

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 第34卷第2號 1997年5月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 34, No. 2, May 1997

## 6분력계의 설계와 제작에 관한 연구

김효철\*, 김재성\*, 송무석\*\*, 유성선\*\*\*

### A Design and Manufacture of 6-Component Load Cell

by

H. Kim\*, J.S. Kim\*, M. Song\*\* and S.S. Rhyu\*\*\*

#### 요 약

6분력계를 ( $F_x=F_y=F_z=10\text{Kg}$ ,  $M_x=M_y=M_z=1\text{Kg-m}$ ) 설계하고 제작하여 검증시험을 실시하였다. 설계된 검력계는 순수 굽힘모멘트를 받는 보를 적절히 배치하는 형식의 일체형 6분력계로, 스트레인 게이지와 휘스톤회로를 이용한 것이다. 개발된 검력계의 정밀 검정시험을 통하여 특성을 파악하고 힘의 성분간에 간섭을 계산된 영향계수를 이용하여 분리하였다. 반복된 검정시험을 통하여 개발된 검력계의 정확도와 신뢰도를 확인할 수 있었으며, 축적된 경험은 앞으로의 실용적이고 신뢰도 높은 각종 검력계의 설계 및 제작에 도움을 줄 수 있을것으로 믿어진다.

#### Abstract

A 6-component load cell ( $F_x=F_y=F_z=10\text{Kg}$ ,  $M_x=M_y=M_z=1\text{Kg-m}$ ) is designed and manufactured. Basic mechanism of the operation is measuring strains corresponding to pure bending stresses, at certain portions of the device, due to forces and moments given. Wheastone bridge is used for the strain measurement and the amplified output signals from the bridge are decoupled to give the real forces and moments by using the influence coefficient matrix obtained through the calibration. Based on the result of the calibration test, the developed load cell is believed to be quite accurate and reliable. We also believe that the design experience provided us with essential information for future design of various types of conventional or object oriented force measuring device.

---

발 표 : 1996년도 대한조선학회 춘계연구발표회('96. 4. 19.)

접수일자: 1996년 10월 18일, 재접수일자: 1997년 2월 3일

\*정회원, 서울대학교 조선해양공학과

\*\*정회원, 홍익대학교 조선해양공학과

\*\*\*정회원, 삼성중공업

## 1. 서 언

조선해양공학 제 분야의 실험적 연구에 있어서 많은 부분이 각종 힘의 계측을 필요로 한다. 전통적인 저항시험 및 추진기의 성능 시험에서뿐만 아니라 새로운 해양구조물에 대한 다양한 실험이 요구됨에 따라, 실험 대상 구조물의 형상과 예상되는 하중의 크기에 합당한 검력계를 선정하여 사용하는 것이 바람직하다. 일반적으로 검력계는 높은 정밀도가 요구될 뿐만 아니라 충분한 재현성과 신뢰도가 요구되어 선진 외국의 제품을 도입하여 사용하는 것이 관행으로 되어왔다. 하지만 현재 연구목적으로 사용되고 있는 검력계들은, 계측하는 힘의 종류와 계측치의 정확도에 따라 차이가 있지만, 일반적으로 로드셀만도 수천 만원을 호가하고 있다. 이런 이유로 검력계의 구입이 용이하지 않은 경우가 많으며, 실험 목적과 성격에 전적으로 부합되는 검력계의 구입을 수시로 고려하기란 더욱 어려운 현실이다. 현재 한국표준연구원과 한국기계연구원 등의 국내 기관에서 이러한 로드셀의 개발에 힘을 기울이고 있고, 얻어진 기술을 바탕으로 국내의 산업체에서 검력계의 생산이 이루어지고 있지만, 이들은 단축의 힘 계측용 검력계의 수준에 머무르고 있다.

한편 임창규[1989], 서홍원[1993] 등은 실험 목적에 부합되는 로드셀을 자체 제작하여 성공적으로 이용한 바 있고, 김재성[1996] 등은 프로펠러의 단독시험 및 저항시험에 효과적으로 사용될 수 있는 검력계를 개발한 바 있다. 이러한 경험을 바탕으로 본 연구에서는 각종 유체력 추정의 실험이 이루어지고 있는 비교적 소형의 실험실에서 ( $F_x=F_y=F_z=10\text{Kg}$ ,  $M_x=M_y=M_z=1\text{Kg}\cdot\text{m}$ ) 효과적으로 쓰일 수 있는 실용성 있고 정밀도도 높은 6분력계를 자체 설계하고 제작하여 그 실효성을 살펴 보았으며, 본 논문은 설계와 제작 및 검증 결과에 대한 간단한 보고이다.

