

논문 94-3-2-04

30 MN 스트레인 게이지 방식 힘 센서의 제작 및 특성

강대임*, 송후근**, 이정태**

Fabrication and Characteristics of 30 MN Strain
Gage Type Force Sensor

D. I. Kang*, H. K. Song**, J. T. Lee**

요 약

힘 증강기법을 이용하여 10 MN 로드셀 3개로 30 MN 힘 센서를 설계·제작하였다. 로드셀은 스트레인 게이지 방식으로서 기동형 감지부로 설계되었으며 오차를 줄이기 위하여 온도보상회로등이 내장되어 있다. 특성실험 결과 제작된 힘 센서의 총오차는 0.1 % 이내로 추정되어 4.5 MN 이상의 대용량 재료시험기의 교정 및 시험에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

Abstract

A force sensor of 30 MN capacity using build-up technique in which three load cells of 10 MN capacity are arranged in parallel was fabricated. A column spring element was adopted as a shape of a strain gage type load cell. Temperature compensation circuits were used to reduce the error of a load cell. It was estimated that the total error of the fabricated force sensor is less than 0.1 %. The force sensor may be used to calibrate or test material testing machines above 4.5 MN capacity in industries.

I. 서 론

산업이 대형화, 정밀화됨에 따라 중화학 공업에서 대용량 힘 측정의 필요성이 날로 증가하고 있다. 힘 측정에 사용되는 힘 센서는 국가표준인 힘 표준기로부터 교정을 받아 사용해야만 힘 측정 결과에 대해 국제적으로 인정받을 수 있다. 한국표준과학연구원에서도 500 kN의 실하중 힘 표준기, 2 MN의 유압식 힘 표준기 그리고 4.5 MN의 교정링/하중장치를 사용하여 국가 힘표준을 유지하고 각종 교정용표준기(transfer

standard)로 힘표준을 산업체에 보급하고 있다. 그러나 산업체에서 요구하는 힘 측정용량은 30 MN으로 현재 보유하고 있는 힘 표준기의 용량을 훨씬 초과하고 있다.

이와같은 문제점을 해결하기 위하여 현재 보유하고 있는 힘 표준기를 사용하여 힘 측정기기의 교정 및 시험 능력을 대폭 향상시킬 수 있는 힘 측정의 증강기법에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 힘 측정 증강기법이란 여러 개의 로드셀들을 병렬로 배열하여 힘을 측정하는 기술로서 각각의 로드셀들을 현재 보유하고 있는 힘 표준기로 교정하여 사용함으로써 힘 표준 소급을 유지할 수 있는 방법을 말한다. 이와 관련된 연구사례를 살펴보면 영국의 국립물리연구소에서 10 MN 로드셀 3개를 사용하여 30 MN 힘 센서를 개발하였으며 네덜란드의 국립연구소에서도

* 正會員 : 한국표준과학연구원 역학연구부
(Div. of Mechanical Metrology)

** 한국표준과학연구원 역학연구부
(Div. of Mechanical Metrology)

<접수일자 : 1994년 5월 10일>

550 kN 로드셀 9개를 사용하여 4.95 MN 힘 센서를 개발하였고 센서의 오차가 0.02% 이내로 추정된다고 보고한 바 있다^[1,2]. 이외에도 폴란드, 독일등에서도 이와 비슷한 연구들을 수행하였거나 수행 중에 있다^[3]. 본 연구원에서도 그 동안 1.5 MN, 4.5 MN 용량의 힘 센서를 설계·제작하여 특성 실험을 완료하였으며 오차해석 결과 힘 센서의 총오차가 0.06 % 이내인 것으로 밝혀졌다^[4].

본 논문에서는 10 MN 스트레인 게이지방식 로드셀 3개를 사용하여 30 MN 힘 센서를 설계·제작하였으며 특성실험을 통하여 그것의 오차를 추정한 결과 힘 측정기기의 교정용 표준기로 사용할 수 있음을 확인하였다.

