

〈논 문〉

Build-up 기법을 이용한 대용량 힘측정 시스템 개발

강대임* · 송후근*

(1996년 8월 7일 접수)

Large Force Measuring System Using Build-up Technique

Dae-Im Kang and Hou-Keun Song

Key Words : Build-up Force Measuring System (Build-up 힘측정 시스템), Force Transducer (힘변환기), Strain Gage (스트레인 게이지), Force Standard Machine (힘표준기), Calibration (교정), Uncertainty (불확도)

Abstract

This paper describes the build-up force measuring system of 9.9 MN capacity which consists of nine force transducers of each having 1.1 MN capacity. We have specially designed a force transducer for a build-up force measuring system to reduce the uncertainty of a build-up system and to accomodate the new test procedure for a build-up system. It reveals that the relative uncertainty of the force measuring system is less than 1.5×10^{-4} in the range of 1~4.5 MN irrespective of loading direction. The force measuring system may be used to calibrate a 10 MN force standard machine to be used as a large force standard in Korea.

1. 서 론

산업이 대형화, 정밀화됨에 따라 대용량 힘을 정확하게 측정해야 할 필요성이 증가하고 있다. 힘을 정확하게 측정하기 위해서는 아주 정밀한 힘변환기를 실하중 힘표준기나 레버식 힘표준기 또는 유압식 힘표준기로 교정하여 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 이와 같은 힘표준기들의 용량은 여러 가지 이유로 제한되어 있다.⁽¹⁾

Build-up 기법을 이용한 힘측정 시스템은 병렬로 배열된 힘변환기들을 이용하여 측정하려는 힘을 분산하여 감지함으로써 대용량 힘을 효율적으로 측정할 수 있다.^(2~5) 이때 힘측정 시스템을 구성하는 각각의 힘변환기들은 시스템에 장착되기에 앞서 현재 이용할 수 있는 힘표준기로 교정을 받아 사용

하여야만 시스템의 정확도를 높일 수 있다. Build-up 힘측정 시스템의 정확도는 힘변환기 각각의 정확도, 힘측정 시스템의 구조, 출력신호 측정방법 등의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. Debnam^(2,3) 등은 힘변환기로의 힘전달을 균일하게 하고 접촉부 위에서의 소성변형을 방지하기 위하여 강구를 이용한 힘전달 기구를 제시하였으나 접촉부위의 마찰 때문에 재현도 및 히스테리시스 오차가 커지는 거동을 보였다. Gizmajer⁽⁴⁾는 구형 베어링을 이용한 힘전달 기구를 제시하였다. Wieringa⁽⁵⁾는 시스템의 정확도를 향상시키기 위하여 시스템의 평행도가 1/100,000이 되도록 힘변환기 및 시스템을 구성하는 부품들을 정밀 가공할 것을 제시하였다. 힘측정 시스템의 정확도를 평가할 때 Debnam⁽³⁾ 은 힘변환기의 재현성, 크리프 오차 및 온도의 영향만을 고려하였으며, Gizmajer⁽⁴⁾는 힘변환기의 재현성, 병렬회로의 오차 및 굽힘 모멘트의 영향만을 고려하였고, Wieringa⁽⁵⁾는 힘변환기의 재현성, 크리프

*회원, 한국표준과학연구원 역학연구부

오차 및 병렬회로의 오차만을 고려하였다. 한편 강 등⁽⁶⁾은 힘변환기 각각의 교정결과로부터 계산된 build-up 힘측정 시스템의 출력과 build-up 힘측정 시스템을 힘표준기로 직접 교정하였을 때의 출력과는 일정한 편차가 존재함을 확인하였으며, 이것이 build-up 힘측정 시스템의 계통오차의 요인이 된다고 보고하였다. 강 등⁽⁶⁾은 이와 같은 계통오차를 줄이기 위하여 build-up 힘측정 시스템의 설치방향을 0°, 90°, 180°, 270° 바꾸는 기존의 교정방법 대신 시스템의 설치방향을 고정하고 힘변환기의 설치방향을 0°, 90°, 180°, 270° 바꾸는 방법을 제시하였다. 그러나 현재 상품화된 힘변환기로 build-up 힘측정 시스템을 구성할 경우 힘변환기의 구조적 형상때문에 새로운 교정방법을 적용하기가 곤란하다. 따라서 새로운 교정방법을 적용할 수 있는 힘변환기의 개발이 시급하다. 저자들은 1.5 MN 힘변환기 3개를 이용한 4.5 MN 힘측정 시스템을 설계 및 제작한 바 있으며, 특성시험 결과 힘측정 시스템의 불확도가 5×10^{-4} 인 것으로 나타났다.⁽⁶⁾ 한편 한국표준과학연구원에서는 대용량 힘의 국가표준용으로 사용할 수 있는 10 MN 힘 발생장치를 개발 중에 있으며, 이것의 정확도를 평가하기 위해서는 3×10^{-4} 이내의 불확도를 갖는 전달용 측정 시스템 (transfer measuring system)이 필요하다.

