

## 3축 분력 측정이 가능한 대형 공구동력계 개발

김중선<sup>\*,\*\*\*</sup>, 왕덕현<sup>\*\*,#</sup>

<sup>\*</sup>경남대학교 대학원, <sup>\*\*</sup>경남대학교 기계공학부, <sup>\*\*\*</sup>세원정밀

### Development of Large-scale Tool Dynamometer for Measuring Three-axis Individual Force

Joong-Seon Kim<sup>\*,\*\*\*</sup>, Duck-Hyun Wang<sup>\*\*,#</sup>

<sup>\*</sup>Graduate School, Kyungnam Univ.,

<sup>\*\*</sup>School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ., <sup>\*\*\*</sup>Sewon Engineering

(Received 5 March 2019; received in revised form 23 March 2019; accepted 10 April 2019)

#### ABSTRACT

In modern society in which the fourth industrial revolution has come to the fore and rapid technology innovations are taking place, a phenomenon of making and selling small quantities of various products that consumers want instead of mass producing one item has emerged. As the market is moving toward the multi-item small-sized production system, there is a need for a system in which a machine independently judges and carries out machining and post-processing. In order for a machine to judge processing on its own, it is necessary to measure the force applied to a product. This study aimed to develop a large-scale dynamometer that enables three-axis measurement using octagonal ring load cells. As for the device's configuration, four octagonal ring load cells, which were previously researched, were used to enable three-axis measurement. It was reconfigured by modifying the attachment position of the octagonal ring load cells' strain gauge and the Wheatstone bridge of each axis, and a system was set up to allow the monitoring of data measured through the monitor. The configured device calculated a strain rate by an experiment, and this rate was compared with the theoretical strain rate to find a correction value. The correction value was entered into a formula, deriving a modified formula. The modified formula was entered into the device, which completed the large-scale dynamometer.

**Key Words** : Octagonal Ring Type Load-cell(팔각링 로드셀), Strain Gage(스트레인 게이지), Strain Measurement(변형을 측정), Strain-rings Law(스트레인 링 이론), Tool Dynamometer(공구 동력계)

#### 1. 서 론

4차 산업혁명이 대두되고 빠른 기술 혁신이 일어나는 현대사회에서 한 제품을 대량 생산하기보다 소비자가

가 원하는 제품을 소량 생산하여 판매되는 현상들이 나오고 있다. 다품종 소량생산 시스템으로 나아가는 시장 상황에서 기술력으로 따라가기 위해선 기계 스스로가 판단을 하여 기계 가공과 후처리를 하는 시스템을 개발하여 기계 스스로가 최적의 공정과정을 갖고 공정 시간을 줄이는 시스템이 필요하다. 기계가 스스로 공정 처리를 판단하기 위해서는, 절삭가공 중 제품에

# Corresponding Author : [dhwang@kyungnam.ac.kr](mailto:dhwang@kyungnam.ac.kr)

Tel: +82-55-249-2712, Fax: +82-505-999-2160

가해지는 힘 측정이 필요하다.

힘 측정 장치들을 연구한 국내 연구들을 보면 복합 압전필름형 가속도계를 이용한 초정밀 선반 공구동력계의 개발에 관한 연구<sup>11)</sup>, 가공성 평가를 위한 3축 공구동력계 개발<sup>12)</sup>, 고속 엔드밀용 고강성 공구동력계 개발 등 힘 측정 장치에 관한 여러 가지 연구개발<sup>13-14)</sup>이 이루어지고 있으며 이러한 측정 장치를 통하여 절삭력 특성을 분석하는 등 다양한 분석 연구들이 이루어지고 있다.

현재 힘 측정 장치는 주로 소형화된 장치 및 연구용 장치로 생산되며 대형 공작물이 가공하는 동안 측정할 수 있는 장치가 부족한 현실이다. 자동차 산업, 우주항공 산업 등 대형 공작물을 고 정밀성을 갖도록 가공해야 하지만 측정 장비의 연구와 생산이 부족하여 정밀성이 떨어지게 된다. 이러한 산업체들에 고 정밀성과 제품 신뢰성을 향상시키기 위해서는 소형화된 장치가 아닌 대형 공작물 가공에서도 객관적 판단을 내릴 수 있도록 힘이 측정이 가능한 장치의 연구 개발이 필요하다.

