

## 증강 원리를 이용한 힘 측정 시스템 설계 및 제작에 관한 연구

강 대 임\*, 송 후 근\*\*

### Design and Fabrication of Force Measuring System using Build-up Procedure

Dae-Im Kang\*, Hou-Keun Song\*\*

#### ABSTRACT

In heavy industries forces which are exceeding the range of available force standard machines have to be measured. Force measuring system using build-up procedure can be applied to measure large forces efficiently. In this study strain gage type force sensors are designed and fabricated, and the build-up force measuring system with 4.5 MN capacity using the developed force sensors is fabricated. The total error of the force sensor is 0.03% or less over the range of 600 kN~1.5 MN and the force measuring system is less than 0.06% or less over the range of 500 kN~4.5 MN.

**Key Words :** 힘 센서(force sensor), 스트레인 게이지(strain gage), 힘 표준기(force standard machine), 재현도(repeatability), 하중이력(hysteresis), 크리프(creep), 스프링 요소(spring element), 보상 회로(compensation circuit), 불확도(uncertainty)

#### 1. 서 론

산업이 고도화, 대형화 됨에 따라 조선, 건설, 기계 산업분야에서 대용량 힘 측정의 필요성이 날로 증가하고 있다. 힘 측정에 사용되는 힘 센서는 국가 힘 표준인 힘 표준기로부터 교정을 받아 사용함으로써 힘 측정 결과에 대해 국제적으로 인정받을 수 있다.

국가 힘 표준으로 사용되는 힘 표준기로는 실하중 힘 표준기(deadweight force standard machine), 유압식 배울식 또는 레버식 힘 표준기(hydraulic or lever type force standard machine) 및 증강 원리(build-up)을 이용한 힘 표준기 등이 있다. 실하중 힘 표준기는 정확한 질량값을 갖는 추의 무게를 힘 측정

센서에 직접 가할 수 있도록 제작된 장치로서 불확도가 0.002% 정도로 힘 표준기중에서 제일 정확한 장점을 갖고 있다.<sup>1)</sup> 실하중 힘 표준기는 용량이 증가함에 따라 추의 크기가 커지며 각종 부품의 정밀가공 및 조립에 문제점이 생기고 제작과 유지관리에 막대한 비용이 소요 되어 현재 미국립표준기술원(National Institute of Standards and Technology)에서 보유하고 있는 4.5 MN 용량이 세계 최대용량이다.<sup>2)</sup> 유압식 힘 표준기는 파스칼의 원리를 이용한 것으로서 단면적이 서로 다른 두조의 유압랩과 실린더를 유압배관으로 연결하여 두조가 균형을 이룬 상태에서 단면적이 작은 실린더에 질량값을 알고 있는 추의 무게를 가하면 단면적이 큰 실린더에 단면적의 비에 비례한 증폭된 힘이 발생하게 된

\* 한국표준과학연구원 질량연구실(정희원)

\*\* 한국표준과학연구원 질량연구실

다. 유압식 힘 표준기는 유압제어 및 마찰력 영향 등 때문에 불확도는 0.02% 정도로 실하중 힘 표준기보다 떨어지나 제작비 및 유지비가 실하중 힘 표준기보다 저렴하여 일본, 중국, 독일 등의 표준기관에서는 20 MN 용량의 힘 표준을 유압식 힘 표준기로 유지하고 있다.<sup>2)</sup>

Build-up 힘 측정 시스템을 이용한 힘 표준기는 힘 센서를 여러개 병렬로 조합하여 측정하고자 하는 힘을 분산하여 감지하도록 함으로써 대용량 힘을 용이하게 측정할 수 있도록 한 장치이다. 이 방법은 다른 방법에 비해 불확도가 0.2%로 큰 단점이 있으나 제작비 및 유지비가 아주 저렴한 장점을 갖고 있으며 힘 센서의 정확도가 날로 향상되고 있으므로 앞으로 불확도도 유압식 힘 표준기와 거의 대등한 수준까지 낮아질 것으로 기대되고 있다.<sup>3) 4) 5) 6)</sup>

본 연구에서는 힘 표준기에 사용될 수 있는 스트레인 게이지식 힘 센서를 설계 및 제작하고 힘 센서 각각의 특성을 실험한 후 build-up 힘 측정 시스템을 구성하였으며 build-up 시스템의 출력특성을 실험하여 오차를 계산하였다.

