

대용량 Compact 형 로드셀의 기둥형 감지부 설계 및 해석

강대임[†] · 신흥호^{*} · 김종호^{*} · 박연규^{*}
(2002년 9월 9일 접수, 2003년 2월 28일 심사완료)

Design and Analysis of Column Type Sensing Element for Large Compact Load Cell

Dae-Im Kang, Hong-Ho Shin, Jong-Ho Kim and Yon-Kyu Park

Key Words: Column Type(기둥형), Aspect Ratio(세장비), Finite Element Method(유한요소법), End Loading Effect(끝단효과)

Abstract

The column type is used as the sensing element of the load cell to measure the large force in the range of $10^4 \sim 10^7$ N. However, it is not easy to handle the load cell with large capacity due to its size. It is, therefore, necessary to design a compact load cell with a low aspect ratio. Thus this paper showed the characteristic evaluation of compact load cell with respect to the shape of supporting plate. The supporting plate of the load cell was an annular type with inner(D_i) and outer(D_o) diameters. Using the strain distribution obtained from FEM, the supporting plate was designed to get the stable output voltage of the load cell. The three designed supporting plates were manufactured, and the result of characteristic experiment of the load cell, using the 10 MN hydraulic force standard machine, was compared with FEM.

1. 서론

스트레인 게이지식 로드셀(이하 로드셀로 칭함)은 정밀도와 내구성이 우수하여 전자저울, 재료시험기, 구조물 해석, 각종 역학시험 등의 감지센서로 많이 사용되고 있다. 로드셀은 감지부(sensing element), 스트레인 게이지, 보상회로, 보호케이스로 구성되어 있다. 감지부는 측정하고자 하는 하중에 대응하여 적절한 기계적 변형률을 발생시키는 일종의 스프링과 같은 것이다. 스트

레인 게이지는 감지부에 발생된 기계적 변형률을 전기적인 신호로 변환하는 역할을 한다. 보상회로는 로드셀의 정밀도를 높이기 위하여 사용되는 것으로서 온도 변화에 따른 영점출력 및 감도변화 등을 보상하는 회로로 구성되어 있다. 보호케이스는 로드셀의 내구성과 과부하 특성을 높이는 역할을 한다.

로드셀 감지부의 구조로는 굽힘 변형률을 감지하는 구조로 외관보형, 쌍안경형, 다이아프램형, S자형 등이 있으며, 전단 변형률을 감지하는 구조로 수레바퀴형, 전단빔(shear beam)형 등이 있고 수직변형률을 감지하는 구조로 기둥형이 있다. 설계자들은 로드셀의 용량, 측정범위, 요구 정밀도 및 사용 대상 등을 고려하여 감지부의 형상을 결정한다. 기둥형 감지부는 설계가 용이하고 대용량 측정에 적합하여 수십 kN부터 최대 수십 MN까지의 대용량 로드셀의 감지부로 사용되고 있다.

[†] 책임저자, 회원, 한국표준과학연구원

E-mail : dikang@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5010 FAX : (042)868-5012

^{*} 한국표준과학연구원 물리표준부

Bray와 Robinson⁽¹⁻⁴⁾은 기둥형 감지부를 갖는 로드셀의 경우 접촉시 발생하는 접촉하중의 불균일성, 접촉부위에서 발생하는 미세한 변형의 효과, 접촉하고 있는 로드셀의 구조적 강성 차이, 접촉면에서의 마찰계수의 차이가 로드셀의 정밀도에 미치는 영향을 연구하였다. Sundin 등⁽⁵⁾은 유한요소해석을 이용하여 로드셀을 지지하는 바닥의 마찰계수에 따른 스트레인 게이지 부착 부근의 변형을 분포를 조사 및 분석하였다. Mitchell 등⁽⁶⁾은 유한요소해석과 실험을 이용하여 로드셀의 끝 부분에 작용하는 하중조건에 따른 스트레인 게이지 부착 지점의 변형을 분포를 연구하였다. 강⁽⁷⁾은 유한요소법을 이용하여 세장비에 따른 끝단 효과의 영향을 고찰하였으며, 로드셀의 정밀도에 접촉면의 영향을 배제하기 위해서 감지부의 길이가 최소 감지부 직경의 2.5배가 되도록 설계하는 것을 제안하였다. 그러나 산업현장에서는 설치공간이 협소하여 강동이 제시한 조건으로 제작된 로드셀을 설치하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 협소한 설치 공간에 적합한 compact 구조의 기둥형 로드셀을 설계할 필요성이 대두된다.

