

<응용논문>

MEMS 가속도계를 이용한 주행 중 차량 진동 측정 IoT 모듈 개발

박태정¹⁾ · 유영훈¹⁾ · 조형진²⁾ · 송준영²⁾ · 조인제³⁾ · 이치범^{*1)}

서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과¹⁾ · 현대모비스 디지털구조해석셀²⁾ · 현대모비스 NVH응용기술셀³⁾

Development of Vehicle Vibration Measurement IoT Module Using MEMS Accelerometer

Taejung Park¹⁾ · Younghun You¹⁾ · Hyungjin Cho²⁾ · Junyeong Song²⁾ · Inje Cho³⁾ · Chibum Lee^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

²⁾Digital Science & Structural Analysis Cell, Hyundai Mobis, 17-2 Mabuk-ro 240beon-gil, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 16891, Korea

³⁾NVH Applied Technology Cell, Hyundai Mobis, 17-2 Mabuk-ro 240beon-gil, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 16891, Korea

(Received 26 January 2023 / Revised 29 March 2023 / Accepted 13 April 2023)

Abstract : With the recent commercialization of electric-hydrogen vehicles and the development of vehicle parts, noise measurement of steering systems has become more important than engines or tires, which are the main causes of noise inside vehicles. This study was developed to determine the cause of noise generation by attaching an IoT Module to the engine room to measure vibration generated by the steering system of a driving vehicle.

Key words : Vibration(진동), Accelerometer(가속도계), MEMS(미세 전기 기계 시스템), Internet of things(사물인터넷), Wi-Fi(와이파이)

1. 서론

최근 전기·수소 차량이 상용화와 기술 개발로 과거에 진동 및 소음의 주요 원인인 엔진이나 타이어 이외에 조향 장치나 현가 장치에서 발생하는 진동과 소음이 상대적으로 부각되고 있다.^{1,2)} 본 연구는 소음 발생 원인을 규명하고자 IoT(Internet of Things) 모듈을 엔진룸에 부착하여 주행 중인 차량의 조향 장치에서 발생하는 진동을 측정하기 위해 개발하였다.

차량 소음은 크게 내부 소음과 외부 소음으로 나눌 수 있다.³⁾ 이중 내부 소음은 피로감을 유발하고 운전자에게 영향을 미쳐 안전에 문제가 생길 수 있다⁴⁾고 알려져 있다. 차량 내부 소음 측정에 중요한 조향 장치 중에서도 최근에는 우수한 조향 감각과 주행 안정성으로 인해 랙으로 구동되는 전자 조향 장치인 R-EPS(Rack Type Electric Power Steering)가 최근 많은 차량에 설치되고 있다.⁵⁾ 그러나 R-EPS는 모터와 볼스크류, 벨트, 풀리 등의 감속기에 구조로 인해 소음이 발생하는 문제점이 있다.⁶⁾ R-EPS에서 발생하는 소음 중 차량 실내 소음에 큰 영향

을 미치는 주파수는 차량 종류에 따라 0 ~ 400 Hz 영역이 주를 이루며, 더 넓게 살펴보아도 1,400 Hz 이내이다.⁷⁾ 따라서 본 연구는 2 kHz의 주파수로 진동을 측정하여 1 kHz 이하의 진동을 분석할 수 있도록 설계하였다.

본 연구에서 개발된 IoT 모듈은 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 가속도계를 이용해 진동 센서를 소형화해 엔진룸에서 작동하도록 개발되었다. MEMS 가속도계는 크기가 작아 기계적 동작에 영향을 주지 않고 다른 물체에 쉽게 부착할 수 있다.⁸⁾

R-EPS에서 발생하는 2 kHz 이내의 진동을 측정함과 동시에 차량에서 발생하는 CAN(Controller Area Network) 정보를 함께 저장하여 차량의 동작에 따른 진동의 변화를 파악하여 분석에 용이하도록 한다. 또한 엔진 룸에 부착된 IoT 모듈로부터 Wi-Fi를 이용하여 무선 통신으로 차량 내에 있는 사용자에게 진동 및 CAN 데이터가 전달될 수 있도록 개발하였다.

기존에 가속도를 측정하고 무선 네트워크를 이용하여 기계의 상태를 모니터링하는 연구⁹⁾는 Piezo 방식의 가속

*Corresponding author, E-mail: chibum@seoultech.ac.kr

[†]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.

