

〈論文〉

Build-Up 힘측정 시스템의 출력거동

강대임* · 송후근* · 홍창선**

(1995년 4월 7일 접수)

Output Behavior of Build-Up Force Measuring System

Dae-Im Kang, Hou-Keun Song and Chang-Sun Hong

Key Words : Build-Up Force Measuring System (Build-Up 힘측정 시스템), Force Transducer (힘 변환기), Deadweight Force Standard Machine (실하중 힘표준기), Repeatability Error (재현도오차), Bending Moment Compensation (굽힘모멘트 감도보상), Calibration (교정)

Abstract

In order to reduce the systematic error of a build-up system, we have proposed a new test procedure in which all force transducers in a build-up system are rotated by 90° with a base platen fixed on a force standard machine. The setting positions of force transducers on the output of a build-up system were investigated using an orthogonal array. The effects of the parallelism of a build-up system and of the bending moment sensitivity of a force transducer were considered. The experimental results show that the setting position of the base platen hardly affects the output of the build-up system, but the setting positions of force transducers affects it strongly. It reveals that the new test procedure reduces effectively the systematic error of a build-up system.

1. 서 론

힘을 정확하게 측정하기 위해서는 아주 정밀한 힘변환기를 실하중 힘표준기로 교정하여 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 실하중 힘표준기의 용량은 여러 가지 이유로 제한이 되어 있다.⁽¹⁾ 유압식이나 레버식 배율장치를 이용하여 실하중을 증폭시키는 방법이 대용량 힘측정에 많이 사용되고 있으나⁽²⁾ 정확한 힘변환기를 여러개 조합하는 것도 한 방법이 될 수 있고^(3,4) 측정효율의 관점에서 볼 때 연구할 가치가 높다.

Build-up 기법을 이용한 힘측정 시스템은 병렬로 배열된 힘변환기들을 이용하여 측정하려는 힘을 분

산하여 감지함으로써 대용량 힘을 효율적으로 측정할 수 있다. 힘측정 시스템은 일반적으로 3^p ($p=1, 2, 3$ 등) 개의 힘변환기로 구성된다. 이때 각각의 힘변환기는 현재 보유하고 있는 힘표준기로 교정하여 사용해야만 힘측정의 불확도(uncertainty)를 줄일 수 있다. Build-up 기법을 이용한 힘측정 시스템의 불확도요인으로는 시스템을 구성하는 힘변환기의 불확도, 힘측정 시스템의 구조, 힘측정 시스템과 힘표준기와의 상호작용 등이 있다. 힘변환기로는 정밀도 등을 고려하여 스트레인게이지식 로드셀이 사용되며, 로드셀의 감지부로는 build-up 시스템의 구조를 소형화하기 위하여 기동형이 주로 사용된다.

Build-up 힘측정 시스템 구조설계에 대한 연구로는 Debnam 등이 힘변환기로의 힘전달을 균일하게 하고 접촉부위에서의 소성변형을 방지하기 위하여

*정회원, 한국표준과학연구원

**정회원, 한국과학기술원 항공우주공학과

강구를 이용한 하중 전달 시스템을 제시하였으나 접촉부위의 마찰때문에 재현도 및 하중이력 오차가 커지는 거동을 보였다.⁽⁴⁾ Gizmajer 등은 구면 베어링(spherical bearing)을 이용한 하중 전달 시스템을 제시하였다.⁽⁵⁾ Wieringa 등은 시스템의 오차를 줄이기 위해서 힘변환기에 직접 힘을 가하는 대신에 시스템의 평행도를 0.1 mm/m 이내가 되도록 각 부품을 정밀가공할 것을 제시하였다.⁽⁶⁾ 힘변환기와 힘표준기와의 상호작용 효과는 힘측정 불확도에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 상호작용 효과에 의한 불확도를 줄이기 위해서 힘변환기를 힘표준기의 중심축을 기준으로 90°씩 설치방향을 바꾸면서 교정하고 있다.⁽⁷⁾ 그러나 build-up 힘측정 시스템과 힘표준기와의 상호작용 효과에 관한 연구는 거의 없으며 힘변환기 시험과 동일한 방법으로 힘측정 시스템을 교정하고 있다. 이 경우 힘변환기의 교정결과로부터 계산된 build-up 시스템의 출력과 build-up 시스템을 직접 힘표준기로 교정하였을 때의 출력과는 일정한 계통오차가 존재하는 것으로 나타났다.⁽⁸⁾

본 논문에서는 build-up 힘측정 시스템의 계통오차를 줄이기 위하여 힘측정 시스템의 출력에 대한 힘변환기의 설치방향의 영향을 고찰하였다. 직교배열표를 이용한 실험계획법을 사용하여 시스템의 계통오차에 영향을 미치는 인자들을 분석하였고 기존의 교정방법에서 오는 계통오차를 효과적으로 줄일 수 있는 교정방법을 제시하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

2.1.1 시스템 구조 설계 및 제작

Build-up 시스템의 용량은 1.5 MN이며, 그것의 구조는 Fig. 1과 같이 밀판(①), 500 kN 힘변환기 3조(③), 압축패드(④), 중간판(⑤), 하중버튼(⑧), 핀(②, ⑤, ⑦) 등으로 구성되어 있다. 힘변환기들은 밀판 상부의 지름 104 mm의 동일 원주 상에 120° 간격으로 핀을 통해서 조립된다. 이때 조립공차는 50 μm 이내가 되도록 하였다. 압축패드를 포함한 힘변환기들의 높이의 최대차가 힘측정 시스템의 불확도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 시스템의 평행도가 0.5 mm/m 또는 0.05 mm/m의 조합이 가능하도록 압축패드를 제작하였다. 압축패드의 안

