

스트레인게이지 타입 회전형 공구동력계 개발과 3축 정적 하중 검증

이동섭*, 김인수*, 이세한**, 왕덕현**,#
*경남대학교 대학원 기계응용공학과, **경남대학교 기계공학부

Development of Strain-gauge-type Rotational Tool Dynamometer and Verification of 3-axis Static Load

Dong-Seop Lee*, In-Su Kim*, Se-Han Lee**, Duck-Hyun Wang**,#

*Graduate School of Kyungnam Univ., **School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

(Received 9 July 2019; received in revised form 15 July 2019; accepted 26 July 2019)

ABSTRACT

In this task, the tool dynamometer design and manufacture, and the Ansys S/W structural analysis program for tool attachment that satisfies the cutting force measurement requirements of the tool dynamometer system are used to determine the cutting force generated by metal cutting using 3-axis static structural analysis and the LabVIEW system. The cutting power in a cutting process using a milling tool for processing metals provides useful information for understanding the processing, optimization, tool status monitoring, and tool design. Thus, various methods of measuring cutting power have been proposed. The device consists of a strain-gauge-based sensor fitted to a new design force sensing element, which is then placed in a force reduction. The force-sensing element is designed as a symmetrical cross beam with four arms of a rectangular parallel line. Furthermore, data duplication is eliminated by the appropriate setting the strain gauge attachment position and the construction of a suitable Wheatstone full-bridge circuit. This device is intended for use with rotating spindles such as milling tools. Verification and machining tests were performed to determine the static and dynamic characteristics of the tool dynamometer. The verification tests were performed by analyzing the difference between strain data measured by weight and that derived by theoretical calculations. Processing test was performed by attaching a tool dynamometer to the MCT to analyze data generated by the measuring equipment during machining. To maintain high productivity and precision, the system monitors and suppresses process disturbances such as chatter vibration, imbalances, overload, collision, forced vibration due to tool failure, and excessive tool wear; additionally, a tool dynamometer with a high signal-to-noise ratio is provided.

Key Words : Cutting Force(절삭력), Tool Dynamometer(공구동력계), Strain Gauge(스트레인게이지), Whiston Bridge(휘스톤 브릿지)

1. 서 론

절삭력 측정은 가공 공정에서 필수적인 요건이다. 절삭 성능과 관련된 가장 중요한 가공 공정 변수 중 하나는 절삭 공구가 가공물을 자르고 깎을

Corresponding Author : dhwang@kyungnam.ac.kr

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

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

때 발생하는 절삭력이다. 또한 기계 공구 설계 및 절삭 프로세스 최적화 절삭 공구 성능의 기초 연구 조사, 표면 거칠기의 예측, 공구 마모 모니터링, 기타의 채터링 예측 등의 중요한 지표로 사용된다. 일반적으로 테이블 동력계는 가공물이 있는 밀링 및 천공 공정에서 절삭력을 측정하는 데 사용된다.

국내의 관련연구들은 압전필름형 가속도계를 이용한 초정밀 선반 공구동력계의 개발과^[1], 절삭 가공을 평가하기 위한 3축 공구동력계 개발^[2], 고속 엔드밀용 고강성 공구동력계 개발 등^[3-4]이 이루어지고 있으며, 최근 Kim 등은 테이블에서 대형구조물 가공에서 절삭력을 측정할 수 있는 스트레인게이지 타입의 공구동력계를 개발^[5-6]하였다. 한편, 공구동력계가 기계 공구에 고정된 동력계 상단에 장착된다. 상용 동력계의 원리는 동력계 구조에서 주요 요소로 사용되며 비례 전기로 변환되는 압전 재료를 사용하는 압력 감지이다. 스트레인 게이지에 기초한 테이블 동력계도 개발되었다^[7].