도 센서를 이용하여 실제 주행하는 차량에 부착하여 측정하기에는 DAQ의 필요와 가격 및 보정의 문제가 있다. MEMS 가속도계를 이용하여 회전 기계에서 발생하는 진동을 측정하는 다른 IoT모듈은 1개의 센서를 이용¹⁰⁻¹²⁾하여 측정하여 측정하고자 하는 부품의 진동 모드 해석이나 부품 간의 연관성을 확인하기에는 어려움이 있다. 차량의 상태를 모니터링하는 방법으로 MEMS 가속도계를 측정된 연구¹³⁾은 저주파로 측정된 값을 전송하므로 NVH 연구에 부적합하며 차량의 상태인 CAN 값은 알 수가 없다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 3개의 MEMS 가속도계를 연결하고, CAN 값을 동기화하여 측정하여 차량의 상태에 따른 부품의 상태를 측정할 수 있도록 하였다.

본 연구는 다음과 같은 구조를 갖는다. 2장에서는 IoT 모듈을 구성하는 MEMS 가속도계와 엣지 장치에 대해 설명한다. 3장에서는 모듈의 작동 모드를 분류하여 데이터 처리를 설명하고, 4장은 소프트웨어의 구성을 설명한다. 5장은 MEMS 가속도계를 검증하고, 실제 주행하는 차량에서 실험한 결과를 설명한다. 6장은 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

2. IoT 모듈 구성

본 연구의 시스템은 Fig. 1과 같이 이루어져 있다. MEMS 가속도계와 SPI(Serial Peripheral Interface)를 이용하여 진동 데이터를 측정하고, 차량에서 발생하는 CAN 정보를 획득하여 전송하는 엣지 장치와 엣지 장치를 제

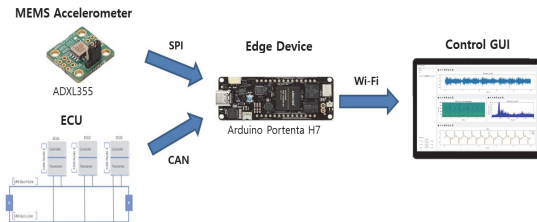


Fig. 1 Data measurement and transmission structure

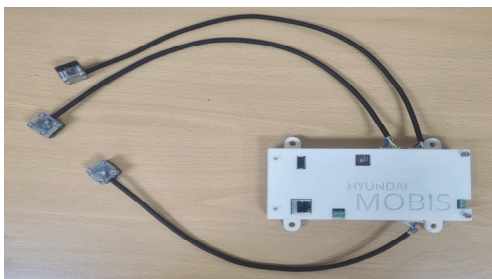


Fig. 2 IoT module

어하고, 데이터를 저장하는 Control GUI로 구성하였다.

IoT 모듈은 170 × 78 × 30 mm 크기이며 Fig. 2와 같이 차량 엔진 룸에 부착될 수 있도록 설계되었다. MEMS 가속도계 3개와 1개의 MCU(Micro Controller Unit)를 이용하여 진동 데이터와 CAN 정보를 습득한다.

2.1 MEMS 가속도계

본 연구에서 관심을 갖는 진동은 R-EPS에 의해 발생하는 진폭이 ±1 g 이내이고, 주파수가 2 kHz 이내의 진동이다. 이러한 영역의 부합하는 MEMS 가속도계로 ADXL355 (Analog Devices사, 미국)를 선정하였다.

MEMS 가속도계 ADXL355는 엔진 룸에서 진동하는 차량 구성 요소에 부착하여 사용되므로, Fig. 3과 같이 진동과 먼지로부터 회로를 보호하기 위해 마운트와 먼지 커버를 결합하여 사용한다.

MEMS 가속도계 ADXL355는 3축의 가속도를 측정하여 20 bits의 정보로 출력한다. 본 연구의 엣지 장치는 3개의 ADXL355로부터 각각 3축의 가속도를 0.5 ms의 주기마다 SPI를 통하여 수신한다. IoT 모듈은 메모리 효율성과 통신의 속도를 향상을 위하여 ADXL355에서 출력되는 20 bits 중 상위 2 Byte(16 bits)만을 이용한다.

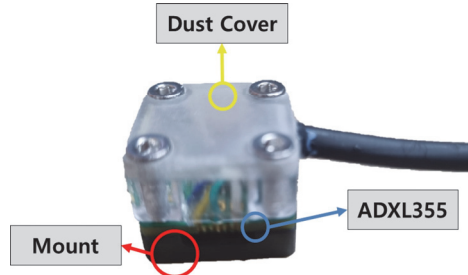


Fig. 3 MEMS accelerometer

2.2 엣지 장치

엣지 장치는 Arduino Portenta H7(Arduino 사, 이탈리아)와 확장 보드(Portenta Breakout)를 사용하여 MEMS

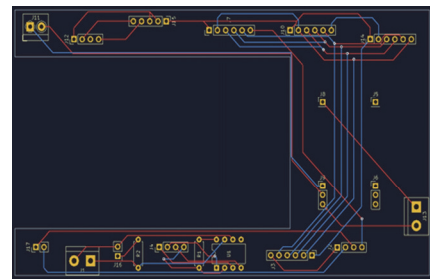


Fig. 4 Edge device PCB circuit

가속도계와 SPI 통신하며, CAN을 연결할 수 있도록 Fig. 4와 같이 PCB를 제작하였다. 12 V 차량 배터리 전원을 사용할 수 있도록 PCB에 DC-DC 컨버터 NDY1205 (Murata Power Solutions사, 일본)를 장착하였고, 일반적인 USB 배터리 전원 5 V도 직접 연결이 가능하도록 하였다. CAN 연결 시 임피던스를 조절하기 위하여 종단저항 120 Ω 선택적으로 사용할 수 있도록 구성하였다.