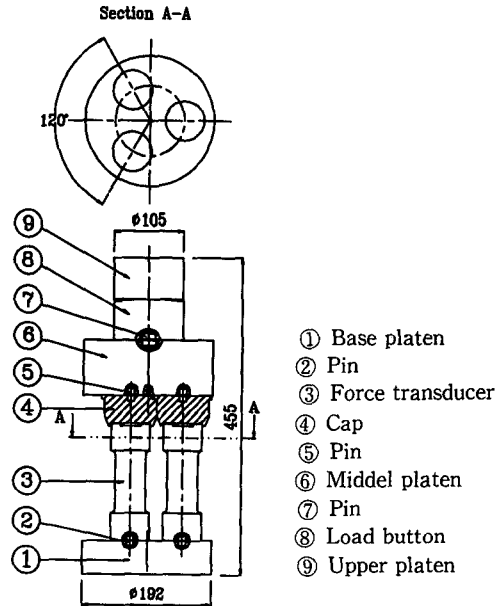
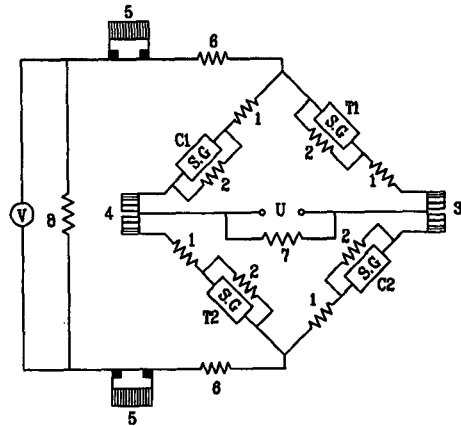


Fig. 1 Schematic diagram of the 1.5 MN build-up system



- | | |
|----------------|----------------|
| 1 : Constantan | 5 : Balco |
| 2 : Resistor | 6 : Constantan |
| 3 : Copper | 7 : Resistor |
| 4 : Constantan | 8 : Resistor |

Fig. 2 Photograph of experimental set-up

지름이 힘변환기의 바깥지름보다 0.1~0.2 mm 정도 크게 설계하여 힘측정 시스템에 편심하중이나 경사하중이 가해져도 압축패드와 힘변환기 사이에 간섭이 일어나지 않도록 하였다. 감지부를 제외한 각 부품들의 재질은 Cr-Mo강인 SCM 4를 열처리 하여 사용하였다. 열처리 후 압축패드의 경도는

HRC 40~42가 되도록 하였으며 나머지 부품들은 HRC 46~48이 되도록 하였다. 각 부품들은 평행도, 동심도, 평면도 및 표면조도 등에 유의하여 정밀 가공하였다.

Fig. 2는 실험장치 및 힘측정 시스템을 보여주고 있다.

2.1.2 힘변환기 제작

힘측정 시스템을 구성하는 힘변환기의 용량은 현재 보유하고 있는 힘표준기의 용량을 고려하여 500 kN으로 하였으며 정격 출력은 1.85 mV/V로 하였다. 힘변환기로는 정밀도와 안정도가 우수한 스트레인게이지방식 로드셀을 사용하였다. 로드셀의 감지부로는 대용량 구조에 적합한 기둥형을 선정하였으며 노치의 영향을 배제하고 밀면의 경계조건 및 밀면의 접촉상태가 달라져도 이로 인한 재현도 및 하중이력 오차가 발생하지 않도록 감지부의 길이 (length) 대 직경 (diameter)의 비, 즉 L/D를 3으로 정하였다.⁽⁹⁾ 감지부의 재질은 니켈-크롬-몰리브덴강인 SNCM 8을 사용하였으며 감지부로서 갖추어야 할 기계적 성질을 만족하도록 담금질과 뜨임처리를 하였다. 감지부의 가공오차에 의한 힘 변환기

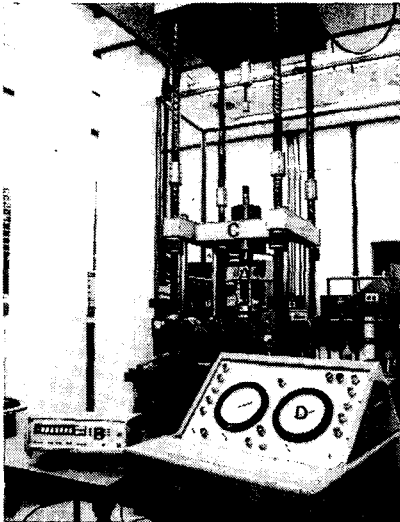
의 오차요인을 줄이기 위해서 감지부의 직각도 및 동심도에 유의하여 가공하였으며 곡면 부분은 래핑으로 표면연마를 하였다.

