

# 사물인터넷 센서를 이용한 동적 부품의 스트레인 측정 방법

## Strain measurement method for moving parts using IoT sensors

김바다<sup>1</sup> · 안영철<sup>2</sup> · 박정현<sup>2</sup> · 유영준<sup>1</sup> · 이철희<sup>1,2</sup> · 이대엽<sup>1,2\*</sup>

Ba Da Kim, Young Chul An, Jung Hyun Park, Yeong Jun Yu, Chul Hee Lee and Daeyup Lee

Received: 06 Feb 2023, Revised: 21 Feb 2023, Accepted: 23 Feb 2023

**Key Words** : Internet of Things(사물인터넷), Embedded CPU(임베디드 CPU), Strain gauge(스트레인게이지), Axis torque(축 토크), Axis thrust force(축력)

**Abstract**: The aim of this study was to develop a method for installing strain gauges on moving, lubricating oil-filled, and sealed parts, such as drive shafts of equipment, including construction machinery. A measuring device was constructed using an embedded CPU and an IoT sensor to measure the strain of the strain gauge, which allowed for the measurement of axial torque and axial force, and subsequent analysis. To verify the performance of the developed device, the axial torque and axial force of the forklift were measured during operation using a strain gauge attached to the inside of the drive shaft. This study confirmed the possibility of measuring and analyzing the strain of a moving part, such as the inside of a drive shaft, which is sealed and filled with hydraulic oil.

### 기호 설명

$\Delta R$  : strain initiated change in resistance,  $\Omega$   
 $R$  : resistance of the strain gauge under load,  $\Omega$   
 $R_0$  : original resistance,  $\Omega$   
 $GF$  : gauge factor  
 $\varepsilon$  : strain  
 $V$  : output voltage, mV  
 $V_0$  : input voltage, mV  
 $F_c$  : centrifugal force, N

$m_s$  : sensor total weight, g  
 $R_t$  : tire radius of tire, m  
 $V_{veh}$  : velocity of forklift, km/h  
 $r$  : residuals  
 $y_i$  : measured data  
 $f(x_i)$  : model function  
 $\varepsilon(T)$  : temperature compensation for strain  
 $T$  : temperature

### 1. 서론

작업 하중이 인가되고 움직이는 장비에서 부품의 스트레인(strain)을 측정하여 구동 부품의 강도 및 피로 특성 등의 동적 성능 분석을 하는 것은 중요한 시험 평가 항목이다. 구동축과 같은 부품에는 인장과 압축 및 비틀림과 같은 힘과 토크가 작용하게 되고 이로 인하여 생긴 변형의 비율이 스트레인이다. 축을 비틀면 전단력이 발생하고 동시에 축선과 45° 경사진 두 방향으로 전단력과 인장 및 압축의 힘이 발생

\* Corresponding author: dylee@inha.ac.kr

1 Department of Construction Machinery Engineering, Inha University,

Inchon 22212, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Inha University  
 Inchon 22212, Korea

Copyright © 2023, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<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.

한다. 따라서 비틀림에 의한 변형은 단독의 변형에 의한 것이 아니라 전단 변형과 세로 변형, 가로 변형을 조합한 변형이 된다.

스트레인 게이지는 물체의 인장과 압축에 따라 저항이 변화하는 특성을 이용하여 스트레인(변형)의 양을 측정하는 것이다. 변형이 발생하는 장소에 붙여 사용하여 변형 전에 저항값과 변형이 발생했을 때의 저항값을 측정함으로써 변형을 측정할 수 있다. 원래 저항값과 저항의 변화량, 변형량의 관계는 다음과 같은 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta R}{R} = GF \times \varepsilon \quad (1)$$

여기서  $\Delta R$ 은 저항 변화량( $\Omega$ ),  $R$ 은 원래 저항값( $\Omega$ ),  $GF$ 는 비례상수로서 스트레인 게이지에 이용하는 금속의 재질에 의해 정해져 있는 비례상수이다.  $\varepsilon$ 는 변형률을 의미한다.