## 2. 시험기의 형상 및 특성

### 2.1 전체적인 구성

개발된 검력계의 모든 부재는 두랄루민 계열의 알루미늄 합금으로 이루어져 있다. 힘을 받는 물체의 부착이 이루어지는 면을 바라보는 전체적인 형상은 Figure 1과 같다. 원통형인 계측기의 전체적인 크기는 직경 18 cm, 높이 12.2 cm로 중량은 약 5.8 kg이다. 그림에서 외벽에 싸인 4각형을 이루는 부재를 볼 수 있는데, 이들 부재가 하부에 단단히 고정되어 있는 변형 계측 부분이다.

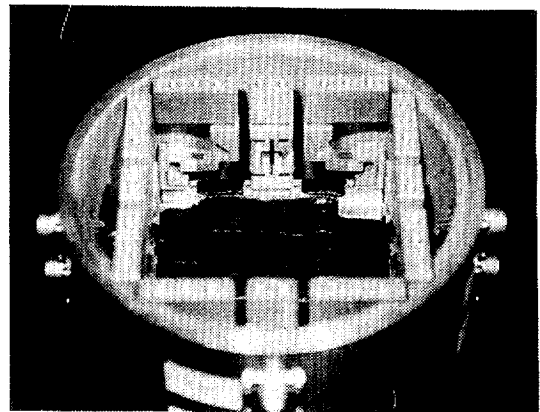


Fig. 1 Oblique view of the load cell without cover.

Figure 2는 이들 부재중 하나의 형상을 보이고 있다. 정면도를 보면 하부에서는 서로 연결된 3개의 부재가 조립된 형태임을 알 수 있다. 좌우의 부재는 그림에서 좌우로 주어지는 힘에 저항하고 중앙의 부재는 위아래로 주어지는 힘에 저항한다. 중앙부재의 경우, 일 부분이 상대적으로 얇은 판으로 되어 있어서 좌우로 주어지는 힘에는 거의 저항을 하지 못하게 되어 있고, 좌우의 부재는 유사한 이유로 위아래로 주어지는 힘에는 거의 저항을 하지 못한다. 만약 좌우로 힘이 주어지면 그림의 좌우에 위치한 부재의 중앙부에 위치한 수평의 부재에 굽힘모멘트가 걸리게 되고, 따라서 이 부재의 위아래에 스트레인 게이지를 부착하면 주어진 좌우의 힘에 대응되는 변형율을 구하게 된다. 또한 위아래의 힘이 주어지면 그림의 중앙에 위치

한 부재의 중앙부의 수직한 두 기둥에 굽힘 모멘트가 걸리고 역시 안쪽과 바깥쪽에 적절히 스트레인 게이지를 부착하면 변형율을 계측해 낼 수 있다.

Figure 3과 같이 Figure 2의 부재를 배열하면 각 방향의 힘과 모멘트가 좌우 혹은 위아래 부재의 변형율의 차이로 나타나게 되고 이를 정리하면 주어진 힘과 모멘트를 알 수 있다. 본 계측기의 설계 특성상 힘과 모멘트의 간섭을 동반할 수 밖에 없다는 문제가 있지만 이는 후에 설명할 영향계수를 이용한 간단한 방법으로 분리가 가능하고, 시간에 대해 변하는 힘과 모멘트의 경우도 충분한 메모리를 가지는 전산기에 출력값을 저장한후 분리하는 방식으로 문제를 해결할 수 있다.