II. 힘 센서 설계 및 제작

1. 힘 센서의 구조

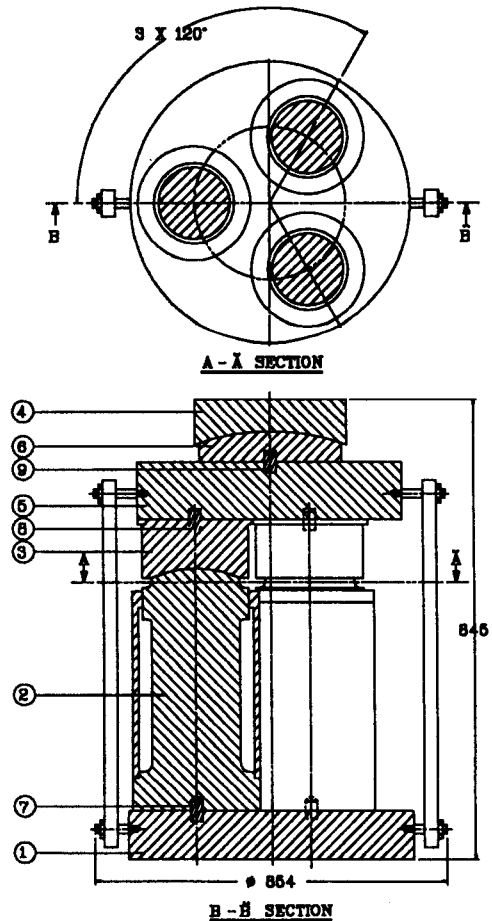
힘 센서의 구조는 힘 증강기법을 이용하기 위하여 그림 1과 같이 10 MN 로드셀 3개로 구성되어 있으며 측정 최대용량은 30 MN이다. 로드셀의 크기는 외경 지름이 300 mm이고 높이가 380 mm로서 상부면은 10 MN 하중에서도 소성변형이 발생하지 않도록 곡률 반경이 200 mm인 볼록구면으로 되어 있으며 구형 캡(spherical cap)과 한조를 이루어 사용된다. 로드셀 곡면부와 구형 캡의 아랫면은 균일한 접촉이 이루어지도록 특별 연마 가공을 하였으며 로드셀 각각에 걸리는 힘이 균일하도록 구형 캡을 포함한 로드셀들의 높이가 ±2 μm이내가 되도록 정밀 연마가공 하였다. 원형 단면 감지부를 갖는 로드셀의 경우 경계 조건의 영향을 배제하고 스트레인 게이지 부착지점에서 균일한 응력분포를 얻기 위해서는 감지부의 길이를 지름의 2~4배로 설계하는 것이 바람직하나^[5] 10 MN 로드셀의 경우 현재 국내 산업체에서 보유하고 있는 대용량 재료시험기의 유효 설치공간을 고려하여 길이대 지름의 비를 1로 하였다.

기동형 로드셀의 경우 힘이 축 중심에 가해졌을 때 스트레인 게이지가 부착되는 감지부의 응력장은 수직응력만이 존재하며 축방향의 스트레인 게이지는 수직응력에 상응하는 변형률을 감지하고 원주방향의 스트레인 게이지는 축방향의 프와송비만큼 감지하게 된다. 따라서 기동형 감지부에 스트레인 게이지를 축

방향으로 2개, 원주방향으로 2개 부착하여 휘스톤 브리지를 구성할 경우 브리지 회로의 입·출력 전압비 E_0/E_1 와 변형률 ϵ 과의 관계는 다음과 같다.

$$E_0/E_1 = \frac{K\epsilon(1+\nu)}{2 + K\epsilon(1-\nu)} \quad (1)$$

여기에서 K 와 ν 는 각각 스트레인 게이지의 게이지 상수 및 감지부 재료의 프와송비를 나타낸다. 게이지 상수가 2인 스트레인 게이지를 사용하고 정격 출력이 1.5 mV/V가 되도록 하려면 감지부 재질이 강일



- 1 : BASE PLATEN
- 2 : LOAD PLATEN
- 3,4 : SPHERICAL CAP
- 5 : MIDDLE PLATEN
- 6 : LOAD BUTTON
- 7,8,9 : PIN

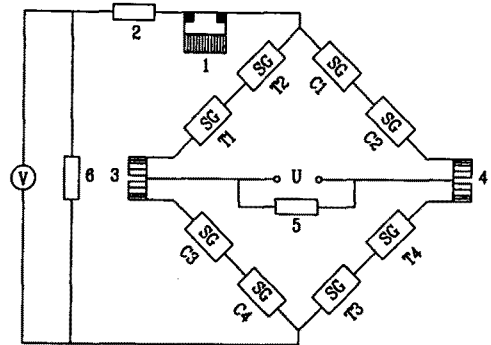
그림 1. 30 MN 힘 센서의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of 30 MN force sensor.

경우 설계 변형률은 약 $1154 \mu\text{m/m}$ 가 된다. 그러나 본 논문에서는 로드셀의 정확도를 높이기 위하여 온도 보상회로등을 휘스톤 브리지의 입력단에 첨가할 예정이므로 이로 인한 출력 저하가 예상되어 설계 변형률을 $1285 \mu\text{m/m}$ 로 하였다. 이 경우 감지부의 직경은 217.2 mm 가 된다.