본 연구에서는 회전형 공구에 부착해서 절삭력을 측정할 수 있는 스트레인게이지 타입의 회전형공구동력계 구조물을 설계하고자 한다. 그리고 이 구조물의 3축과 Fc방향의 힘을 정적으로 측정하여 구조물의 각 분력을 측정할 수 있는지 검증하고자 하며, 향후 무선통신방법으로 각 분력의 힘을 측정할 수 있는 회전형 공구동력계를 완성하고자 한다.

2. 공구동력계 개발

본 장치는 절삭력 측정이 가능한 공구동력계 설계 및 개발을 목적으로 진행한다. 설계를 진행시킨 뒤 검증실험을 통하여 이론값과 수치적 차이를 구하고 보상값을 통한 보상을 시킨 뒤 장치를 완성시킨다.

MCT의 공구를 통해 소재가 가공될 때 공구동력계에 힘이 가해지고 가해진 힘은 Force Sensing을 변형시키게 된다. 변형된 Force Sensing은 스트레인 게이지를 통해 측정이 되며 커넥터와 NI-DAQ Board를 통하여 컴퓨터에 신호를 전달하게 된다. 전달된 변형률은 데이터로 저장시키고 그래프로 화면에 표시된다. 변형률 데이터를 통하여 소재에 가해지는 힘을 도출시킬 수 있으며 도출된 힘을 통해서 가공 유저의 후 가공 처리 방식의 선택을 돕는다.

2.1 밀링 작업 시 힘의 요소

Fig. 1에 밀링 커터가 공작물 재재를 절단할 때 발생하는 절삭력을 표시하고, 힘(Fa)의 방향은 진입각 ϕ 에 따라 달라진다. 힘의 구성 요소는 절단 속도(vc)와 공급 속도(vf)의 방향을 포함하여 두 가지 방향을 가진다. 절삭력(Fc)과 수직 절삭력(FcN)은 방향이 절삭 속도와 평행하고 스핀들 중앙을 향하도록 하는 좌표의 공동 회전 시스템과 관련이 있다. 공급력(Ff)과 수직 공급력(FfN)은 좌표계의 고정 시스템과 관련된다. 공구별 구성부품과 관계가 있는 힘은 절삭력과 수직 절삭력이다.

추력(Ft)도 가공물이 절삭 툴에 반하고 그 방향이 항상 수직 축에 있기 때문에 공구 시스템과 직접적인 관계가 있다. 좌표의 고정 시스템에서 공회전 시스템으로 힘을 변환하려면 다음 방정식 Eq. (1) ~ Eq. (5)이 적용된다.

$$F_c = F_f \cos \varphi + F_{fN} \sin \varphi \quad (1)$$

$$F_{cN} = F_f \sin \varphi + F_{fN} \cos \varphi \quad (2)$$

$$F_x = F_f \quad (3)$$

$$F_y = F_{fN} \quad (4)$$

$$F_z = F_t \quad (5)$$

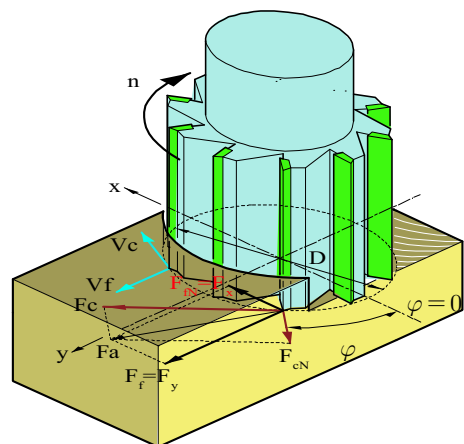


Fig. 1 Cutting force component of plane milling

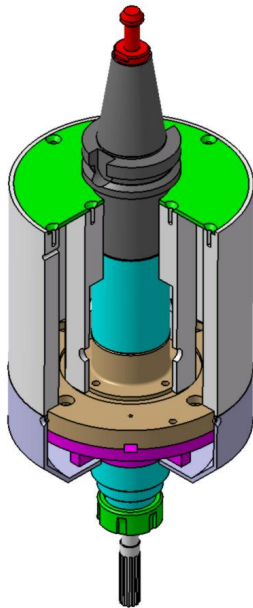


Fig. 2 Model structure of an tool dynamometer and tool holder

2.2 힘 감지 요소의 형상설계

금속 절삭시 발생하는 힘의 크기를 확인하기 위해 공구동력계 형상 설계를 진행하였으며 공구동력계 전체 조립체는 Fig. 2에 표시하였다. 또한 절삭 공구를 장착할 수 있는 구조로 형상설계를 하고 공구동력계 시스템에 대한 적합성을 보장하기 위해 측정의 기하학, 크기, 강성, 안정성 및 정확도가 고려되었다.