본 논문에서는 10 MN 힘 발생장치의 정확도를 평가하는데 사용할 수 있는 고정밀 대용량 힘측정 시스템을 개발하고자 한다. 힘측정 시스템은 현재 국내에 있는 힘표준기로 시험 및 교정이 가능하면서도 대용량 힘을 측정할 수 있도록 build-up 기법을 채택하고 있다. 특히 힘측정 시스템의 계통오차를 최소화하기 위하여 힘변환기를 특수하게 설계 및 제작하였고, 1.1 MN 힘변환기 9개를 병렬로 조합하여 9.9 MN의 build-up 힘측정 시스템을 구성하였다. 또한 힘변환기 각각의 특성시험 결과를 토대로 build-up 힘측정 시스템의 불확도(uncertainty)를 평가하였다.

2. 힘측정 시스템 설계 및 제작

2.1 힘측정 시스템 구조 설계

힘측정 시스템 구조의 개략도는 Fig. 1과 같다. Fig. 2는 A부분의 상세도이다. 시스템은 9개의 힘변환기(Fig. 2의 ①) 및 각종 플레이트로 구성되어 있으며, 힘변환기의 용량은 1.1 MN이다. 힘변환

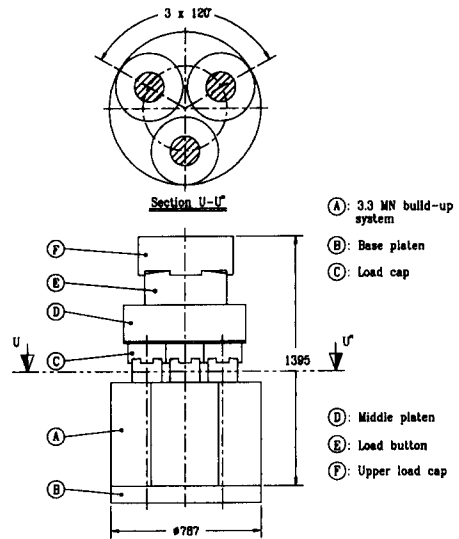


Fig. 1 Schematic diagram of large force measuring system

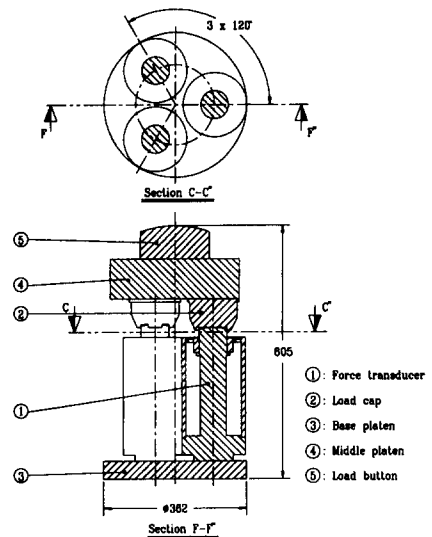


Fig. 2 Enlarged schematic diagram of section (a) in large force measuring system

기들은 밀판(Fig. 2의 ③)의 동일 원주 상에 120°간격으로 설치되고, 세개의 힘변환기를 하나의 세트(Fig. 1의 A)로 하여 세 개의 세트로 구성되고, 각 세트는 밀판(Fig. 1의 B)에 120°간격으로 설치되도록 하였다. 따라서 힘 전달점은 세점으로 이루어진 정삼각형 모양을 형성하게 되어 힘측정 시스템은 안정된 구조를 유지하게 된다. 힘변환기의 하중전달부(Fig. 2의 1의 상부) 및 각종 하중 전달용 버

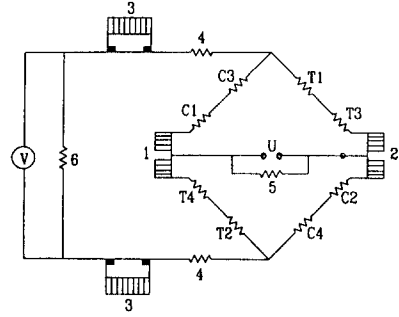
튼(Fig. 2의 5, Fig. 1의 E)들은 일정한 곡률반경을 갖는 만곡형으로 설계하여 편심하중 및 경사하중에 의한 굽힘모멘트의 발생이 최소화되도록 하였으며, 최대하중에서 하중 전달용 버튼과 하중 플레이트(load cap) 사이의 최대접촉압력이 2.6 GPa 이내가 되도록 하중 전달용 버튼의 곡률반경을 400 mm로 설계하였다. 각 부품의 재질 및 제작사양은 참고문헌⁽⁷⁾과 동일하다.