로드셀 A, B, C는 밀판상에 120° 간격으로 지름이 358 mm 인 동일 원주상에 가이드 핀에 의해 장착되도록 하였다. 밀판상에 로드셀의 위치오차는 힘 센서의 계통 오차의 요인이 될 수 있으므로 가이드 핀 구멍의 위치를 지그보링기계를 사용하여 정밀하게 가공하였다. 힘 센서에 편심하중 또는 경사하중이 가해졌을 때 로드셀 각각에 굽힘 모멘트가 작게 걸리도록 베어링 역할을 하는 하중 버튼(load button)과 구형 캡을 장착하였다. 감지부의 재질은 니켈-크롬-몰리브덴 강인 SNCM 8을, 기타 부품은 니켈-크롬강인 SCM 4을 모두 열처리하여 사용하였다.

2. 스트레인 게이지 부착 및 회로 구성

스트레인 게이지는 축 방향으로 4개, 원주 방향으로 4개를 부착하였으며 사용된 스트레인 게이지는 정밀 변환기용으로서 규격이 N2A-06-T004N-350이고 게이지 길이가 3.175 mm 이고 게이지 상수가 2.07이며 저항값이 350Ω 이다. 접착제는 고온경화제인 M-bond 610을 사용하였으며 경화하는 동안 250 kN/m^2 의 압력을 가하였으며 경화 온도는 165°C 에서 2시간 유지하였다. 스트레인 게이지 부착이 완료된 후 경화압력에 의한 잔류응력의 영향을 제거하기 위해서 205°C 에서 2시간 동안 후처리를 하였다. 회로 구성은 그림 2와 같이 브리지 한개의 암(arm)에 스트레인 게이지를 2개씩 직렬로 연결하였다. 온도변화에 따른 영점변화의 보상 및 브리지의 초기 불평형의 조정을 위해서 구리 게이지(copper gage) 및 콘스탄탄 게이지(constantan gage)를 각각 브리지 내에 삽입하였다. 온도변화에 따른 로드셀의 감도변화를 보상하기 위해서 60Ω 의 발코 게이지(balco gage)를 브리지의 입력단에 직렬로 연결하였다. 로드셀들의 출력은 측정이 간편하고 측정 오차가 작은 병렬회로를 이용하여 측정하였다.^[1,3] 이 경우 병렬회로에 의한 오차를 줄이기 위하여 로드셀들의 감도 및 입·출력 브리지저항을 정밀저항으로 동일하게 맞추었다. 스트레인 게이지의 회로 연결, 각종



- 1 : BALCO
- 2 : RESISTOR
- 3 : COPPER
- SG : STRAIN GAGE
- T1,T2,T3,T4 : TENSION SG
- C1,C2,C3,C4 : COMPRESSION SG
- 4 : CONSTANTAN
- 5 : RESISTOR
- 6 : RESISTOR

그림 2. 로드셀의 회로도
Fig. 2. Circuit diagram of a load cell.

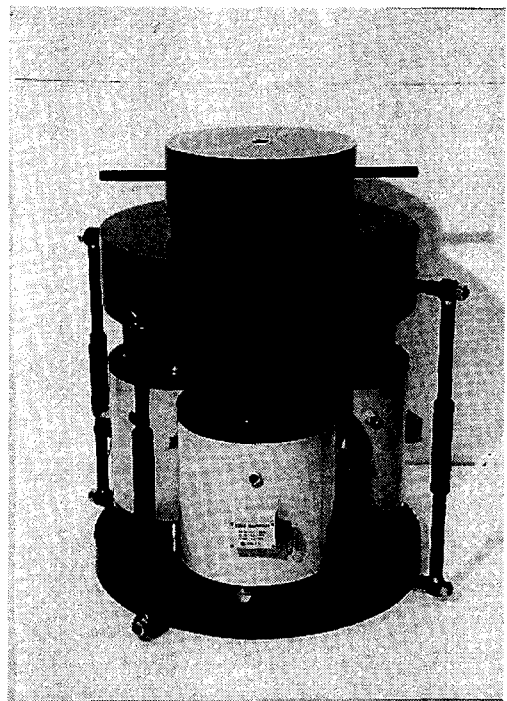


그림 3. 제작된 힘 센서의 사진
Fig. 3. Photograph of 30 MN force sensor fabricated.

보상 저항 삽입 및 보정 등을 완료한 휘스톤 브리지 회로도에는 그림 2와 같다. 설계·제작이 완료된 30 MN 힘 센서는 그림 3과 같다.