동적 부품에서 스트레인 게이지를 이용한 변형률을 측정하기 위하여 무선 telemetry 기술을 사용한 연구[1,2]가 수행된 바가 있다.

이 기술에는 광학 기술을 이용하는 방법과 슬립링을 이용하는 방법과 유도결합방식을 이용하는 방법 등이 있다.

슬립링은 접촉식 방법으로 동적 부품으로부터 데이터를 획득하는 데 많이 사용되어왔다. 하지만 동적 부품에 설치하기 위한 공간적 제약이 있고 측정대상을 옮기기 어려우며 실제 주행하는 장비의 동적 부품에 적용하는 데 한계가 있다.

스트레인 게이지와 함께 트랜스폰더를 사용하고 트랜스폰더는 유도결합방식(inductive coupling method)으로 구동되므로 기존의 신호선 케이블 배선이 필요하지 않은 장점이 있다. 그러나 이 방식에서는 동적 부품에 트랜스폰더를 설치하는 것이 필요하고 무선 신호를 취득할 수 없는 밀폐된 구조 및 유압유로 채워진 구조에서 사용은 불가하다.

움직이는 물체의 변형률을 비접촉식으로 측정하는 방법으로 광학 센서와 속도계(velocimetry)를 사용하여 측정하는 방법이 있다[3]. 그러나 이와 같은 방식에서는 광원, 렌즈, 거울 등의 광학 시스템을 사용하기 때문에 움직이는 구동축과 같이 진동이 발생하면 데이터 링크의 신뢰성 문제와 온도에 따른 노이즈 현상과 같은 문제가 있다. 또한 설치 공간의 여유가 없는 경우에는 적용하기 쉽지 않다.

최근 몇 년 동안 스트레인 측정 분야는 상당한 발전을 이루었으며 IoT 센서의 통합으로 정밀한 원격

측정을 위한 새로운 기회가 생겼고 데이터 수집의 정확성과 효율성을 높이고 측정에 대한 수동 개입을 최소화하기 위해 IoT 센서를 사용한 스트레인 측정에 관한 여러 연구가 수행되었다.

최근 연구에서는 IoT 센서를 이용한 무선 저전력 스트레인 측정시스템을 설계하여 토목 인프라의 구조적 상태 모니터링에 활용했고 측정된 데이터를 인터넷을 통한 클라우드 기반 플랫폼으로 전송하여 실시간으로 데이터 분석 및 시각화를 하여 이를 통해 문제를 신속하게 감지할 수 있도록 하였다[4].

기존의 연구사례에서는 IoT 센서를 이용한 동적 부품의 변형률을 측정한 사례 보다는 건물의 구조물에 대한 변형률을 측정하여 구조물의 건전성을 평가하는 실증적 사례 연구에 대한 분석과 평가가 대부분이다.

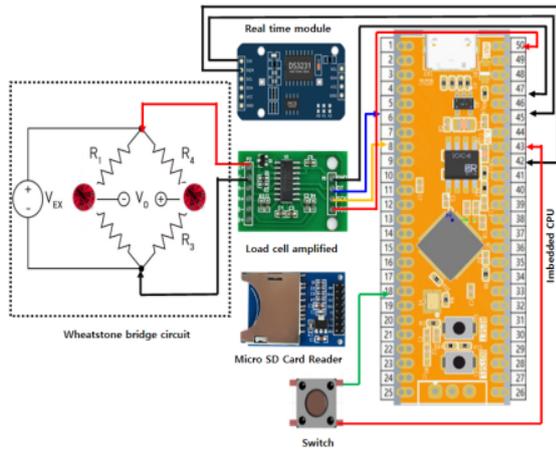
따라서 본 연구에서는 작업 부하가 인가된 기계 장비의 구동축과 같은 동적 부품의 변형률을 측정하기 위한 목적으로 IoT(또는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)) 센서와 임베디드 CPU를 이용한 측정 장치를 구성 및 제작을 하고 이를 이용하여 성능시험을 수행하였다. 개발된 장치의 성능 확인을 위하여 스트레인 게이지를 지게차의 드라이브 액슬에 부착하여 운행 중 차량의 축 토크와 축력을 측정하였고, 이를 통하여 동적 부품의 스트레인 측정이 가능함을 확인하였다.