2.2 힘변환기 설계

힘변환기의 용량은 1.1 MN이며, 정격출력이 2 mV/V가 되도록 스프링요소의 감지부 지름을 설계하였다. 일반적으로 힘변환기들은 보상회로용 상자(box)가 보호케이스 밖으로 돌출되어 있어 build-up 힘측정 시스템을 구성시 힘변환기의 설치방향을 축방향을 기준으로 바꾸기가 어렵다. 이로 인하여 힘측정 시스템의 계통오차를 줄일 수 있는 새로운 교정방법을 적용하기가 어렵다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 보상회로용 상자를 보호케이스와 동일한 외경을 갖도록 특수하게 설계하였다. ⁽⁷⁾ 감지부의 바닥면이 넓을수록 감지부를 가공하는 선반 또는 연삭기의 정밀도 때문에 바닥면의 평면도 오차가 커지게 되고, 이로 인하여 힘 변환기의 방향성 오차 및 히스테리시스 오차가 커지는 것으로 알려져 있다. ⁽⁷⁾ 본 연구에서는 이와같은 오차를 줄이기 위해서 감지부의 바닥면을 기존의 전면접촉형에서 부분접촉형으로 변경하여 설계하였다. 감지부의 길이대 지름의 비, 감지부 재질, 가공방법 등은 참고문헌⁽⁷⁾과 동일하게 하였다.

2.3 힘변환기 제작

스트레인 게이지는 정밀 로드셀에 많이 사용되는 콘스탄탄(constantan)형을 사용하였으며 게이지의 코드는 N2A-06-T004N-350이다. 게이지의 저항은 $350\Omega \pm 0.15\%$ 이고, 게이지의 길이는 3.175 mm이며, 크리프 보상 및 온도변화에 따른 영점 보상이 가능한 게이지이다. 스트레인 게이지들을 기둥형 감지부 중앙 부위에 90°간격으로 축방향으로 4개, 원주방향으로 4개를 각각 대칭으로 부착하였고 접착제는 고온 경화제인 에폭시 페놀계 접착제인 M bond 610을 사용하였다. 힘변환기의 최종회로도는 Fig. 3과 같다. 구리 게이지(copper gage)는 온도변화에 따른 힘변환기의 영점변화를 보상하는 기능을 하며 발코 게이지(balco gage)는 온도변화에



1 : Copper 2 : Constantan 3 : Balco
4 : Resistor 5 : Resistor 6 : Resistor
C1, C2, C3, C4 : Compression strain gages
T1, T2, T3, T4 : Tension strain gages

Fig. 3 Final bridge circuit diagram of force transducer with all compensation resistors

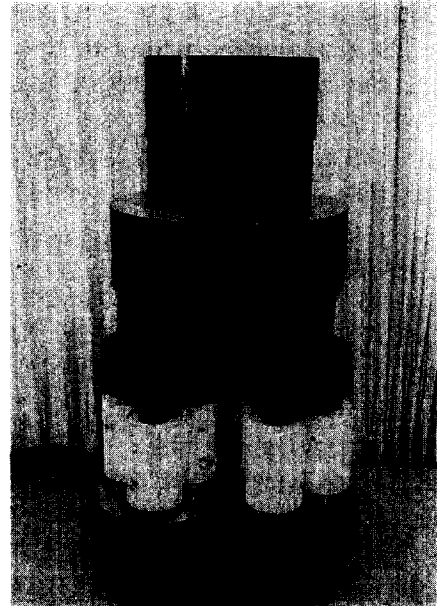


Fig. 4 Photograph of build-up force measuring system

따른 힘변환기의 감도변화를 보상하는 기능을 한다. 힘변환기를 단독으로 사용할 경우에는 힘변환기의 감도, 브리지의 입력저항 및 출력저항은 힘변환기의 불확도 요인이 되지 않으나 본 연구에서와 같이 여러개의 힘변환기를 병렬로 조합하여 사용할 경우에는 불확도 요인이 되므로 감도조정저항 (4), 입력조정저항 (6) 및 출력조정저항 (5)을 사용하여 9개의 힘변환기들의 감도, 입력저항 및 출력저항들을 각각 정밀하게 조정하였다. 즉 힘변환기들의 감

도의 편차는 0.1% 이내가 되도록 하였으며 출력저항 및 입력저항의 편차는 각각 0.01% 이내가 되도록 하였다. 또한 힘변환기의 온도변화에 따른 영점 변화 및 감도 변화가 각각 $\pm 0.002\%/^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.0015\%/^{\circ}\text{C}$ 이내가 되도록 하였으며 제작공정은 참고문헌과 같다.⁽⁷⁾ 제작이 완료된 힘변환기들로 build-up 힘측정 시스템을 구성한 상태는 Fig. 4와 같다.