Fig. 3에 절삭 실험시 밀링공구를 부착할 수 있으며 힘 감지 요소의 기하학적 설계를 보여줍니다. 힘 감지 요소는 크로스 빔 유형의 형태의 Force Sensing과 Force Sensing Support으로 구성된다. 힘 측정에 관련한 Force Sensing 부품은 Fig. 4에 자세한 형상을 나타내었다. 이 Force Sensing은 공구 홀더, 크로스 빔을 감지 요소로 연결하고 하부 링을 감지 요소에 힘을 분배하는 중앙 축으로 구성된다. 크로스 빔에는 네 개의 대칭 수평 빔과 수직 빔이 있다. 힘 감지 요소의 재료 선택에는 환경적 문제, 힘의 크기, 기계적 통합, 강성, 높은 자연 주파수 및 부식 내성을 포함한 몇 가지 요소가 있다. 본 과제에서는 상기 기준을 만족하기 때문에 Force

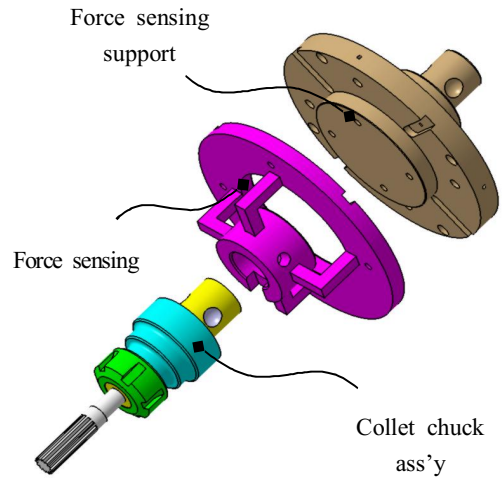


Fig. 3 Force Sensing 3d Model

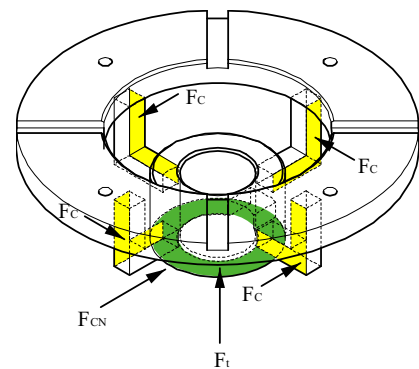


Fig. 4 Force Sensing 3d Model

Table 1 Properties of stainless steel grade 304

Properties	Values
- Density	8000 kg/m^3
- Poisson ratio	0.3
- Modulus of elasticity	193,000 N/mm^2
- Tensile strength	515 N/mm^2
- Yield strength	205 N/mm^2
- Hardness	201 HB

Sensing은 스테인리스강 등급 304를 사용하였으며 자세한 재료의 성질은 Table 1에 표시되어 있으며, 절삭력을 측정할 수 있고 스핀들 공구에 통합된 힘

감지 요소 설계 밀링 및 시추 작업의 홀더 회전 시 절단력(Fc) 방향은 100kgf으로 하고 공작물의 스핀들 압력에 의한 추력(Ft)은 대략적으로 가정된다. 3000 N을 Z축 방향에 적용하고 밀링 공정은 공급 속도로 인해 변환 움직임이 있기 때문에 수직 절단력(FcN)은 운동에 따라 발생하며 최대 값은 약 100kgf으로 가정한다.