## 2. 증강 원리를 이용한 힘 측정 시스템

증강 원리를 이용한 힘 측정 시스템은 여러개의 힘 센서를 병렬로 배열하여 힘을 측정함으로써 대용량 힘을 효율적으로 측정할 수 있으며 측정 최대용량은 힘 센서 각각의 용량의 합과 같아진다. 각각의 힘 센서는 시스템을 구성하기에 앞서 개별적으로 실하중 힘 표준기나 유압식 힘 표준기에 의해 교정되어야 한다. 따라서 build-up 힘 측정 시스템을 이용한 힘 표준기는 직접 하중을 발생시키는 실하중 힘 표준기나 유압식 힘 표준기와는 달리 힘 센서를 이용한 비교 측정방식이므로 정확도는 힘 센서의 정확도에 크게 좌우된다. 그러므로 build-up 식 힘 표준기를 개발하기 위해서는 높은 정확도를 발휘할 수 있는 힘 센서의 설계·제작기술 확보는 물론 오차가 작고 간편한 힘 센서 출력신호 측정기술이 요구된다.

증강 원리를 이용한 힘 측정 시스템으로 힘을 측정할 때 힘 센서 각각의 출력신호를 측정하는 것은 시간이 많이 소요되고 동일한 시간에서 힘 센서 각각의 출력을 측정하기 어렵다. 힘 센서로 스트레인 게이지식 힘 센서를 사용하게 되면 출력전압을 직렬이나 병렬로 쉽게 연결할 수 있으므로 힘 센서들의 출력을 동시에 측정할

수 있게 되며<sup>4) 6)</sup>, Fig.1과 같이 병렬회로를 이용한 측정방식이 측정오차가 작아 많이 사용되고 있다. Fig.1 (a)는 힘 센서 3개를 이용하여 build-up 힘 측정 시스템을 구성한 후 출력신호를 병렬회로로 측정할 경우의 회로도이며 Fig.1 (b)는 그것의 동가회로를 나타내고 있다. 여기에서 S.G.는 스트레인 게이지를, V는 휘스톤 브리지의 입력전압을,  $U_1, U_2, U_3$ 는 힘 센서 각각의 출력감도(sensitivity)를,  $R_1, R_2, R_3$ 는 힘 센서 각각의 출력저항을 나타낸다.  $R_k$ 는 출력전압을 측정하는 전압계의 내부저항을 나타내고  $U_k$ 는 전압계에 의해 측정되는 출력전압을 나타낸다.

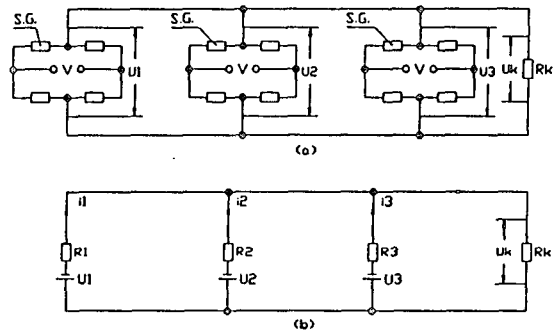


Fig.1 Output connected in parallel  
(a) circuit diagram  
(b) equivalent diagram

병렬회로를 이용한 측정방식의 경우 전압계에 의해 측정되는 출력전압  $U_k$ 는 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$U_k = \frac{R_2 R_3 U_1 + R_1 R_3 U_2 + R_1 R_2 U_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3} \times \left(1 + \frac{1}{R_k} \cdot \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}\right)^{-1} \quad (1)$$

휘스톤 브리지의 출력저항 즉  $R_1=R_2=R_3=350\Omega$ 이고 전압계의 내부저항  $R_k > 100\text{M}\Omega$ 이라고 가정하면

$$\frac{R_1 R_2 R_3}{R_k (R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)} < 1.2 \times 10^{-6} \ll 1 \quad (2)$$

이다. 따라서 출력전압  $U_k$ 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$U_k = \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}\right) / \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \quad (3)$$

만약에 힘 센서의 출력감도  $U_1, U_2, U_3$ 가 동일하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 쓸 수 있고, 또는 힘 센서의 출력저항  $R_1, R_2, R_3$ 가 동일하면 식 (3)은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$U_k = U_1 = U_2 = U_3 \quad (4)$$

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

그러나 일반적으로 힘 센서의 출력감도나 출력저항을 동일하게 제작하기는 거의 불가능하므로 출력전압  $U_k$ 는 식 (6)으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$U_k = \frac{1}{3} (U_1 + U_2 + U_3) - \Delta U_k \quad (6)$$

여기에서  $\Delta U_k$ 는 힘 센서들의 출력감도  $U_1, U_2, U_3$ 의 최대차, 출력저항  $R_1, R_2, R_3$ 의 최대차, build-up 시스템 구성후 힘 센서 각각이 감지하는 힘의 차이에 의해서 결정되는 값으로써 H. Wieringa의 오차해석에 의하면 힘 센서들의 출력저항의 최대편차가 0.01% 이내이고 감도의 최대편차가 0.1% 이내이며 힘 센서 각각이 감지하는 힘의 최대편차가 10% 이내이면  $\Delta U_k/U_k$ 는 0.01% 이내가 된다.<sup>4)</sup> 따라서 build-up 힘 측정 시스템의 병렬회로에 의한 오차를 0.01% 이내로 줄이기 위해서는 이와 같은 조건들을 만족할 수 있도록 힘 센서 각각을 설계·제작하여야 한다.