본 연구는 선행연구<sup>15)</sup>에서 완성한 팔각링 로드셀 4개를 통한 장치를 구성하고 스트레인 게이지 부착위치 설정 및 각 축별 휘스톤 브릿지 4개의 휘스톤 브릿지 (X축, Y축, Z<sub>1</sub>, Z<sub>2</sub>)를 형성하여 3축 측정이 가능한 대형 동력계 장치를 구성한다. 장치검증 방법으로는 장치에 가해지는 힘을 증가시켜 각 축의 변화를 측정하고 각 축을 측정할 때 다른 축의 변화를 보정하여 3축 분력 측정이 가능한 대형 동력계를 개발을 목적으로 연구를 진행한다.

## 2. 3축 측정 대형 공구동력계 제작

### 2.1 대형 동력계 구성



Fig. 1 Full modeling of experimental device using KeyShot rendering program

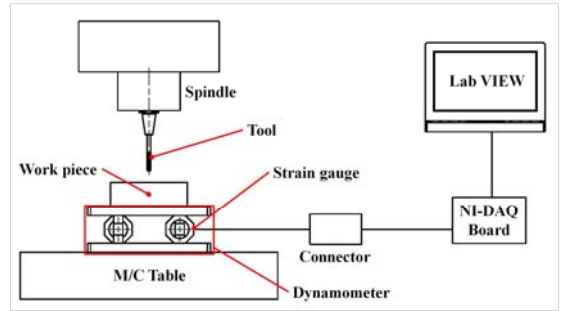


Fig. 2 Schematic illustration of experimental system

Fig. 1은 대형 동력계를 제작하기 전에 KeyShot 프로그램을 통해 실험 장치를 렌더링한 사진이다. 사전 연구를 통해 설계된 팔각링 로드셀 4개를 사용하여 3축이 측정 가능하도록 구성하였으며, 모니터를 통하여 실시간 측정 모습이 보이도록 구성한다.

Fig. 2는 3축 분력 측정이 가능한 대형 동력계가 MCT에 장착되었을 때 모습을 계통도를 표현한 것이다. MCT의 공구를 통해 소재가 가공될 때 동력계에 힘이 가해지고 가해진 힘은 팔각링 로드셀을 변형시키게 된다. 변형된 팔각링 로드셀을 통해 변형률이 측정되며 커넥터와 NI-DAQ Board를 통하여 컴퓨터에 신호를 전달하게 된다.

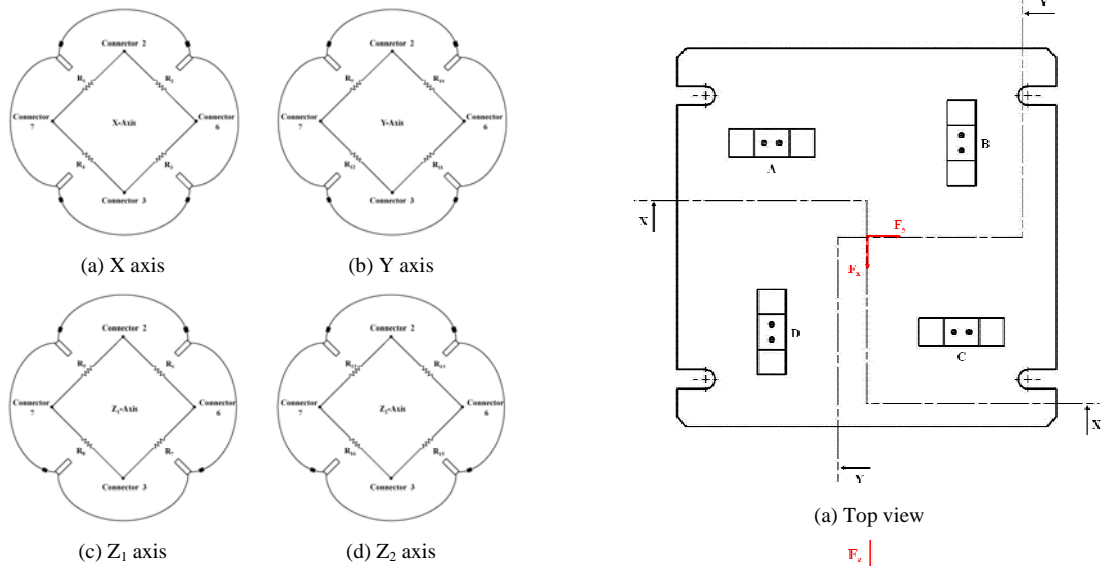
전달된 변형률 데이터는 컴퓨터에 저장되며, 실시간 그래프로 화면에 표시된다. 변형률 데이터를 통하여 소재에 가해지는 힘을 도출시킬 수 있으며 도출된 힘을 통해서 가공 사용자의 후 가공 처리 방식의 선택을 돕는다.