2.3 정적구조 특성의 이론적 분석

본 과제에 힘 감지 요소의 기하학은 외팔보 모양이 동일한 교차 빔이다. Fig 5에서 표시한 대로 적용되는 힘에 의해 외팔보의 변형은 표면에 변형 값 변화를 이야기한다. 외팔보의 탄성 변형에 대한 응력-변형 관계는 후크의 법칙으로 Eq. (6)에 의해 나타낸다.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6)$$

여기서 σ 는 응력이고, E는 탄성계수이며 ε 는 변형률이다. 다음 방정식 Eq. (7)에서 후크의 법칙으로 대체 함으로써 변형률과 가해진 힘 사이의 관계를 다음과 같이 달성할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6FL}{Ebt^2} \quad (7)$$

주 절삭력(Fc)을 Fig. 4에서 설명한 대로 절삭 속도에 평행한 방향으로 가하면 힘 감지 요소의 하단 링이 힘 또는 모멘트를 준수 빔을 통해 크로스 빔으로 전송한다.

교차 빔은 대칭이기 때문에 4개의 수평 가로 빔으로 균일하게 변형되며 다음과 같이 Eq. (8)으로 표현될 수 있다.

$$F = \frac{F_c}{4} \quad (8)$$

커팅 힘 작용으로 인해 크로스 빔 표면에서 발생하는 스트레인 속도를 Eq. (9)으로 단순화하여 작성 될 수 있다.

$$\varepsilon_{F_c} = \frac{3F_3}{2Ebt^2}(l^2 + h^2)^{1/2} \quad (9)$$

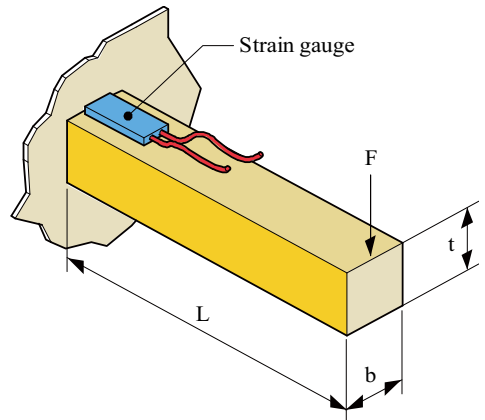


Fig. 5 Schematic diagram of a cantilever beam

추력 및 수직 절단력이 힘 변환기의 하단 링에 가해진 경우, 모멘트 평형도는 여전히 중앙 축에 있지만, 모멘트의 길이는 크로스 빔의 수직 및 수직 길이이며, 추력과 수직력에 의한 변형율은 다음과 같이 Eq. (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{F_t} = \frac{3F_l}{2Ebt^2} \quad (10)$$

다음 Eq. (11)과 Eq. (12)식은 단순 외팔보가 힘을 받을 때의 이론식이다. 본 과제에 힘 감지 요소의 형상은 많은 복잡한 보의 형태로 되어 있어 위 식 만으로 이론을 작성할 순 없지만 참고용으로 사용할 수는 있다.

$$\varepsilon_{F_c} = \frac{3F_c}{2Ebt^2}(l^2 + h^2)^{1/2} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{F_{cN}} = \frac{3F_{cN}h}{2Ebw^2} \quad (12)$$

2.4 스트레인 게이지 배열

스트레인 게이지를 기반으로 하는 힘 감지 요소를 스프링 소자라고 한다. 힘 감지 요소에 외부 하중을 가하면 재료 표면 내의 응력 및 변형이 변화한다. 스트레인 게이지는 가해지는 힘으로 인해 나타나는 응력을 전압 신호로 변환한다.