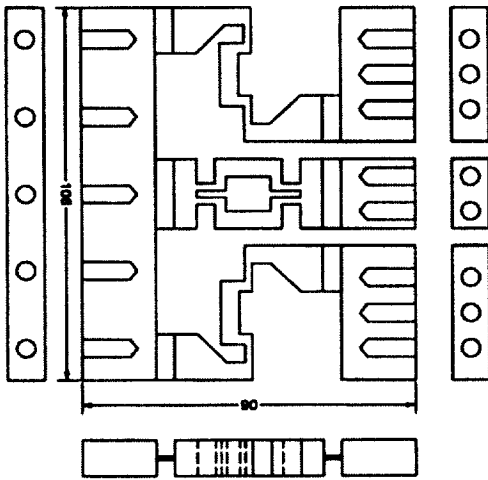


Fig. 2 Drawing of the strain measuring segment

### 2.2 계측 부위의 치수결정 및 Wheastone Bridge

계측 부위에서의 허용 변형율과 (피로한계 등을 고려한) 예상되는 최대하중이 제약조건으로 주어진 상태에서, 계측 부위의 엄밀한 치수 결정은 계

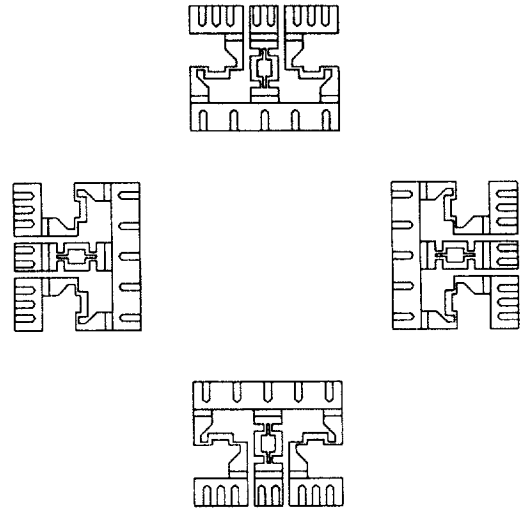


Fig. 3 A fish-eye view of the measuring segments' arrangement

측 부위의 형상이 복잡해질 경우 수 많은 변수의 최적화 과정을 포함하는 노력이 많이 드는 구조 계산을 요구한다. 하지만 계측기 제작후 검증과정을 통해 얻어진 결과를 사용할 것이므로 문제를 단순화하여 기본설계를 하는 것이 효과적이며 어느 정도의 설계자유를 두면 일반적으로 전혀 문제를 일으키지 않는다. 이러한 관점에서 계측부위의 치수결정에 사용할 수 있는 개념을 Wheastone Bridge와 더불어 간단히 설명하기로 한다.

Figure 2에서 보인 바와 같이 우리의 계측기의 모든 변형 부재는 Figure 4와 같이 단순화 시킬 수 있다. 그림의 왼편과 같이 좌우에서 하중 P를 받는 부재를 생각하자. P가 주어지는 지점에서 아래로 내려 뺀 부재가 충분한 두께를 가진다면 아래쪽의 x-축과 나란한 부재에는 순수 굽힘모멘트가 ( $Pt$ ) 걸린다고 볼 수 있다. 이 모멘트를  $M = Pt$  라 놓으면, 보의 단면에 분포되는 응력은  $\sigma(y) = yM/I$  로 쓸 수 있다. 여기서  $I$ 는 단면 2차 모멘트이다. 이때 우측 그림의 상단에서의 응력은  $\sigma(y=H/2) = 6Pt/BH^2$  로 되고, 거기에 대응하는 변형율은  $\epsilon = 6Pt/BH^2E$

로 된다. 따라서 주어지는 하중의 크기와 부재의 탄성계수가 주어지면 원하는 변형율이 발생하는 부재의 폭과 (B) 높이를 (H) 선택할 수 있다.

이제 선택된 지점에 스트레인 게이지를 부착하면 변형율을 계측할 수 있는데 우리의 경우 Figure 4 좌측의 수평부재 위아래에 스트레인 게이지를 (온도보상이 가능한 Kyowa사의 350Ω 제품) 각각 1개 혹은 2개를 접착시키고 이들을 적절한 Wheastone Bridge로 연결하여 변형율을 계측하였다 (Dally[1987], 염영하[1969], 백종승[1987], 김재성 등[1995]).

Figure 5는 사용된 Wheastone Bridge의 회로를 보이고 있는데 마주보는 부분에 같은 종류의 변형이 걸리도록 배치한다. 여러개의 스트레인 게이지를 사용할 경우 보다 안정적인 결과를 기대할 수 있지만 회로의 복잡성을 피하기 위하여 게이지 배치를 아래 그림의 두가지 경우를 같이 사용하기로 하였다.

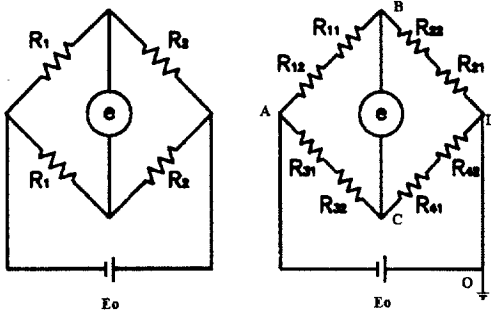


Fig. 4 The Wheastone bridges used.