### 2.2 휘스톤 브릿지 회로 구성

Fig. 3은 휘스톤 브릿지 회로 구성을 나타내었다. 휘스톤 브릿지는 풀 브릿지로 구성하였으며, 브릿지 구성에 혼선을 막기 위해 스트레인 게이지 선에 검은 표식을 두어 나타내었다.

Fig. 4는 3축 측정을 위하여 팔각링 로드셀 4개의 스트레인 게이지 부착도이다. 휘스톤 브릿지는 X축, Y축, Z축 방향으로 구분하여 스트레인 게이지 부착위치를 선정하였다.

Fig. 3(a)는 X축의 브릿지, Fig. 3(b)는 Y축의 브릿지 구성을 표기하였다. Z축의 경우 스트레인 게이지가 8개가 설치되기 때문에 Fig. 3(c)에 보이듯 X축을



**Fig. 3 Drawing to show connection location of four octagonal ring of wheatstone bridge**

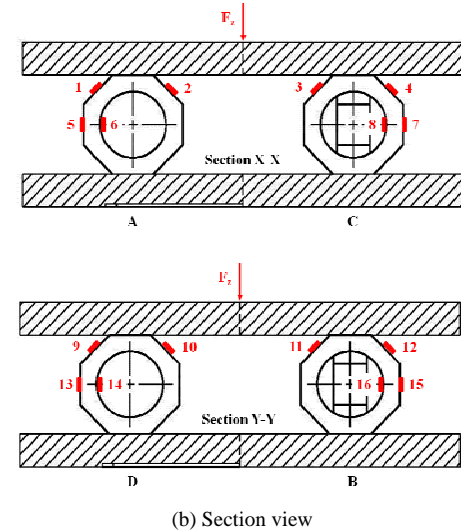
측정하는 팔각링 로드셀에 Z축의 스트레인 게이지로 휘스톤 브릿지를 구성하고 Z<sub>1</sub>으로 표기하였다. 또한 Fig. 3(d)에 보이듯 Y축을 측정하는 팔각링 로드셀에 Z축의 스트레인 게이지로 휘스톤 브릿지를 구성하고 Z<sub>2</sub>로 표기하였다. 표기할 때 각 축별 휘스톤 브릿지에 연결되는 전류의 입출력이 뒤바뀌지 않도록 커넥터의 연결 번호를 도면에 같이 표기하였다.

### 2.3 LabVIEW 시스템 설계

팔각링 로드셀에서 데이터를 추출하기 위해 기존의 LabVIEW 프로그램을 사용한 시스템 설계를 수정하였다. 출력되는 데이터는 변형을 값이며 실시간으로 Front panel의 그래프에 도출과 동시에 파일로 저장되도록 설정해놓았다. 데이터는 연속적으로 측정되며 왜곡(Aliasing)을 피하기 위해 데이터 취득 속도를 초당 1000개의 데이터를 추출되도록 설정하였다.

### 3. 실험방법

실험은 총 2가지 실험으로 진행된다. 첫 번째 실험은 3축 측정 실험은 도출되는 데이터를 통하여 이론에서



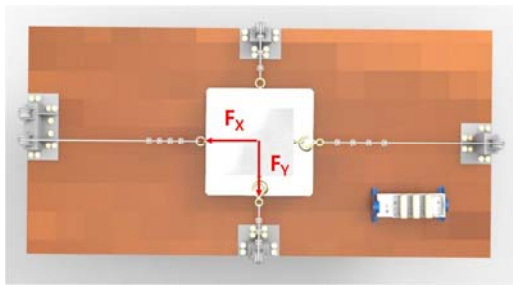
**Fig. 4 Drawing to show position of strain gage attachment of four octagonal ring**

도출한 변형을 값과 실제 측정 변형을 값과의 차이를 분석하고 보정을 통해 장치를 완성 및 실험식을 도출하는 실험이다. 두 번째 실험은 보정된 장치에 직접 소재를 올려 소재 측에 힘을 가하여 소재의 물성치 차이에서 나오는 세부 보정을 진행한다.