### 3. Build-up 힘 측정 시스템 설계·제작

#### 3-1. 힘 센서 설계·제작

##### 3-1-1. 스프링 요소 설계·제작

힘 센서에는 스트레인 게이지 방식, 압전 소자식, 자기식등 여러가지가 있으나 스트레인 게이지 방식이 재현도(repeatability), 안정도(stability)등의 관점에서 볼때 가장 좋은 특성을 가지고 있으므로 본 연구에서는 build-up 힘 측정 시스템으로 스트레인 게이지식 힘 센서를 사용하였다. 힘 센서에서 스프링 요소(spring element)는 측정하고자 하는 힘에 대응하여 적절한 수준의 변형이 발생되도록 하며 이 변형이 스프링 요소에 부착된 스트레인 게이지의 저항변화를 야기시키게 된다. 스프링 요소의 종류에는 기둥형(column), 전단형(shear), 링형(ring), 빔형(beam)등 여러 가지가 있으나 build-up 힘 측정 시스템은 대용량 힘 측정에 주로 사용되므로 이 목적에 맞도록 스프링 요소로 기둥형을 선정하였다. 기둥형 스프링 요소의 경우 스트레인

게이지를 축방향으로 2개, 원주방향으로 2개 부착하여 휘스톤 브리지를 구성할 경우 브리지 회로의 입·출력 전압비  $U/V$ 와 스트레인  $\epsilon$ 과의 관계는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$U/V = \frac{K\epsilon(1+\nu)}{2+K\epsilon(1-\nu)} \quad (7)$$

K는 스트레인 게이지의 게이지 상수이고  $\nu$ 는 감지부 재료의 프와송비를 나타낸다. 온도 보상회로, 비직선성 보상회로 삽입으로 인한 정격출력의 저하를 고려하고 정격출력이 2 mV/V 이상이 되도록 설계 스트레인을 1850  $\mu\text{m}/\text{m}$ 로 하였다. 스프링 요소의 단면은 스트레인 게이지 부착이 용이하고 굽힘 강도에 대한 내력이 크도록 원형 대신에 팔각형으로 하였으며 끝효과(end effect)에 의해 스프링 요소의 스트레인 게이지 부착 지점에서의 스트레인 분포가 균일하도록 길이대 직경의 비를 4로 하였다. 스프링 요소의 재료는 KS SNCM 8을 적절히 열처리하여 사용하였다.

#### 3-1-2. 스트레인 게이지 부착 및 회로구성<sup>7) 8)</sup>

스트레인 게이지는 Fig.2와 같이 기둥형 감지부 중앙

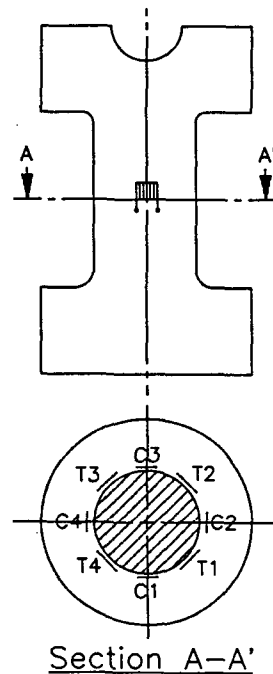


Fig.2 Position of strain gages



- 보유기관 : 독일 연방 물리청
- 용도 : 힘 센서의 하중 출력특성 실험
- 유압식 힘 표준기
  - 용량 : 15 MN
  - 불확도 : 0.02%
  - 보유기관 : 독일 연방 물리청
  - 용도 : Build-up 힘 측정 시스템의 하중 출력특성 실험
- 고정도 지시계 (High precision compensator)
  - 정확도 수준 : 0.0005%
  - 최대 분해능 : ±1,000,000
  - 용도 : 힘 센서 및 build-up 힘 측정 시스템의 입력전압 공급 및 출력전압 측정용

4-2. 실험방법

Build-up 힘 측정 시스템의 출력측정 회로에 의한 오차가 0.01% 이내가 되도록 힘 센서 각각의 감도의 최대편차 및 출력저항의 최대편차를 각각 0.1%, 0.01% 이내로 미세조정하였다. Build-up 힘 측정시스템 구성 후 힘 센서 각각에 걸리는 힘의 분포는 3% 이내이었다. 1.5 MN 힘 센서 각각을 1 MN 용량 실험중 힘 표준기를 사용하여 크리프 특성을 조사하였다. 3번의 사전 부하를 가한 후 1MN 하중을 부하한 상태에서 30분 동안 힘 센서의 출력을 측정하였다.