일반적으로 기둥형 로드셀의 정밀도에 영향을 미치는 요인으로서는 휘스톤 브리지의 비선형 효과, 감지부 변형의 비선형 효과, 히스테리시스, 스트레인 게이지 부착위치의 오차, 감지부의 가공오차, 감지부 접촉 경계조건 및 끝단 효과 등이 있다. 기둥형 감지부를 compact형으로 설계할 경우 감지부의 끝단 효과와 접촉부위의 경계조건이 제일 큰 오차요인이 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 기둥형 감지부의 세장비(길이 대 지름의 비, aspect ratio, L/D)를 변화시키면서 접촉조건에 따른 변형 게이지 부착지점에서의 변형률 분포 특성을 분석하였다. 이를 통하여 임의의 세장비에서의 접촉조건을 제시하였다. 여기에서 제시된 결과를 토대로 로드셀 시제품을 제작하여 특성 시험한 결과 로드셀의 정밀도가 매우 향상될 수 있음을 확인하였다.

2. 유한요소해석

감지부 바닥면의 지름이 클 경우 감지부 바닥면과 접촉 대상체의 평면 가공 정도에 따라 감지

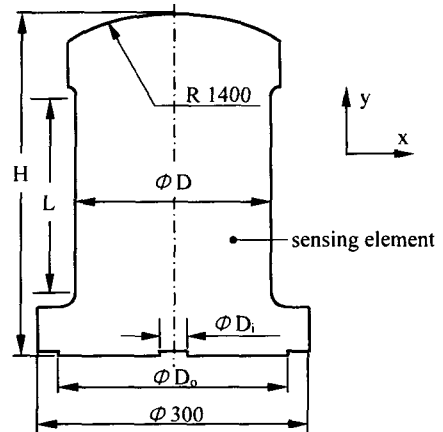


Fig. 1 Schematic diagram of a column type load cell with the aspect ratio, $L/D=1$ (unit : mm)

부와 접촉 대상체가 전면 접촉을 하지 않고 띠 형태로 접촉할 수 있다. 고정밀 로드셀을 구현하기 위해서는 접촉조건이 달라지더라도 스트레인 게이지 부착지점에서의 변형률 분포가 균일하도록 설계하여야 한다. 특히 세장비가 작은 로드셀은 접촉조건에 아주 민감하므로 끝단 효과의 영향을 분석한 필요가 있다. 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 접촉조건에 따른 기둥형 감지부의 스트레인 게이지 부착지점에서의 변형률 거동을 조사하였다.

2.1 유한요소해석 모델

Fig. 1은 기둥형 감지부의 전형적인 구조로 한국표준과학연구원에서 제작된 바 있으며 설계 용량은 10 MN이다. 전체 높이(H)는 380 mm, 감지부의 지름(D)은 217.2 mm, 접촉부 곡률반경(R)은 1400 mm, 감지부 평행부의 길이(L)는 217 mm로 세장비(L/D)는 1이다.

사용한 유한요소해석 프로그램은 ANSYS Ver. 5.6이었고, 재료 상수는 종단성계수 210 GPa, 푸아송 비는 0.3으로 하였다. 로드셀 감지부의 형태를 고려하여 8절점 2차원 평면요소, 축대칭 조건으로 모델링하였다. 감지부 평행부의 길이(L), 감지부 바닥면 접촉부의 내경(D_i)과 외경(D_0)을 변수로 하였다. 유한요소 격자의 형상은 Fig. 2와 같다. 본 연구에서는 로드셀 감지부와 지지부 플레이트(supporting plate)의 접촉 경계는 해석 시간