브리지 전압( $E_0$ )을 걸어주면 출력전압은  $e$ 가 되고 O점은 접지점을 기준으로 나타낸 것이다. 절점 사이의 저항은 직렬 연결됨으로 아래의 식으로 나타내어진다.

$$R_i = R_{i1} + R_{i2}, \quad i=1,2,3,4 \quad (1)$$

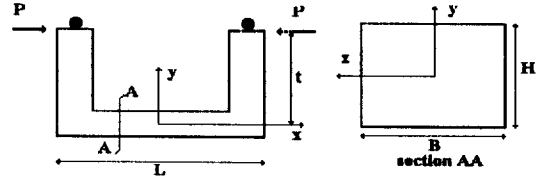


Fig. 5 A schematic force/deformation sketch and the coordinates

그리고 절점사이를 흐르는 전류는 A로부터 B로 흐를때를  $I_{AB}$ , A로부터 C로 흐르는 전류를  $I_{AC}$  라하면  $I_{AB}$ 와  $I_{AC}$ 는

$$I_{AB} = \frac{E_0}{R_1 + R_2}, \quad I_{AC} = \frac{E_0}{R_3 + R_4} \quad (2)$$

결국 우리가 계측하고자하는 전압  $e$ 는 점B 와 점 C 사이의 전위차이므로 식(2)를 이용하여 정리하면 아래와 같다.

$$e = V_B - V_C = R_2 I_{AB} - R_4 I_{AC} \quad (3)$$

$$= E_0 \left[ \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$

한편, 각각의 게이지 저항  $R_{ij}$ 는 저항의 변화량  $r_{ij}$  를 써서  $R_{ij} = R_0 + r_{ij}$  로 표시할 수 있다. 저항 증가량  $r_{ij}$  는  $r_{ij} = KR_0 \epsilon_{ij}$  로 표시되며, 여기서 K는 선정된 스트레인 게이지의 계인 상수이다. 인장 및 압축에 대한 변형율이 같아지도록 게이지의 부착위치를 선정하면 게이지들의 저항변화도 아래의 식으로 표시할 수 있게 된다.

$$r_{11} = r_{12} = r_{41} = r_{42} = KR_0 \epsilon \quad (4)$$

$$r_{21} = r_{22} = r_{31} = r_{32} = KR_0 (-\epsilon)$$

(4)식을 (3)식에 넣어 다시 정리하면 아래의 결과를 얻는다.

$$e = E_0 \left[ \frac{2R_0 + 2R_0K\epsilon}{(2R_0 + 2R_0K\epsilon) + (2R_0 - 2R_0K\epsilon)} - \frac{2R_0 - 2R_0K\epsilon}{(2R_0 + 2R_0K\epsilon) + (2R_0 - 2R_0K\epsilon)} \right] = E_0K\epsilon \quad (5)$$

위의 식을 이용하여 예상되는 변형률에 대하여 얻어지는 출력전압을 확인하여 증폭되어 읽히기에 충분한 출력을 갖는지를 살펴보고 또한 이를 검증 결과와 비교해 볼 수도 있다.

### 3. 정적 하중을 이용한 검력계의 검증

설계에 따라 제작된 검력계의 조립된 모습을 Figure 6에 보였다. 그림은 Figure 1의 형상에 케이블을 연결하고 뚜껑을 덮어 검증용 하중을 걸어 줄 수 있도록 만들어진 하중 부가용 원판을 부착시킨 모습이다. 각 방향의 힘과 모오멘트를 적절히 주기 위하여 Figure 7과 같은 검증 테이블을 제작하고 각 방향으로 힘과 모오멘트를 체계적으로 부하를 걸어주며 검증을 실시하였다.

전 절에서 설명한 바와 같이 본 검력계는 힘 및 모오멘트 성분간에 간섭이 최소로 되도록 설계되었으나, 실제로 성분간의 간섭이 나타나고 이는 오차의 원인이 되므로 이를 알아볼 필요가 있다. 상호 간섭이 선형적으로 발생한다고 가정하면 이는 간단한 영향계수의 산출로 제거될 수 있다. 즉

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_{ox} \\ F_{oy} \\ F_{oz} \\ M_{ox} \\ M_{oy} \\ M_{oz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

인데, 여기서 a는 각 성분들의 영향계수, o점자의 힘과 모오멘트는 검력계로 부터의 출력값 그리고 우변은 결과로 정리되는 계측값이다. 우변의 계측값은 검증시 걸어주는 실 하중이 되며 좌변은 실 하중의 부하로 인하여 출력되는 신호와 비례상수에 해당하는 영향계수임으로 성분별로 실험을 실

시하고 상호간섭을 살펴보면 영향계수는 쉽게 구해질 수 있다.