힘 센서의 출력특성은 ISO, DIN 및 힘 측정기기 표준 교정절차를 참조하여 실험 및 교정을 하였다.<sup>9) 10)</sup>  
 11) Build-up 힘 측정 시스템은 힘 센서 각각을 교정한 후 그 교정 결과로부터 미지의 힘을 측정하게 되나 본 연구에서는 build-up 힘 측정 시스템의 오차를 정량적으로 계산하기 위해 1 MN 실험중 힘 표준기와 15 MN 유압식 힘 표준기를 사용하여 build-up 힘 측정 시스템의 출력특성을 실험하였다. 여기에서 얻어진 build-up 시스템의 출력값과 힘 센서 각각의 출력특성 곡선으로부터 계산되는 출력값을 비교하여 오차를 계산하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5-1. 힘 센서 각각의 특성

5-1-1. 출력특성

Fig. 5는 힘 센서의 출력특성 거동을 나타내는 그래프로서 횡축은 부하된 힘을 나타내고 종축은 무하중에서의

출력과 정격하중(rated load)에서의 출력을 직선으로 연결하여 그것을 기준출력으로 가정하였을 때, 실제 측정된 출력과 기준출력과의 편차를 나타내고 있다. 힘 센서 A, B, C의 정격출력(full scale)은 각각 2151.811  $\mu V/V$ , 2151.526  $\mu V/V$ , 2151.752  $\mu V/V$ 이다. 힘 센서 A, B, C의 정격출력 즉 감도의 최대 편차는 0.02% 이내이다. Build-up 힘 측정 시스템을 구성할 때 사용되는 힘 센서의 출력특성이 동일한 것이 가장 이상적이다. 본 연구에서 제작된 힘 센서의 경우 A, C는 거의 동일한 출력특성을 보이나 B는 약간 다른 거동을 보이고 있다. 그 이유로는 힘 센서 B가 힘 센서 A, C에 비해 스프링 요소의 가공 오차, 사용된 스트레인 게이지의 오차, 스트레인 게이지 부착위치의 오차등이 다소 커서 그 오차들이 복합적으로 나타난 것으로 생각된다. 힘 센서 A, B, C의 출력특성은 재현도 오차 범위 내에서 항상 같은 거동을 보였다.

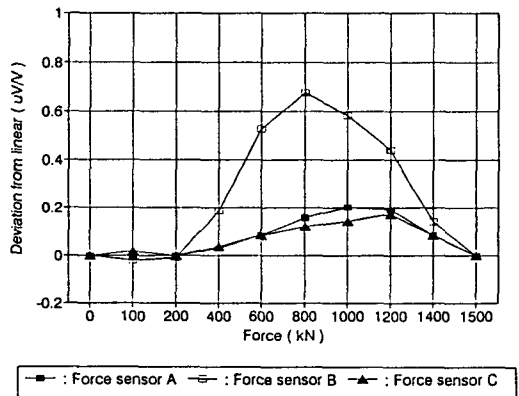


Fig. 5 Characteristic curves of the force sensors

힘 센서들의 비직선성 오차는 각각 0.009% FS, 0.032% FS, 0.008% FS로 나타났다. 비직선성 보상을 사용하지 않는 기동형 힘 센서의 경우 비직선성 오차는 0.1% 정도이므로<sup>12)</sup> 본 연구에서 사용한 반도체 게이지를 이용한 비직선성 보상방법은 그 효과가 우수함을 알 수 있다.

5-1-2. 재현도 특성

힘 센서의 재현도란 같은 시험하중에서 힘 센서 출력의 반복성을 나타내는 것으로서 힘 센서를 힘 표준기상에 동일한 설치방향에서 반복실험할 때의 재현도로 힘 센서를 힘 표준기 하중측을 중심으로 설치방향을 바꾸면

서 실험하였을 때의 재현도로 나눌 수 있다. 힘 센서를 동일한 위치에서 반복 실험하였을 때의 재현도 오차  $brg, i$ 는 식 (8)을 이용하여 계산하였으며 3회 반복 실험하였다.