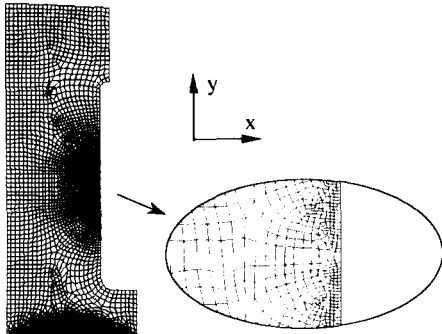


Fig. 2 Finite element mesh of column type load cell

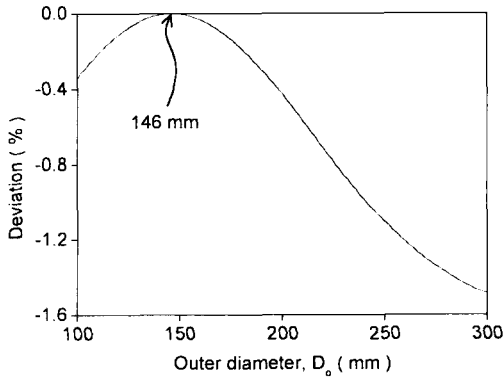


Fig. 3 The Deviation of output voltage obtained from Eg. (2) with the change of outer diameter, D_o , in case of aspect ratio, $L/D=1$ and $D_i=30$ mm

을 고려하여 접촉 지점에 있는 절점 자유도를 완전 구속하는 것으로 가정하였다. 이러한 경계조건으로 접촉부 형상의 선계를 위한 출력거동을 분석할 수 있었다. 하중은 감지부의 곡면부 중앙 절점에 집중하중 10 MN을 가했다. 또한 게이지 부착 지점 격자의 간격을 0.5 mm로 조밀하게 나누어 변형률의 분포를 세밀하게 분석하였다.

2.2 접촉조건에 따른 출력 거동 분석

감지부 접촉면의 외경과 내경이 로드셀의 출력에 미치는 영향을 조사하였다. 외경의 영향을 알아보기 위해 접촉면 내경 D_i 를 30 mm로 고정하고 외경 D_o 를 100 mm에서 300 mm까지 2 mm씩

증가시키면서 그 사이에 있는 절점의 자유도를 구속하였으며 외경이 증가할 때마다 게이지 부착 지점에서의 축방향 변형률을 계산하였다. 일반적으로 기동형 로드셀의 출력은 축방향의 스트레인 게이지 2개와 원주방향의 스트레인 게이지 2개가 조합된 완전 결선 브리지 회로(Full bridge circuit)로 구성된다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석으로부터 얻어진 축방향 변형률(ϵ_{avg})을 식 (1)에 대입하여 로드셀의 출력으로 변환하였다. 이때 축방향 변형률은 스트레인 게이지의 길이가 3.5 mm인 것을 고려하여 0.5 mm간격으로 구성된 7개의 절점의 변형률을 산술평균 하였다.

$$\left(\frac{E_o}{E_i} \right) = \frac{(1 + \nu)K\epsilon_{avg}}{2 - \{(1 - \nu)K\epsilon_{avg}\}} \quad (1)$$

여기서, E_o 은 출력 전압, E_i 는 입력 전압, ν 는 푸아송 비, K 는 게이지 상수, ϵ_{avg} 는 축방향 변형률이다.

유한요소해석 결과 접촉면 외경이 146 mm일 때의 로드셀 출력이 최대가 되었다. Fig. 3은 로드셀의 출력거동을 보여주며, 이때 편차(deviation)는 식 (1)과 식 (2)로부터 계산되었다.

$$Deviation = \frac{E - E_{max}}{E_{max}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, E 는 감지부 접촉면의 외경 D_o 가 100 mm에서 300 mm까지 2 mm씩 증가할 때 각 외경에서 출력이고, E_{max} 는 이 구간에서의 최대출력이다. D_o 값이 146 mm 일 때 곡선의 기울기가 0이다. 따라서 D_o 를 146 mm로 설계할 때 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 최소화할 수 있다.

