

Motor-Driven Power Steering 시스템의 진동 소음 스펙트럼 분석

박한영 · 김진영 · 강준희⁺

Analysis of Vibration Noise Spectrum in Motor-Driven Power Steering System

Han Young Park, Jin Young Kim, and Joonhee Kang⁺

Abstract

Unlike the hydraulic power steering (HPS) system, which operates by the high pressure of a fluid obtained from the engine power, the motor-driven power steering (MDPS) system uses an electric motor to steer the wheel without consuming engine power. To steer the wheel with an electric motor, a worm wheel and a worm gear rotating between the steering shaft and motor are required. Any imperfection during the construction of an MDPS system or in a composing part creates noise and vibration, which can be sensed by a driver. To solve the noise and vibration problems, each part must be designed to not resonate with other parts. In this work, we developed the measurement and analysis systems to obtain the noise and the vibration of an automobile MDPS system. A signal analyzer was equipped with a 96 kHz, 24-bit ADC and a 150 MHz digital signal processor. The predetermined threshold value of the vibration in the MDPS system was used to determine the pass/fail, and the results were displayed on the screen. Our system can be used in the fabrication line to swiftly determine any imperfections in the MDPS system construction.

Keywords: sensor, noise, vibration, MDPS

1. 서 론

자동차의 스티어링 휠을 쉽게 구동하기 위해서 많은 자동차에는 엔진출력을 사용하여 유압식으로 작동하는 Hydraulic Power Steering (HPS) 시스템을 사용하고 있다. 연비 경쟁이 최고조에 다다르고 있는 최근에는 기존 HPS 시스템과는 달리 Motor Driven Power Steering (MDPS) 시스템을 탑재하는 것으로 변화하고 있는 추세이다. MDPS 시스템은 전기모터를 사용하기 때문에, 유압 펌프를 구동하기 위하여 엔진의 출력을 소비하지 않으면서 조향을 보조함으로써 연비를 향상시키고 운전자의 편리성을 증가시키는 필수적인 부품이 되었다. MDPS 시스템은 스티어링 샤프트와 모터 사이에 워م 휠, 워م 기어 등의 부품으로 구성되어 있으며 모터에 의해 주요 부품들이 함께 회전함으로써 조향을 보조하는 장치이다[1-4].

완성된 MDPS 시스템 중에서 조립 불량 또는 부품 불량이 있

는 경우에는 구동 시 소음과 진동을 발생시키고 스티어링 휠을 통해 소음과 진동이 운전자에게 직접 전달된다. 이러한 소음 진동은 자동차의 품질 경쟁력 저하로 직결되므로 제조사는 불량을 줄이기 위한 모든 노력을 기울이고 있다. 또한 조립 후 구동을 시켜 소음 진동이 발생하는지 여부를 판정하는 불량 판정 시스템이 필수적으로 요구되고 있다. MDPS 시스템의 소음, 진동 측정은 작업자가 직접 느껴서 판단하거나 가속도센서를 이용하여 측정한다. 작업자가 판단하는 방식은 작업자의 상태에 따라 기준이 다르고, 생산라인에서 검사를 위하여 무향실로 이동해야 하기 때문에 생산성이 떨어지는 단점이 있으며, 이를 개선하기 위해 가속도 센서를 사용하여 생산라인에서 측정하는 방식이 더 유효하다고 할 수 있다[5,6].

본 연구에서는 두 개의 가속도 센서를 사용하여 장비의 진동과 MDPS 시스템의 진동을 동시에 수집하고, 외부 소음 및 진동을 제거하여 순수한 MDPS 시스템의 진동만으로 MDPS 시스템의 상태를 판단하고자 하였다.

인천대학교 물리학과 (Dept. of physics, Incheon National University)
(Songdo-dong)119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea.

⁺Corresponding author: jhkang@inu.ac.kr

(Received: Mar. 14, 2018, Revised: Mar. 21, 2018, Accepted: Mar. 23, 2018)

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.