III. 특성 실험

10 MN 로드셀의 특성을 실험하기 위해서 일본계량연구소에서 보유하고 있는 유압식 힘 표준기(용량 : 20 MN, 정확도 : 1×10^{-4})을 사용하였다^[6]. 로드셀의 브리지 입력전압을 공급하고 하중 변화에 따른 출력전압을 측정하기 위해서 고정밀 지시계 (모델명 : DK-38S6, 정확도 : 0.0025 %)을 사용하였다.

로드셀의 출력특성을 평가하기 위하여 힘측정기기 표준교정절차^[7], DIN 규격^[8]을 참조하여 실험하였으며 로드셀의 거동을 안정시키기 위하여 정격용량의 110 % 까지 50회의 사전부하를 실시하였다. 로드셀의 크리프 시험은 사용된 힘 표준기의 특성때문에 3분간만 실시하였다. 온도변화에 따른 영점출력(zero output)의 변화를 측정하기 위해서 정밀 항온조를 사용하여 0 °C, 20 °C, 40 °C에서 실험하였으며 그 결과를 토대로 영점출력 변화량을 줄이기 위해서 휘스톤 브리지내에 삽입된 구리 게이지를 이용하여 보상하였다. 온도변화에 따른 감도(sensitivity) 변화는 스트레인 게이지의 종류, 감지부의 재질의 영향을 받는 것으로서 스트레인 게이지 및 감지부 재질이 동일할 경우 감지부 형태, 로드셀의 용량 및 하중 부하 방식에 큰 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있다^[9]. 따라서 본 논문에서는 온도변화에 따른 감도변화 실험을 별도로 하지 않았다.

IV. 결과 및 고찰

1. 출력 특성

로드셀 A, B, C의 정격출력(rated output)은 각각 1499.91 $\mu\text{V/V}$, 1500.12 $\mu\text{V/V}$, 1500.62 $\mu\text{V/V}$ 로 나타났으며 감도들의 최대 상대편차는 0.1 % 이내이다. 로드셀들의 출력특성은 그림 4와 같다. 횡축은 부하된 힘을 나타내고 종축은 무하중에서의 출력과 정격하중(rated load)에서의 출력을 직선으로 연결하여 그것을 기준출력으로 가정하였을 때 실제 측정된 출력과 기준출력과의 편차를 나타낸다.

로드셀 A, B, C의 출력특성은 거의 비슷한 거동을

보이고 있으며 비직선성 오차는 2 MN에서 최고값을 보이고 그 크기가 각각 0.21 %RO(rated output), 0.21 %RO, 0.19 %RO이다. 일반적으로 기동형 감지부로 된 로드셀의 경우 비직선성 오차는 정격용량의 50 % 근처에서 최대가 되며 그 점을 기준으로 좌우 대칭형상을 이룬다. 출력특성이 일반적인 기동형 로드셀 거동과 다르게 나타난 것은 감지부의 길이대 지름의 비를 1로 설계하였기 때문에 힘이 전달되는 접촉면 즉 로드셀의 바닥면과 윗면에서 접촉에 의한 상호작용 그리고 감지부의 노치효과가 스트레인 게이지 부착 지점에 영향을 주기 때문이며 그 영향이 부하되는 힘에 따라 달라지기 때문인 것으로 생각된다.

일반적으로 힘 센서를 교정용 표준기로 사용할 경우 이와같은 출력특성거동으로부터 2차 또는 3차의 특성곡선식을 구하여 사용하게 되므로 비직선성 오차는 힘 센서의 오차에 포함시키지 않아도 되며 대신 내삽오차만을 고려하면 된다.

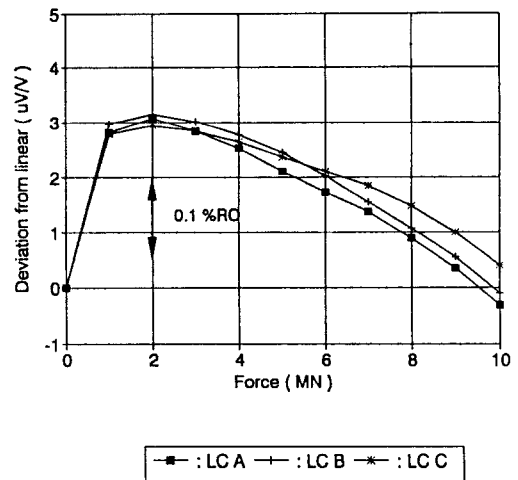


그림 4. 로드셀의 출력 특성곡선

Fig. 4. Characteristic curves of load cells.