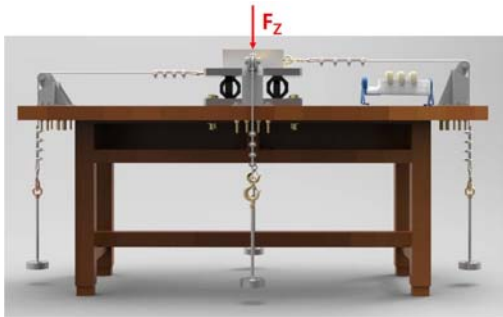
실험 방법으로는 Fig. 5와 같이 각 축에 하중을 가하며 이때 발생하는 3축의 데이터를 동시에 측정한다. 측정은 15초 동안 연속 측정하며 측정된 데이터는

추를 올릴 때 발생하는 흔들림을 제거하기 위해 측정이 끝난 시점부터 역으로 3000개의 데이터를 추출하여 평균을 내어 사용한다.

Fig. 6은 실험 장치를 구성한 모습이며 보이는 바와 같이 추를 이용하여 하중을 증가시킨다. 하중은 각 축별로 0kg<sub>f</sub>부터 100kg<sub>f</sub>까지 10kg<sub>f</sub>씩 증가시켜 11번의 실험 데이터를 구하며 각 하중별로 2번 진행하여 총 각 축당 22개의 데이터를 추출한다. Z축의 경우 스트레인 게이지가 8개로 구성되어 있기 때문에 Z<sub>1</sub>과 Z<sub>2</sub>로



(a) X and Y axis force



(b) Z axis force

Fig. 5 Direction of force for three-axis measurement



Fig. 6 Actual installation appearance of experimental devices

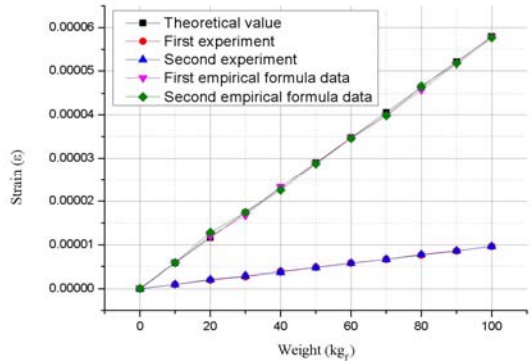


Fig. 7 X axis measurement experiment graph at X axis

나누어져 측정되며 측정된 Z<sub>1</sub>과 Z<sub>2</sub>의 값을 더하여 평균을 도출하여 그 수치를 Z값으로 표기한다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 3축 측정 실험

3축 측정의 목적은 팔각링 로드셀을 사용하여 만든 동력계의 작동이상 유무를 판단한다. 이론값과 실제 측정된 변형률 값의 차이를 분석하고 보정하여 보정식을 도출하며, 도출된 보정식을 통하여 장치를 완성시키는 것을 목적으로 실험한다.

#### 4.1.1 X축 측정 실험

Fig. 7 은 X축으로 힘을 증가시켰을 때 도출되는 이론 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률, 보정된 1차 실험 변형률, 보정된 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면 이론값과 실험값이 약 6.02배 정도의 차이를 보여준다. 이론값 같은 경우 팔각링을 1개를 쓴 반면 3축 측정에서는 팔각링을 4개 사용하였기 때문에 힘의 분산이 일어나 차이가 나타나게 된다. 이러한 도출 데이터를 통해 보정값을 이론 수식에 대입하게 되면 식(1)이 나오게 된다. (여기서  $n_X$ 은 보정값)