$$brg, i = \frac{x_{i, \max} - x_{i, \min}}{x_{g, i}} \quad (8)$$

여기에서  $\overline{x_{g, i}}$ : i번째 하중에서의 평균 출력  
 $x_{i, i}$ : i번째 하중에서의 출력

힘 센서를 힘 표준기 하중축을 중심으로 설치방향을 바꾸어서 실험하였을 때의 재현도 오차  $brv, i$ 는 식 (9)를 이용하여 계산하였으며  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 의 네 방향에서 실험하였다.

$$brv, i = \frac{x_{i, \max} - x_{i, \min}}{x_{v, i}} \quad (9)$$

여기에서  $\overline{x_{v, i}}$ 는 i번째 하중에서 네 방향에서 얻어진 평균출력

힘 센서 A, B, C의 재현도 오차  $brg, i$ 와  $brv, i$ 는 각각 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다. 힘 센서의 등급 분류표에 의하면 초정밀급인 0.025% 힘 센서의 경우 재현도 오차  $brg$ 와  $brv$ 는 정격하중의 20%부터 정격하중까지의 범위에서 각각 0.01%, 0.02% 이내로 규정되어 있다.

10) 13) 300 kN에서 1.5 MN 범위에서 힘 센서 A, B, C의 재현도 오차  $brg$ 는 모두 0.01% 이내로 초정밀급 수준을 나타내고 있다. 반면에 힘 센서 A, B, C의 재현도 오차  $brv$ 는 800 kN에서 1.5 MN 범위에서는 0.02%의 조건을 만족하나 그 보다 낮은 하중에서는 그 오차가 점점 커져서 300 kN에서는 0.08%까지 증가하고 있음을 볼 수 있다. 재현도 오차  $brv$ 로 볼 때 본 연구에서 제작한 힘 센서의 등급은 정밀급인 0.1% 수준이다. 힘 센서의 설치방향을 바꾸면서 실험했을 때의 재현도 오차  $brv$ 가 동일방향에서 실험했을 때의 재현도 오차  $brg$  보다 크게 나타나고 있는 것은 힘 센서가 방향성을 갖고 있기 때문인 것으로 생각된다. 그 원인으로는 가공 오차 때문에 생기는 스프링 요소의 팔각 단면의 동심도와 강구가 놓여지는 강구집의 동심도의 편차 때문에 스트레인 게이지 부착위치에서의 스트레인 분포가 힘 센서가 설치되는 방향에 따라 미소하게 달라지기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 힘 센서의 재현도 오차를 초정밀급 수준으로 줄이기 위해서는 스프링 요소 단면의 형상으로 팔각단면보다 굽힘 강도가 다소 떨어지고 스트레인 게이지 부착이 다소 어려우나 가

공 오차가 작은 원형 단면을 사용하는 것이 더 효과적일 것으로 사려되며 강구집의 가공정밀도를 향상시킬 수 있는 대책등 보완 연구가 필요하다고 생각된다.

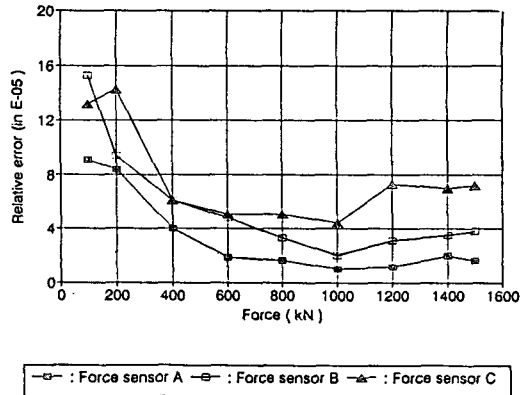


Fig. 6 Relative repeatability errors for same position of the force sensors

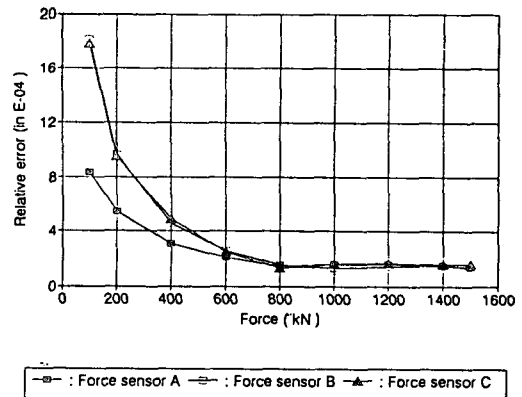


Fig. 7 Relative repeatability errors for different installation positions of the force sensors

### 5-1-3. 하중이력 특성

하중이력 오차는 힘 센서에 하중을 증가순으로 가했을 때의 출력과 감소순으로 가했을 때의 출력의 편차를 각 시험 하중에서의 출력으로 나눈 값으로서 그 결과는 Fig. 8과 같다. 힘 센서 A, B, C 하중이력 오차는 300 kN에서 0.13%로 정밀급인 힘 센서 수준이다. 하중이력 오차는 스프링 요소의 재질, 스트레인 게이지, 점착제, 힘 센서 바닥면과 힘 표준기 밀판(lower plate)의 마찰영향, 강구와 힘 센서 윗부분의 마찰영향

때문에 생기는 것으로 사려되며 앞으로 이에 대한 정량적인 분석이 필요하다고 생각된다.