감지부 접촉면의 내경이 로드셀의 출력에 미치는 영향을 조사하기 위해 감지부 접촉면의 외경 D_o 를 146 mm로 고정하고, 접촉면의 내경 D_i 를 30 mm에서 80 mm까지 2 mm씩 증가시키면서 게이지 부착지점에서의 축방향 변형률을 구하였다. 로드셀의 출력 및 편차는 식 (1)과 식 (3)으로부터 계산하였다.

$$Deviation = \frac{E - E_{D_i=30}}{E_{D_i=30}} \times 100(\%) \quad (3)$$

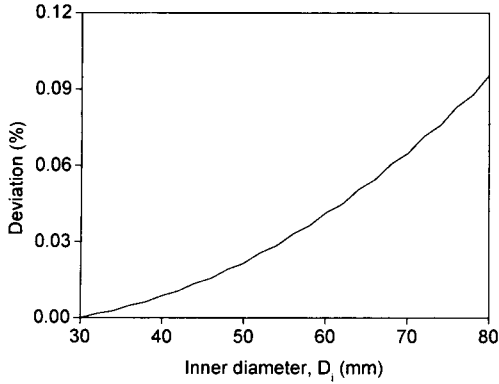


Fig. 4 The Deviation of output voltage obtained from Eq. (3) with the change of inner diameter, D_i , in case of aspect ratio, $L/D=1$ and $D_o=146$ mm

여기서, E 는 감지부 접촉면의 내경 D_i 가 30 mm에서 80 mm까지 2 mm씩 증가할 때마다의 출력이고, $E_{D_i=30}$ 는 D_i 가 30 mm일 때의 출력이다.

Fig. 4는 접촉면 내경 D_i 변화에 따른 로드셀의 출력 편차 기동이다. D_i 가 커질수록 편차 곡선의 기울기는 커진다. 이것은 접촉면 내경을 작게 설계할수록 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향이 작아짐을 보여준다. 따라서 세장비가 1인 기동형 로드셀의 경우 감지부 바닥면의 접촉을 D_i 는 30 mm, D_o 는 146 mm로 설계함으로써 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 줄일 수 있다.

2.3 세장비에 따른 출력거동 해석

Compact형 로드셀을 구현하기 위해 세장비 0.3 ~ 1 범위에 대해 접촉조건에 따른 로드셀 출력거동을 해석하였다. 감지부의 지름은 217 mm로 고정하고, 세장비는 감지부의 길이를 변화시키며 조정하였다. **Fig. 5**는 각 세장비에 대한 감지부 접촉면의 외경 D_o 에 따른 로드셀의 출력 거동을 보여준다. 세장비가 작아질수록 출력은 감소하고 출력값의 변화폭은 커지고 있다. **Fig. 6**은 각 세장비에 대한 감지부 접촉면의 외경에 따른 로드셀의 출력 편차거동을 보여준다. 편차는 각각의 세장비에서 출력이 최대인 값을 기준으로 식 (2)로부터 구하였다. 세장비 1에서와 같이 나머지 세장비에서도 출력이 최대인 부분에서 출력 편차

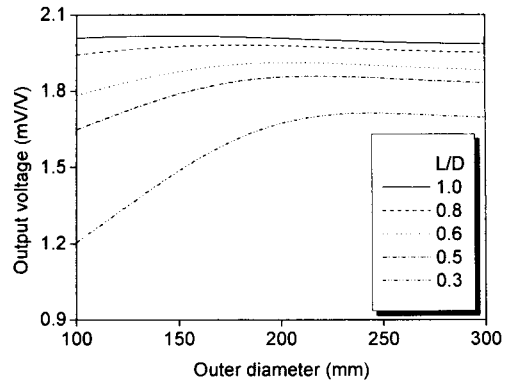


Fig. 5 The output voltage with the change of outer diameter, D_o , in case of the aspect ratio, L/D , being changed 0.3 to 1 and $D_i=30$ mm

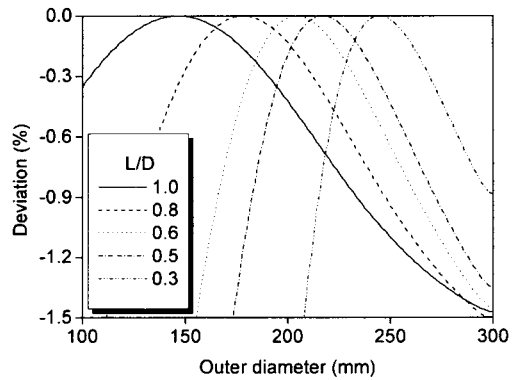


Fig. 6 The deviation of output voltage with the change of outer diameter, D_o , in case of the aspect ratio, L/D , being changed 0.3 to 1 and $D_i=30$ mm