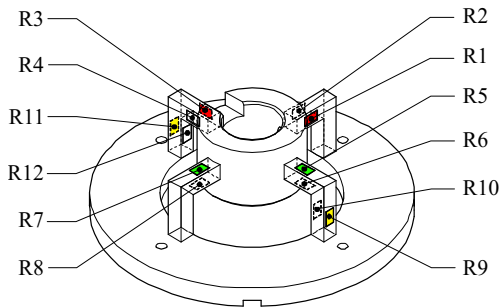


Fig. 6 Locations of Stress Gauge Attachment for Force Sensing

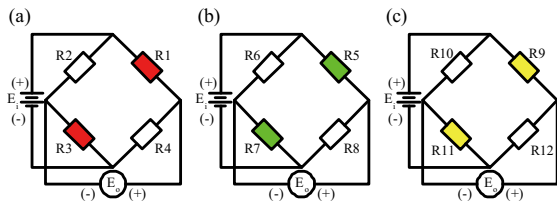


Fig. 7 Strain gauge arrangement of the Wheatstone bridge circuit : (a) channel X,Y, (b) channel of Z, and (c) channel of Fc

스트레인 게이지가 힘 감지 요소에 장착되면, 가해진 하중이나 힘에 의한 응력 변화를 반영하는 변형을 값 또는 저항 변화를 겪게 된다. 이러한 변화는 보통 게이지율(GF)이라 불린다. 이것은 또한 변형 감도에 대한 기본 매개 변수이며 다음과 같이 Eq. (13)로 표현 될 수 있다.

여기서 R은 스트레인 게이지의 원래 저항이고 L은 원래 길이이고 ϵ 는 스트레인 게이지에 의해 감지된 변형률이다.

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (13)$$

최대 감도를 얻기 위해 스트레인 게이지가 장착되는 지점의 위치가 매우 중요하다. 주 절삭력, 추력 및 수직 절삭력 측정을 위한 스트레인 게이지 위치의 방향은 세 가지가 있다.

Fig. 6은 힘 감지 요소에 장착된 스트레인 게이지의 3방향 위치를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용된 모든 스트레인 게이지는 공칭 저항이 350 Ω 인 KYOWA 회사에서 구입한 범용 선형 스트레인 게이지 이다. GF는

2.09 \pm 1.0%이고, 게이지의 길이는 5mm, 폭은 3.2mm이다.

이론적 분석(mm/m)에서 정격 변형률과 전압 신호의 정격 출력 값(mV/V)을 변환하기 위해 다음과 같은 방정식이 있다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{4} GF \epsilon \quad (14)$$

여기서 V_i 는 휘스톤 브릿지의 입력 전압(고정 4V), V_o 는 휘스톤 브릿지의 출력 전압, GF는 응력 게이지, ϵ 는 이론적 분석의 정격 변형률이다. 이론상 정격 스트레인은 Eq. (14)를 사용하여 mV/V 단위로 전기 신호의 정격 출력으로 변경된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 ANSYS을 이용한 정적구조해석

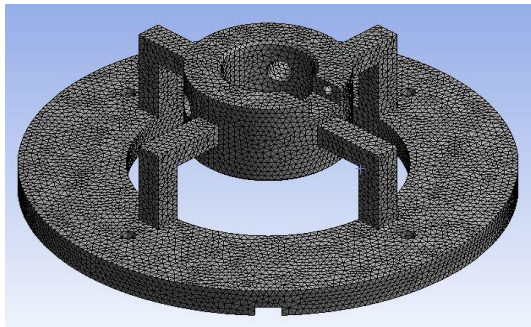
공구동력계의 실험장치 검증 실험과 비교 및 대조를 하기 위해서, 카티아(CATIA)에서 모델링 작업을 진행하였으며 ANSYS 프로그램을 활용하여 정적구조해석을 이용해서 해석적 실험을 먼저 진행하였다.

해석계산을 위해 Force Sensing 부품의 재료 물성치의 정의를 위해 스테인리스강 등급 304 재질값을 정의하였다. Force sensing의 형상에 메쉬를 정의하였으며 정의된 Mesh Size는 2.5mm, 노드 수는 141374EA, 요소 수는 92882EA로 Fig. 8(a)에 정의된 메쉬모델을 작성한 후 경계조건으로 및 하중조건을 입력하여 전처리과정 조건을 정의하고 이후 해석계산을 통해 정적구조해석의 결과를 확인할 수 있었다.