스트레인게이지는 정밀 로드셀에 많이 사용되는 constantan형을 사용하였으며 게이지의 코드는 N2A-06-T004N-350이다. 게이지의 저항은 $350\Omega \pm 0.15\%$ 이고 게이지의 길이는 3.175 mm이며, 크리프 보상 및 온도 변화에 따른 영점 보상이 가능한 게이지를 사용하였다. 스트레인게이지들을 기둥형 감지부 중앙부위에 90°간격으로 축방향으로 2개, 원주방향으로 2개를 각각 대칭으로 부착하였으며 접착제는 고온 경화제인 epoxy-phenolic 접착제인 M bond 610을 사용하였다. 스트레인게이지에 270 kPa의 압력을 가하면서 165 °C에서 2시간 동안 1차 경화를 시켰다. 1차 경화 후에 접착제 층의 잔류응력을 제거하기 위해서 205 °C에서 2시간 동안 2차 경화를 시켰다. 힘변환기의 회로는 Fig. 3과 같이 스트레인게이지, 온도변화에 따른 초기출력보상게이지, 온도변화에 따른 감도보상게이지, 굽힘모멘트 보상저항 등으로 구성되어 있다. 힘변환기의 굽힘모멘트 감도가 build-up 힘측정 시스템의 출력에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Dietrich가 제안한 보상방법을 이용하여 힘 변환기의 굽힘모멘트 감도를 조정하였다.^(10,11)

2.2 실험방법

2.2.1 Build-up 힘측정 시스템의 교정방법

힘측정 시스템을 이용하여 힘을 측정하기 위해서는 힘측정 시스템을 구성하는 힘변환기 각각을 실험하중 힘표준기 또는 유압식 힘표준기 등으로 교정해야만 한다. 이때 힘표준기가 갖는 회전 비대칭요인과 힘변환기가 갖는 회전 비대칭요인 때문에 힘변환기를 힘표준기의 중심축에 정확히 설치하여도 힘변환기의 설치방향을 힘표준기의 중심축을 기준으로 변화시키면 힘변환기의 출력이 달라지는 것이 보통이다.⁽⁵⁾ 따라서 힘변환기의 출력과 힘과의 관계를 정확히 알기 위해서는 힘표준기의 중심축을 기준으로 4개의 서로 다른 위치(0°, 90°, 180°, 270°)에서 힘변환기를 교정해야만 한다.⁽¹²⁾ 본 논문에서도 build-up 시스템을 구성하기에 앞서 위와 같은 방법으로 힘변환기를 정밀하게 교정하였다. 이때 i 번째 하중에서 힘변환기의 재현도오차 $b_{rv,i}$ 는 식(1)을 사용하여 계산된다.



A: Build-up system
B: Digital indicator
C: 500 kN deadweight force machine
D: Control unit of deadweight force machine

Fig. 3 Final bridge circuit with all compensation resistors

$$b_{rv,i} = \frac{x_{i,\max} - x_{i,\min}}{\bar{x}_{v,i}} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

여기에서, $\bar{x}_{v,i}$: i 번째 하중에서의 평균출력
 $x_{i,\max}$: i 번째 하중에서의 최대출력
 $x_{i,\min}$: i 번째 하중에서의 최소출력

힘측정 시스템의 출력을 병렬회로를 이용하여 측정할 경우 임의의 하중 $j(=3i)$ 에서 힘측정 시스템의 출력 $x_{v,j}$ 는 식(2)와 같이 i 하중에서 힘변환기 B, C, D의 평균출력들의 평균값으로 표시할 수 있다.

$$x_{v,j} = \frac{(\bar{x}_{v,i})_B + (\bar{x}_{v,i})_C + (\bar{x}_{v,i})_D}{3} \quad (2)$$

식(2)로부터 얻어진 $x_{v,j}$ 와 힘과의 관계는 식(3)과 같이 2차 식으로 나타낼 수 있다.

$$F = a + bx + cx^2 \quad (3)$$

여기서, 계수 a , b , c 는 힘변환기들의 교정결과를 최소자승법으로 처리하여 결정된다. 따라서 build-up 시스템의 출력을 측정하면 식(3)으로부터 힘의 크기를 알 수 있게 된다.

2.2.2 직교배열표를 이용한 실험계획

힘측정 시스템의 계통오차를 줄이기 위해서 힘변환기 설치방향에 따른 힘측정 시스템의 출력거동을 조사하였다. 본 논문에서는 Table 1과 같이 힘변환기 B, C, D의 설치방향과 힘측정 시스템의 설치방향을 변수로 선정하였으며 설치방향은 힘변환기 출력시험시 일반적으로 사용되는 힘변환기 설치방향과 동일하게 힘표준기 상에 0°, 90°, 180°, 270°의 방향, 즉 네 수준으로 하였다. 이런 모든 변수를 동시에 취급하기 위해서는 모든 변수의 조합들에 대해 실험을 해야 하므로 많은 실험 회수가 요구된다. 따라서 실험을 효율적으로 실시하기 위

하여 Table 2와 같이 $L_{16}(4^6)$ 직교배열표를 이용한 실험계획을 수립하였다. L_{16} 형 직교배열표의 경우 1행과 2행의 교호작용은 3, 4, 5행에 나타나므로 교호작용의 영향을 배제하기 위하여 2행에는 인자를 배치하지 않았으며 2행으로부터 오차가 계산된다. 힘변환기의 비대칭성 및 시스템의 비대칭성의 영향을 조사하기 위하여 아래와 같이 세 가지 경우의 힘측정 시스템들에 대해 실험을 실시하였다.