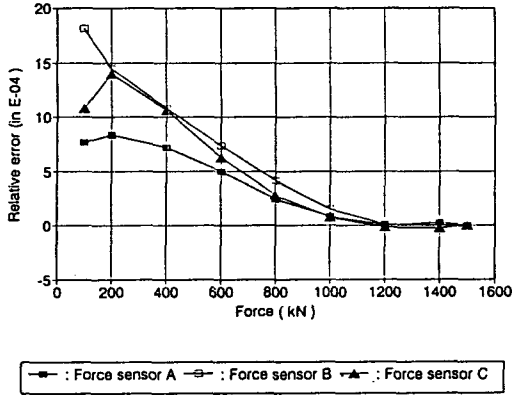


Fig. 8 Relative hysteresis errors of the force sensors

5-1-4. 크리프 특성

힘 센서의 크리프는 일정한 힘이 힘 센서에 부하되었을 때 시간의 변화에 따른 출력 변화를 나타내는 것으로 힘 측정시 중요한 오차요인이 된다. 힘 센서의 크리프 오차는 스프링 요소의 재질, 스트레인 게이지 및 접착제 등에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>14)</sup>

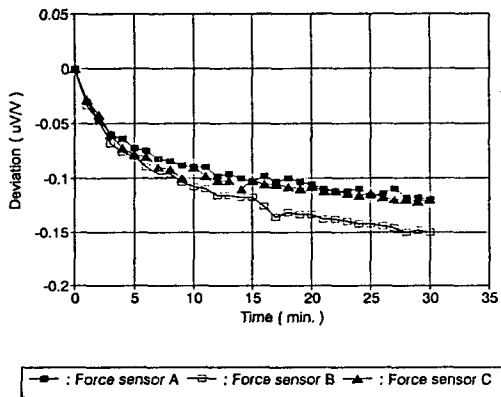


Fig. 9 Creep behaviors of the force sensors

Fig. 9는 힘 센서들의 크리프 특성을 나타내는 그래프로서 횡축은 시간을, 종축은 하중 부하직후의 출력을 기준으로한 출력의 편차를 나타내고 있으며 실험하중은 1 MN이다. 힘 센서 A, B, C 모두 30분 동안 크리프 오차는 0.01% 이내로 초정밀급 수준으로 나타났다.

이와같이 힘 센서의 크리프 오차가 작은 것은 본 연구에서는 스프링 요소의 재질 및 형상 등에 의해서 발생하는 크리프를 스트레인 게이지 자체에서 보상할 수 있는 스트레인 게이지를 사용하였기 때문이다.<sup>14) 15)</sup>

5-1-5. 온도 특성

힘 센서의 온도 특성에는 온도변화에 따른 영점 출력 변화와 감도변화가 있다. 온도변화에 따른 영점 출력 변화 요인으로는 스트레인 게이지의 저항선(grid)의 저항 계수 및 선팽창 계수가 온도의 함수이고 스프링 요소 재질의 선팽창 계수가 온도의 함수이므로 힘 센서에 힘이 가해지지 않는 상태에서 온도를 변화시키면 힘 센서의 영점 출력은 변화하게 된다. 본 연구에서는 Fig. 3의 copper gage를 이용하여 휘스톤 브리지내에서 온도변화에 따른 영점 출력변화를  $\pm 0.002\%/^{\circ}\text{C}$  FS 이내가 되도록 보상하였다. 온도변화에 따른 힘 센서의 감도변화는 스프링 요소의 재질, 스트레인 게이지의 종류에 의해 결정되므로 본 연구에서는 별도로 실험하지 않았으며 본 연구실에서 500 kN 힘 센서 제작시 얻어진 보상회로를 그대로 사용하였다.<sup>7) 8)</sup> 이렇게 할 경우 온도변화에 따른 힘 센서의 감도변화는  $\pm 0.0015\%/^{\circ}\text{C}$  FS 이내로 추정된다.

5-1-6. 오차 계산

힘 센서의 정확도를 결정하는 앞의 오차들 중에서 하중이력 오차는 하중을 증가순으로 가하면서 사용할 경우 거의 무시할 수 있으므로 재현도 오차, 크리프 오차, 온도변화에 따른 감도 변화등을 제곱합 평방근 방법(root sum of square)을 이용하여 힘 센서의 총 오차를 계산한 결과는 Fig. 10과 같다.