가 가장 작은 부분이 나타났다. 세장비가 작아질수록 출력 편차가 완만한 범위가 좁아지고 있다. 이것은 세장비가 작아질수록 곡선의 기울기가 급격히 변하는 것을 의미한다. 따라서 세장비가 작아질수록 로드셀의 출력은 접촉 조건에 더욱 민감하다. 최대 출력을 얻는 로드셀 지지부의 외경은 세장비가 1인 경우 146 mm, 0.8인 경우 178 mm, 0.6인 경우 204 mm, 0.5인 경우 218 mm, 0.3인 경우 244 mm로 나타나 세장비가 작아질수록 최대 출력이 나타나는 감지부 접촉면의 외경은 축중심으로부터 멀어지고 있다. 이것은 세장비가

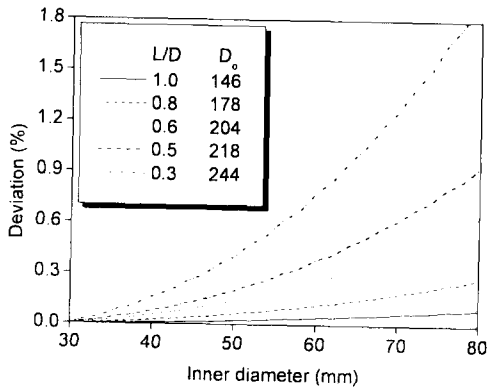


Fig. 7 The deviation of output voltage with the change of inner diameter, D_i , in case of the aspect ratio, L/D , being changed 0.3 to 1

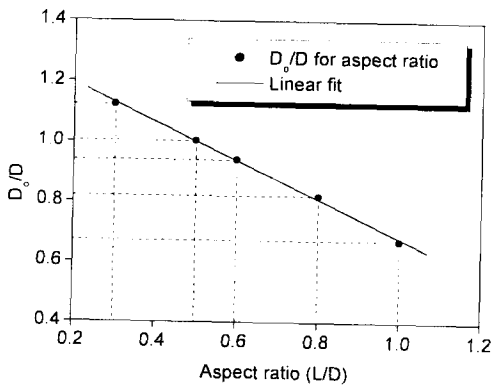


Fig. 8 The change of D_0/D as a function of aspect ratio, L/D , for obtaining the maximum output voltage

작아질수록 접촉면의 외경을 크게 설계해야 함을 의미하며, 이로써 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 줄일 수 있다.

Fig. 7은 각각의 세장비에 대한 감지부 접촉면의 내경에 따른 로드셀 출력 편차 기동성을 보여준다. 편차는 D_i 가 30 mm 일때의 출력을 기준으로 식 (3)으로부터 구하였다. 해석에서는 감지부 접촉면의 외경을 각 세장비에서 최대 출력을 얻는 외경으로 고정하였다.

세장비가 1인 경우와 같이 나머지 세장비에서도 내경이 증가할수록 편차 곡선의 기울기가 증가하고 있다. 따라서 감지부 접촉면의 내경을 작

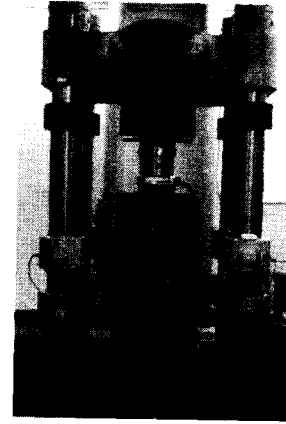


Fig. 9 The experiment for evaluating of a compact load cell using 10 MN hydraulic force standards machine in KRISS

게 설계함으로써 로드셀 출력에 대한 접촉면의 영향을 줄일 수 있다.