## 2. 측정 장치의 구성

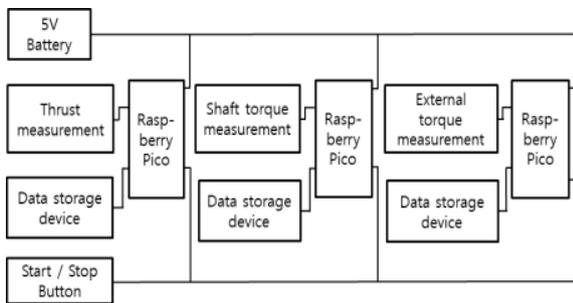
본 연구에서는 MEMS 또는 IoT 센서를 이용하여 공간적 제약이 있는 동적 부품에 스트레인 게이지를 장착하여 스트레인을 측정하고 이를 이용한 축 토크 및 축력을 분석할 수 있는 장치를 구성하고 제작하였다. 장치의 구성에 사용한 부품 리스트는 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of parts used to construct the measuring device

Components	Model	Size in mm	Weight
Embedded CPU	RP2040	50.8×22.8×7	3 g
Load cell amplifier	HX711	33.6×20.5×3.0	8 g
MicroSD memory	-	42×24×12	5 g
Real time module	DS3231	38×22×14	8 g
Battery	18650	69×18	45 g
LED	-	-	-
Strain gauge	KFG-3	10×3	-



(a) Diagram of strain measurement module



(b) Block diagram of strain measurement module

Fig. 1 A schematic diagram of module to measure strain

토크 및 축력 측정 및 신호처리를 위해서 Fig.1과 같이 각각 1개씩의 임베디드 CPU (RP2040 Dual core arm cortex-M0+, Raspberry, UK)를 사용했다.

RP2040은 저전력 기능을 통해 보드의 주변장치에 공급 전압을 제어하여 전력 소비를 최적화할 수 있도록 하는 PMU(Power Management Unit)가 포함되어 있고 저전력 아날로그 디지털 변환기(ADC)가 포함되어 동적 부품에 장착하여 데이터를 약 2시간 연속 측정할 수 있다.

스트레인 게이지는 휘스톤브릿지 회로에 연결하고 브릿지의 출력을 Load cell (HX711, Avia Semiconductor, China)의 입력에 연결하였다. Load cell 과 Real time module(DS3231, Maxim Integrated Products, United States)의 출력은 Raspberry Pi Pico 의 GPIO 아날로그 입력 핀에 연결하였다. 측정된 데이터는 MicroPython 파일시스템 API를 사용하여 마이크로 컨트롤러 보드에 내장되어있는 36GB 메모리의 micro SD 카드에 데이터가 저장되도록 하였고 여러 개의 스트레인 측정 모듈 간에 측정 시간을 일치(sync)시키기 위해서 Real time module을 사용하였다.