2. 재현도 특성

그림 5는 로드셀을 힘 표준기의 동일한 설치방향에서 반복 실험했을 때의 재현도 오차 brg,i 를 나타낸 것으로서 brg,i 는 식 (2)로부터 계산된다.

$$brg,i = \frac{x_{i,max} - x_{i,min}}{x_{g,i}} \times 100(\%) \quad (2)$$

여기에서

$\overline{x_{g,i}}$: i 번째 하중에서의 평균출력

x_{i} : i 번째 하중에서의 출력

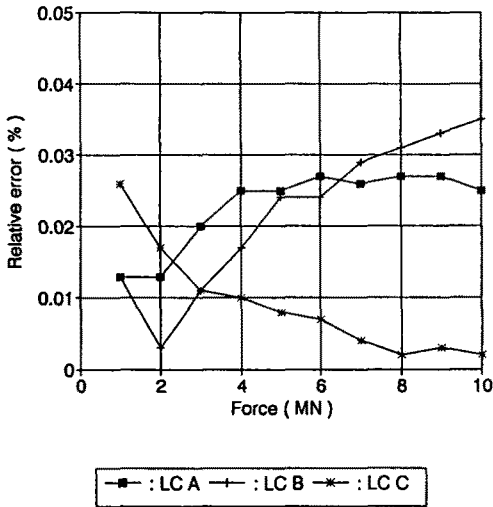


그림 5. 동일한 설치방향에서의 로드셀의 재현도 오차
 Fig. 5. Relative repeatability errors of load cells for same installation position.

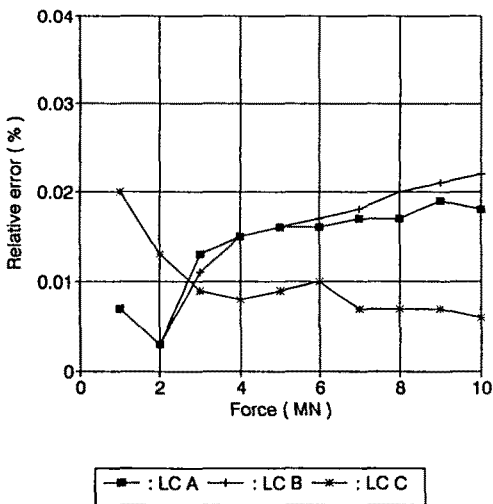


그림 6. 설치방향을 바꾸었을 때 로드셀의 재현도 오차
 Fig. 6. Relative repeatability errors of load cells for different installation positions.

하중변환기를 힘 표준기 부하축을 중심으로 설치 방향을 0° , 90° , 180° , 270° 로 바꾸면서 실험했을 때의 재현도 오차 brv,i 는 그림 6과 같으며 brv,i 는 다음 식으로 계산된다.

$$brv,i = \frac{X_{i,max} - X_{i,min}}{X_{v,i}} \times 100(\%) \quad (3)$$

여기에서

$\overline{x_{v,i}}$: i 번째 하중에서 네 방향에서 얻어진 평균출력

동일한 설치방향에서의 재현도 오차 brg 는 전 시험 하중에서 0.035 % 이내이고 설치 방향을 바꾸었을 때의 재현도 오차 brv 는 전 시험 하중에서 0.025 % 이내이다. 따라서 로드셀들의 재현성은 매우 우수한 것으로 나타났다.

3. 하중이력 및 크리프 특성

하중이력 오차는 로드셀에 힘을 증가순으로 가했을 때의 출력과 감소순으로 가했을 때의 출력의 편차를 각 시험 하중으로 나눈 값으로서 그 결과는 그림 7과 같다.

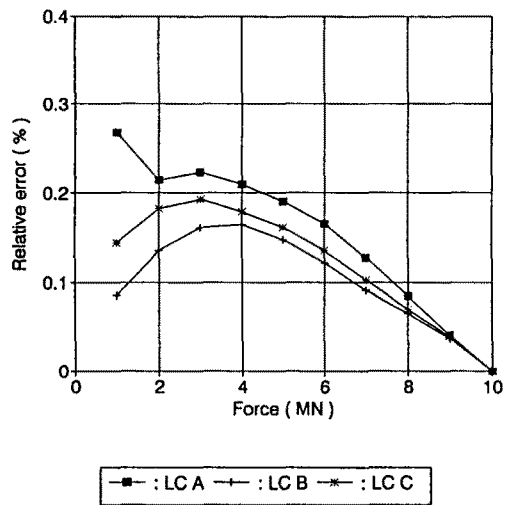


그림 7. 로드셀의 하중이력 오차
 Fig. 7. Relative hysteresis errors of load cells.