2.4 세장비에 따른 감지부 접촉 조건 설계

Fig. 8은 Fig. 6의 각 세장비에서 최대 출력을 얻는 접촉면 외경과 로드셀 감지부 직경과의 비를 보여준다. 세장비와 감지부 직경에 대한 접촉면의 외경은 반비례 관계를 가지며, 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{D_0}{D} = 1.3213 - \left\{ 0.6402 \times \frac{L}{D} \right\} \quad (4)$$

위 식을 이용하여 접촉면의 영향이 작고 임의의 세장비를 갖는 로드셀의 접촉 조건을 설계할 수 있다. 또한 원기동형 로드셀의 용량이 직경(D)의 제곱에 비례하므로 임의의 용량을 갖는 로드셀에 대해서도 적용이 확장될 수 있다.

용량에 따라 감지부 직경(D)이 결정되므로, 감지부의 길이가 길어지면 세장비가 거지고, 접촉면의 외경(D₀)은 작아진다. 따라서 감지부 바닥의 접촉 면적이 감소함으로써 접촉부의 응력은 증가한다. 그러므로 로드셀 설계시에는 식 (4)와 감지부의 최대 허용 응력을 고려하여 접촉부 외경을 결정해야 한다.

Table 1 Three cases for variation of a compact load cell with change of D_i , D_o , t , unit=mm

Case	D_i (mm)	D_o (mm)	t (mm)
1	30	168	50
2	30	176	50
3	30	209	50

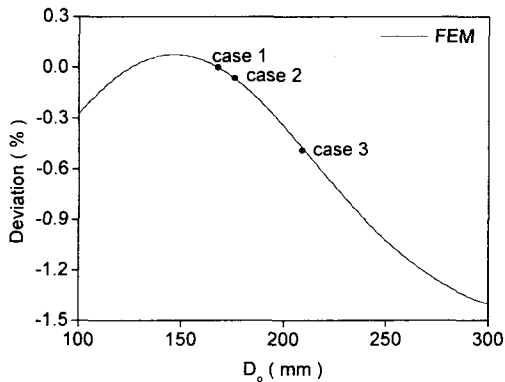


Fig. 10 The comparison of deviation between experiment and FEM over output voltage of case 1 in case of aspect ratio, $L/D=1$, $D_i=30$ mm

3. 검증

3.1 로드셀의 제작 및 실험 방법

유한요소해석과의 비교를 위해 세장비가 1인 로드셀을 제작하였다. 로드셀의 감지부의 재질은 고용량 힘센서의 탄성체로 많이 사용되는 니켈-크롬-몰리브덴강인 SNCM 8종을 사용하였다. Fig. 9와 같이 한국표준과학연구원의 10 MN 유압식 힘표준기로 하중을 가하였으며, 사용된 지시계는 HBM사가 제작한 DK38S6이었다. 시험 절차는 사전부하를 3회 가한 후 5단계로 나누어 증가순 분시험을 2회, 증가·감소순 분시험을 1회 실시하여 출력과 비직선도 오차, 반복도 오차 등의 특성을 보았다. 유한요소해석을 통해 설계한 접촉 조건을 검증하기 위해서는 로드셀의 감지부 바닥면이 임의의 접촉면을 갖도록 가공하여야 한다. 그러나 이러한 방법은 비용과 제작 시간에 있어서 많은 제약을 받는다. 따라서 본 논문에서는

Table 2 The characteristics of a compact load cell with supporting plate of three cases and without supporting plate

	without plate	case 1	case 2	case 3
output (mV/V)	1.54401	1.56071	1.55897	1.55115
nonlinearity error(% FS)	0.341	0.058	0.080	0.173
repeatability error(% FS)	0.004	0.003	0.003	0.003

하나의 감지부와 세개의 로드셀 지지부를 제작하여 다양한 접촉 조건을 구현하였다. 이렇게 함으로써 로드셀 제작에 따른 오차를 배제하여 접촉 상태에 따른 영향만을 분석할 수 있었다. 제작된 로드셀 지지부의 치수는 Table 1과 같다.