2. 연구 방법

2.1 하드웨어 개발

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 진동 소음 시그널 분석기의 하

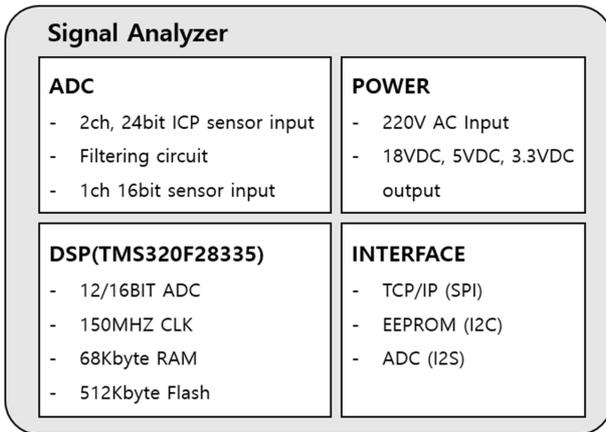


Fig. 1. Hardware block diagram of the vibration noise signal analyzer.

드웨어 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 시그널 분석기는 검사 대상과 외부에서 유입되는 소음 및 진동 데이터를 수집하는 장치로 총 3개의 입력 채널을 가지고 있다. 이 중 2개의 채널은 가속도 센서의 입력이 가능한 24bit ADC (Analog to Digital Converter) 회로가 내장되어 있다. 가속도 센서는 산업현장에서 많이 사용하는 ICP타입의 센서를 사용할 수 있도록 구성하였다. 나머지 1개의 채널은 전류 센서 등 다양한 센서를 사용할 수 있도록 16bit ADC 회로를 탑재하였다. 모든 ADC 회로에는 입력된 신호의 안정화를 위한 필터 회로를 탑재하였다. 본 연구에서는 디지털 시그널 프로세서 (DSP TMS320F2833)를 사용하여 3CH 센서의 입력을 실시간 처리하도록 하였다. 센서 신호의 안정적인 수집을 위해 4 MByte의 32 bit 외부 메모리를 사용하여 센서 신호를 처리 할 수 있도록 하였다. DSP 동작 클럭은 150 MHz로 최대 샘플링 96 kHz의 신호를 처리하기에 충분하였다. 또한 EEPROM을 추가적으로 구성하여 하드웨어의 주요 설정값이 저장되도록 하였으며, 전원이 제거되어도 지워지지 않도록 하였다[7].

외부 전원은 220VAC를 사용하도록 하였다. 주요 회로와 칩셋에 맞는 전원을 공급하기 위해 외부전원을 변환하는 AC-DC convertor, DC-DC convertor를 구성하였다. 세부적으로는 ICP센서를 구동하기 위한 18 VDC, DSP 및 메모리, ADC 등의 IC 전원용 5 VDC, 디지털 I/O 에 사용되는 3.3 VDC 로 구성하였다. 또한 아날로그와 디지털 ground를 분리하여 센서 신호에 높은 클럭의 디지털 회로 노이즈를 최소화 하도록 설계하였다. PC와의 통신 인터페이스는 TCP/IP 를 사용하였으며, 내부적으로 TCP/IP모듈과는 SPI, EEPROM은 I2C, ADC는 I2S 의 통신 방식이 필요하여 이에 대한 각각의 회로를 설계 하여 구성하였다.

Fig. 2는 제작된 진동 소음 시그널 분석기의 내부 모습을 나타내고 있다.

가속도 센서는 ICP 타입인 PCB사1축 가속도 센서 (모델명: 352C34, 감도 100 mV/g)를 사용하였다.