위에 설명한 실험 결과를 Figure 8에서 10에 보였다. Figure 8은 x-축 방향의 힘을 -10Kg에서 10Kg까지 2Kg 간격으로 변화를 주었을 때 얻어진 결과이다. 검력계의 구조설계에서 하중방향으로의 출력이 최대로 나타나고 하중방향 이외의 출력이 최소가 될 수 있도록 계획하였다. 하지만 실제에서는 실험결과에서 확인되는 바와 같이 하중방향 이외의 출력이 검출되고 있다. 이들의 검출은 어느정도 제작상의 오차 등으로 불가피하다고 생각되나 이들로 인한 영향은 출력의 선형성만 확보되면 그 영향은 별도로 분리할 수 있다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 선형성에 있어서는 오차를 판별하기 어려운 정도의 정밀도를 보이고 있다.

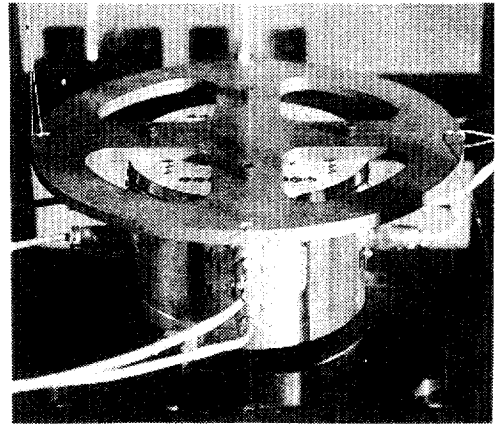


Fig. 6 Oblique view of the fully assembled load cell

한편 z-방향의 힘을 주었을 경우는 Figure 9에서 보듯이 거의 완벽하게 간섭이 배제된 출력값을 보이고 있으며, 역시 우수한 선형성을 나타내고 있다. Figure 10은 y-방향의 모오멘트에 대한 결과이다.

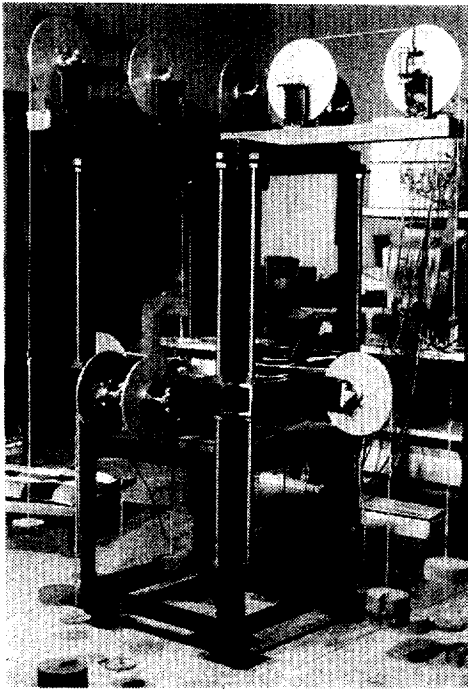


Fig. 7 Calibration table constructed

이상의 검정실험결과를 종합하면 식(6)의 행렬  $a_{ij}$ 를 얻을 수 있게 되는데, 이 행렬의 대각성분은 하중방향에 대한 출력력을 나타내는 영향계수가 되고 나머지 요소는 간섭성분이다. 참고로 상용으로 제작공급되고 있는 Nissho사의 제품의 경우 간섭도가 3%인 것으로 보고되고 있고, 본 연구에서 제작된 검력계는 성분에 따라 차이는 있지만 1% 미만에서 6%까지의 간섭도를 가지는 것으로 검증되었다.

검정실험의 결과로 영향계수가 계산되고, 이를 이용하여 임의의 하중을 여러 방향으로 분포시켰을 때의 각 방향 하중을 계측하였다. Figure 11은 대표적인 예로 보인 그림으로, 점선상에 점이 놓이게 되면 완벽한 계측기라 할 수 있는데, 그림에서 볼 수 있듯이 0.2% 이하의 오차를 확인할 수 있었다.