3. 작동 모드 구성

IoT 모듈은 차량의 엔진 룸에 엣지 장치를 부착하고, Wi-Fi를 이용하여 사용자가 차량 내에서 데이터를 수신할 수 있도록 한다. 만약 주행 중인 차량에서 Wi-Fi를 이용하여 통신을 할 때는 수신 데이터가 지나치게 많으면 소형 Control GUI에서 처리하고 저장하기에 어렵다. 반면 본 장비를 실험실에서 단품을 시험하기 위해 활용할 경우에는 엣지 장치와 Control GUI를 직접 연결하여 사용할 수도 있으므로 유선 통신으로 데이터를 전달할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 10초간 데이터를 측정해 전송하는 Wi-Fi 모드와 유선 연결을 통해 실시간으로 정보를 전송하는 시리얼 모드로 나누어 개발하였다.

3.1 Wi-Fi 모드

Wi-Fi 모드는 매 샘플마다 데이터를 전송하지 않고 진동과 CAN 데이터를 10초간 측정한 뒤 10초간 Wi-Fi를 이용하여 전송한다. 이때 계속 10초 측정 후 10초 데이터 전송을 하는 주기를 갖는 타이머 모드와 차량의 CAN 정보를 확인하면서 일정한 변화 이상이 감지되면 신호를 측정하는 이벤트 모드로 나뉜다.

3.1.1 타이머 모드

타이머 모드는 Fig. 5와 같이 가속도계의 연결을 확인하고, Client로부터의 연결을 기다린다. 사용자가 Control GUI를 통해 Client를 연결한 후 10초 동안 진동 및 CAN 측정을 수행한다. 이후 Wi-Fi를 이용하여 데이터를 Client인 Control GUI에 전송하고, 10초의 전송시간 중 남은 시간을 기다린 후 10초간 데이터 측정을 반복한다.

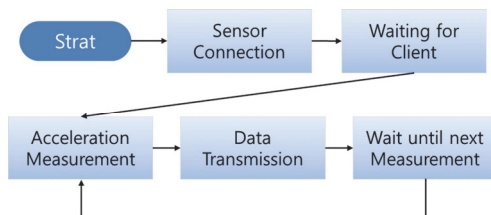


Fig. 5 Flowchart of timer mode

3.1.2 이벤트 모드

EPS는 주행 중 대부분의 시간 동안 동작하지 않고, 운전자가 조향 입력을 가했을 경우에만 작동하므로, 항상 데이터를 측정할 필요가 없을 수 있다. 조향각이나 조향토크 입력을 살펴보다가 특별한 임계치가 넘어가면 조향 입력이 가해진 것으로 판단하여 측정을 시작하는 것이 이벤트 모드이다. Fig. 6의 이벤트 모드도 가속도계의 연결을 확인하고, Client로부터의 연결을 기다린다. 사용자가 Control GUI에서 기준이 되는 CAN 신호를 선택하여 전송하면, 지정한 CAN 신호가 특정한 임계치 이상 변동할 때를 기다려 측정을 시작하고, 10초 측정 후 Wi-Fi를 이용해 데이터를 전송한다. 이후 지정한 CAN 신호의 변화가 다시 발생할 때까지 대기한다.

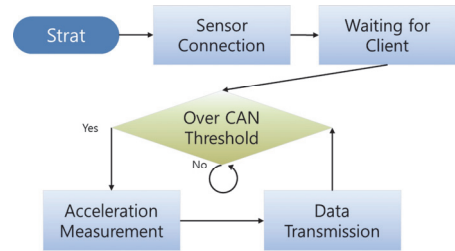


Fig. 6 Flowchart of event mode

3.2 시리얼 모드

실험실에서 유선으로 엣지 장비를 사용할 경우 성능이 우수한 PC를 사용할 수 있으므로, 수신하는 데이터를 처리하거나 저장하는 데 상대적으로 여유가 있다. 시리얼 모드는 0.5 ms 주기마다 3개의 가속도계로부터 가속도를 전달받아서, 바로 시리얼 통신으로 PC로 전달한다. 9개 가속도 신호를 수신하고 처리하는 데 Fig. 7과 같이 약 0.12 ms가 소요되고, 시리얼 통신을 추가하더라도 샘플 시간인 0.5 ms 내에 동작함을 확인할 수 있다.