3. 실험

3.1 실험장치

용량이 500 kN이고, 상대불확도가 2×10^{-5} 인 실하중 힘표준기를 사용하여 1.1 MN 힘변환기의 45 kN~489 kN 범위의 특성을 평가하였다. 489 kN~1.1 MN 하중범위에서의 특성은 현재 보유하고 있는 2 MN 용량의 유압식 힘표준기의 정확도 평가가 완료되지 않아 시험하지 못하였다. 힘변환기의 출력은 정확도가 0.0005%인 고정도 지시장치(모델명: DMP39, 제작회사: 독일 HBM)을 사용하여 측정하였다.

3.2 실험방법

특성시험에 앞서 힘변환기의 안정도를 높일 목적으로 각각의 힘변환기에 1.2 MN 하중을 30회씩 가하였다. 힘변환기의 출력거동은 힘변환기의 설치 방향을 실하중 힘표준기의 중심축을 기준으로 0°, 90°, 180°, 270°바꾸면서 시험하였다. 시험하중은 44.483, 88.966, 133.449, 222.415, 311.381, 400.347, 489.313 kN이었으며, 하중 증가순 및 감소순에 대하여 시험하였다. 실하중 힘표준기의 진동에 의한 오차를 배제하기 위하여 각 시험하중이 가해지고 난 후 30초 후에 출력을 측정하였다. 힘변환기의 크리프 시험은 489.313 kN 하중에서 실시되었으며, 하중이 부하된 후 5초 후에 초기출력을 측정하고 그 후 5분까지는 매 30초마다 출력을 측정하였으며, 그 후부터 30분까지 1분 간격으로 출력을 측정하였다. 그 외 시험절차는 전기식 힘측정기의 표준교정절차⁽⁸⁾를 참조하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 힘변환기의 출력특성

힘변환기들의 출력특성 시험결과는 Table 1과

같다. 하중을 증가순으로 가했을 때의 출력이 하중을 감소순으로 가했을 때의 출력보다 크게 나타나고 있다. 일반적으로 기동형 로드셀의 경우 이와 반대의 거동을 보인다. 그 이유는 본 연구에서 제작한 힘변환기들의 크리프 특성이 4-2절에서 보는 바와 같이 부(negative) 거동을 보이고, 그 크기가 히스테리시스에 의한 출력증가보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5는 힘변환기들의 평균출력과 시험하중과의 관계를 나타내는 것으로서 횡축은 부하된 하중을 나타내고, 종축은 무하중에서의 출력과 489.313 kN 하중에서의 출력을 직선으로 연결하여 그것을 기준출력으로 가정하였을 때 실제 측정된 출력과 기준출력과의 편차를 나타내고 있다. 힘변환기의 출력과 힘과의 관계는 하중부하 방향에 관계없이 비선형성을 보이고 있다. 그 이유는 기동형 감지부의 경우 하중이 가해짐에 따라 푸아송비 때문에 감지부의 단면적이 변하기 때문이다. 이 효과 때문에 압축하중을 받을 때는 감지부의 강성(stiffness)이 커지고 인장하중을 받을 때는 강성이 작아진다. 일반적으로 스트레인 게이지식 힘변환기의 경우 완전결선 브리지(full bridge) 형태로 만들어지는데, 이 때 브리지의 각 단(arm)을 구성하는 스트레인 게이지들의 변형률의 절대값이 같아야만 브리지회로의 입출력 전압비와 변형률과의 관계가 직선이 된다. 그러나 기동형 감지부의 경우 원주방향으로 부착되는 스트레인 게이지의 변형률은 축방향으로 부착되는 스트레인 게이지의 변형률