3.2 유한요소해석과 실험 비교

유한요소해석 결과를 검증하기 위하여 감지부 접촉면의 내경 D_i 는 30 mm이고, 접촉면의 외경 D_o 가 168 mm, 176 mm, 209 mm인 세가지 경우의 로드셀 지지부를 제작하여 실험을 수행하였다. Fig. 10에서 실선은 외경 D_o 변화에 따른 유한요소해석 출력값과 접촉면 외경이 168 mm일 때의 유한요소해석 출력값과의 편차를 나타내는 곡선이다. 또한 실험결과 case 1, 2, 3는 case 1을 기준으로 계산된 각 경우의 편차이다.

3.3 특성시험 결과

Fig. 10의 유한요소해석으로부터 case 1의 접촉 조건에서 출력이 가장 크고, 출력 편차의 기울기가 완만하여 로드셀의 특성이 우수할 것으로 예상되었다.

Table 2의 특성시험 결과는 실험이 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 보여주었다. 로드셀 지지부를 사용하지 않았을 때의 로드셀 출력은 1.54401 mV/V, 비직선도 오차는 0.341 %이었다. 이에 비해 case 1인 로드셀 지지부를 사용하였을 때의 로드셀 출력은 1.56071 mV/V, 비직선도 오차는 0.058 %로 나타나 출력과 비직선성이 크게 향상되었음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 대용량 compact 구조의 기동형 로드셀 설계를 위해 유한요소 해석을 수행하였으며, 이로부터 끝단효과의 영향을 줄이는 접촉 조건을 갖는 로드셀 지지부를 설계·제작함으로써 기존 로드셀 보다 로드셀의 특성이 크게 개선되었다. 본 논문은 다음과 같은 결론을 제시하고 있다.

(1) 유한요소해석 결과 로드셀 지지부의 내경 D_1 와 외경 D_2 를 변수로 했을 때, 내경이 작을수록 접촉부 형상의 영향이 작았다.

(2) 접촉부 형상의 영향이 작은 지지부 외경 D_2 와 세장비의 관계는 식 (4)와 같다. 이 식을 이용하여 임의의 세장비를 갖으며 접촉면의 영향이 작은 로드셀을 설계할 수 있었다. 또한 임의의 용량을 갖는 로드셀에 대해서도 이 식을 적용할 수 있다.

(3) 본 연구에서 설계한 compact형 로드셀은 기존 로드셀과 비교했을 때 출력은 1.54401 mV/V에서 1.56071 mV/V로 약 1.1 % 증가하였고, 비직선도 오차는 0.341 %에서 0.058 %로, 반복도 오차는 0.004 %에서 0.003 %로 그 특성이 개선되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업(힘 측정 및 평가 연구실)에서 후원하였음. (과제 번호: 2000-N-NL-01-C-141)

참고문헌

(1) Bray, A., 1972, "The Influence of Contact Stresses on the Characteristics of a Load Cell," *V*

D I Berichte, pp. 43~52.

(2) Robinson, G.M., 1986, "Errors due to Non-Uniform Axisymmetric Loading of Column Load Cell," *Mechanical Problems in Measuring Force and Mass*, Martinus Nijhoff Publishers.

(3) Robinson, G.M., 1995, "Genetic Algorithm Optimization of Load Cell Geometry by Finite Element Analysis," pp. 927~952.

(4) Robinson, G.M., 1995, "The Influence of Contact Stresses on Cylindrical Strain Gauge Load Cells," *Proceedings of the 14th Conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass*, Warszawa, Poland, September.

(5) Sundin, K.G. and Johsson, K.G., 1985, "A Stiff and Compact Impact-Force Transducer Based on Strain Measurement," Cambridge University.

(6) Mitchell, R. A., Wooley, R. M. and Fisher, C. R., 1971, "Formulation and Experimental Verification of an Axisymmetric Finite-element Structural Analysis," *J. of Res. of the National Bureau of Standards*, 75C, Nos 3 & 4, 155~163.

(7) Dae-Im Kang, 1994, "Design and Application of Force Measuring System Using Build-up Technique," Ph. D. Thesis, Korea Advanced Institute Science and Technology.

(8) Lee, C. Y. and Kang, D. I., 1998, "Nonlinear Finite Element Analysis According to Design Parameters of A Column Type Load Cells," *Proceedings of the 16th Conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass*, Taejon, Republic of Korea, September.