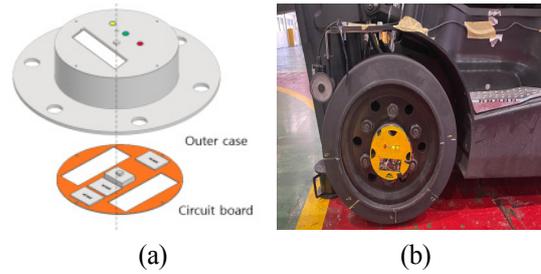
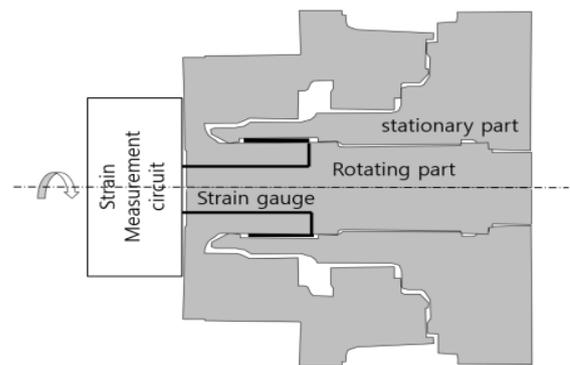


Fig. 2 (a) Schematics of case and circuit (b) an external view of installation

MEMS 및 IoT 센서로 구성된 토크 또는 축력 측정 모듈 1개의 구성 및 구성도는 Fig.1과 같고 외관 구성은 Fig.2에 나타낸 바와 같다.

Fig.1과 같은 회로를 Fig.2(a)에 나타낸 바와 같은 circuit board에 장착하고, 부하 운전 시험 시 외부 충격에 대한 강성을 높이기 위한 외부 케이스(탄소강) 내부에 설치하였다. 지게차 전륜에 장착된 측정 장치 모습의 예는 Fig.2(b)와 같다.

지게차의 드라이브 액슬에 이와 같은 장치를 장착한 예는 Fig.3에 나타낸 바와 같다. 스트레인 게이지 선은 Shaft out 부품에 홈을 가공하여 외부로 인출하였고 Shaft out 외부에 측정 장치를 부착하였다. 고정된 차축 하우징 내부에서 구동축과 스트레인 게이지 회로 전체가 같이 회전을 하면서 스트레인을 측정하도록 하였다.



(a) Section view of drive axle



(b) Strain gauge wiring picture

Fig. 3 The picture of installed strain gauge in drive axle of a forklift

회로 전체의 무게는 배터리를 제외하고 수십 그램 이고 센서의 중량에 따른 원심력(Centrifugal Force)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

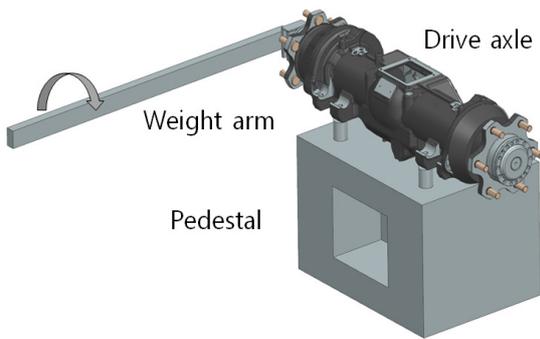
$$F_c = \frac{m_s V_{veh}^2}{R_t} \quad (2)$$

여기서  $m_s$ 는 센서 중량을 나타내고  $R_t$ 와  $V_{veh}$ 는 타이어의 반경과 지게차의 속도를 나타낸다. 따라서 센서 모듈의 중량은 100g, 타이어 반경은 0.29m, 이 경우에 최대속도는 10km/h로 가정할 경우  $F_c$ 는 약 2.7N이 되기 때문에 센서에 의하여 작용하는 원심력은 일반적인 장비의 동적 부하와 비교하여 매우 작을 것으로 예상할 수 있다.

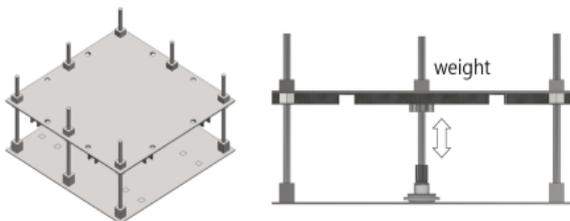
따라서 사용 목적에 따라서 소형 및 경량 배터리를 사용할 경우 회로 전체를 더욱 소형화 및 경량화하여 동적 부품 내부에 격납하는 것도 가능하게 된다. 또한, 유압유가 채워진 밀폐된 구조에 사용하는 것도 가능하게 된다.