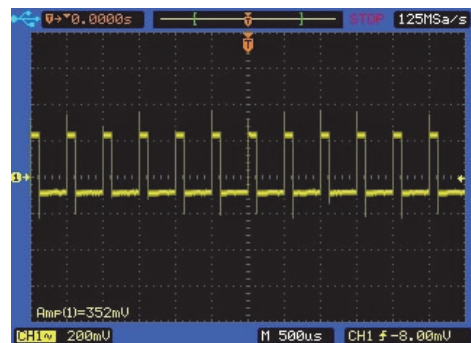


Fig. 7 Timing chart of accelerometer communication

4. 소프트웨어 구조 및 알고리즘

IoT 모듈은 엣지 장치와 Control GUI로 구성된다. IoT 모듈의 엣지 장치는 STM32H747(STMMicroelectronics 사, 스위스) 기반의 MCU인 Arduino Portenta H7을 사용하여 구현하였다. Control GUI는 Windows 기반으로 개발하였다. 엣지 장치를 작동하려면 Control GUI에서 사용자가 측정하고자 하는 CAN 정보를 설정하고, Wi-Fi 연결과 CAN 정보를 전송하며 측정을 시작한다.

4.1 엣지 장치의 구조

Edge Device로 사용한 Arduino Portent H7은 Fig. 8과 같이 M7과 M4로 이루어진 Dual Core이다. Core M7에서는 MEMS 가속도계로부터 샘플 시간인 0.5 ms 마다 가속도를 측정하고, Core M4에서는 측정하기로 지정한 CAN 신호를 수신하도록 설계하였다. Wi-Fi 모드의 경우 Core M7과 M4를 모두 이용하여 M7에서는 10초 동안 측정된 진동 데이터를 Transmission Thread를 이용하여 Wi-Fi 전송하고, M4에서 측정된 CAN 정보를 전송받아 Transmission Thread로 데이터를 전송한다. 시리얼 모드의 경우 M7의 SPI Thread와 Transmission Thread를 사용하여 실시간으로 측정된 데이터를 전송하도록 구현하였다.

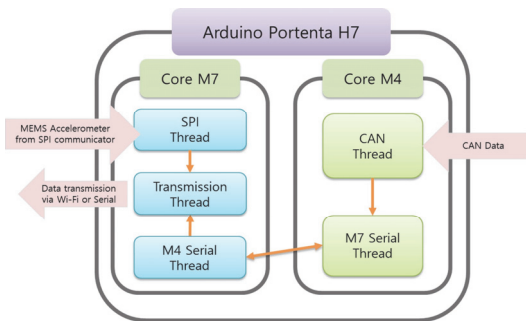


Fig. 8 Thread structure of edge device

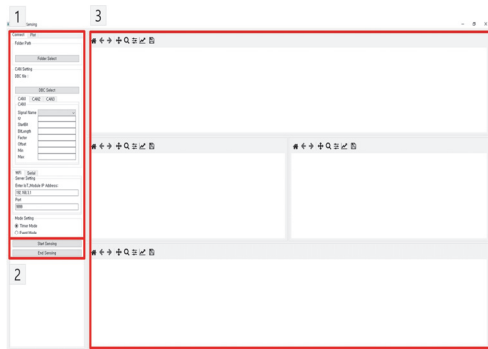


Fig. 9 Graphical user interface

4.2 Control GUI 구성

Control GUI는 측정된 데이터를 저장할 경로를 먼저 설정하고, 측정하고자 하는 CAN 정보 설정하고 측정 모드를 설정한다(Fig. 9의 1). 이후 연결하고자 하는 엣지의 IP 주소와 TCP/IP Port를 설정하고 Client로 연결을 통해 측정을 시작한다(Fig. 9의 2). 엣지 장치로부터 데이터를 전송받은 뒤에는 자동으로 Plot을 띄워 주며 TimeSeries, Spectrogram, FFT, CAN의 정보가 표현된다(Fig. 9의 3).

5. 실험 및 검증

저전력 및 소형화를 위하여 MEMS 가속도계를 이용하여 IoT 모듈을 개발하였으며, 요구하는 진동 주파수와 진폭에 대해 기존의 가속도계와 비교하여 성능을 검증하였다. 또한 실제 주행하는 차량의 엔진 룸 내에 부착하여 실험을 통해 무선 통신 성능을 확인하였다.

5.1 MEMS 가속도계 검증

MEMS 가속도계 검증은 실험실 내에서 Shaker를 이용하여 0 ~ 1,000 Hz의 영역에서 FFT를 비교하여 차이를 비교하였다. 차량 실내 소음의 중요한 부품인 R-EPS에서의 진동을 비교하며 Spectrogram과 FFT로 성능을 검증하였다.