$$n_X \epsilon_X = \epsilon_B = \pm \frac{2.18 F_X r}{E b t^2} \quad (1)$$

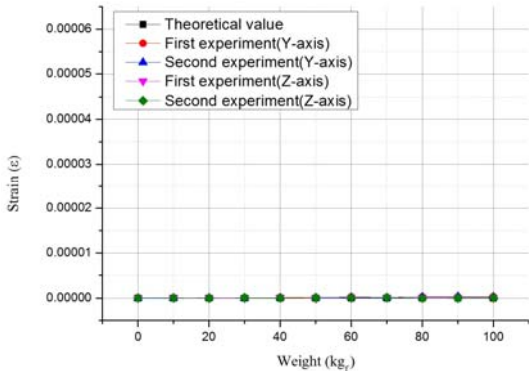


Fig. 8 X axis measurement experiment graph at Y-Z axis

도출된 식(1)을 X에 관한 변형을 수식으로 고쳐 표기하면 식(2)와 같이 나타난다.

$$\varepsilon_X = \pm \frac{2.18}{n_X} \frac{F_Y r}{Ebt^2} \quad (2)$$

Fig. 7의 그래프를 살펴보면 보상된 1차, 2차 실험 데이터 값은 이론값과 거의 흡사한 수치를 나타내고 있으며 이를 통하여 수식변형을 통해 원하는 데이터 값을 추출이 가능해 진다.

Fig. 8은 X축으로 하중을 증가시켰을 때 도출되는 Y축 1차 실험 변형률, Y축 2차 실험 변형률, Z축 1차 실험 변형률, Z축 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 그래프이며 이론에서 X축 방향에 힘을 줄 때 다른 축의 방향의 변형률은 0이 된다. 그래프를 살펴보게 되면 Y축 측정, Z축 측정 데이터들이 0에 가까운 값들을 도출시키고 있음을 보여준다. 이를 통하여 이론에 가까운 값을 도출시키는 장치를 설계하였음을 검증할 수 있다.

#### 4.1.2 Y축 측정 실험

Fig. 9는 Y축으로 힘 증가시켰을 때 도출되는 이론 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률, 보정된 1차 실험 변형률, 보정된 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보게 되면 이론값과 실험값이 약 5.61배 정도의 차이를 보여준다. 이러한 도출 데이터를 통해 보정값을 이론 수식에 대입하게 되면 식(3)이 나오게 된다.(여기서  $n_Y$ 은 보정값)

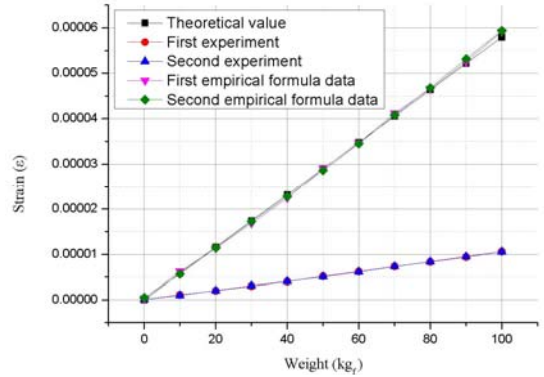


Fig. 9 Y axis measurement experiment graph at Y axis

$$n_Y \varepsilon_Y = \varepsilon_B = \pm \frac{2.18 F_Y r}{Ebt^2} \quad (3)$$

도출된 식(3)을 Y에 관한 변형을 수식으로 고쳐 표기하면 식(4)와 같이 나타난다.

$$\varepsilon_Y = \pm \frac{2.18}{n_Y} \frac{F_Y r}{Ebt^2} \quad (4)$$

Fig. 9의 그래프를 살펴보면 보상된 1차, 2차 실험 데이터 값은 이론값과 거의 흡사한 수치를 나타내고 있으며 이를 통하여 수식변형을 통해 원하는 데이터 값을 추출이 가능해 진다.

Fig. 10은 Y축으로 하중을 증가시켰을 때 도출되는 X축 1차 실험 변형률, X축 2차 실험 변형률, Z축 1차 실험 변형률, Z축 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 테이블이며 이론에서 Y축 방향에 힘을 줄 때 다른 축의 방향의 변형률은 0이 된다. 그래프를 살펴보게 되면 X축 측정, Z축 측정 데이터들이 0에 가까운 값들을 도출시키고 있음을 보여준다.