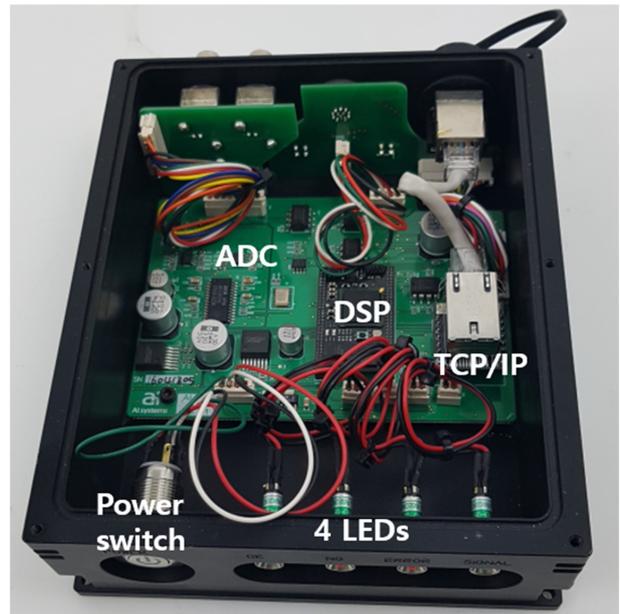


Fig. 2. PCB layout and the inside look of the vibration noise signal analyzer

2.2 펌웨어 개발

펌웨어에는 DSP와 ADC, 메모리, PC 와의 통신 프로토콜, 송수신 알고리즘, 센서로부터 받은 신호의 디지털 신호처리 알고리즘, 그리고 외부 디스플레이와 외부 릴레이 점점 입출력 프로그램이 내장되어 있다. 생산라인의 장비로부터 트리거 입력신호를 받은 DSP는 우선 시스템을 초기화하고 기존의 설정 값을 로드 하도록 하였다. TCP/IP 모듈과 SPI 통신을 위하여 SPI 핀 설정, SPI의 통신 클럭 및 데이터 크기 등의 설정, 내부 BUS를 사용하는 플래시 메모리의 동작 설정을 하고, ADC의 디지털 I/O 에 설정 값을 출력하여 샘플링 rate 및 ADC 모드를 설정하도록 하였다. ADC 데이터의 빠른 전송을 위하여 디지털 메모리 액세스 (DMA) 의 설정까지 완료된 후에 대기 모드로 진입하도록 하였다. 대기 상태에서는 외부 트리거 또는 PC 소프트웨어의 명령이 입력 될 때까지 계속 외부 트리거와 TCP/IP 통신 상태를 확인하도록 하였다.

외부 트리거가 입력되거나 소프트웨어에서 측정 시작 명령이 있을 경우에는 신호 분석기는 센서의 신호를 수집하고 분석을 수행하도록 하였다. 최종 판정 값을 PC의 화면에 디스플레이하고 점점 신호로 출력하여 생산라인의 다른 장비에게 판정결과를 알려줄 수 있도록 구성하였다.

2.3 소프트웨어 개발

본 연구에서 개발한 MDPS분석 소프트웨어는 신호 분석기로부터 진동 신호를 전달 받아 분석하고 정상 MDPS 진동 레벨

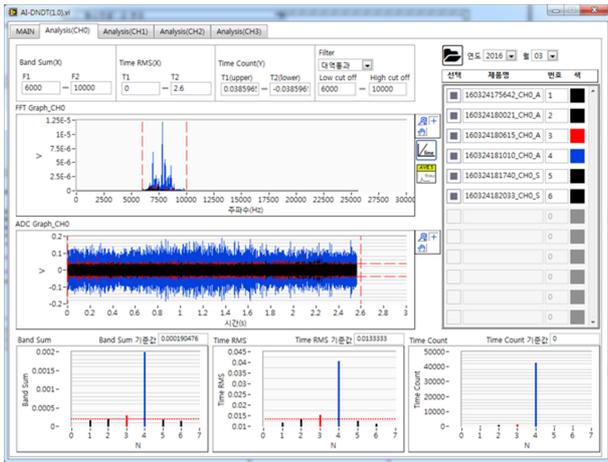


Fig. 3. Main front panel displaying the frequency spectrum, real time signal, band sum, time RMS, and time count.

의 기준을 정하여 합격 불량을 판별하는 기능을 하도록 하였다. 수집된 데이터는 연산처리 과정(Band Sum, Time RMS, Time Count, 최대값, 최소값, 평균)을 거쳐 그래프로 출력 되도록 하였다. 측정된 값은 미리 설정되어 있는 기준 값과 비교 연산을 통해 합격/불량을 판별 하게 된다. 보다 편리하게 측정값을 구별하기 위해서 소프트웨어 필터링 기법을 적용 하였다. 소프트웨어 필터링은 저역통과, 고역통과, 대역통과, 대역정지 필터를 탑재하였다.