### 3. 캘리브레이션

부품에 스트레인 게이지를 장착한 후에 정확한 토크 및 축력을 얻기 위하여 Fig.4에 나타낸 바와 같은 리그 장치를 이용하여 캘리브레이션을 수행하였다[5].



(a) Rig for torque calibration



(b) Rig for compressive force calibration

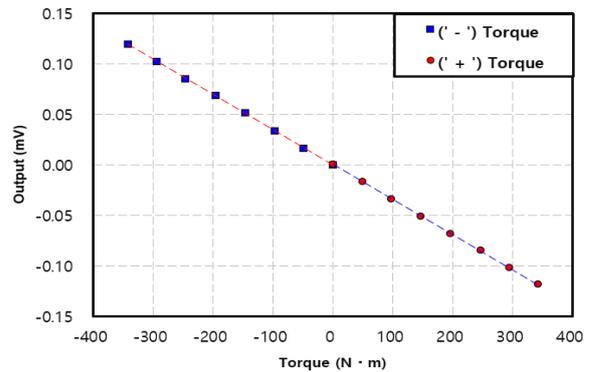
Fig. 4 Rigs for calibration of torque and compressive force

무게 추를 이용한 스트레인 게이지 캘리브레이션 원리는 알려진 무게를 로드 셀 또는 힘 센서에 적용하고 스트레인 게이지에서 출력전압을 측정하는 것이다. 출력전압은 힘 또는 변형률로 변환하여 상관관계를 나타낼 수 있다.

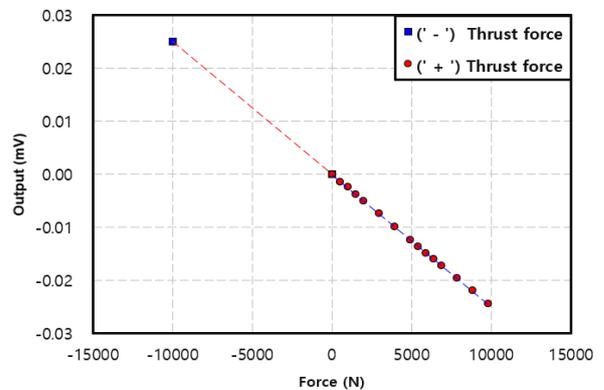
본 실험에서는 Fig.4(a)와 같이 지게차 드라이브 액슬에 축력 및 토크 측정용 스트레인게이지를 각각 2개씩 부착하고 1m 길이의 캔틸레버 암을 설치하고 무게 추를 장착하여 회전력(토크)을 인가하였다. 이때 무게 추를 50 kg씩 증가시키면서 1000 kg까지의 중량에 대한 스트레인 게이지의 출력전압과 토크를 측정하였고 결과는 Fig.5(a)와 같다.

축력 실험은 Fig.4(b)와 같이 판을 설계 및 제작하여 무게 추를 올려 압축력을 1000 kg까지 작용하여 축력과 전압을 측정하고 캘리브레이션 결과는 식 (3)과 같이 게이지의 출력전압과 저항의 관계식을 이용하였고 그 결과는 Fig.5(b)와 같이 우수한 선형성을 나타내고 있다.

$$V = V_0 \times (R/R_0) \times GF \quad (3)$$



(a) Relation between torque and voltage



(b) Relation between force and voltage

Fig. 5 Calibration results of torque and compressive force

여기서  $V$ 는 출력전압,  $V_0$ 는 입력 전압,  $R$ 은 부하시 스트레인 게이지의 저항,  $R_0$ 는 무부하시 스트레인 게이지의 저항,  $GF$ 는 스트레인 게이지 계수다.

