

스트레인 링 이론 기반의 팔각링 로드셀 개발

김중선^{*,***}, 조형근^{**}, 왕덕현^{**,#}

^{*}경남대학교 대학원, ^{**}경남대학교 기계공학부, ^{***}세원정밀

Development of Octagonal Ring Load Cell Based on Strain Rings

Joong-Seon Kim^{*,***}, Hyeong-Geun Jo^{**}, Duck-Hyun Wang^{**,#}

^{*}Graduate School, Kyungnam Univ.,

^{**}School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ., ^{***}Sewon Engineering

(Received 30 May 2018; received in revised form 9 June 2018; accepted 15 June 2018)

ABSTRACT

Force is a crucial element to be measured in various industries, especially the machine tool industry. Mega units of force are required in fields such as the heavy and ship industries. Micro/nano units of force are required for microparticles. The detection of force generates a physical transformation due to the force imposed from the outside, and electrical voltage signals are obtained from the system. For the detection of force, an octagonal ring load cell based on circular ring theory is designed and produced. To design the octagonal strain ring, theoretical values with data from the ANSYS program are compared to determine the size of the octagonal strain ring. An octagonal strain ring of the chosen size is made with the SCM415 material. The strain gauges are attached to the octagonal strain ring, designed to construct a full Wheatstone bridge. The LabVIEW program is used to measure the data, and strain values are found. With the octagonal ring load cell completed in this way, experiments are conducted by imposing forces on the tangential axis and radial axis. Experiments are performed to verify if the octagonal ring load cell conducts measurements properly, and theoretical values are analyzed to find any differences. The data will later be used in further research to develop a machine-tool dynamometer.

Key Words : Octagonal Ring Load Cell (팔각링 로드셀), Strain Gage (스트레인 게이지), Strain Measurement (변형을 측정), Strain Rings (스트레인 링 이론)

1. 서 론

절삭가공에 의한 기계부품의 절삭력인 힘의 측정은 공작기계뿐만 아니라 여러 산업분야의 설계 개발에서 중요한 요소이다. 힘 측정은 중공업, 항공·조선 등의 분야에서 작용하는 메가 단위의 힘 측정 장비부터, 미세 입자 간에 작용하는 나노 단위의 힘을 측정하는 장비가 필요하다. 미세한 공간의 작업영역에서 부품을

제작하는 경우는 일반적인 가공과는 다르게 마이크로/나노 단위의 정밀한 분해능을 요구되며, 이러한 초정밀 작업을 검증을 위하여 비전 시스템과 함께 접촉 정보를 위한 힘 측정 장치 개발 연구가 활발히 진행되고 있다.

힘 측정 장치는 외부로부터 가해진 힘에 발생하는 물리적인 변형을 센서를 통해 간접적으로 전압을 측정하는 방법을 주로 사용하고 있다. 힘 측정 장치에서 주로 사용하는 센서로는 압전소자(Piezoelectric element), 압전필름(Polyvinylidene Fluoride, PVDF), 스트

Corresponding Author : dhwang@kyungnam.ac.kr

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

레인 게이지(Strain gage) 등이 있으며, 일반적으로 힘을 측정하는 센서 개발은 힘의 크기나 방향을 측정할 수 있도록 제작되어야 한다.

스트레인 게이지는 Simmons 등에 의해 1936년 접착 저항 스트레인 게이지가 처음 개발되어 사용의 편리함과 높은 정밀도를 가지게 되었고, 이에 따라 기계나 구조물에서 응력 측정^[1-2] 등에 많이 사용되어 왔다. 스트레인 게이지를 기반으로 힘을 측정하는 장치를 로드셀(Load-cell)이라 지칭하며 외력에 의해 감지부(Sensing element)가 변형이 되고 그 변형을 측정하여 힘을 구하게 된다. 감지부의 형상도 기둥형(Column), 링형(Ring), 전단형(Shear beam), 쌍안경형(binocular) 등 여러 가지 감지부의 형상을 연구^[3-5]하여 동력계를 만들어 사용^[6-7]되고 있다.

본 연구는 스트레인 링 이론을 기반으로 한 팔각링 로드셀을 개발하고자 한다. 팔각링을 설계 및 제작하고 팔각링에 스트레인 게이지를 부착 후 휘스톤 브릿지 형성한다. 형성한 휘스톤 브릿지를 NI-Board에 연결하여 하드웨어적 노이즈 제거를 시킨 뒤 측정이 가능한 팔각링 로드셀을 구성한다. 팔각링 로드셀은 추후 연구할 공구동력계용 측정장비의 사양을 기반으로 제작하고자 하였다.