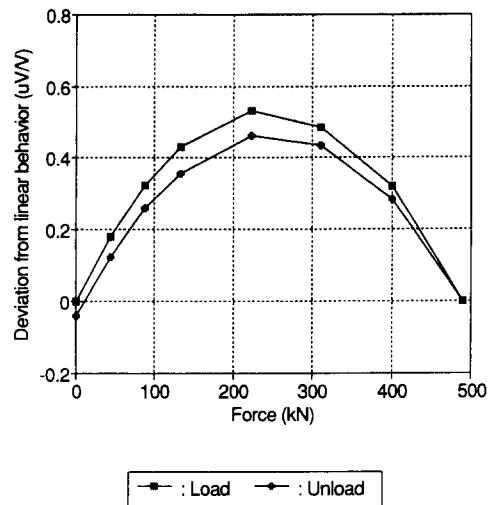


Fig. 5 Characteristic curve of force transducers

Table 1 Calibration results of force transducers

unit : $\mu V/V$

Ser. No. Force (kN)	Group A			Group B			Group C			Average
	1A	2A	3A	4B	5B	6B	7C	8C	9C	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44.483	90.499	90.505	90.506	90.496	90.531	90.500	90.516	90.531	90.589	90.519
88.966	180.951	180.964	180.970	180.946	181.028	180.968	180.999	181.023	181.146	180.999
133.449	271.381	271.399	271.404	271.371	271.484	271.391	271.441	271.474	271.664	271.446
222.415	452.116	452.144	452.166	452.095	452.285	452.129	452.214	452.260	452.581	452.221
311.381	632.696	632.746	632.779	632.674	632.945	632.723	632.844	632.906	633.354	632.852
400.347	813.171	813.233	813.233	813.148	813.485	813.188	813.348	813.439	813.990	813.365
489.313	993.511	993.588	993.684	993.483	993.645	993.518	993.726	993.824	994.504	993.720
400.347	813.132	813.205	813.245	813.123	813.443	813.145	813.293	813.413	813.953	813.328
311.381	632.660	632.713	632.725	632.653	632.898	632.663	632.768	632.858	633.290	632.803
222.415	452.058	452.095	452.088	452.060	452.223	452.060	452.118	452.163	452.500	452.151
133.449	271.318	271.340	271.328	271.328	271.413	271.318	271.338	271.408	271.578	271.374
88.966	180.905	180.918	180.900	180.908	180.965	180.905	180.903	180.963	181.075	180.938
44.483	90.448	90.453	90.438	90.453	90.480	90.445	90.440	90.478	90.535	90.463
0	-0.04	-0.04	-0.05	-0.03	-0.03	-0.04	-0.06	-0.04	-0.03	-0.04

의 프와송 비인 0.3 배이므로 브리지의 입출력 전압비와 변형률과는 비선형 관계를 갖게 된다.⁽⁹⁾ 반도체 스트레인 게이지에 의한 비선형 보상회로⁽¹⁰⁾를 사용할 경우 이와같은 비선형 오차를 줄일 수 있으나 힘변환기의 안정도가 떨어지는 단점이 있다. 힘변환기의 비선형 오차에 의한 힘측정 불확도를 최소화하기 위하여 힘변환기들의 출력 y 와 힘 F 와의 관계를 최소자승법을 이용하여 식 (1)과 같은 2차식으로 곡선접합할 수 있다. 하중증가순의 경우 $a=0.0100805$, $b=2.03514$, $c=-0.881601 \times 10^{-5}$ 이며, 하중감소순의 경우 $a=-0.0387932$, $b=2.03491$, $c=-0.814127 \times 10^{-5}$ 이다. 이들 결과로부터 상대 내삽오차를 계산하면 하중증가순의 경우 00.002%이고, 하중감소순의 경우 0~0.004%이다.

$$y = a + bF + cF^2 \quad (1)$$

Table 1에서 얻어진 출력들은 힘변환기를 힘표준기 하중축을 중심으로 0°, 90°, 180°, 270° 네 방향으로 회전시켜 설치하였을 때 각 방향에서 시험한 결과들의 평균값이다. 식 (2)을 사용하여 힘변

환기의 상대 재현도오차 $b_{rv,i}$ 를 구한 결과는 표 2와 같다.

$$b_{rv,i} = \frac{X_{i,max} - X_{i,min}}{X_{v,i}} \quad (2)$$

여기에서,

$\overline{X_{v,i}}$: i 번째 하중에서 네 방향에서 얻어진 출력의 평균값

$X_{i,max}$: i 번째 하중에서 네 방향에서 얻어진 출력의 최대값

$X_{i,min}$: i 번째 하중에서 네 방향에서 얻어진 출력의 최소값

힘변환기 9개 재현도오차의 평균값이 0.004~0.019%이다. 힘변환기 6B의 경우 다른 힘변환기들에 비해 재현도 오차가 크게 나타나고 있는데 그 이유는 스트레인 게이지의 부착위치의 오차가 다른 힘변환기보다 크기 때문인 것으로 추정되는 제작상의 문제일 것으로 판단된다. 힘변환기의 등급분류표⁽¹¹⁾에 의하면 초정밀급인 0.025% 힘

변환기의 경우 상대 재현도오차 b_{rv} 는 정격용량의 20%의 하중에서부터 정격용량까지의 범위에서 0.02% 이내로 규정되어 있다. 따라서 본 연구에서 설계 및 제작한 힘변환기의 경우 6B를 제외하고는 재현도 특성이 초정밀급 수준이다. 힘변환기의 재현도 특성이 우수한 이유는 기존의 전면접촉형 감지부 밑면을 부분접촉형으로 설계변경하여 접촉조건에 의한 영향을 줄였으며, 스트레인 게이지의 부차오차를 최소화하였기 때문이다.