Case 1. 시스템의 바닥 기준면과 중간판의 윗면간의 평행도가 0.5 mm/m이고 굽힘모멘트의 영향을 보상하지 않은 힘변환기를 사용한 경우

Case 2. 평행도가 0.5 mm/m이고 굽힘모멘트의 영향을 보정한 힘변환기를 사용한 경우

Case 3. 평행도가 0.05 mm/m이고 굽힘모멘트의 영향을 보정한 힘변환기를 사용할 경우

2.2.3 실험절차

힘측정 시스템을 구성하기에 앞서 힘변환기 각각을 2.2.1절에 따라 교정하였다. 이때 힘변환기의 굽힘모멘트의 감도를 정량적으로 관찰하기 위하여 힘변환기의 받침판(bearing plate)으로 굽힘모멘트가 인위적으로 발생되지 않는 평판과 굽힘 모멘트가 인위적으로 발생하는 0.2° 경사판을 사용하였다. 또한 힘변환기의 굽힘모멘트의 감도가 힘측정 시스템의 출력에 미치는 영향을 조사하기 위해서 굽힘모멘트를 보상하기 전과 후에 위의 실험을 반복하였다. 힘변환기를 교정한 후 2.2.2절의 세 가지 경우의 힘측정 시스템을 구성하였으며 직교배열표를 이용한 실험계획에 따라 힘변환기 및 힘측정 시스템의 설치방향을 바꾸면서 실험하였다. 힘측정 시스템의 용량은 1.5 MN이나 현재 보유하고 있는 실하중 힘표준기의 용량은 500 kN 이므로 500 kN 범위까지만 실험하였다. 500 kN 힘측정 시스템을 추가로 제작하여 본 논문에서 제시한 힘측정 시스

Table 1 Factors and their levels chosen in the experiment.

Factor \ Level	1	2	3	4
A (Base platen)	0°	90°	180°	270°
B (Force transducer B)	0°	90°	180°	270°
C (Force transducer C)	0°	90°	180°	270°
D (Force transducer D)	0°	90°	180°	270°

Table 2 Experimental layout of four factors and their levels in an L_{16} orthogonal array.

Expt. No.	Column numbers and factor assignment*					Group
	1(A)	2(e)	3(B)	4(C)	5(D)	
1	0°	1	0°	0°	0°	1
2	0°	2	90°	90°	90°	
3	0°	3	180°	180°	180°	
4	0°	4	270°	270°	270°	
5	90°	1	90°	180°	270°	2
6	90°	2	0°	270°	180°	
7	90°	3	270°	0°	90°	
8	90°	4	180°	90°	0°	
9	180°	1	180°	270°	90°	3
10	180°	2	270°	180°	0°	
11	180°	3	0°	90°	270°	
12	180°	4	90°	0°	180°	
13	270°	1	270°	90°	180°	4
14	270°	2	180°	0°	270°	
15	270°	3	90°	270°	0°	
16	270°	4	0°	180°	90°	

* Second column is identified by error (e)

탐의 교정방법의 타당성을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 힘변환기의 출력특성

굽힘모멘트를 보상하기 전, 힘변환기 B, C, D의 출력의 평균값으로 특성곡선을 그리면 Fig. 4와 같다. 힘변환기 B, C, D의 정격출력은 각각 $1844.999 \mu\text{V}/\text{V}$, $1844.098 \mu\text{V}/\text{V}$ 및 $1843.457 \mu\text{V}/\text{V}$ 이므로 힘변환기들의 출력의 최대차는 0.1% 이내이다. 힘변환기들의 비직선성 오차는 0.1% 이내이고 힘변환기들 간의 비직선성의 최대편차는 0.001% 이내로 거의 무시할 수 있다.

힘표준기와 힘변환기 간의 상호작용 효과로 나타나는 재현도오차 $b_{rv,i}$ 는 Fig. 5와 같다. 여기에서 실선은 굽힘모멘트 영향을 보상하기전 힘변환기 B, C, D의 재현도오차를 나타내고, 점선은 보상

후의 재현도오차를 나타낸다. 보상 전의 재현도오차는 최대 0.037%이고 최소 0.018%이며, 보상 후의 재현도오차는 최대 0.016%이고 최소

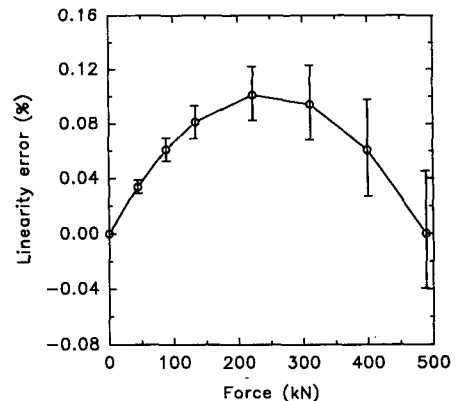


Fig. 4 Mean characteristic curve of the force transducers

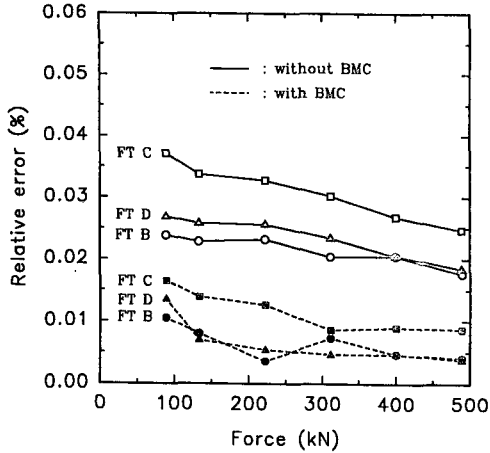


Fig. 5 Relative repeatability errors of the force transducers in a different Positions

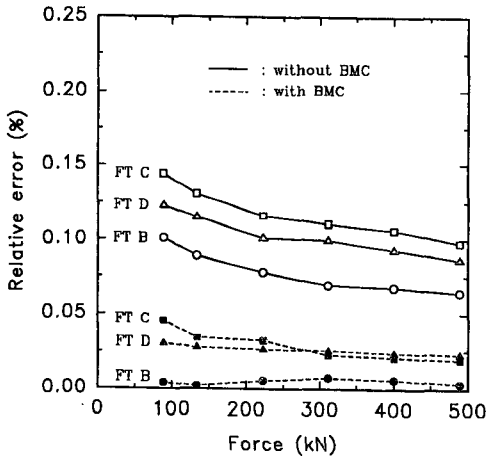


Fig. 6 Relative repeatability errors of the force transducers in different positions in case of the 0.2° wedge as the bearing surface

0.004%이다. 굽힘모멘트 보상회로를 추가함으로써 힘변환기의 재현도오차 $b_{rv,i}$ 는 보상전 재현도오차의 1/2~1/3 수준까지 낮아졌다. 무하중 근처에서의 오차가 정격하중 근처에서의 오차보다 크게 나타나는 이유는 시험하중이 0에 가까워질수록 출력이 작아져 상대오차가 커지기 때문이다.