#### 4.1.3 Z축 측정 실험

Fig. 11은 Z축으로 힘을 증가시켰을 때 도출되는 이론 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률, 보정된 1차 실험 변형률, 보정된 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보게 되면 이론값과 실험값이 약 4.65배 정도의 차이를 보여준다. 이러한 도출 데이터를 통해 보정값을 이론 수식에 대입하게

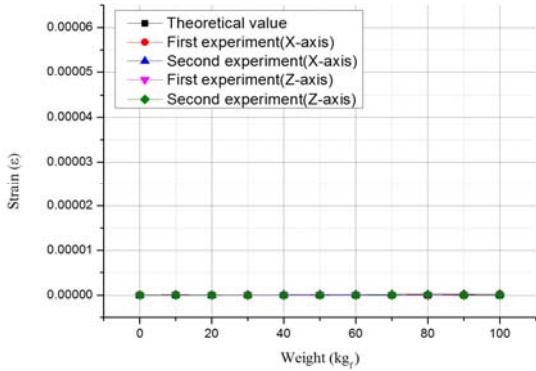


Fig. 10 Y axis measurement experiment graph at X-Z axis

되면 식(5)이 나오게 된다.(여기서  $n_Z$ 은 보정값)

$$n_Z \varepsilon_Z = \varepsilon_A = \pm \frac{1.09 F_Z r}{E b t^2} \quad (5)$$

도출된 식(5)을 Z에 관한 변형률 수식으로 고쳐 표기하면 식(6)와 같이 나타난다.

$$\varepsilon_Z = \pm \frac{1.09 F_Z r}{n_Z E b t^2} \quad (6)$$

Fig. 11의 그래프를 살펴보면 보상된 1차, 2차 실험 데이터 값은 이론값과 거의 흡사한 수치를 나타내고 있으며 이를 통하여 수식변형을 통해 원하는 데이터 값을 추출이 가능해 진다.

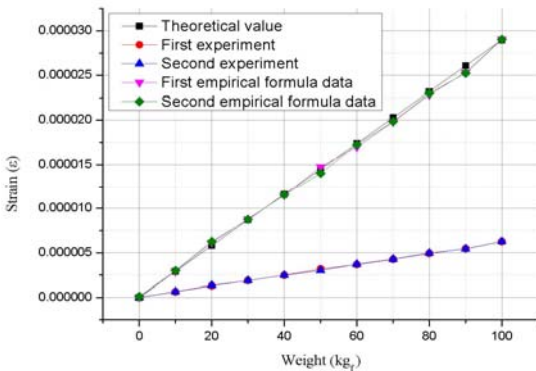


Fig. 11 Z axis measurement experiment graph at Z axis

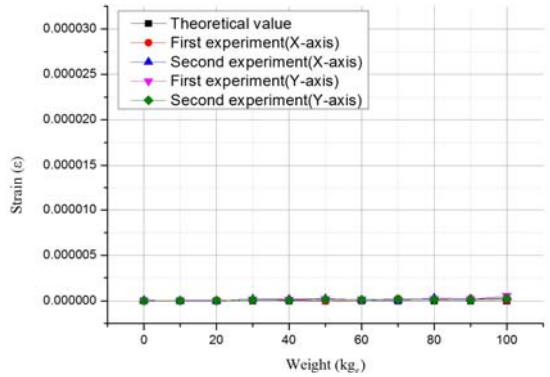


Fig.12 Z axis measurement experiment graph at X-Y axis

Fig. 12은 Z축으로 하중을 증가시켰을 때 도출되는 X축 1차 실험 변형률, X축 2차 실험 변형률, Y축 1차 실험 변형률, Y축 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 테이블이며 이론에서 Z축 방향에 힘을 줄 때 다른 축의 방향의 변형률은 0이 된다. 그래프를 살펴보게 되면 X축 측정, Y축 측정 데이터들이 0에 가까운 값을 도출시키고 있음을 보여준다.

## 4.2 소재 측 측정 실험

소재 측 측정 실험은 보정된 장치에 직접 소재를 올려 소재 측에 힘을 가하여 측정을 진행하며, 이때 소재 특성에 따라 발생하는 세부 보정을 진행한다. 소재의 크기는 가로 250mm, 세로 250mm, 높이 80mm이며, 재질은 Al 6061-T6로 선정하였다.