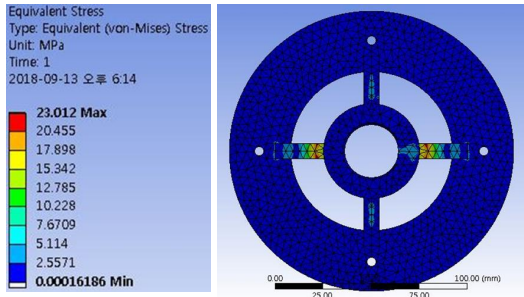
다음의 Fig. 8(b)에 X축, Y축 방향의 응력값, Fig. 8(c)에 Z축 방향의 응력값, Fig. 8(d)에 Fc축 방향의 응력값을 나타내어 각각의 방향별로 응력분포 결과값을 비교 확인할 수 있으며 또한 각 축별로 하중에 따른 변위 및 변형률도 확인할 수 있었다.

3.2 DAQ 측정 프로그램 설계

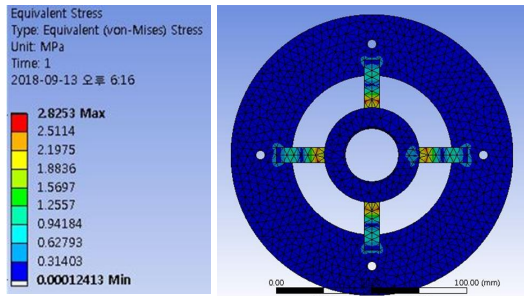
내셔널인스트루먼트(NI)사의 NI-9237 장비를 통해



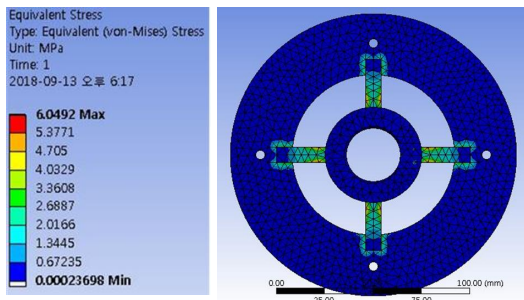
(a) mesh model



(b) X, Y-axis stress values

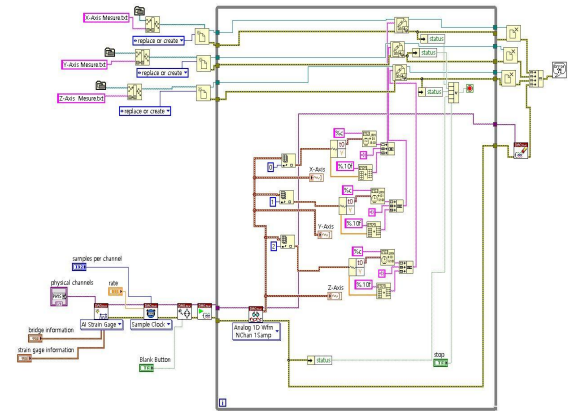


(c) Z-axis stress values

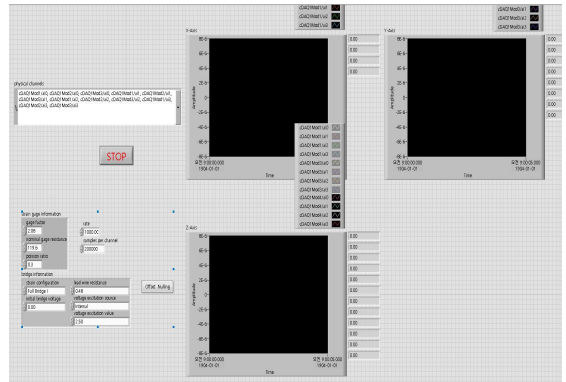


(d) Fc axis stress values

Fig. 8 Photographs of an experiment



(a) block diagram



(b) front panel

Fig. 9 Design of LabVIEW Program

하드웨어적인 장비 장치 구성을 완료하면 컴퓨터에서 전류를 내보내고 받아들여 신호를 감지하는 프로그램 설계가 필요하다.