4.2 힘변환기의 크리프 특성

힘변환기의 크리프는 일정한 힘이 부하되었을 때 시간경과에 따른 힘변환기의 출력변화를 나타내는 것으로 힘측정시 중요한 오차요인이 된다. 힘변환기의 크리프 오차는 스프링요소의 재질, 스트레인 게이지 및 접착제 등에 의해서 발생하는 것으로 알려져 있다.⁽⁷⁾ Fig. 6은 힘변환기 1A, 2A, 3A의 크리프 거동을 나타낸 것으로서 횡축은 시간을, 종축은 하중이 부하되었을 때의 출력을 기준으로한 상대오차를 나타내고 있다. 시간이 경과함에 따라 힘변환기의 출력이 감소하고 있음을 볼 수 있으며, 힘변환기들의 크리프 오차는 $-0.011\% \sim -0.017\%$ 이다. 다른 힘변환기들도 비슷한 거동을 보였다. 현재 상품화되어 있는 스트레인 게이지⁽¹²⁾들은 이와같은 힘변환기의 크리프 특성곡선을 토대로 게이지 코드를 바꾸어 크리프 성능을 향상시킬 수 있다. 스트레인 게이지의 코드를 N2A-06-T004N-350에서 N2A-06-T004R-350로 바꾸어 힘변환기를 다시 제작한 후 크리프 특성을 시험한 결과는 Fig. 7과 같으며, 크리프 오차가 $0.004\% \sim 0.008\%$ 까지 감소됨을 확인할 수 있었다.

4.3 힘변환기의 온도 특성

온도변화에 따른 힘변환기의 영점 출력변화는 $\pm 0.002\%/^{\circ}\text{C}$ RO(rated output) 이내이고, 온도변화에 따른 힘변환기의 감도변화는 $\pm 0.0015\%/^{\circ}\text{C}$ OL(of load) 이내로 추정된다. 온도변화에 따른 영점 출력변화는 힘변환기 출력시험시 재현도 오차에 포함되므로 build-up 힘측정 시스템의 불확도 계산시 영점 출력변화를 고려할 필요가 없다. 그러나 온도변화에 따른 감도변화는 힘변환기의 교정온도와 사용온도가 다를 경우 오차요인으로 작용하므로 힘측정 시스템의 불확도 계산시 감도변화를 고려해야 한다.

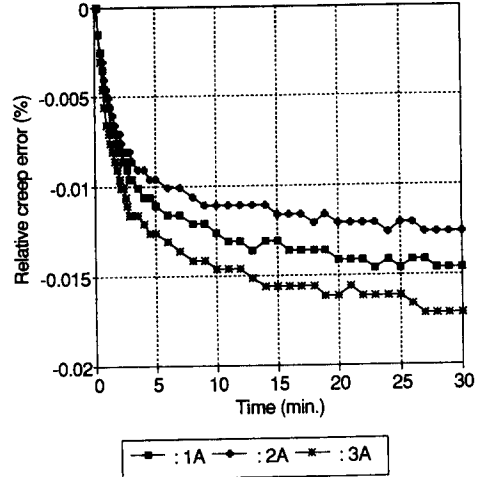


Fig. 6 Creep behaviors of the force transducers in group A

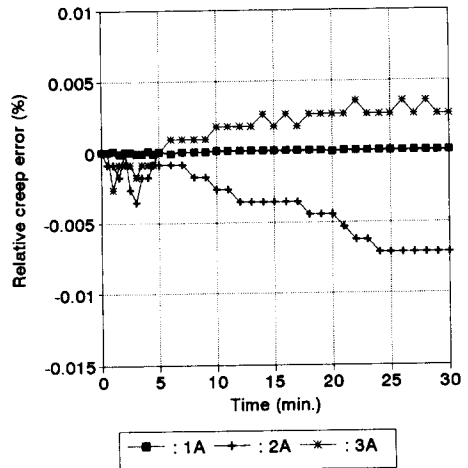


Fig. 7 Creep behaviors of the force transducers made by strain gages of N2A-06-T004R-350

4.4 힘변환기의 정격출력 및 브리지 저항

489.313 kN 하중에서 9개의 힘변환기들의 평균 출력값은 $993.720 \mu\text{V}/\text{V}$ 이고, 출력들의 최대차는 0.1% 이내이다. 평균입력저항값은 700.015Ω 이고, 저항값들의 최대차는 0.04% 이내이다. 평균출력저항값들은 699.987Ω 이고, 그 값들의 최대차는 0.01% 이내이다. 이들 값으로부터 build-up 힘측정 시스템의 병렬브리지 사용⁽³⁾으로 인한 회로오차를 계산하면 0.01% 이내이다.