본 연구에서는 GUI(Graphic User Interface) 기반의 프로그래밍 tool인 Labview를 사용하여 개발 하였다. 분석 소프트웨어에서는 병렬 루프 구조로 프로그램을 개발하였으며, 병렬 구조는 각각의 루프를 병렬로 프로그래밍 하기 때문에 각각의 CPU 코어에 독립적으로 프로그램이 실행되는 효과를 줄 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서 개발한 소프트웨어의 모습은 Fig. 3에 나타내었다. 측정신호의 시간과형 및 FFT 변환을 통한 주파수 분석이 가능하도록 구현하였으며, 각종 필터링 기능 및 불량 판정을 위한 연산기능 (Band Sum, Time RMS, Time Count)을 탑재하였다. Band Sum기능은 FFT 스펙트럼에서 미리 설정한 주파수 사이의 면적을 계산하여 이상을 판정하는 기능이다. Time RMS는 진동데이터를 기반으로 미리 설정한 시간 영역 사이에서 진폭의 RMS 값을 계산하는 기능이다. 마지막으로 Time Count는 진동 데이터의 전체 시간 영역에서 설정해준 진폭 레벨 값 이상 또는 이하로 존재하는 데이터 갯수를 카운트하여 판정하는 기능이다[8].

3. 시험 결과

3.1 소음 진동 시험 설정

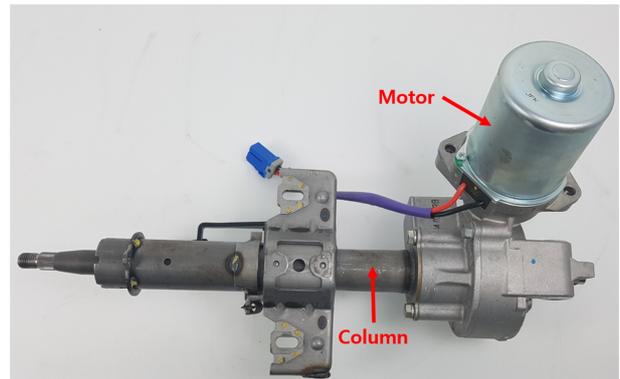


Fig. 4. Picture of the MDPS showing the motor and the column.

Table 1. Combination of the test samples.

column motor	A-OK1	A-OK2	A-NG1	A-NG2	S-OK1
OK1	1	2	3	4	5
OK2	6	7	8	9	10
OK3	11	12	13	14	15
OK4	16	17	18	19	20
OK5	21	22	23	24	25
OK6	26	27	28	29	30
NG1	31	32	33	34	35
NG2	36	37	38	39	40

Fig. 4는 MDPS의 실제 모습을 나타내고 있다. 소음 진동을 검사하기 위해서는 최적의 센서 부착 위치를 선정하여야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 센서 부착에 적합한 지점을 column 부위와 motor 부위로 선정하였다. 위의 두 지점을 선정한 이유는 MDPS의 소음 진동 정보를 잘 측정할 수 있어야 할 뿐만 아니라 가속도 센서를 부착하기 용이한 지점 이어야 하기 때문이다. 센서의 부착 위치는 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에서는 1축 가속도 센서를 사용하였기 때문에 가속도 센서의 부착 위치가 중요하며 가장 민감도가 높은 X 방향으로 위치하였다. X 방향은 Fig. 5에서 보여 지는 바와 같이 회전축과 수직이면서 중력과 수직인 방향이다. 실제 진동의 측정은 Y방향 또는 X방향에 주로 장착하게 되는데 일반적으로 중력 방향인 Y방향보다 중력과 수직인 방향인 X방향의 측정결과가 1.5배 정도 크게 나오기 때문에 X방향으로 가속도 센서를 부착하였다.