Fig. 6은 0.2°판을 사용하여 힘변환기들을 시험하였을 때의 재현도오차 $b_{rv,i}$ 를 나타낸 것으로서 실선은 굽힘모멘트의 영향을 보상하기 전의 결과이고 점선은 보상후의 결과이다. 힘변환기 스프링요소의 0.15%이고 최소 0.07%이며 보상후의 재현도오차

곡률반경이 300mm이므로 0.2°판의 사용으로 500kN의 표준 힘이 힘변환기에 가해질 때 499.997kN의 수직하중과 512 N.m의 굽힘모멘트가 힘변환기에 가해진다. 굽힘모멘트 보상 전의 재현도오차는 최대는 최대 0.045%이고 최소 0.005%이다. 굽힘모멘트 보상회로의 도입으로 힘변환기의 재현도오차 $b_{rv,i}$ 도 $b_{rv,i}$ 와 마찬가지로 상당히 작아짐을 볼 수 있다. 굽힘모멘트가 가해지지 않았을 때(평판 사용의 경우)의 재현도오차가 굽힘모멘트가 가해졌을 때(0.2°판 사용의 경우)에 비해 작게 나타나고 있는데 그 이유는 힘변환기의 굽힘모멘트 감도의 영향때문이다. 굽힘모멘트 감도보상에 관계없이 재현도오차 $b_{rv,i}$ 와 $b_{rv,i}$ 가 제일 작은 것은 힘변환기 B이고 제일 큰 것은 힘변환기 C로 나타났다.

3.2 힘변환기 설치방향과 힘측정 시스템의 출력과의 관계

직교배열표의 실험계획에 따라 실시한 세가지 build-up 시스템의 실험결과는 Table 3과 같으며 이때 시험하중은 488.98kN이다. Table 2와 3으로부터 계산된 각 수준에서의 총 출력은 Table 4와 같다. 힘측정 시스템의 출력 y_i 에 대한 분산분석을 실시하기 위하여 각 인자들의 변동 S_i , 총 변동 S_T , 각 인자들의 평균제곱 V_i , 평균제곱의 비 F_{oi} 값 등은 식(4)를 이용하여⁽¹³⁾ 계산하였으며 그 결과는 Tables 5, 6, 7과 같다.

$$S_i = \sum_{j=1}^4 \frac{T_{ij}^2}{4} - \frac{1}{16} \left(\sum_{j=1}^4 T_{ij} \right)^2 \quad (i=A, e, B, C, D)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^{16} y_i^2 - \frac{1}{16} \left(\sum_{i=1}^{16} T_i \right)^2$$

$$V_i = \frac{S_i}{\phi_i} \quad (i=A, e, B, C, D)$$

$$F_{oi} = \frac{\phi_i}{\phi_e} \quad (i=A, e, B, C, D) \quad (4)$$

여기에서 각 인자의 자유도 ϕ 는 3이다. 세 경우 모두 시스템의 V_A 가 다른 인자들의 V 에 비해 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 V_A 를 풀링하여 F_0 값을 구하였다.

Tables 5, 6, 7로부터 시스템의 평행도 상태와 힘변환기의 굽힘모멘트 감도보상 여부에 관계없이 시스템 설치방향은 시스템의 출력에 영향을 거의 주지 않는 것을 알 수 있다. F분포 표로부터 F(3, 6:0.1)은 3.07이므로⁽¹³⁾ 힘변환기 D의 설치 위치는 case 1, case 2, case 3 세 경우 모두 유의 수

Table 3 Experimental results of the build-up system for three cases.

* Unit : mV/V

Expt. No.	Output (y_i) *		
	Case 1	Case 2	Case 3
1	616.645	612.565	612.785
2	616.46	612.615	612.85
3	616.42	612.555	612.775
4	616.57	612.5	612.725
5	616.535	612.62	612.84
6	616.395	612.5	612.73
7	616.525	612.545	612.755
8	616.605	612.605	612.8
9	616.615	612.605	612.84
10	616.52	612.61	612.815
11	616.49	612.565	612.785
12	616.545	612.455	612.7
13	616.46	612.545	612.77
14	616.51	612.515	612.74
15	616.635	612.615	612.84
16	616.4	612.58	612.785

Table 4 Supplementary data for factors for the parallelism of 0.5 mm/m and force transducers without bending moment compensation (BMC)

Factor Total of level	A	e	B	C	D
T_1	2466.095	2466.255	2465.93	2466.225	2466.405
T_2	2466.06	2465.885	2466.175	2466.015	2466
T_3	2466.17	2466.07	2466.15	2465.875	2465.82
T_4	2466.005	2466.12	2466.075	2466.215	2466.105
$\sum_{i=1}^4 T_i$	9864.33				