2. 팔각링 로드셀 제작

팔각링 로드셀의 제작은 스트레인 링 이론(Strain rings law)을 기반으로 팔각링의 크기와 형상을 제작하였다. 해석과 이론값의 비교를 통하여 최적의 팔각링 형상을 찾았으며 휘스톤 브릿지의 구성과 LabVIEW 시스템 설계를 통하여 최종적으로 팔각링 로드셀을 제작하였다.

2.1 스트레인 링 이론^[8]

Fig. 1(a)에 표시된 스트레인 링(Strain ring)은 좌굴에 대해 충분한 안정성을 지니면서 강성에 대한 높은 민감도를 가져야한다. 스트레인 링에 휘스톤 브릿지의 풀 브릿지를 형성하여 온도보상을 통해 온도에 의한 영향을 제거하였다. Fig. 1(a)에 표시된 얇은 금속의 링은 반경(r), 두께(t), 폭(b)의 금속링으로 반경방향의 힘(F_r), 접선방향의 힘(F_t), 하중이 작용하는 점에서 작용하는

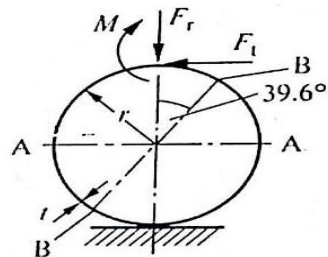
모멘트 M 이 작용하여 힘의 평형을 이루고 있다. 만약 F_r 만 작용할 경우 Fig. 1(b)와 같이 변형된다. 얇은 링에 관한 탄성이론에 의하면 A점에서 링의 내외 표면의 변형률은 식(2.1)와 같다.

$$\varepsilon_A = \pm \frac{1.09 F_r r}{E b t^2} \quad (2.1)$$

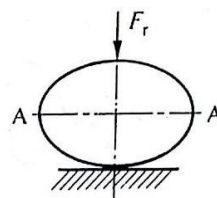
이 경우 B점(수직축에서 39.6° 에 위치)의 변형률은 0이 된다. 또한 F_t 만 작용할 경우 Fig. 1(c)와 같이 변형되는데 B점에서의 변형률은 식(2.2)과 같이 되며 A점에서의 변형률은 0이 된다.

$$\varepsilon_B = \pm \frac{2.18 F_t r}{E b t^2} \quad (2.2)$$

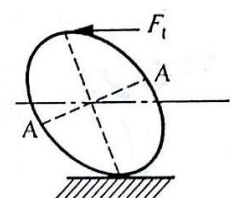
Fig. 1(a)와 같이 A점과 B점에 스트레인 링 내외부 표면에 스트레인 게이지를 배치하였다고 하면 힘의 분력 F_r 와 F_t 를 각각 분리하여 측정할 수 있을 것이다. 힘의 분력인 F_r 은 B점에 스트레인 게이지 저항의 변화가 생기지 않게 하면서 A점의 스트레인 게이지 저항을 변하게 한다. 같은 방법으로 B점에 적용을 시키면 F_t 분력을 측정할 수 있다.



(a) Measuring for combined load



(b) For radial load only



(c) For tangential load only

Fig. 1 Circular strain ring showing type of deformation for different load condition

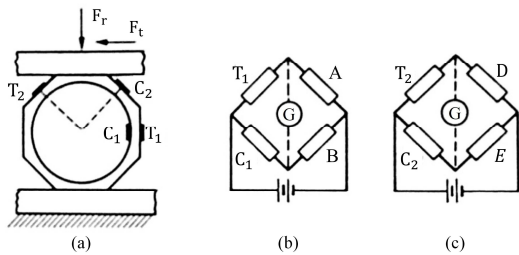


Fig. 2 Octagonal strain ring showing gage positions

원형링의 경우 작용점에서 회전되는 것을 방지하기 어렵기 때문에 링의 형상대신 외부 형상을 팔각형상으로 만들어 팔각링(Octagonal ring)으로 변형하여 사용하면 작용점에서의 회전 방지가 가능하다. 이 경우 응력이 집중이 되는 위치가 39.6° 의 B점 위치에서 45° 의 위치로 변형되게 된다. 이는 원형링에서는 일정한 두께를 유지하는 반면 팔각링에서는 각도에 따라 두께가 변화되며 단면적이 45° 위치에서 가장 적기 때문이다.

