. Zahavi, E., "Fatigue Design," A Solomon Press Book, 1996.
17. Han, M. and Cho, J., "The Analysis of Fatigue Damage in Structure under Variable Load," Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 12, No. 4, pp. 85-93, 2004.