하중이력 오차는 최대 0.28 %로서 기동형 감지부의 경우 보통 얻을 수 있는 오차와 비교했을 때 약

1.5배 정도 크게 나타났다. 그 원인으로서는 로드셀 출력저동과 마찬가지로 접촉면의 상호작용 및 노치의 효과 때문인 것으로 생각되며 앞으로 이에 대한 정량적인 원인 분석이 필요하다

로드셀의 크리프는 일정한 힘이 부하되었을 때 시간의 변화에 따른 로드셀 출력변화를 나타내는 것으로서 힘 측정시 중요한 오차 요인이 된다. 그림 8은 로드셀의 크리프 특성을 나타낸 것으로서 횡축은 시간을 종축은 하중이 부하되었을 때의 출력을 기준으로 한 상대편차를 나타내고 있으며 실험하중은 10 MN 이다. 실험시간 3분 동안 크리프 오차는 $\pm 0.01\%$ 이내로 나타났다. 일반적으로 크리프 오차는 초기 시험 3분 이내에 70~80%가 발생하는 것으로 알려져 있다^[10]. 따라서 본 논문에서 설계·제작한 로드셀의 크리프 특성은 상당히 우수하다.

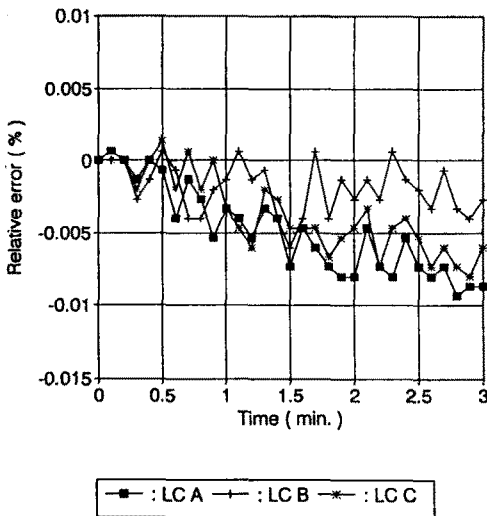


그림 8. 로드셀의 크리프 오차
Fig. 8. Relative creep errors of load cells.

4. 온도 특성

로드셀의 온도 특성에는 온도변화에 따른 영점변화와 감도변화가 있다. 온도변화에 따른 영점 출력변화 요인으로는 스트레인 게이지 저항선(grid)의 저항계수 및 선팅창 계수가 온도의 함수이고 스프링 요소 재질의 선팅창 계수가 온도의 함수이므로 로드셀에 힘이 가해지지 않는 상태에서도 주위온도가 변하면 로드셀의 영점도 변하게 된다. 본 논문에서는 그림 2

의 구리 게이지를 이용하여 $0^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 온도구간에서 온도변화에 따른 영점변화를 $\pm 0.003\%/\text{CRO}$ 이내가 되도록 보상하였다. 온도변화에 따른 로드셀의 감도변화는 스프링 요소의 재질, 스트레인 게이지의 종류에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다^[9]. 본 논문에서는 온도 실험장치의 문제로 로드셀 감도에 대한 온도 특성실험은 하지 못하였으나 지금까지의 연구결과를 종합하여 볼 때 10 MN 로드셀의 온도변화에 따른 감도 변화는 $\pm 0.002\%/\text{COL}$ 이내일 것으로 추정된다^[9,11].

5. 회로오차 및 내삽오차

로드셀 각각을 특성 실험한 후 30 MN 힘 센서를 구성하였으며 힘 센서의 출력은 각 로드셀의 브리지를 병렬로 연결하여 측정하였다. 병렬회로를 이용한 측정방식의 경우 전압계에 의해 측정되는 출력전압 U_k 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_k = \frac{1}{3}(U_1 + U_2 + U_3) - \Delta U_k \quad (4)$$

여기에서 U_1, U_2, U_3 는 로드셀의 출력을 나타내고, ΔU_k 는 로드셀의 출력감도의 차, 출력저항의 차, 로드셀 각각이 감지하는 힘의 차이에 의해서 결정되는 값으로서 H. Wieringa의 오차 해석에 의하면 로드셀의 출력저항의 최대편차가 0.01% 이내이고, 감도의 최대편차가 0.1% 이내이며 로드셀 각각이 감지하는 힘의 최대편차가 10% 이내이면 $\Delta U_k/U_k$ 는 0.01% 이내가 된다^[11]. 본 논문에서 제작한 로드셀 A, B, C의 출력저항은 각각 702.51 Ω , 702.48 Ω , 702.46 Ω 이므로 최대편차가 0.01% 이내이며 감도의 최대편차도 0.1% 이내이었다. 또한 로드셀 각각이 감지하는 힘의 최대편차는 5% 이내이었다. 따라서 병렬회로의 사용에 의한 측정오차는 0.01% 이내가 된다. 따라서 식 (4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_k \approx \frac{1}{3}(U_1 + U_2 + U_3) \quad (5)$$