본 장치에서는 LabVIEW 프로그램을 사용하여 3축을 각각 측정할 수 있도록 프로그램을 작성하였으며, Fig. 9는 3축 절삭력을 측정할 수 있는 LabVIEW 프로그램이다.

설계 시 휘스톤 브릿지의 형태와 사용되는 스트레인 게이지의 사양을 입력 가능하게 하였고 MCT의 주축 회전속도에 의한 앨리어싱(Aliasing)을 피하기 위해 데이터 취득 속도를 수정 가능하게 하였다.

3.3 정적 3축 분력 측정

3축 분력 측정 실험으로 힘 감지 요소와 프로그



Fig. 10 Photographs of an experiment

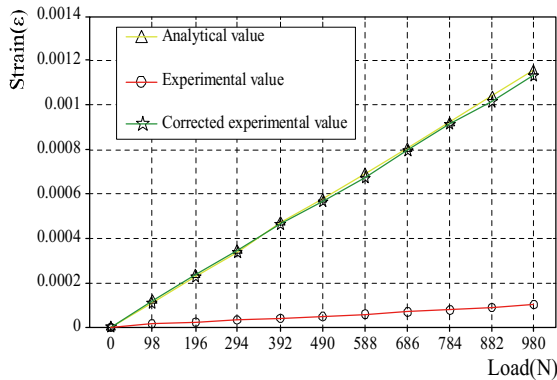


Fig. 11 Graph of X, Y axis results

램의 설계, 스트레인 게이지의 부착 위치의 이상 유무를 평가하는 실험이다.

Fig. 10 처럼 접선방향 힘, 반경방향 힘을 가해 추의 무게를 10kg_r~100kg_r까지의 축별로 힘을 유지하면서 15초 동안 측정하였다.

측정값은 추를 올릴 때 발생하는 흔들림을 제거하기 위해 측정이 끝난 시점부터 3000개의 값을 추출하여 평균을 구한다.

힘은 10kg_r~100kg_r까지 10kg_r씩 증가시켜 10개의 값을 추출한다.

3.3.1 정적 X축과 Y축 분력 결과

X, Y축에 가해지는 힘을 통해 해석 값, 실험 변형률, 보정된 실험 변형률은 절대 값을 취한 뒤 Fig. 11에 그래프 화 시켰다.

결과값을 비교분석해보면 해석 값과 실험값이 약 11.6배 정도의 차이를 보였다.

3.3.2 정적 Z축 측정결과

Z축에 가해지는 힘을 통해 해석값, 실험 변형률, 보정된 실험 변형률은 절대 값을 취한 뒤 Fig. 12에 나타냈다.

결과값을 비교 분석해보면 해석 값과 실험 값이 약 2.46배 정도의 차이를 보였다.

3.3.3 정적 Fc 방향 측정결과

Fc축에 가해지는 힘을 통해 ANSYS 해석 값, 실험 변형률, 보정된 실험 변형률을 절대 값을 취한 뒤 Fig. 13에 나타냈다. 결과값을 비교 분석해보면 해