4.5 힘측정 시스템의 불확도 계산

Build-up 힘측정 시스템의 이론불확도 U 는 식

(3)⁽¹¹⁾과 같이 시스템을 구성하는 9개의 힘변환기의 불확도 U_{tra} 와 교정에 사용된 힘표준기의 불확도 U_{fsm} 표시되며, 그 결과는 Fig. 8과 같다.

$$U = \sqrt{U_{tra}^2 + U_{fsm}^2} \quad (3)$$

여기에서 U_{tra} 는 식 (4)와 같고, u_{tra} 는 식 (5)와 같다.

$$U_{tra} = k u_{tra}, \quad k=2 \quad (4)$$

$$u_{tra} = \sqrt{u_{zero}^2 + u_{repro}^2 + u_{inpt}^2 + u_{res}^2 + u_{creep}^2 + u_{cuit}^2 + u_{temp}^2} \quad (5)$$

여기에서,

u_{zero} : 영점 미복귀량에 의한 변동
(사각형분포로 가정)

u_{repro} : 재현도 오차에 의한 변동
(U형분포로 가정)

u_{inpt} : 내삽오차에 의한 변동
(삼각형분포로 가정)

u_{res} : 지시장치의 분해능오차에 의한 변동
(사각형분포로 가정)

u_{creep} : 크리프오차에 의한 변동
(삼각형분포로 가정)

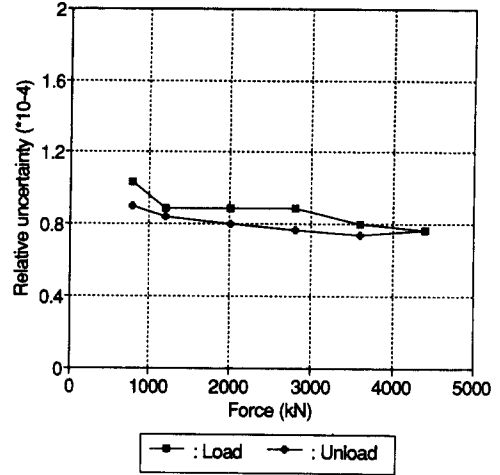


Fig. 8 Relative uncertainty of build-up force measuring system.

u_{cuit} : 병렬브리지회로 사용에 의한 변동
(사각형분포로 가정)

u_{temp} : 온도변화에 따른 감도변화에 의한 변동
(사각형분포로 가정)

이때 온도변화에 따른 감도변화의 경우 실험실의

Table 2 Repeatability errors of force transducers

unit : %

Ser. No. Force(kN)	Group A			Group B			Group C			Average
	1A	2A	3A	4B	5B	6B	7C	8C	9C	
44.483	0.006	0.011	0.011	0.006	0.006	0.028	0.006	0.017	0.011	0.011
88.966	0.008	0.008	0.014	0.011	0.008	0.022	0.003	0.014	0.011	0.011
133.449	0.005	0.003	0.004	0.002	0.007	0.022	0.004	0.013	0.011	0.008
222.415	0.010	0.004	0.004	0.003	0.007	0.019	0.002	0.011	0.010	0.008
311.381	0.006	0.005	0.006	0.006	0.007	0.018	0.002	0.011	0.009	0.008
400.347	0.003	0.004	0.004	0.002	0.006	0.014	0.003	0.008	0.008	0.006
489.313	0.003	0.003	0.004	0.003	0.005	0.014	0.003	0.005	0.006	0.005
400.347	0.003	0.002	0.001	0.001	0.002	0.014	0.002	0.003	0.006	0.004
311.381	0.002	0.002	0.002	0.001	0.003	0.015	0.001	0.010	0.008	0.005
222.415	0.004	0.002	0.003	0	0.003	0.020	0.001	0.009	0.009	0.006
133.449	0.005	0	0.006	0.002	0.006	0.024	0.002	0.013	0.009	0.007
88.966	0.008	0.003	0.011	0.003	0.006	0.022	0.003	0.014	0.006	0.008
44.483	0.017	0.006	0.017	0.006	0	0.022	0.022	0.017	0	0.019