따라서 로드셀 A, B, C의 출력의 평균값 U ($\mu\text{W}/\text{V}$)와 시험하중과의 관계로부터 식 (6)을 사용하여 힘 센서의 출력감도 S ($\text{kN}/\mu\text{W}/\text{V}$)를 구할 수 있다.

$$S = a_0 + a_1U + a_2U^2 \quad (6)$$

여기에서 a_0, a_1, a_2 는 최소자승법으로 계산되는 계

수이며 본 논문에서 제작한 힘 센서의 경우 a_0, a_1, a_2 는 각각 $-19.8083, 6.6633, 0.10435 \times 10^{-4}$ 이다. 따라서 힘 센서에서 측정된 출력 $U(\mu V/V)$ 을 식(6)에 대입하여 출력감도 S 를 구하고 다시 S 에 힘 센서를 구성하는 로드셀의 수량, 즉 여기에서는 3을 곱함으로써 힘을 측정할 수 있게 된다. 식 (6)을 사용하여 미지의 힘을 측정할 때 내삽오차는 $\pm 0.03\%$ 이내이다.

6. 힘 센서의 오차분석

본 연구에서 설계, 제작한 힘 센서의 오차를 종합한 결과는 표 1과 같다. 교정용 표준기중 최상등급인 G 0.5 등급^[8]과 비교하였다. 크리프 오차, 온도에 의한 오차는 교정용 표준기의 경우 별도의 규격이 없으므로 일반적으로 많이 사용되는 정밀 로드셀 1/3,000 등급을 기준으로 하였으며 회로오차는 Wieringa의 오차 해석 결과^[1]를 기준으로 하였다. 하중이력 오차를 제외한 모든 오차가 G 0.5 등급이내임을 볼 수 있다.

하중이력 오차는 하중을 증가순으로 가하면서 사용할 경우는 거의 무시할 수 있으며 비직선성 오차도 출력 특성곡선을 곡선접합하여 사용할 경우 내삽오차로 대체될 수 있다. 따라서 재현도 오차, 크리프 오차, 온도 변화에 따른 감도 변화, 내삽오차 및 병렬회로 사용으로 인한 측정오차만을 고려하여 힘 센서의 총오차를 제곱합 평방근방법으로 계산한 결과는 그림 9와 같다. 3 MN을 초과하는 하중범위에서는 총오차가 0.03% 이내이다. 로드셀을 병렬로 배열하여 힘 센서로 만들 경우 힘 센서를 구성하는데 사용된 각종 부품들의 영향 즉 하중전달 기구에 의한 오차도 고려되어야 한다. 이와같은 오차를 알기 위해서는 힘 센서를 직접 실험해야만 하나 대용량 힘 센서의 경우 힘 표준기의 용량의 한계로 실험이 거의 불가능하다. 따라서 이와같은 하중전달기구의 오차는 시험가능한 용량의 모델시험으로부터의 결과를 토대로 예측하는 방법이 현재 사용되고 있다. 본 연구실에서 지금까지 설계·제작한 500 kN, 1.5 MN 및 4.5 MN 용량 힘 센서의 경우 실험결과 하중전달기구에 의한 오차는 위에서 계산한 총오차 이내임이 밝혀졌다^[4,5]. 따라서 본 논문에서 제작한 힘 센서의 총오차는 지금까지의 연구결과들과 비교해 볼 때 3 MN-30 MN 범위에서 0.1% 이내인 것으로 추정된다. 교정용 표준기의 정확도가 0.25 %인 점을 고려해 볼 때 본 논문에서 설계·

제작한 힘 센서는 특성이 매우 우수한 것으로 나타났으며 산업체의 각종 대용량 재료시험기의 교정 및 시험에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

표 1. 30 MN 힘 센서의 오차

Table 1. Error of the designed 30 MN force sensor.

Specifications	G 0.5 class (%)	Test result (%)
○ Max. relative repeatability error, brg	0.05	0.035
○ Max. relative repeatability error, brv	0.10	0.025
○ Max. relative interpolation error	0.05	0.03
○ Max. relative hysteresis error	0.15	0.28
○ Creep error for 3 min.	0.03 *	0.01
○ Temperature effect on zero output	0.003%/°CRO *	0.003%/°CRO
○ Temperature effect on sensitivity	0.002%/°COL *	0.002%/°COL
○ Circuit error	0.01 **	0.01