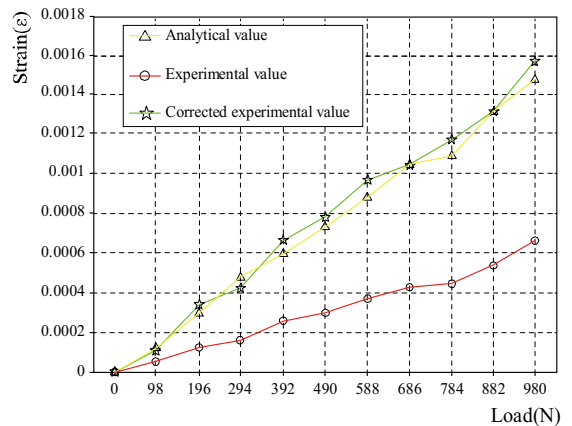


Fig. 12 Graph of Z axis results

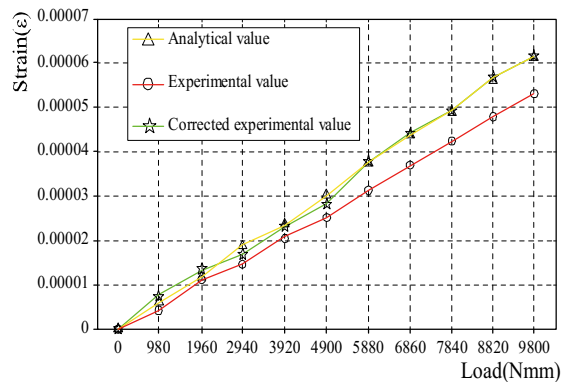


Fig. 13 Graph of Fc axis results

석 값과 실험 값이 약 1.1배 정도의 차이를 보여준다.

4. 결론

본 장치는 3방향 측정이 가능한 공구 동력계 개발로 설계는 Strain rings 이론, 휘스톤 브릿지 이론 등을 기반으로 절삭력 측정 설계, 스트레인 게이지 부착 위치 설정, 휘스톤 브릿지 구성을 하였고 3방향 측정이 가능한 공구 동력계의 실험을 하였다. 검증 실험은 z축 측정, x축 측정, 모멘트 값 측정 3가지로 분류하여 진행하였다.

2축 측정 실험은 절삭력 측정과 프로그램의 설계, 스트레인 게이지의 부착 위치의 이상 유무를 평가하는 실험이다. z축 측정 실험은 측정되는 데이터와 이론 변형률 값의 차이를 분석하고 보정하기 위한 실험이며 소재 측 측정 실험은 소재 측에 힘을 가했을 때 데이터를 측정하는 실험으로 z축 측정 실험의 보정값으로 측정된 데이터를 보정하여 분석한다.

모멘트 측정 또한 측정 실험의 보정값으로 측정된 데이터를 보정하여 분석하였으며 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2축 측정 실험은 절삭력 측정과 프로그램의 설계, 스트레인 게이지의 부착 위치의 이상 유무를 확인하였다. 프로그램을 실행 시 동시에 3축 그래프가 화면상에 도출되었고 데이터 저장 상태도 이상이 없었다. 또한 반경방향에 힘을 가했을 때 발생하는 변형률과 이론값과 비교하였을 때 약 11.6배 정도의 차이가 났으나 변형률의 증가폭을 살펴보면 일정한 증가를 보이고 있어 설계나 제작에 이상이 없음을 검증하였다.
2. Z축에 힘을 가할 때 약 2.46배가 이론값과 차이가 났으며 이를 보상하여 새로운 수식을 도출하였다. 변형된 수식을 통해 사용자가 원하는 데이터 값으로 변환하여 사용 가능해진다. z 축을 측정할 때 측정하는 축이 아닌 다른 축에서는 값이 도출되지 않았으며 이는 변형률이 이론값에 가까운 데이터를 도출시키는 장치를 제작하였음을 검증하였다.

3. 모멘트 측정 실험을 통해 측정되는 변형률 데이터와 이론 계산을 통해 도출된 변형률 데이터의 차이를 보정값을 이용해 도출하며 측정된 변형률 데이터를 보정한다. 모멘트 측에 힘을 가할 때 약 1.1배가 이론값과 차이가 났으며 이를 보상하여 새로운 수식을 도출하였다.

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 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.
6. Kim, J. S., and Wang, D. H., "Development of Large-scale Tool Dynamometer for Measuring Three-axis Individual Force", Journal of the

Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 5, pp. 29-36, 2019.

7. Muhammad Rizal, Jaharah A. Ghani, Mohd Zaki Nuawi, Che Hassan Che Haron “Development and testing of an integrated rotation dynamometer on tool holder for milling process”, Mechanical Systems and Signal Processing, 52-53 pp. 559-576, 2015.