5.1.1 Shaker 이용 Piezo 가속도계와 비교 검증

Shaker를 이용해 1 kHz 이내의 주파수에서 진동을 측정하여 비교하였다. Shaker와 Amplifier는 Type 4808과 Type 2719(Bruel & Kjaer사, 덴마크)를 이용하였다. Piezo 가속도계 356A15(PCB Piezotronics 사, 미국)와 IoT 모듈에 사용한 MEMS 가속도계 ADXL355를 Fig. 10과 같이 Shaker에 함께 부착하여 비교하였다. Fig. 11의 결과는 주파수 20 Hz, 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz로 Shaker가 동작할 때 측정된 시계열 그래프와 FFT 그래프 이미지로 좌측이 MEMS 가속도계, 우측이 Piezo 가속도계를 보여준다.

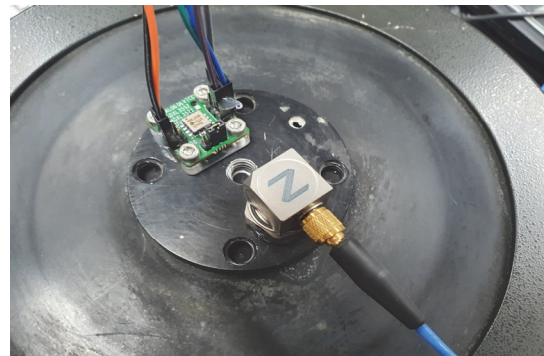
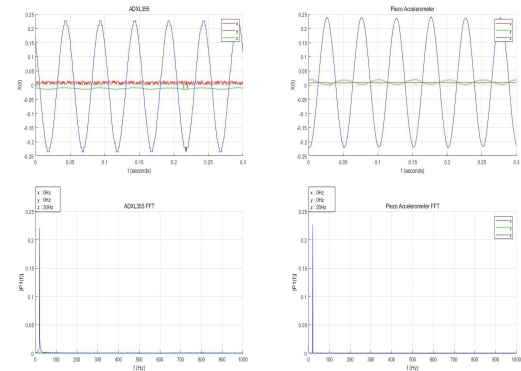
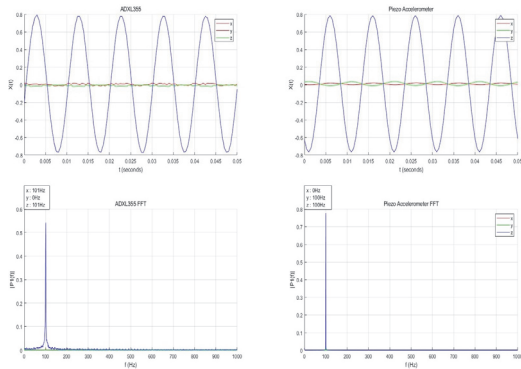


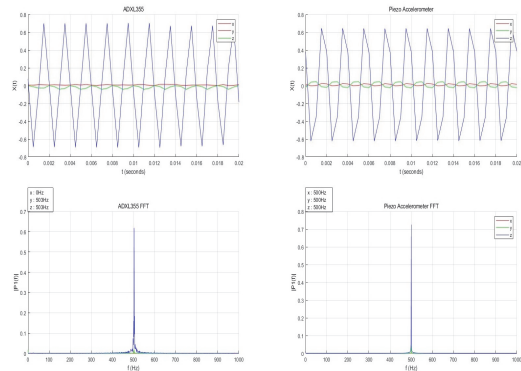
Fig. 10 Attachment of accelerometers on shaker



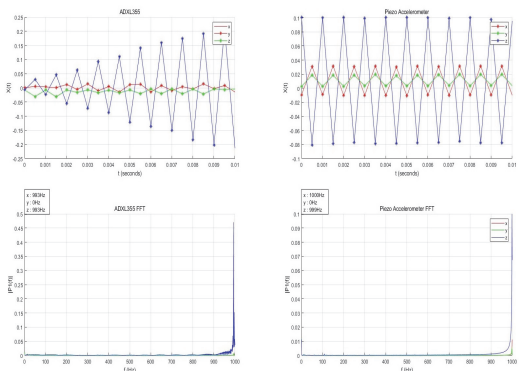
(a) 20 Hz



(b) 100 Hz



(c) 500 Hz



(d) 1000 Hz

Fig. 11 Results of comparison verification using shaker

Table 1 Result of FFT comparison of accelerometer

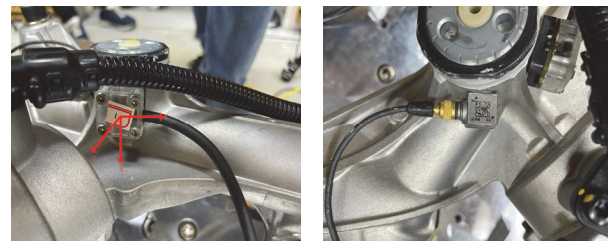
Frequency	ADXL355	356A15	Error
20 Hz	20 Hz	20 Hz	0.00 %
100 Hz	101 Hz	100 Hz	1.00 %
500 Hz	503 Hz	500 Hz	0.60 %
1000 Hz	993 Hz	999 Hz	0.60 %