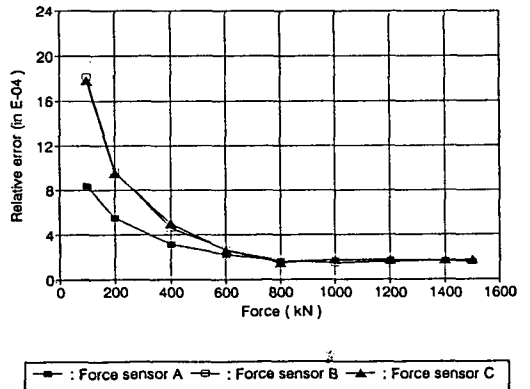


Fig. 10 Relative total errors of the force sensors

실험하중이 600 kN 이하에서는 총 오차가 급격히 증가하고 있는데 그 이유는 힘 센서의 재현도 오차  $brv$  가 600 kN 이하에서 크게 나타나고 있기 때문이며 600 kN-1500 kN 범위에서는 0.03% 이내이다. 힘 센서의 총 오차를 줄이기 위해서는 힘 센서의 설치방향을 바꾸면서 얻어진 재현도 오차를 줄여야만 하며 이를 위해서 스프링 요소의 단면형상을 재검토하는 것이 필요하다고 생각된다.

5-2. Build-up 힘 측정 시스템

힘 센서 각각의 특성을 실험한 후 build-up 힘 측정 시스템을 구성하였으며 병렬회로를 이용한 출력 측정방법을 사용하였다. 병렬회로를 이용할 경우 회로에 의한 오차가 0.01% 이내가 되도록 build-up 시스템 구성에 앞서 힘 센서 각각의 감도, 출력저항, 감지되는 힘의 최대편차를 미세 조정하였다. 즉 힘 센서 감도는 힘 센서 각각의 감도를 측정후 세계의 힘 센서중 제일 작은 값을 기준으로 Fig. 3의 브리지 회로에서 2 (constantan)의 저항값을 변화시켜 조정하였다. 힘 센서의 출력저항은 A, B, C 각각의 출력저항을 측정후 제일 작은 값을 기준으로 Fig. 3의 브리지 회로에서 6의 저항값을 조정하였다. 힘 센서에 분포되는 힘의 최대편차를 10% 이내로 줄이기 위해서는 힘 센서의 부품 가공시 각 부품들의 높이를 가능한 동일하게 하였으며 각 부품조립 후 build-up 힘 측정시스템의 평행도가 10  $\mu$ m 이내가 되도록 하였다.

Build-up 힘 측정 시스템은 힘 센서 각각의 출력특성곡선을 이용하여 힘을 측정하게 되므로 본 연구에서는 힘 센서 A, B, C의 출력특성 데이터와 식 (10)을 이용하여 힘 측정 시스템의 감도  $S$  (kN/ $\mu$ V/V)를 계산하였다.

$$S = a_0 + a_1U + a_2U^2 \tag{10}$$

여기에서  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ 는 최소자승법으로 계산되는 계수이고  $U$  ( $\mu$ V/V)는 힘 측정 시스템에서 감지하는 출력을 나타낸다. 본 연구에서 제작한 힘 측정 시스템의 경우  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ 는 각각 0.119685, 0.696596, 0.21441E-06이다. 따라서 병렬회로를 이용한 build-up 힘 측정 시스템의 경우 측정하려는 힘은 측정된 출력  $U$ 를 (10)식에 대입하여 감도  $S$ 를 구하고 다시  $S$ 에 build-up 시스템을 구성하는 힘 센서의 수량, 즉 여기에서는 3을 곱함으로써 구해진다.

Build-up 힘 측정 시스템을 구성한 후 1 MN 이하 중 힘 표준기와 15 MN 유압식 힘 표준기를 사용하여 build-up 시스템 출력특성을 실험하였으며 (10) 식으로 예측된 값과 힘 표준기에서 직접 얻어진 값을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다. ■는 1 MN 실하중 힘 표준기에서의 실험한 결과와 (10) 식으로 얻어진 결과를 비교한 것이고, □는 15 MN 유압식 힘 표준기에서 실험한 결과와 (10) 식으로 얻어진 결과를 비교한 것으로서 500 kN~4.5 MN 전 범위에 걸쳐 상대편차가 0.06% 이내이다. 이 값은 힘 센서 각각의 총오차, 병렬회로에 의한 오차 등을 고려한 값보다 2배 정도 큰 값이다. 그 원인으로는 build-up 시스템을 구성하는 각 부품들, 즉 하중전달기구의 영향 및 build-up 힘 측정을 구성하는 힘 센서들의 편심하중 및 경사하중의 감도의 영향때문인 것으로 사려되며 앞으로 그 원인에 대한 정량적인 분석이 필요하다. 본 연구에서 제작된 4.5 MN build-up 힘 측정 시스템의 총오차는 0.06% 이므로 힘 표준 유지용 표준기 오차 0.05%와 거의 대등한 수준이며 힘 표준기용으로 사용할 경우 힘 측정 시스템의 오차, 하중틀의 영향, 유압제어의 오차를 고려할 때 0.1% 이내의 오차를 가질 것으로 추정된다.