Fig. 2는 팔각링을 사용한 로드셀의 스트레인 부착 위치와 휘스톤 브릿지의 회로 설정을 표기한 설명도이다. Fig. 2(a)에는 스트레인 게이지 부착 위치가 도시되어 있으며 Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)에서는 F_r 와 F_t 를 단독 측정하기 위한 스트레인 게이지 연결 방법을 도시하였다. Fig. 2(b)의 A와 B의 전기저항은 고정된 한 쌍의 저항으로 사용한다. 하지만 팔각링을 여러 개 동시에 사용하게 된다면 고정된 저항을 사용하지 않고 다른 링의 압축, 인장 쪽에 스트레인 게이지를 부착한 뒤 고정저항 위치에 연결하여 풀 브릿지 회로를 형성시킨다. 같은 방법으로 Fig. 2(c)의 D와 E의 전기저항에도 적용이 가능하다.

2.2 팔각링 설계 및 제작

팔각링의 제작에 앞서 해석을 통하여 팔각링의 두께(t)/피치원 반경(r)에 따른 변형률 수치들을 살펴보았다. Strain rings 이론값과 1차원 원형링, 2차원 원형링, 3차원 원형링, 3차원 팔각링 형상을 만들어 해석한 데이터들을 t/r 을 기준으로 분석하였다.

해석은 반경방향의 힘(F_r)과 접선방향 힘(F_t)이 주어질 때 A점과 B점을 기준으로 데이터를 도출하였으며 스트레인 게이지 부착을 고려해 점에서 $\pm 1^\circ$ 의 범위를

지정하여 해석하였다. 또한 3차원 팔각링에서 응력집중이 일어나는 B점이 39.6° 위치가 아닌 45° 위치이기 때문에 3차원 팔각링에서만 B점의 위치를 45° 에 위치하고 나머지 해석들은 B점의 위치를 39.6° 에 위치하였다.

Table 1에는 t/r 비율에 따른 각 내경 반지름, 피치원 반지름, 두께를 나타내었으며 이 비율은 이론 및 각 해석 모델링 상에 공통적으로 적용시켰다. 그 외 조건으로 힘은 100N, 외경의 반지름(최대 높이) 45mm, 물성치는 SCM415의 물성치인 Young's Modulus $2.05E+05$ MPa, Poisson's Ratio 0.29를 입력하여 해석을 진행하였다.

이론값 계산은 식(2.1)와 식(2.2)식을 기준으로 계산하였으며 해석은 ANSYS 프로그램을 사용하여 해석하였다. Fig. 3은 Mesh 격자가 생성된 모델링의 모습을 나타내었으며 Table 2는 해석을 진행할 때 각 해석 모델링별 Mesh size, Element 개수, Node 개수를 표현하였다.

Table 1 The size of octagonal ring shape according to t/r ratio

t/r	Inner radius	Pitch circle radius	Thickness
0.1	40.72	42.86	4.29
0.2	36.82	40.91	8.18
0.3	33.26	39.13	11.74
0.4	30	37.5	15
0.5	27	36	18

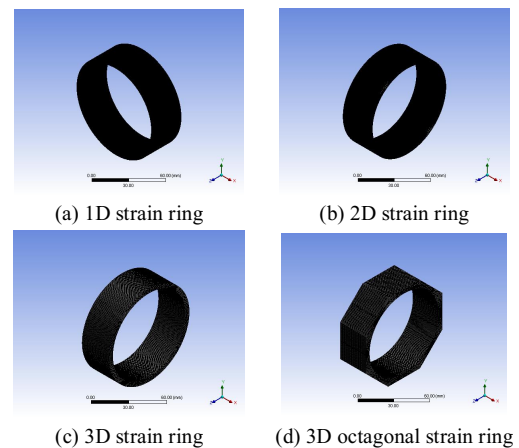


Fig. 3 Mesh grid generated modeling

Table 2 Mesh grid information

	Mesh size (mm)	t/r	Number of elements	Number of node
1D strain ring	0.01	0.1	26931	53862
		0.2	25706	51412
		0.3	24590	49180
		0.4	23564	47128
		0.5	22623	45246
2D strain ring	0.2	0.1	94700	95647
		0.2	94700	95647
		0.3	94700	95647
		0.4	94700	95647
		0.5	94700	95647
3D strain ring	0.6	0.1	158200	710996
		0.2	279500	1200130
		0.3	387600	1635672
		0.4	463200	1939264
		0.5	509600	2124304
3D octagonal strain ring	0.6	0.1	214353	942406
		0.2	339660	1447440
		0.3	450891	1895342
		0.4	527748	2203726
		0.5	572220	2380510