이와 같이 얻은 결과를 요구되는 토크 및 축력 범위에 외삽(extrapolation)을 하여 스트레인 게이지를 캘리브레이션하여 사용할 수 있게 된다.

#### 4. 시험 및 결과분석

개발된 시험장치의 기능구현과 성능 검증을 위해 지게차의 진륜 액슬에 측정장치를 부착하고 운행 중 차량의 축 토크와 축력을 측정하였다. 시험용 지게차는 2.5톤급 가스엔진 지게차를 사용하였고[6] 실험은 Fig.6(b)와 같이 ‘ㄱ’자 아스팔트의 정해진 도로에서 우회전 및 좌회전 복귀하는 코스로 포크에 하중이 없는 조건과 1000 kg 부하체를 적재한 조건에서 시험을 수행하였다.

지게차의 왼쪽 및 오른쪽 구동 차축에서 부하 인가 및 작업 중 축력 및 토크를 측정한 결과, 측정값에서 Fig.7(a)와 같이 선형 드리프트(linear drift)가 나타나는 경우가 있다. 원인은 측정부의 환경 변화 때문에 측정 중에 스트레인 게이지 저항값의 미소 변화와 영점이 이동하였기 때문이다[7].

선형 드리프트를 제거하는 방법으로 식 (4)과 같은 최소자승법(Linear square method)을 사용하였고 오차의 총합이 최소가 되는 선형 드리프트 함수의 출력값을 초기 측정값에서 제거하였다[8].

$$\sum_{i=1}^n r^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (4)$$

여기서  $r$ 은 오차를 나타내고  $y_i$ 는 측정값,  $f(x_i)$ 는 측정값의 선형 드리프트 함수를 나타낸다.

스트레인 게이지 값은 측정대상 물체의 온도변화에 따른 저항 변화의 영향을 받기 때문에 측정값의 오차를 줄이기 위해서 온도보상을 하였다.

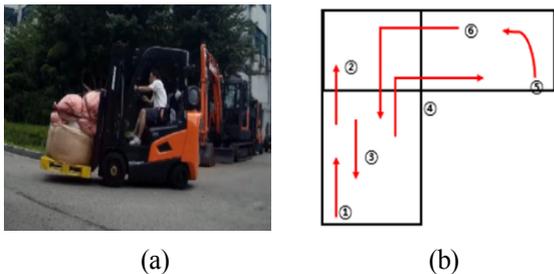
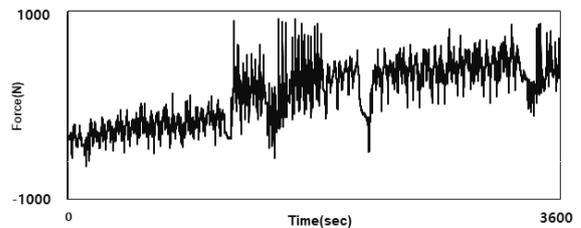


Fig. 6 (a) Test vehicle (b) Driving course

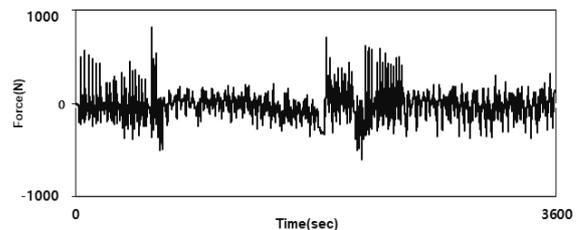
온도보상 식은 제작사에서 제공하는 식 (5)를 사용하였다. 선형 드리프트를 제거하고 온도 보상한 결과는 Fig.7(b)과 같다[9].

$$\varepsilon(T) = -7.45 + 0.86 * T - 2.48E-02 * T^2 + 4.71E-05 * T^5 + (T-20)*0.6 \quad (5)$$

시험에서 측정 주기는 10Hz로 나타났고, 신호처리 후 Fig.8과 같이 작업 부하의 변동에 따라서 축력과 토크 변화가 잘 측정이 된 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 스트레인 측정결과를 이용하여 동적 부품의 강도 해석 및 피로 해석에 활용할 수 있고 클라우드 기반 플랫폼을 통해 실시간 모니터링 및 데이터 분석을 통해서 고장을 감지하고 예측하는데 활용할 수 있다. 또한 회로의 동기 기능을 이용하여 다른 측정 신호와 측정 주기를 일치시켜서 측정 및 분석하는 것도 가능하다.