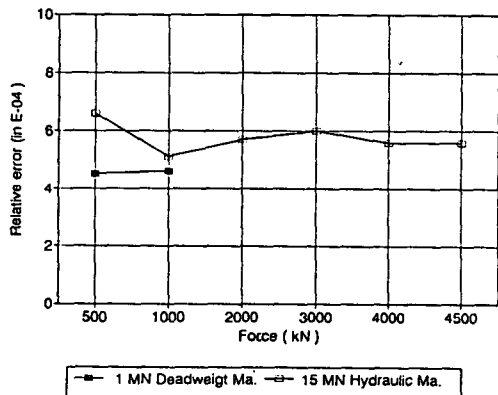


Fig. 11 Comparison of direct and indirect calibration of the build-up measuring system

6. 결 론

Build-up 힘 표준기에 사용될 수 있는 1.5 MN 스트레인 게이지식 힘 센서 3개를 설계, 제작하였으며



이것을 사용하여 4.5 MN build-up 힘 측정 시스템을 구성하였고 힘 센서 각각의 특성실험 및 build-up 힘 측정 시스템의 특성실험을 행하여 힘 측정 시스템의 오차를 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 4.5 MN build-up 힘 측정 시스템용으로 설계, 제작된 1.5 MN 힘 센서들의 재현도 오차, 하중이력 오차, 크리프 오차, 온도변화에 따른 감도변화 등은 정밀급 수준이며(0.1%) 하중이력 오차를 제외한 힘 센서의 총오차는 600 kN에서 1.5 MN 하중범위에서 0.03% 이내이다.
2. 4.5 MN build-up 힘 측정 시스템의 오차는 500 kN에서 4.5 MN 범위에서 0.06% 이내이고 힘 표준 유지용 기준기와 거의 대등한 수준이다. 이 build-up 힘 측정 시스템을 사용할 경우 0.1% 이내의 오차를 갖는 힘 표준기의 제작이 가능할 것으로 추정된다.

#### 참고문헌

1. M. Peters, "The realization of forces up to 1 MN on an international level", Proc. 10th Int. Con. on Measurement of Force and Mass, pp.71~76, 1984.
2. W. Weiler and A. Sawla, "Force standard machines of the national institute for metrology", PTB-ME-22, pp.71~76, 1978.
3. 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.
4. H. Wieringa, "Design of a 1.65 and 4.95 MN transfer standard based on the build-up procedure", Proc. 10th Int. Con. on Measurement of Force and Mass, pp.205~208, 1984.
5. P. J. Braudenburg and H. Wieringa, "Design of high-precision force transducers with capacities of 1.65 and 4.95 MN and their use as transfer standards", Report of the CCM Working Group Force (PTB-MA-17), pp.86~99, 1990.
6. 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.
7. 강대임 등, "힘 측정 정확도 향상 연구", KSRI-90-2-IR, 과학 기술처, 1990.
8. 강대임 등, "대 용량 힘 측정 정확도 향상 연구", KSRI-91-25-IR, 과학 기술처, 1991.
9. ISO 376, "Metallic materials-calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines", 1987.
10. DIN 51301, "Verification of materials testing machines with the aid of static force measuring devices", 1986.
11. 백종승 등, "힘 측정기기의 표준 교정 절차", KASTO-ME-1-84, 국가 교정 검사기관 협의회, 1984.
12. Measurement Group, Strain Gage Based Transducers, pp.26~27, 1988.
13. P. J. Brandenburg, etc, "Calibration and classification of force transducers by using a traceable set of high-performance facilities", "Proceedings of the 11th Int. Conference on Measurement of Force and Mass, pp.207~216, 1986.
14. P. Tegelaar and H. Wieringa, "Some developements at TNO on load cells for weighing purposes", VDI-Berichte Nr.137, pp.29~40, 1970.
15. Micro Measurements Division, "Strain gages and bondable compensation resistors", M-M catalog TC-116-2, pp.4, 1988.