준 10%로 수준간에 차가 있고 시스템의 출력에 영향을 미치는 것이 거의 확실하다. 반면에 힘변환기 B의 설치위치는 시스템의 출력에 영향을 거의 미치지 않고 힘변환기 C의 경우는 시스템의 출력에 약간 영향을 미치는 것으로 생각된다. 힘변환기 B의 설치방향이 시스템의 출력에 영향을 미치지

않는 결과는 힘변환기의 재현도오차 $b_{rv,i}$, $b_{rv,i}'$ 이 힘변환기 중에서 제일 작은 결과와 일치한다. 그러나 힘변환기 C와 D의 설치방향의 영향은 재현도오차 $b_{rv,i}$, $b_{rv,i}'$ 의 결과와 일치하지 않고 있다. 16개의 측정시리즈로부터 식(1)을 사용하여 계산된 세 경우의 build-up 시스템의 재현도오차 $b_{rv,i}$ 은

Table 5 Analysis of variance of the build-up system for the parallelism of 0.5 mm/m and force transducers without BMC

Factor	S	φ	V	F_0
A	0.0032	3	0.0011(*)	
B	0.0082	3	0.0027	0.75
C	0.0207	3	0.0069	1.92
D	0.0457	3	0.0152	4.22
e	0.0182	3	0.0061	
(e)**	(0.0214)	(6)	(0.0036)	
T	0.096	15		

Note: Asterisk(*) indicates pooling

Double asterisk(**) indicates error after pooling.

Table 6 Analysis of variance of the build-up system for the parallelism of 0.5 mm/m and force transducers with BMC

Factor	S	φ	V	F_0
A	0	3	0(*)	
B	0.112	3	0.0007	0.88
C	0.0122	3	0.0041	5.13
D	0.018	3	0.006	7.5
e	0.005	3	0.0017	
(e)**	(0.005)	(6)	(0.0008)	
T	0.0372	15		

Note: Asterisk(*) indicates pooling

Double asterisk(**) indicates error after pooling.

Fig. 7과 같다. 세 경우 모두 힘변환기들의 평균 재현도오차 b_m 와 0.2°wedge를 사용하였을 때 힘변환기들의 평균 재현도오차 $\overline{b_m}$ 의 사이에 있다. Build-up 시스템의 재현도오차 $b_{m,i}$ 이 힘변환기들의 평균 재현도오차 $\overline{b_m}$ 보다 크게 나타나는 이유는 시스템을 구성하는 각 부품들의 가공오차의 누적적으로 시스템과 힘표준 기간에 발생하는 상호작용 효과가 힘변환기와 힘표준기간의 상호작용 효과보다 크게 나타나기 때문인 것으로 생각된다. Case 1의 재현도오차가 제일 크고 case 3의 재현도오차가 제일 작게 나타났다. 시스템의 평행도가 좋을수록 또한 힘변환기들의 굽힘모멘트 감도가 작을수록 시스템의 재현도오차는 작아지는 경향을 보이고 있다.

이들 결과들을 종합하여 볼 때 시스템의 설치방향은 시스템의 출력거동에 영향을 주지 않으나 힘변환기들의 설치방향은 시스템의 출력거동에 큰 영향을 미치고, 시스템의 평행도와 힘변환기의 굽힘모멘트 감도도 시스템의 출력거동에 영향을 미친다.

3.3 힘측정 시스템의 계통오차

직교배열표를 이용한 실험결과를 확인하기 위해서 Table 2의 실험번호 1의 설치조건에서의 실험결과와 힘변환기는 시스템에 처음 설치한 상태를 그대로 유지한채 시스템을 90°씩 회전하면서 시험하는 기존 교정방법의 실험결과를 비교하였으며 그 결과는 Fig. 8과 같다. 중측은 실험번호 1의 설치

Table 7 Analysis of variance of the build-up system for the parallelism of 0.05 mm/m and FT(force transducers with BMC

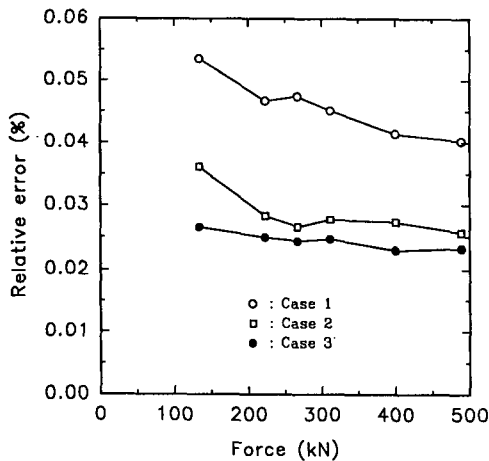
Factor	S	φ	V	F ₀
A	0	3	0(*)	
B	0.00462	3	0.0015	1.36
C	0.00962	3	0.0032	2.9
D	0.01212	3	0.004	3.63
e	0.00662	3	0.0022	
(e)**	(0.00662)	(6)	(0.0011)	
T	0.03298	15		

Note : Asterisk (*) indicates pooling

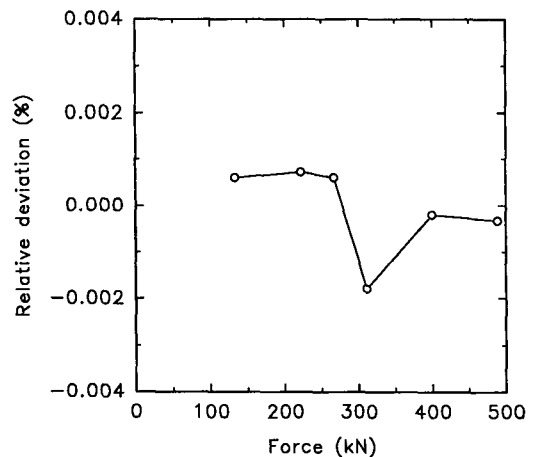
Double asterisk (**) indicates error after pooling.