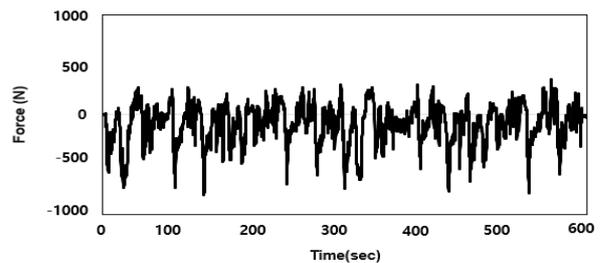


(a) Linear drift signal in strain gauge



(b) Signal after removal of linear drift and temperature compensation in the strain gauge

Fig. 7 Result of measured strain for drive axles



(a) Compressive force (left)

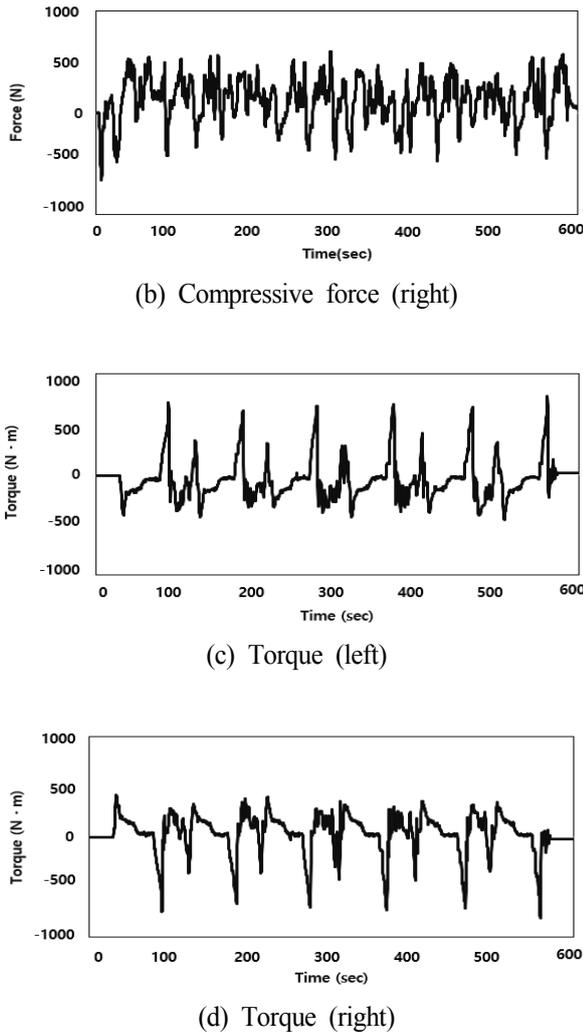


Fig. 8 Compressive force and torque results measured for left and right drive axles under real driving conditions

### 5. 결 론

본 연구는 작업 부하가 인가된 기계 장비의 구동축과 같은 동적 부품의 변형률을 측정하기 위한 목적으로 IoT 센서와 임베디드 CPU를 이용한 측정장치를 구성 및 제작을 하였고 이를 이용하여 공간적 제약 및 설치가 곤란한 동적 부품에서의 측정 가능성을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

1. 본 연구에서는 IoT 센서를 이용한 스트레인 측정 장치를 제작하고 지게차의 라이브 액슬에 부착하여 구동축과 스트레인 게이지 회로가 같이 회전을 하면서 토크와 축력을 측정하였다.