Table 1과 같이 FFT의 결과가 1 % 내의 오차를 발생하여 2 kHz 내의 진동에서 대해서는 Piezo 가속도계를 대체하여 사용할 수 있음을 확인하였다.

5.1.2 R-EPS 구동 시 Piezo 가속도계와 비교 검증

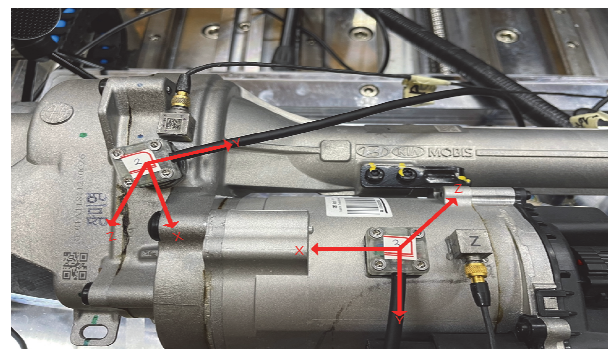
R-EPS를 실험실 내에서 구동하며 MEMS 가속도계 ADXL355와 Piezo 가속도계 4535-B(Bruel & Kjaer사, 덴마크)를 Fig. 12와 같이 유사한 위치에 각각 부착하여 비교 검증하였다. R-EPS를 1.0 RPS(Rotation Per Second)로 10회 구동 후 1.5 RPS로 10회로 전·후반으로 나누어 구동하며 진동을 측정하였다.

Fig. 15는 MEMS 가속도계와 Piezo 가속도계를 10초간 측정된 진동 데이터를 전·후반을 나누어 FFT와 Spectrogram으로 나타낸 결과이다. 상단이 Piezo 가속도계이고, 하단이 MEMS 가속도계를 나타낸 그래프이다. Table 2와 같이 두 가속도계가 부착된 축 방향의 차이로 FFT에서 표현된 축이 표현되었다. Spectrogram은 각 가



(a) MEMS accelerometer 1

(b) Piezo accelerometer 1



(c) MEMS and piezo accelerometer 2,3

Fig. 12 R-EPS accelerometer attachment

Table 2 Direction of accelerometers

	ADXL355	Type 4535-B	
Orientation at location 1	x - axis	z - axis	Axial*
	y - axis	x - axis	Tangential
	z - axis	y - axis	Radial
Orientation at location 2	x - axis	x - axis	Tangential*
	y - axis	y - axis	Axial
	z - axis	z - axis	Radial
Orientation at location 3	x - axis	z - axis	Axial
	y - axis	x - axis	Tangential
	z - axis	y - axis	Radial*

(* Principal axis)

속도계의 주축을 기준으로 나타내었다. 1번 위치의 경우 부착 위치가 달라서 다소 차이가 있었으나, 대부분 두 FFT와 Spectrogram이 유사하였다.

5.2 차량 주행 중 측정 실험

본 IoT 모듈은 실제 주행하는 차량에 장착하여 진동을



Fig. 13 Installation of IoT edge in engine room
(<https://youtu.be/Qlj7xWE5ZSc>)

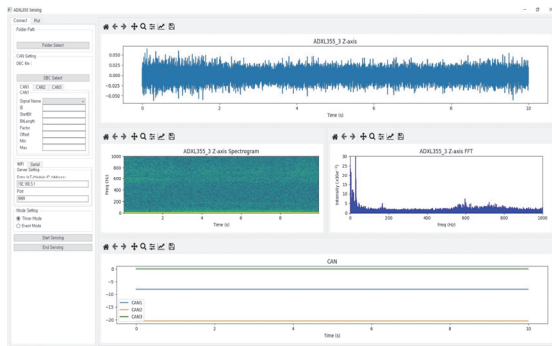


Fig. 14 Data acquisition with GUI
(<https://youtu.be/CtnpLvIFkT8>)

측정하는 것을 목적으로 개발하였다. 일반적으로 주행 중 차량의 엔진룸에 기존의 Piezo 가속도계를 부착하기가 어려워서 해당 시험 시 많은 노고가 필요하다. 차량의 엔진 룸에 본 연구에서 개발한 IoT 모듈 설치하고 차량 내부에서 Control GUI를 이용하여 데이터를 전송받는 통신 실험을 진행하였다. Fig. 13과 같이 엔진 룸 내에 IoT 모듈을 부착하였고, 차량의 배터리에 연결하여 12 V의 전원을 인가하였다. 차량 주행을 하며 MEMS 가속도계로 측정한 진동 데이터를 엷지에서 Wi-Fi를 통해 Fig. 14와 같이 GUI로 안정적으로 전달하는 것을 확인하였다.