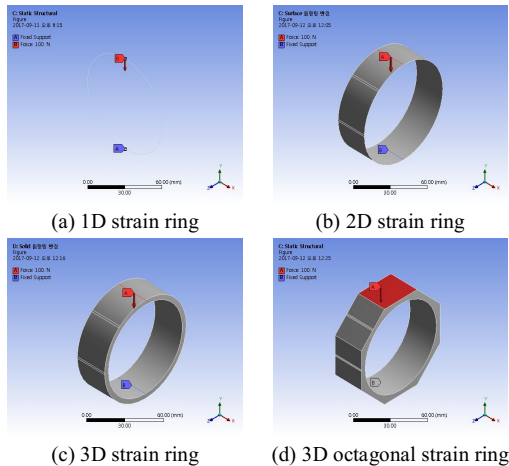


Fig. 4 Boundary condition given radial force(F_r)

Mesh격자 생성 뒤 Fig. 4는 반경방향의 힘(F_r)이 주어질 때, Fig. 5는 접선방향의 힘(F_t)이 주어질 때 구속조건을 설정한 모습이다. 하부에는 Fixed support로 전체 고정을 시켰으며 상부에 100N의 힘을 각 방향별로 주었다.

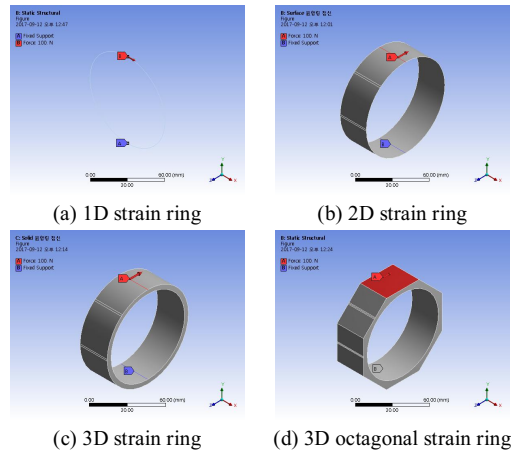


Fig. 5 Boundary condition when tangential force(F_t) is given

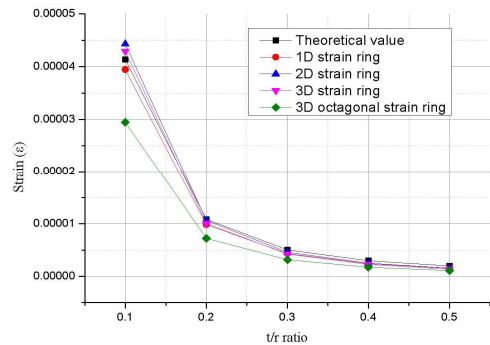


Fig. 6 A point strain graph with t/r ratio

도출된 데이터를 분석하기 위해 데이터를 그래프화 시켜 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6의 그래프는 A점에서 발생하는 변형률을 나타내었으며 Fig. 7의 그래프는 B점에서 발생하는 변형률을 나타내었다.

그래프를 보면 t/r 의 비율이 증가할수록 이론값과 각 해석수치들 간의 차가 줄어드는 현상을 보이며 안정적인 값으로 변하는 현상을 볼 수 있다. 하지만 t/r 의 비율이 0.4일 때와 0.5일 때의 차가 크지 않기 때문에 t/r 의 비율이 0.4 이상의 값이 되면 안정된 값으로 판단되어 실험에서 사용될 팔각링의 t/r 비율을 0.4로 설정하였다. Fig. 8은 최종 결정된 팔각링의 도면이다. 재질은 SCM415로 설정하였으며 높이 90, 길이 90, 두께 30이며 t/r 비에 따라 내부 반경 30, 두께 15로 설계하였다.