이러한 소음 진동 시험을 위해서 본 연구에서는 총 8개의 motor 샘플과 5개의 컬럼 샘플을 가지고 테스트를 진행하였다. motor는 양품(OK) 6개와 불량(NG)이 2개였으며, column은 OK 3개, NG 2개로 구성되어있다.

column의 경우에는 A모델과 S모델 두 종류로 구성하였다. 두 모델간의 차이는 A모델은 재질이 알루미늄이며 S 모델은 스틸이라는 차이가 있다. 실제 테스트는 8개의 motor 샘플, 5개의 column 샘플을 각각 조합하여 총 40개의 샘플 조합을 만들었

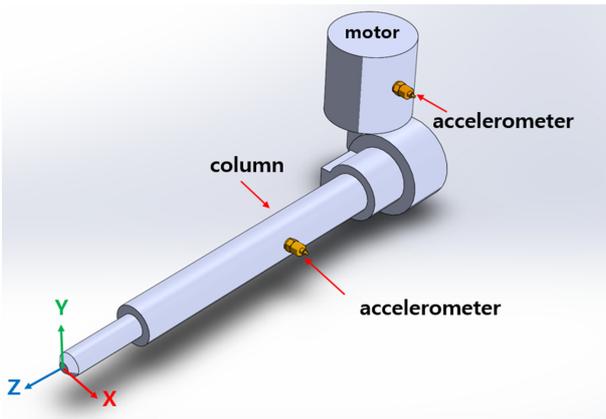


Fig. 5. Picture showing the position of the accelerometer attached to the motor and the column. The sensor direction was toward X-axis which is perpendicular to the gravitation and the rotation axis.

다. Table 1은 샘플 조합을 나타내었다. 이러한 조합을 통해 양 품끼리 조합에서는 당연히 소음 진동이 기준치 보다 적게 발생 하겠지만 motor NG- column OK 제품의 조합이거나 반대로 motor OK – column NG 조합에서 어떤 결과일지 확인하고자 하였다.

3.2 motor 부착 테스트

가속도 센서를 motor 부위에 부착하고 테스트를 진행하였다. MDPS의 컬럼 내부에는 조향시 회전 토크를 충분히 발생시키기 위한 기어부가 장착되어 있으며, 이러한 기어(컬럼)와 모터가 조합되어야 제품으로 기능을 하게 된다. 그러나 실제 생산 현장에서의 문제는 이러한 불량여부를 확인하기 위해서는 제품을 모두 조립하고 MDPS를 구동시켜서 확인해야만 하는 문제가 있다. 모터와 컬럼을 구성하는 부품들 자체의 불량이나 조립시 발생할 수 있는 불량 등의 원인은 vibration 신호의 크기나 주파수 분포에 변화를 초래한다. 본 연구에서는 총 5개의 column 샘플을 테스트 하였으며, 그 측정 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6은 측정된 가속도 값을 시간과형으로 나타낸 것이다. 모터는 양품 모터를 사용하였으며, 컬럼은 양품 3개(A-OK1, A-OK2, S-OK1), 불량 2개 (A-NG1, A-NG2)를 사용하였다. MDPS 구동 후 3.5초 동안 측정하였다.

양품과 불량에서 가속도 진폭의 크기의 차이가 발생함을 알 수 있다. 양품의 경우에는 3 m/s^2 이하 이며, 불량의 경우에는 3 m/s^2 이상의 값이 측정되었다. 보다 더 정확한 분석을 위해 주파수 분석을 수행하였으며, 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이 이 경우에는 주파수 피크가 2,000 Hz ~ 3,000 Hz 사이에 주로 발생하고 6,500 Hz 에서 7,500 Hz 사이에 발생하였다. 2,000 Hz 에서 3,000 Hz 사이의 구간에서는 양품과 불량 제품의 주파수 피크를 구분하기 어려움을