6. 결론 및 고찰

본 연구는 차량의 실내 소음 측정의 주요 부품인 조향 장치 중 R-EPS의 이음 발생 원인을 파악하기 위한 주행 중인 차량에서의 진동 측정 방법을 제안하였다. 주행하는 차량의 엔진 룸 내에 IoT 모듈을 부착하기 위해 저전력 및 소형화를 진행하였고, 그 과정에서 MEMS 가속도계를 사용하였다. 또한, 엔진 룸으로부터 데이터를 송·수신하기 위해 Wi-Fi를 이용하여 무선 통신을 구축하고, 유선 연결 시에는 시리얼 통신으로 샘플 시간인 0.5 ms 내 실시간 측정하는 방법을 제시하였다. 사용자가 차량 내부에서 IoT 모듈을 쉽게 제어하고 관리하도록 Control GUI를 제작하여 연결 및 결과를 확인할 수 있게 개발하였다. MEMS 가속도계를 Piezo 가속도계와 비교 검증을 통해 2 kHz 내의 주파수 내에서 대체하여 사용할 수 있음을 확인하였다.

본 연구를 진행하며 MEMS 가속도계와 CAN 정보를 함께 측정하기 위하여 Arduino Portenta H7을 MCU로 사용하였다. Dual core를 이용하여 여러 데이터를 처리할 수 있지만 차량의 엔진 룸에서 Wi-Fi를 이용한 무선 통신 시 실시간으로 처리할 수 없는 한계점을 발견하였다. 이는 SBC(Single Board Computer)를 사용하여 진동 측정과 무선 통신을 할 수 있을 것으로 예상된다. MEMS 가속도계를 이용한 진동 측정은 본 연구의 차량 실내 소음의 주요 부품인 R-EPS가 아닌 다른 부품에서도 다양한 조건에 맞는 MEMS 가속도계를 선정하여 진동을 측정할 수 있을 것으로 기대한다. 차량에서 측정된 진동 데이터를 활용하여 차량 부품의 수명을 예측하거나 이상을 진단하는 등의 여러 방법으로 사용할 수 있을 것으로 전망한다.