2. 정확한 토크와 축력을 얻기 위해서 스트레인 게이지 장치를 부품에 장착하여 캘리브레이션을 수행

하였고 스트레인 게이지의 출력전압과 토크 및 축력 관계를 측정한 결과 우수한 선형성을 나타냈다.

3. 지게차의 구동 차축에서 부하 인가 및 작업 중 토크 및 축력을 측정하였고 데이터를 취득 결과 선형 드리프트가 나타나고 있어 최소자승법을 사용하여 선형 드리프트를 제거하였고 측정 대상물의 온도 변화에 따른 측정결과 값의 오차를 줄이기 위해서 온도보상을 하였다. 이와 같은 스트레인 측정결과를 이용하여 동적 부품의 강도 해석 및 피로 해석에 활용할 수 있을 것으로 판단이 된다.

4. 기존의 연구사례에서는 IoT 센서를 이용한 건물의 구조물에 대한 변형량을 측정하여 구조물의 건전성을 평가하는 실증적 사례 연구에 대한 분석과 평가가 대부분이다. 본 연구의 결과로부터 IoT 센서를 이용한 스트레인 게이지 장치를 이용하여 밀폐되고 유압유로 채워진 구동 차축 내부와 같은 부품에서 스트레인을 측정하는 것이 가능하고 이로부터 부하 상태에서 축력과 토크를 측정 및 분석하는 것이 가능함을 확인하였다. 향후 연구에서는 telemetry 계측기에서 측정된 데이터와 비교하여 데이터의 신뢰성을 확인하고자 한다.

### 후 기

이 논문은 2022년도 산업통상자원부의 ‘스마트건설기계인력양성사업’의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

### References

- 1) N.H.Nowaira, F.Morris, S. Rakowsky, “Implantable Telemetry System for Strain Measurements“, A Handbook on Biotelemetry and Radio Tracking, Proceedings of an International Conference on Telemetry and Radio Tracking in Biology and Medicine, Oxford, 20 - 22 March 1979
- 2) Y.T. Chuah, P.K. Chan, L. Siek, “A wireless telemetry system for strain measurement”, 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings, May 2000

- 3) Christian Berger, "Strain Measurement of Moving Periodic Objects With Optical Sensors", IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, Vol. 51, No. 4, August 2002
- 4) Liu, Ming, "A DESIGN OF WIRELESS LOW POWER STRAIN MEASUREMENT BASED ON IOT TECHNOLOGY"(2020). Open Access Master's Theses. Paper 1876.
- 5) Y. B. Lee, S. H. Han. (2010). Development of device measuring very high torque via torque arm with attached load cells. Journal of Drive and Control, 7(1), 53-57.
- 6) J. H . Choet. al., "Development of an Unmanned Test System Based on Forklift for Mast Operation Durability", Journal of Drive and Control, Vol.19, No.4 pp70-76, 2022
- 7) RICHARD HATHAWAY, KAH WAH LONG, 1-TRANSDUCERS AND DATA ACQUISITION, Editor(s): YUNG-LI LEE, JWO PAN, RICHARD B. HATHAWAY, MARK E. BARKEY, Fatigue Testing and Analysis, Butterworth-Heinemann, 2005, Pages 1-56, ISBN 9780750677196
- 8) M. K. Seo et al., "Development of Onboard Scales to Measure the Weight of Trucks", Journal of Drive and Control, Vol.18, No.1, pp.9-16, 2021.
- 9) Lanzolla, A.M.L.; Attivissimo, F.; Percoco, G.; Ragolia, M.A.; Stano, G.; Di Nisio, A. Additive Manufacturing for Sensors: Piezoresistive Strain Gauge with Temperature Compensation. Appl. Sci. 2022, 12, 8607. <https://doi.org/10.3390/app12178607>