### 4.2.1 소재의 X축 측정 실험

Fig. 13은 소재의 X축으로 힘을 증가시켰을 때 도출되는 이론 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률, 보정된 1차 실험 변형률, 보정된 2차 실험 변형률 데이터를 나타낸 그래프이다. 수식은 3축 측정을 통해 나온 데이터로 보정한 수식을 사용하여 세부 보정하였다. 그래프를 살펴보게 되면 이론값과 보정된 실험값이 약 1.05배 정도의 차이를 보여준다. 이는 소재의 특성에 의해서 생기는 변형률 오차로 판단되며 식(7)에 세부 보정한 수식을 나타내었다. (여기서  $n_X$ 은 실험 보정값,  $n'_X$ 은 소재 보정값)

$$\varepsilon_X = \pm \frac{2.18 F_X r}{n'_X n_X E b t^2} \quad (7)$$



### 4.2.2 소재의 Y축 측정 실험

Fig. 14는 소재의 Y축으로 힘을 증가시켰을 때 도출되는 이론 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률, 보정된 1차 실험 변형률, 보정된 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 그래프이다. 수식은 3축 측정 실험을 통해 나온 데이터로 보정한 수식을 사용하여 세부 보정하였다. 그래프를 살펴보게 되면 이론값과 보정된 실험값이 약 1.16배 정도의 차이를 보여준다. 이는 소재의 특성에 의해서 생기는 변형률 오차로 판단되며 식(8)에 세부 보정한 수식을 나타내었다. (여기서  $n_Y$ 은 실험 보정값,  $n'_Y$ 은 소재 보정값)