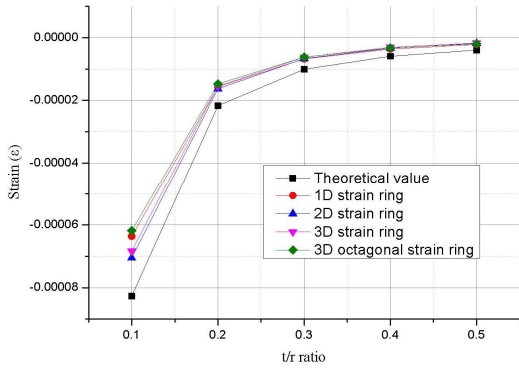


Fig. 7 B point strain graph with t/r ratio

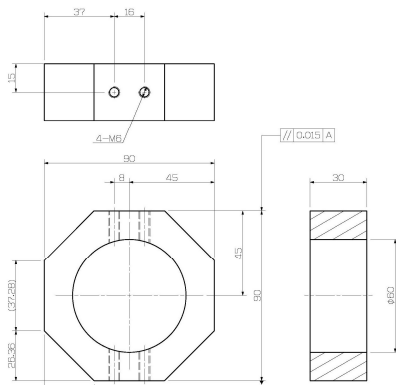


Fig. 8 Octagonal strain ring drawing

상하부 플레이트에 고정과 힘 측정 도중 팔각링의 회전을 막기 위해 M6 나사산을 상하부에 2개씩 내어 마무리하였다.

2.3 휘스톤 브릿지 회로 구성

Fig. 9는 측정을 위한 팔각링의 스트레인 게이지 부착도이다. 휘스톤 브릿지는 반경방향으로 힘을 가할 때와 접선방향으로 힘을 가할 때를 구분하여 스트레인 게이지 부착위치를 선정하였다. 또한 Fig. 10에서는 부착된 스트레인 게이지를 풀 브릿지화 시키기 위해 휘스톤 브릿지 연결 도면을 그려놓았다. 브릿지 구성에 혼선을 막기 위해 표식을 하여 스트레인 게이지 선을 구분하는데 스트레인 게이지 선에 검은 표식이 없는 부분은 정면 쪽의 스트레인 게이지 선, 검은 표식이 있는 부분은 후면 쪽의 스트레인 게이지 선으로

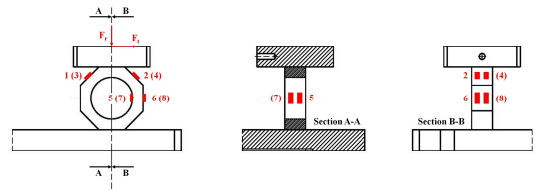


Fig. 9 Drawing to show position of strain gage attachment of one octagonal ring

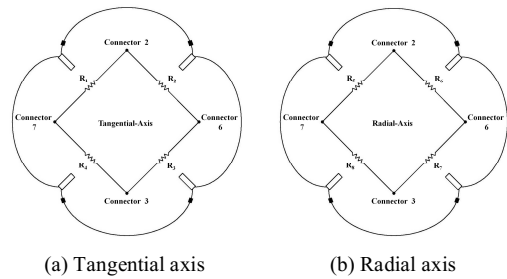
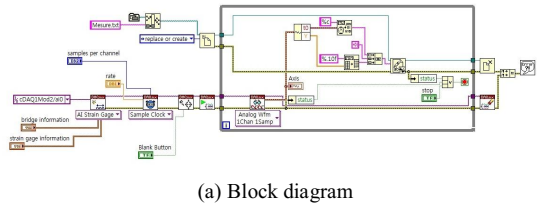
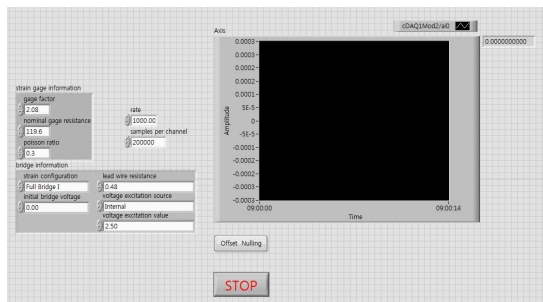


Fig. 10 Drawing to show connection location of one octagonal ring of wheatstone bridge



(a) Block diagram



(b) Front panel

Fig. 11 LabVIEW program design

구분하였다. Fig. 10(a)는 접선방향 축의 브릿지, Fig. 10(b)는 반경방향 축의 브릿지 구성을 표기하였고 표기

할 때 전류의 입출력이 뒤바뀌지 않도록 커넥터의 연결 번호 표기를 같이하였다.