온도유지 상태를 고려하여 2°C의 온도편차가 있는 것으로 가정하였다. 하중부하방향에 관계없이 힘 측정 시스템의 상대불확도는 1 MN~4.5 MN 범위에서 1×10^{-4} 이내이다. 여기에서 build-up 힘 측정 시스템의 교정방법에 의한 계통오차를 고려하지 않았으나 강 등⁽⁶⁾이 제시한 새로운 교정방법을 사용할 경우 교정방법에 의한 계통오차를 5×10^{-5} 이내로 줄일 수 있다. 이들 결과로부터 제작된 대용량 힘 측정 시스템의 총불확도는 1 MN~4.5 MN 범위에서 1.5×10^{-4} 이내이다. 등급분류표⁽¹¹⁾에 의하면 전달용 표준기의 경우 초정밀급 힘 측정기의 불확도는 3×10^{-4} 이내이다. 따라서 본 연구에서 개발한 힘 측정 시스템은 초정밀급 수준이다. 본 연구에서 개발한 대용량 힘 측정 시스템은 한국표준과학연구원에서 개발중인 10 MN 힘발생기 및 산업체에서 보유하고 있는 대용량 힘 측정기의 정밀교정에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 4.5 MN~10 MN 범위에서의 힘 측정 시스템의 불확도는 추후 2 MN 유압식 힘표준기를 이용하여 평가할 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 대용량 힘을 효율적으로 측정할 수 있는 고정밀 build-up 방식 힘 측정 시스템을 개발하였으며, 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 제작된 1.1 MN 힘변환기의 재현도오차는 44 kN~489kN 하중범위에서 0.004~0.0019%이고 2차식으로 곡선점합할 때 상대 내삽오차는 0.004% 이내로 초정밀급 수준이다.

(2) 489.313 kN 하중에서 힘변환기의 크리프오차는 -0.011~-0.017%이나 스트레인 게이지의 크리프 코드를 N에서 R로 바꿀 경우 크리프 오차를 0.004~-0.008%까지 줄일 수 있다.

(3) Build-up 힘 측정 시스템의 이론 불확도는 하중부하 방향에 관계없이 1 MN~4.5 MN 하중범위에서 1.0×10^{-4} 이내이고, build-up 힘 측정 시스템의 교정방법에 의한 계통오차를 고려할 경우 1.5×10^{-4} 로 추정되어 초정밀급 수준이다.

(4) 개발된 힘 측정 시스템은 대용량 힘표준기의 정밀교정에 유용하게 사용될 것으로 기대되며, 앞으로 4.5~10 MN 하중범위에 대해서는 2 MN 유압식 힘표준기를 이용하여 불확도를 평가할 예정이다.

참고문헌

- (1) Weiler, W. W. and Sawla, A., 1978, "Force Standard Machine of the National Institutes for Metrology," *PTB-Me-22*, pp. 71~76.
- (2) Debnam, R. C., 1961, "An Application of Digital Data Recording," *The Monthly Review*, pp. 249~252.
- (3) Debnam, R. C., Jenkins, R. F. and Bentley, N. R., 1978, "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.
- (4) Gizmajer, A., 1978, "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.
- (5) Wieringa, H., 1984, "Design of a 1.65 and 4.95 MN Transfer Standard Based on the Build-up Procedure," *Proc. of IMEKO TC-3 on Measurement of Force and Mass*, Kobe, pp. 205~208.
- (6) 강대임, 송후근, 홍창선, 1993, "Build-up 힘 측정 시스템의 출력거동," 대한기계학회논문집, 제19권, 제9호, pp. 2294~2205.
- (7) 강대임, 송후근, 이정태, 1994, "초정밀 Force Transducer 개발," *KRISS-94-104-IR*, 과학기술처, pp. 16~32.
- (8) 강대임 등, 1994, "전기식 힘 측정기기의 표준 교정절차," *KASTO 94-07-104-104*.
- (9) The Technical Staff of Measurements Group, 1988, "Strain Gage Based Transducers," Measurements Group.
- (10) 강대임, 송후근, 1993, "Build-up 힘 측정 시스템의 설계 및 제작에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제10권, 제2호, pp. 86~94.
- (11) Sawla, A., 1994, "Guidance for the Determination of the Best Measurement Capability of Force Calibration Machines and Uncertainty of Calibration Results of Force Measuring Devices," *PTB-Mitteilungen*, Vol. 104, No. 4, pp. 237~242.
- (12) M. M. Catalog TC-116-3, 1992, "Strain Gages, Bondable Resistors and Installation Accessories," Measurements Group.