조건에서의 측정출력과 기존 교정방법으로부터 얻어진 평균 출력과의 편차를 나타내고 있다. 이들의 상대편차는 $\pm 0.002\%$ 이내로 서로 잘 일치하고 있으며 이 결과는 시스템의 설치방향이 시스템의 출력에 영향을 주지 않는 것으로 나타난 직교배열표를 이용한 실험결과와 잘 일치한다. 그러나 기존

교정방법으로부터 얻어진 시스템의 평균 출력은 16개의 측정시리즈로부터 얻어진 시스템의 평균 출력과는 일정한 편차를 보일 수 있으며, 그 편차는 힘변환기들이 시스템에 처음 설치되는 방향에 따라 다르게 나타나고 case 1의 경우 최대 0.05%의 편차가 발생할 수 있다. 16개 측정 시리즈의 평균 출력과 힘변환기 각각을 교정하여 얻어진 측정 시스템의 출력 특성식 (3)를 비교한 결과는 Fig. 9와 같다. Case 1 및 case 2의 경우 상대편차는 0.01% 이내로 나타났으며, case 3의 경우 상대편차는 0.005% 이내로 나타났다. 따라서 16개의 측

**Fig. 7** Relative repeatability errors of the build-up systems

- (a) Case 1: parallelism of 0.5 mm/m and FT (force transducer) without BMC(bending moment compensation)
- (b) Case 2: parallelism of 0.5 mm/m and FT with BMC
- (c) Case 3: parallelism of 0.05 mm/m and FT with BMC

**Fig. 8** Relative deviation between the mean output from the conventional procedure and the output from experimental number 1 in table 2

정시리즈로 구성된 build-up 시스템 실험방법은 기존 방법에 비해 시스템의 출력특성 식과의 편차를 상당히 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 그러나 16개의 측정시리즈로 구성된 실험방법을 힘측정 시스템의 교정방법으로 사용하기에는 실험 회수가 4배나 많아 부적합하다.

Table 2에 있는 16개의 측정시리즈는 시스템의 설치위치를 기준으로 하여 4개의 그룹으로 나눌 수 있다. 각 그룹의 평균 출력을 계산한 후 이 값으로부터 그룹간의 최대 편차를 계산한 결과는 Fig. 10과 같다. Case 1의 경우 시험하중이 작아질수록 편차가 커지고 있으며 최대 0.03%이나 case 2, case 3의 경우 편차는 0.002% 이내로 나타났다. 따라서 실험회수를 16에서 4로 줄여도 시스템과 힘표준기간의 상호작용 효과를 측정결과에 포함시킬 수 있게 되므로 기존 방법이 갖는 시스템 출력 특성식과의 편차를 효율적으로 줄일 수 있다. 실제적으로 힘측정 시스템을 실험할 때 그룹 1, 2, 3, 4 중 어느 것을 택하여도 같은 결과를 얻을 수 있으나 실험의 편의상 그룹 1이 바람직하다. 그룹 1은 시스템의 설치방향을 고정시키고 힘변환기 각각을 동일하게 0°, 90°, 180°, 270° 위치에 놓고 실험하는

경우이다. 따라서 본 논문에서는 build-up 시스템의 실험방법으로 시스템을 회전시키는 기존의 방법 대신에 시스템을 고정시키고 힘변환기를 회전시키는 수정된 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 시스템과 힘표준기간의 상호작용 효과를 측정결과에 포함시킬 수 있으므로 기존 방법이 갖는 계통오차를 효과적으로 줄일 수 있다.

3.4 수정된 교정방법의 검증

본 논문에서 제시한 build-up 시스템 교정방법을 평가하기 위하여 500 kN 실험하중 힘표준기에서 전체 특성시험이 가능한 466.8 kN build-up 힘측정 시스템을 새로 설계 및 제작하였다. 155.6 kN 힘변환기 3개로 구성되어 있으며 구조는 1.5 MN 힘측정 시스템과 동일하다. 힘측정 시스템의 평행도는 0.05 mm/m이며 굽힘모멘트 감도가 보상되지 않은 힘변환기를 사용하였다. 기존의 교정방법을 사용할 경우와 본 논문에서 제시한 방법을 사용할 경우 시스템의 출력 특성식과의 계통오차는 Fig. 11과 같다. 새로운 교정방법을 사용할 경우 시스템의 상대오차가 기존 방법의 $\frac{1}{3}$ 수준으로 155.6 kN ~ 466.8 kN 범위에서 0.005% 이내이다. 따라서

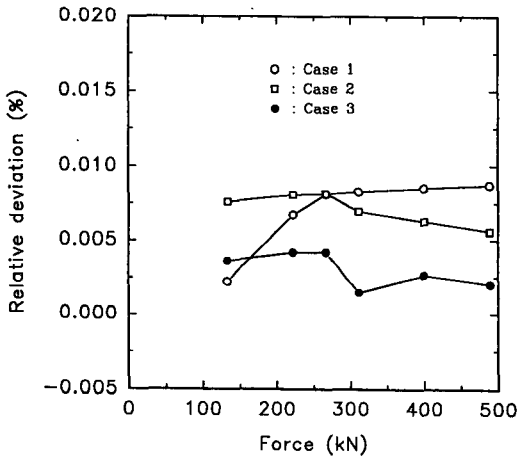


Fig. 9 Relative deviation between the indirect calibration and the direct calibration