* : 1/3000 class of load cell

** : Wieringa data [1]

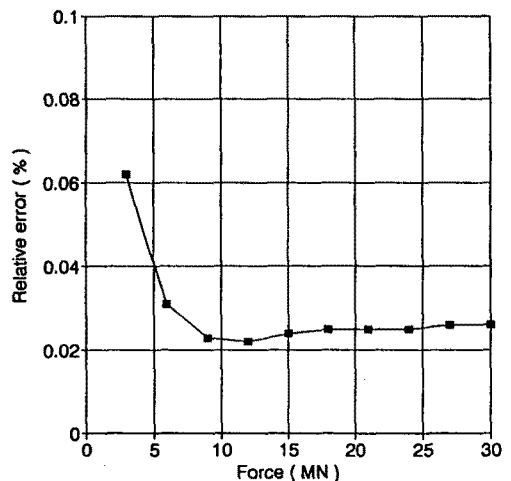


그림 9. 힘 센서의 총오차

Fig. 9. Estimated total error of force sensor.

V. 결 론

10 MN 스트레인 게이지식 로드셀 3개로 구성된 30 MN 힘 센서를 설계·제작하였으며 특성실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 로드셀들의 비직선성 오차는 약 0.2 %로 나타났으며 출력 특성곡선을 2차식으로 접합할 때 내삽오차가 ± 0.03 % 이내이다.
- (2) 로드셀들의 재현도 오차는 설치 방향을 고정시켰을 때와 설치 방향을 축방향으로 회전시켰을 때 각각 최대 0.035 %, 0.025 %로 나타났으며 크리프 오차는 3분 동안 0.01%이내 이었다.
- (3) 30 MN 힘 센서의 총오차는 로드셀 각각의 오차와 출력 측정회로만을 고려했을 때 3 MN-30 MN 범위에서 0.03% 이내로 나타났다. 그러나 힘 센서를 구성하는 각 부품들의 영향에 대해서는 실험 장치의 문제로 조사하지 못하였다. 지금까지의 연구결과들과 비교해 볼 때 본 논문에서 제작한 힘 센서의 총 오차는 0.1% 이내일 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

- [1] H. Wieringa, "Design of a 1.65 and 4.95 MN transfer standard based on the build-up procedure", *Proceedings of the 10th conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass*, Kobe, pp. 205-208, 1984.
- [2] R. C. Debnam, R. F. Jenkins and N. R. Bentley, "The provision of national standards of force in the range 0.5 MN to 30 MN in compression", *VDI-Berichte*, Nr. 312, pp. 79-84, 1978.
- [3] A. Gizmajer, "Calibration of a force transducer by mechanical connection in series with a group of transducers loaded in parallel", *VDI-Berichte*, Nr. 312, pp. 107-111, 1978.
- [4] 강대임, 송후근, "증강 원리를 이용한 힘 측정 시스템 설계 및 제작", *한국정밀공학회지*, 제10권, 제2호, pp. 86-94, 1993.
- [5] 강대임, "Build-up 기법을 이용한 힘 측정 시스템의 설계 및 응용", *한국과학기술원 박사학위논문*, pp. 20-21, 1994.
- [6] N. Hida, T. Tojo, H. Maejima and M. Murata, "Performance of newly developed 20 MN hydraulic force standard machine," *Proceedings of the 10th conference of IMEKO TC3 on Measurement of Force and Mass*, Kobe, pp. 187-192, 1984.
- [7] 교정검사기관협의회, "힘 측정기기의 표준교정절차", KASTO-ME-1-84, 1984.
- [8] DIN 51301, "Verification of materials testing machines with the aid of static force measuring devices", 1986.
- [9] 강대임, 백종승, "고정밀 힘 측정용 로드셀의 개발", *한국표준연구소 논문집*, 제3권, pp. 209-218, 1986.
- [10] R. A. Mitchell and S. M. Baker, "Characterizing the creep response of load cells," *VDI-Berichte*, Nr. 312, pp. 43-48, 1978.
- [11] J. Dorsey, "Homegrown strain gage transducers", *Experimental mechanics*, Vol. 17, No. 7, pp. 255-260, 1977.

 著 者 紹 介

**강대임**

1958년 3월 17일생. 1980년 고려대학교 기계공학과 졸업(공학사). 1982년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사). 1994년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 1982년~현재 한국표준과학연구원 역학연구부 선임연구원. 주관심분야 : 스트레인 게이지 응용, 하중센서 및 힘 표준 시스템 개발

**송후근**

1951년 7월 15일생. 1977년 인하전문대 기계과 졸업. 1978년~현재 한국표준과학연구원 역학연구부. 주관심분야 : 하중센서 및 힘 표준 시스템 개발

**이정태**

1959년 11월 17일생. 1989년 대전공업대학 전자공학과 졸업(공학사). 1986년~현재 한국표준과학연구원 역학연구부. 주관심분야 : 하중센서 및 힘 표준 시스템 개발