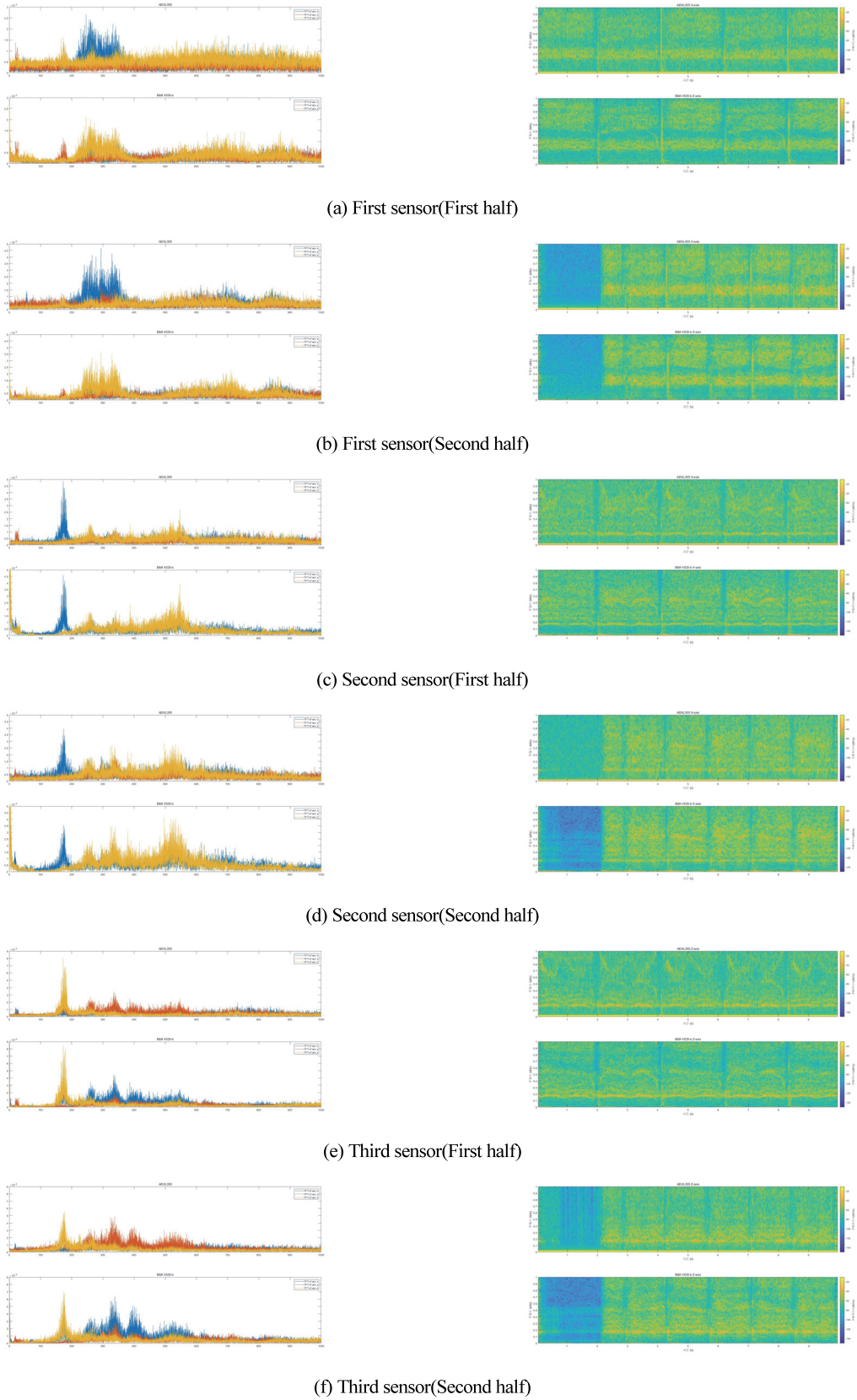


Fig. 15 Result of r-eps verification experiment

후 기

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0008473, 2023년 산업혁신인재성장지원사업).

References

- 1) H. Ham and J. Park, "Research on the Identification and Evaluation of Vehicle BSR Noise Generation Mechanism," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.29, No.2, pp.18-21, 2019.
- 2) S. Lee, Y. S. Kwak, J. Lee and J. Park, "Sound Quality Evaluation and Classification of BSR Noise," The Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Conference Proceedings, pp.691-692, 2013.
- 3) D. Hwang, H. Sim, J. Lee, J. Oh and D. Yoo, "Sound Quality Evaluation for the Vehicle HVAC System after Active Noise Control," The Korean Society of Mechanical Engineers Fall Conference Proceedings, pp.1273-1277, 2005.
- 4) G. Eisele, K. Wolff, N. Alt and M. Huser, "Application of Vehicle Interior Noise Simulation (VINS) for NVH analysis of a Passenger Car," SAE 2005-01-2514, 2005.
- 5) T. Lee, C. Kim and H. Choi, "Experimental Research on the Static Steering Performance test of R-EPS for 48V System," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.309-312, 2017.
- 6) J. Park, K. Kim and W. Won, "Study on Rack Driven Electric Power Steering System Noise," Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference Proceedings, pp.38-39, 2018.
- 7) E. Ko, K. Jeong, Y. Jo, E. Koh, S. Ahn, G. Nam, S. Kim, K. Park and S. Kim, "Noise Level Prediction from R-EPS Automobile Steering Shaft Sensors Based on Multi-encoder Convolutional Neural Networks," Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol.48, No.4, pp.409-419, 2022.
- 8) I. Koene, V. Klar and R. Viitala, "IoT Connected Device for Vibration Analysis and Measurement," HardwareX, Vol.7, e00109, 2022.
- 9) S. Lu, P. Zhou, X. Wang, Y. Liu, F. Liu and J. Zhao, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Motor Bearings using Undersampled Vibration Signals from a Wireless Sensor Network," Journal of Sound and Vibration, Vol.414, pp.81-96, 2018.
- 10) I. Koene, R. Viitala and P. Kuosmanen, "Internet of Things Based Monitoring of Large Rotor Vibration with a Microelectromechanical Systems Accelerometer," IEEE Access, Vol.7, pp.92210-92219, 2019.
- 11) A. Albarbar, S. Mekid, A. Starr and R. Pietruszkiewicz, "Suitability of MEMS Accelerometers for Condition Monitoring: An Experimental Study," Sensors, Vol.8, No.2, pp.784-799, 2008 .
- 12) S. Jiménez, M. O. T. Cole and P. S. Keogh, "Vibration Sensing in Smart Machine Rotors Using Internal MEMS Accelerometers," Journal of Sound and Vibration, Vol.377, pp.58-75, 2016.
- 13) T. Lei, A. A. Mohamed and C. Claudel, "An IMU-based Traffic and Road Condition Monitoring System," HardwareX, Vol.4, e00045, 2018.