2.4 LabVIEW 시스템 설계

구성된 휘스톤 브릿지 회로에서 데이터를 추출하기 위해 LabVIEW 프로그램을 통한 시스템 설계를 하였다. Fig. 11(a)는 신호제어 프로그램을 나타내는 Block diagram이고, Fig. 11(b)는 LabVIEW 프로그램의 입출력부를 나타내는 Front panel이다.

데이터는 실시간으로 Front panel의 그래프에 도출되며 데이터를 파일로 저장시키도록 설정해놓았다. 데이터는 15초간 측정하도록 설정하였으며 앨리어싱(Aliasing)을 피하기 위해 취득 속도를 1000으로 하여 초당 1000개의 데이터를 추출하였다. 측정 데이터는 변형률을 도출시키도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

실험은 설계한 팔각형 로드셀의 이상 유무를 판단하기 위해 진행하는 검증 실험이며 Fig. 12에 모습을 나타내었다. 실험 방법으로는 각 축별로 추를 이용해 하중을 가하며 측정은 15초 동안 측정한다. 측정할 데이터는 추를 올릴 때 발생하는 흔들림을 제거하기 위해 측정이 끝난 시점부터 역으로 3000개의 데이터를 추출하여 평균을 구한다. 힘은 0kg부터 100kg까지 10kg씩 증가시켜 11번의 데이터를 추출하며 실험을 2번 진행하여 총 22번에 데이터를 추출한다.

3.1 접선방향 축(Tangential axis) 측정실험

접선방향 축 측정 실험은 추의 무게를 0kg에서 100kg까지 10kg씩 접선방향으로 증가시켰을 때 B점의 이론상 도출되는 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률 데이터들을 측정하는 실험이다. 이론값은 식(2.2)의 변형률 계산식으로 계산하였으며 Fig. 13에 변형률 데이터들을 그래프에 도식화하였다.

데이터와 그래프를 살펴보게 되면 1차 측정 결과와 2차 측정 결과 모두 거의 일정한 증가 추세를 보이나 이론값과 비교하였을 때 약 2.68배 정도의 차이를 보였다. 이는 이론값은 39.6° 위치를 B점으로 잡은

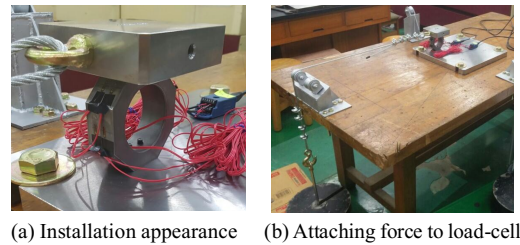


Fig. 12 Installation of octagonal ring type load-cell

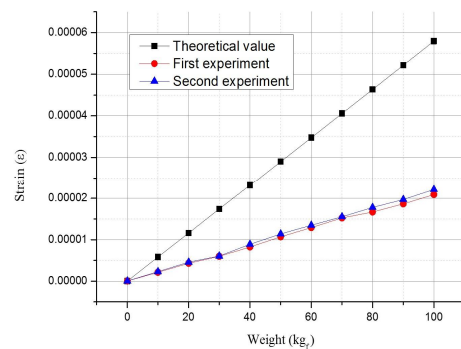


Fig. 13 Tangential measurement experiment graph at one axis

만면 실제 실험에서는 45° 위치를 B점으로 잡았기 때문에 나타나는 오차로 추후 실험에서 보상이 필요하다는 점을 보여준다.

3.2 반경방향 축(Radial axis) 측정실험

반경방향 축 측정 실험은 추의 무게를 0kg에서 100kg까지 10kg씩 반경방향으로 증가시켰을 때 A점의 이론상 도출되는 변형률, 1차 실험 변형률, 2차 실험 변형률 데이터들을 측정하는 실험이다. 이론값은 식(2.1)의 변형률 계산식으로 계산하였으며 Fig. 14에 변형률 데이터들을 그래프에 도식화하였다.

데이터와 그래프를 살펴보게 되면 1차 측정 결과와 2차 측정 결과 모두 거의 일정한 증가 추세를 보이며 이론값과 비교하였을 때 약 1.17배 정도의 차이로 이론값과 매우 흡사함을 보였다. 오차는 이상적 환경과 실험 환경에서 차이에서 발생하는 실험 오차로 판단되며 이는 추후 실험에서 보상이 필요하다.