- (a) Case 1: parallelism of 0.5 mm/m and FT (force transducer) without BMC(bending moment compensation)
- (b) Case 2: parallelism of 0.5 mm/m and FT with BMC
- (c) Case 3: parallelism of 0.05 mm/m and FT with BMC

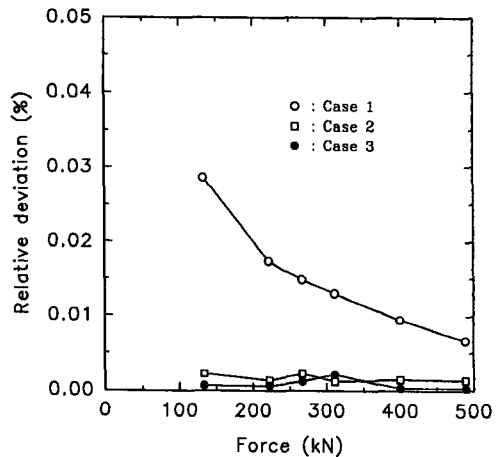


Fig. 10 Maximum deviation of the outputs of four groups

- (a) Case 1: parallelism of 0.5 mm/m and FT (force transducer) without BMC(bending moment compensation)
- (b) Case 2: parallelism of 0.5 mm/m and FT with BMC
- (c) Case 3: parallelism of 0.05 mm/m and FT with BMC

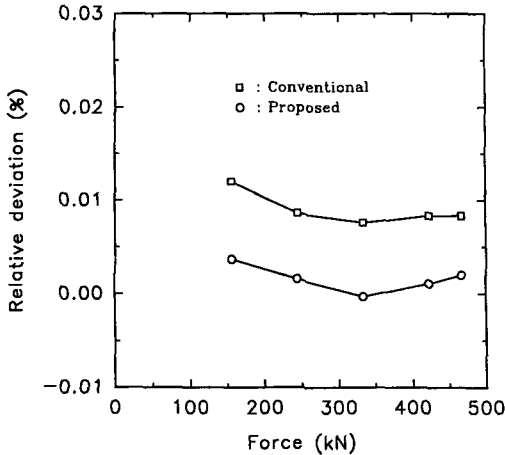


Fig. 11 Relative deviation of 466.8 kN build-up system between the indirect calibration and the direct calibration

새로운 교정방법을 사용할 경우 힘측정 시스템의 계통오차를 매우 효과적으로 줄일 수 있다.

4. 결 론

Build-up 힘측정 시스템의 계통오차를 줄이기 위하여 직교배열표를 이용한 실험계획법을 사용하여 힘측정 시스템의 출력거동에 대한 시스템의 설치방향과 힘변환기의 설치방향의 영향을 고찰하였다. Build-up 힘측정 시스템의 계통오차를 줄일 수 있는 새로운 교정방법을 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) Build-up 시스템의 설치방향은 시스템의 출력 거동에 거의 영향을 주지 않으나 힘변환기의 설치방향은 시스템의 출력거동에 큰 영향을 미치고 시스템의 평행도와 힘변환기의 굽힘모멘트 감도도 시스템의 출력 거동에 영향을 미친다.

(2) Build-up 시스템의 설치방향을 바꾸는 기존의 교정방법에 비해 시스템의 설치방향을 고정시키고 힘변환기의 설치방향을 각각 0° , 90° , 180° , 270° 로 변화시키는 새로운 교정방법이 build-up 시스템의 계통오차를 효과적으로 줄일 수 있다.

(3) 굽힘모멘트 감도가 보상되지 않은 155.6 kN 용량의 힘변환기 3개로 구성되어 있으며 시스템의 평행도가 0.05 mm/m인 build-up 시스템의 경우에 새로운 교정방법을 적용할 경우 시스템의 계통오차가 기존 방법의 1/3 수준인 0.005% 이내이다.

참고문헌

- (1) Peters, M., 1984, "The Realization of Forces up to 1 MN on an International Level," *Proceeding of the Conference of IMEKO TC-3 on Measurement of Force and Mass*, Kobe, pp. 71~76.
- (2) Weiler, W. W. and Sawla, A., 1978, "Force Standard Machine of the National Institutes for Metrology," *PTB-Me-22*, pp. 71~76.
- (3) Debnam, R. C., 1961, "An Application of Digital Data Recording," *The Monthly Review*, pp. 249~252.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Peters, M., 1989, "Experiences and Results of International Comparison Measurements of Forces up to 1 MN," *PTB-Mitteilungen 99*, pp. 343~350.
- (8) 강대임, 송후근, 1993, "Build-Up 힘측정 시스템의 설계 및 제작에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제10권, 제2호, pp. 86~94.
- (9) 강대임, 송후근, 이정태, 1994, "초정밀 Force Transducer 개발," *KRISS-94-104-IR*, 과학기술처, pp. 16~32.
- (10) M. Dietrich, M., 1978, "Development of Strain Gauge Precision Load Cells for the Comparison of Force Standard Measuring Devices," *VDI-Berichte Nr. 312*, pp. 123~128.
- (11) 강대임, 송후근, 도진열, 1994, "굽힘모멘트 영향을 보정한 하중센서 제작," 응용물리, 제7권, 제3호, pp. 215~220.
- (12) DIN 51301, 1886, Verification of Materials

Testing Machines with the Aid of Static Force
Measuring Devices.

(13) Phadke, M. S., 1989, *Quality Engineering
Using Robust Design*, Prentice Hall, New Jersey.