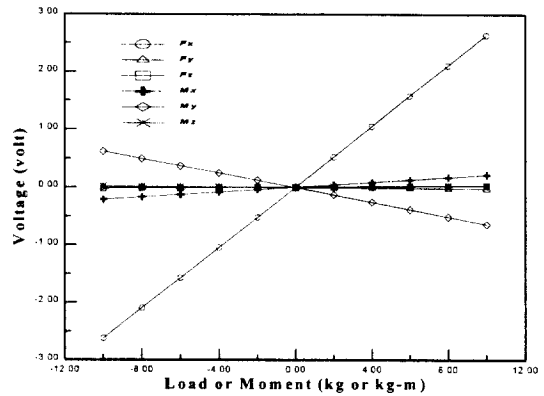


Fig. 8 Calibration results for the influence coefficients. X-force.

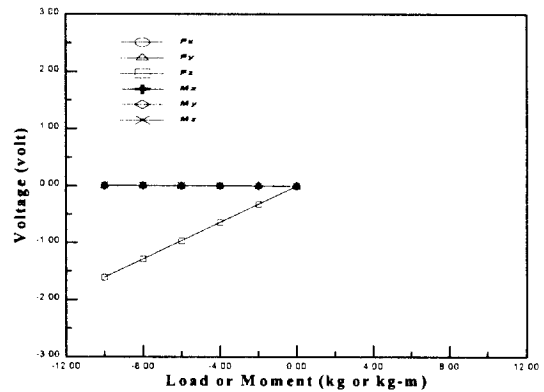


Fig.9 Calibration results for the influence coefficients. Z-force.

#### 4. 결 언

순수 굽힘모멘트를 받는 보를 적절히 배치하는 형식의 일체형 6분력계를 설계제작하였다. 개발된 검력계의 정밀 검정시험을 통하여 특성을 파악하고 힘의 성분간에 간섭을 계산된 영향계수를 이용하여 분리하였다. 반복된 검정시험을 통하여 개발된 검력계의 정확도와 신뢰도를 확인할 수 있

후 기

계측기의 검증 실험과 결과 정리에 도움을 준 서울대학교 서정천 교수님과 박영하군 그리고 홍익대학교 강성욱, 류황진군에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- [1] Dally, J.W. and Riley, W.F., Experimental Stress Analysis, 2nd ed., McGraw-Hill, 1978.
- [2] 김재성, 송무석, 김효철, "소형프로펠러 단독시험기 설계", 대한조선학회논문집, 32권 4호, 1995.
- [3] 백종승, 강대입, 이덕기, 김동진, 장원철, 나두영, "고정밀 로드셀 개발", 한국표준연구소 보고서, KSRI-87-32- IR, 1987.
- [4] 서홍원, "준 정상상태에서의 조파저항에 관한 실험적 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 1993.
- [5] 염영하, 한응교, "스트레인 게이지 기술", 서울대학교 기계공학과편, 1969.
- [6] 임창규, "선미노의 추력발생 기구 규명을 위한 실험적 연구", 석사학위논문, 서울대학교, 1989.

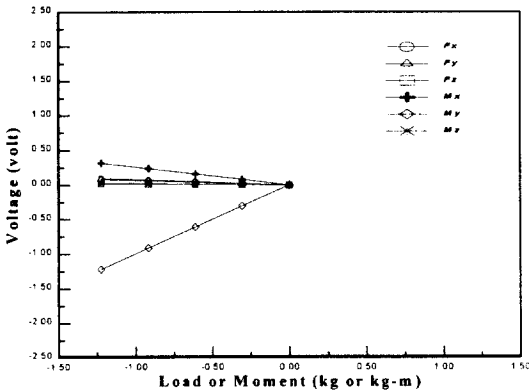


Fig. 10 Calibration results for the influence coefficients. Y-moment.

었으며, 축적된 경험은 앞으로의 실용적이고 신뢰도 높은 각종 검력계의 설계 및 제작에 도움을 줄 수 있을것으로 믿어진다.

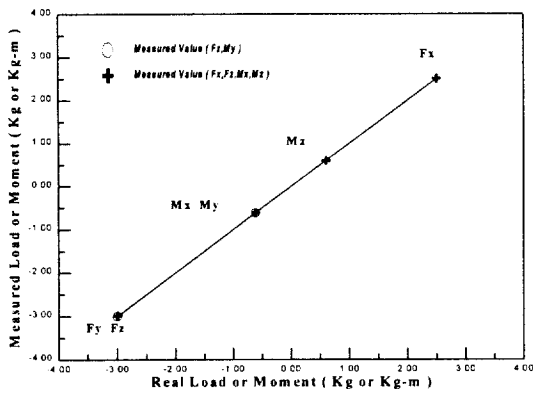


Fig. 11 Result from test measurements.