$$\varepsilon_Y = \pm \frac{2.18}{n'_Y n_Y} \frac{F_Y r}{E b t^2} \quad (8)$$

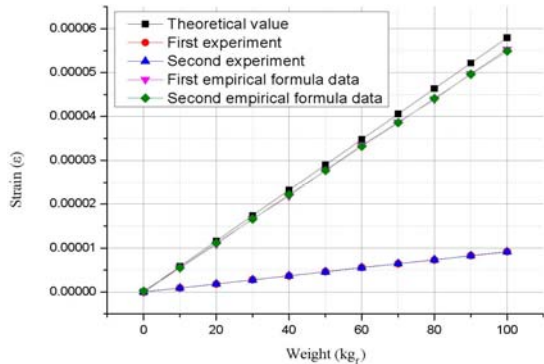


Fig. 13 X axis measurement experiment graph at X axis of the workpiece

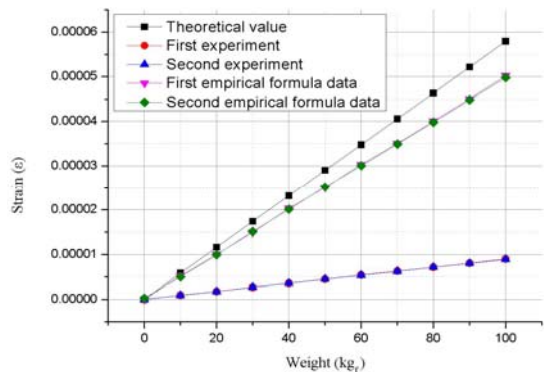


Fig. 14 Y axis measurement experiment graph at Y axis of the workpiece

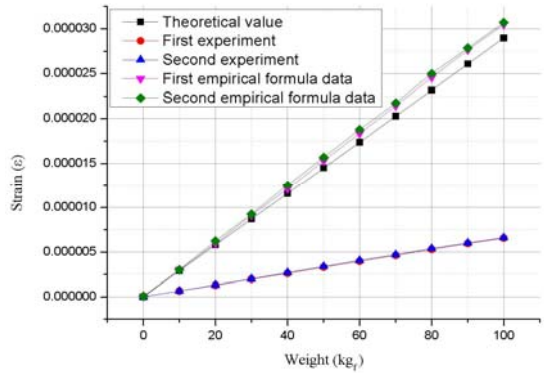


Fig. 15 Z axis measurement experiment graph at Z axis of the workpiece

### 4.2.3 소재의 Z축 측정 실험

Fig. 15는 소재의 Z축으로 힘을 증가시켰을 때 도출되는 이론 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률, 보정된 1차 실험 변형률, 보정된 2차 실험 변형률 데이터들을 나타낸 그래프이다. 수식은 3축 측정 실험을 통해 나온 데이터로 보정한 수식을 사용하여 세부 보정하였다. 그래프를 살펴보게 되면 이론값과 보정된 실험값이 약 0.94배 정도의 차이를 보여준다. 이는 소재의 특성에 의해서 생기는 변형률 오차로 판단되며 식(9)에 세부 보정한 수식을 나타내었다. (여기서  $n_Z$ 은 실험 보정값,  $n'_Z$ 은 소재 보정값)

$$\varepsilon_Z = \pm \frac{1.09}{n'_Z n_Z} \frac{F_Z r}{E b t^2} \quad (9)$$

## 5. 결론

본 연구는 팔각링 로드셀을 이용하여 3축 측정이 가능한 대형 공구동력계 개발을 목적으로 연구를 진행하였다. 선행 연구에서 연구되었던 팔각링 로드셀 4개를 사용하여 장치를 구성하고 실험을 통하여 이론적 수식을 보정하여 공구동력계 장치를 완성하였다.

1. 장치 구성은 팔각링 로드셀 4개를 사용하여 3축이 측정 가능하도록 제작하였다. 팔각링 로드셀의 스트레인 게이지 부착위치 설정 및 각 축별 휘스톤 브릿지(X축, Y축,  $Z_1$ ,  $Z_2$ )를 형성하였다. 또한 측정

되는 데이터를 컴퓨터에 저장하고 그래프로 모니터링 가능하도록 시스템을 구축하였다.

2. 공구동력계 3축 측정 실험을 통해 측정되는 변형률 데이터와 이론 계산을 통해 도출된 변형률 데이터의 차이를 분석하여 데이터를 보정했다. X축에 힘을 가할 때 약 6.02배, Y축에 힘을 가할 때 약 5.61배, Z축에 힘을 가할 때 약 4.65배가 이론값과 차이가 났으며 이를 보상하여 실험식을 도출하였다. 또한 각 축을 측정할 때 측정하는 축이 아닌 다른 축들에서는 변형률이 0에 가까운 값들이 도출되었으며 이는 이론값에 가까운 데이터를 도출시키는 장치를 제작하였음을 검증하였다.
3. 소재 측 측정 실험을 통해 소재 측에 힘을 가했을 때의 데이터를 분석을 하였다. 3축 측정 실험을 통해 얻은 보정값을 통하여 보정을 하였음에도 불구하고 X축에 힘을 가할 때 약 1.05배, Y축에 힘을 가할 때 약 1.16배, Z축에 힘을 가할 때 약 0.94배가 이론값과 차이가 났다. 이는 소재의 특성에 의해서 생기는 오차로 판단되며 소재 보정값을 사용하여 수식에 나타내었다.
4. 실험을 통하여 나온 변형된 수식을 입력하여 대형 공구 동력계를 완성하였다. 입력시킨 변형된 수식을 통해 유저가 원하는 입력 값과 출력 데이터 값을 설정하여 데이터 추출이 가능하다.

dynamometer for measuring high frequency cutting forces in micro milling" International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 6, 2010.

4. Totis, G., Wirtz, G., Sortino, M., Veselovac, D., Kuljanic, E. and Klocke, F., "Development of a dynamometer for measuring individual cutting edge forces in face milling", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, No. 6, pp. 1844-1857, 2010.
5. Kim, J. S., Jo, H. G., and Wang, D. H., "Development of Octagonal Ring Load Cell Based on Strain Rings", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 4, pp. 97-103, 2018.

## REFERENCES

1. Kim, J. D. and Kim, D. S., "A Development of Combined-Type Tool Dynamometer for Ultraprecision lathe with Piezo-Film Accelerometer", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 87-96, 1995.
2. Kang, M. C., Kim, J. S., Lee, D. W., Lee, K. Y. and Kim, J. H., "Development of 3-Component Tool Dynamometer for Evaluation of Machinability in High Speed Machining", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 5, pp. 11-18, 1999.
3. Kang, I. S., Kim, J. H., Hong, C. and Kim, J. S., "Development and evaluation of tool