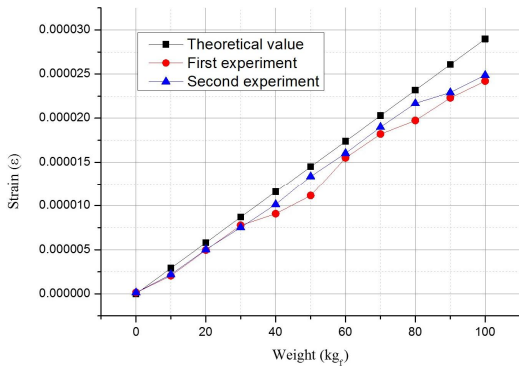


Fig. 14 Radial measurement experiment graph at one axis

4. 결론

본 연구는 공구동력계의 기본 바탕인 팔각링 로드셀 제작을 목적으로 선행 연구를 진행하였다. 팔각링의 설계는 원형링 이론을 기반으로 한 팔각링을 설계 하였으며 그 뒤 팔각링에 스트레인 게이지를 부착 후 휘스톤 브릿지 형성한다. 형성한 휘스톤 브릿지를 NI-Board에 연결하여 하드웨어적 노이즈 제거를 시킨 뒤 측정이 가능한 팔각링 로드셀을 제작하였다.

1. 팔각링은 SCM415 재질로 제작하였으며 추후 있을 공구동력계의 크기를 고려하여 높이 90, 길이 90, 두께 30으로 설정하였다. 또한 t/r 비에 따른 해석과 이론값의 비교를 통하여 내부 반경 30, 두께 15로 설계하였다.

2. 데이터 도출을 위하여 휘스톤 브릿지 종류 중 풀 브릿지를 형성하여 사용하였으며 LabVIEW 시스템 설계를 통하여 변형률을 도출시키도록 설계하였다.

3. 접선방향에 힘을 가했을 때 B점에서 발생하는 변형률과 이론값과 비교하였을 때 약 2.68배 차이가 났으며 이는 B점의 위치가 이론값은 39.6° 위치를 B점으로 잡은 반면 실제 실험에서는 45° 위치를 B점으로 잡았기 때문에 나타나는 오차로 판단되었다. 이는 추후 실험에서 보상을 통해 해결이 가능하다.

4. 반경방향에 힘을 가했을 때 A점에서 발생하는 변형률과 이론값과 비교하였을 때 약 1.17배 정도의 차이가 났으며 이는 이론의 이상적 환경과 실제 실험 상황의 차이 때문에 발생하는 오차로 판단되었다. 이

는 추후 실험에서 보상을 통해 해결이 가능하다.

REFERENCES

1. Park, C. K., Kim, Y. G., Cho, Y. H. and Paik, J. S., "Development of Force Sensor to Measure Contact Force of Pantograph for High-Speed Train", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 13, No. 5, pp. 488-492, 2010.
2. Baek, T. H. and Lee, B. H., "Design of load and Strain Measuring Equipment Using Strain Gage, Instrumental Differential Amplifier and A/D Converter in a Truss System", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 28, No. 2, pp. 217-224, 2008.
3. Kim, J. D. and Kim, D. S., "Development of a combined-type tool dynamometer with a piezo-film accelerometer for an ultra-precision lathe", Journal of materials processing technology, Vol. 71, No. 3, pp. 360-366, 1997.
4. Karabay, S., "Design criteria for electro-mechanical transducers and arrangement for measurement of strains due to metal cutting forces acting on dynamometers", MATERIALS AND DESIGN -REIGATE-, Vol. 28, No. 2, pp. 496-506, 2007.
5. Robinson, G. M., "Finite element modelling of load cell hysteresis", MEASUREMENT - LONDON-, Vol. 20, No. 2, pp. 103-108, 1997.
6. Choi, S. Y., Kwon, D. G., Park, I. S., and Wang, D. H., "A Study on the Cutting Forces and Tool Deformation when Flat-ended Pocket Machining," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp. 28-33, 2017.
7. Cho, K. C., Ha, M. H., Moon, H. J., and Kim, G. K., "A Study on the Structural Strength Evaluation for the Development of One-ton Grade Commercial Vehicle Seat Frame for the FMVSS 201 Model," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 130-136, 2018.
8. Shaw, M. C., "METAL CUTTING PRINCIPLES", Oxford University Press, pp. 153-156, 1984.