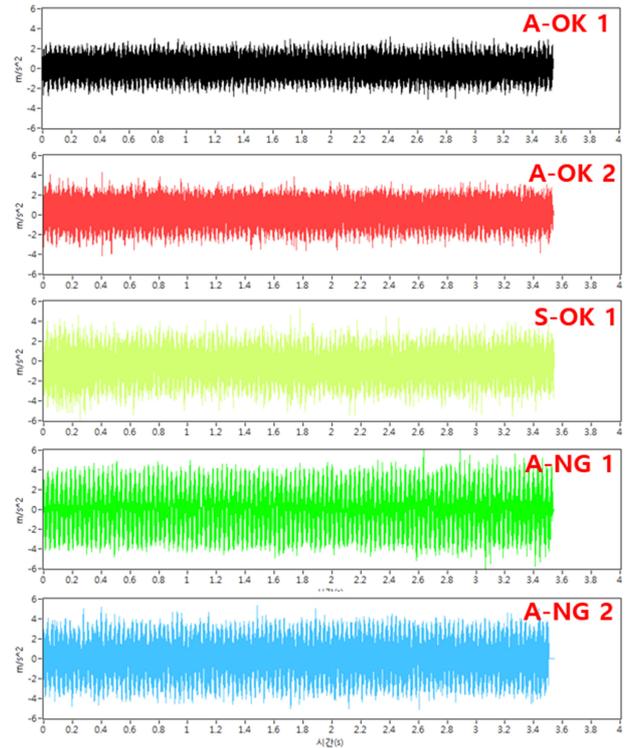


Fig. 6. Vibration signals from the acceleration sensor attached to the good motor part of the MDPS system constructed with various columns.

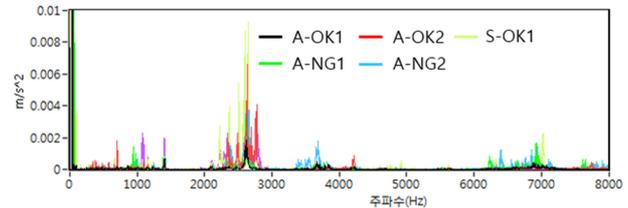


Fig. 7. FFT frequency spectrum from the acceleration sensor attached to the good motor part of the MDPS system constructed with various columns.

알 수 있다. 보다 구분이 잘 되는 영역은 6,000 Hz에서 7,000 Hz 사이의 구간 이었으며, 이 영역을 확대한 그래프를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8을 통해 A-NG1 샘플의 경우에는 6,250 Hz, 6,950 Hz에서 정상 제품에서는 발생하지 않는 피크가 형성됨을 알 수 있다. 또한 A-NG2 샘플의 경우에도 6,400 Hz, 6,850 Hz에서 이상 피크가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 주파수 분석의 경우가 시간 과형 분석 보다 명확하게 검출이 가능함을 알 수 있었다.

3.3 column 부착 테스트

가속도 센서의 부착 위치를 motor 부위에서 column부위로 변

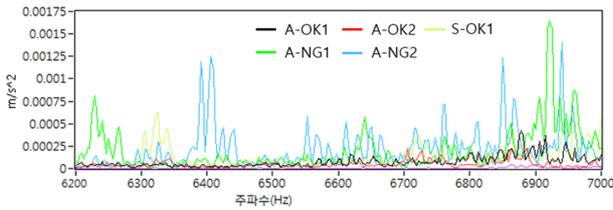


Fig. 8. An enlarged view of the FFT frequency spectrum of Fig. 7.

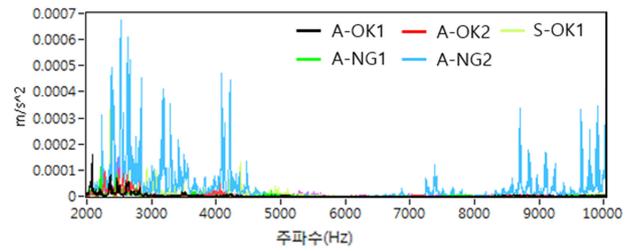


Fig. 10. FFT frequency spectrum from the acceleration sensor attached to the column part of the MDPS system constructed with various columns.

방법이 효과적으로 불량을 찾아낼 수 있다고 판단하였고, column에 센서를 부착하고 40개의 조합 샘플을 테스트 하였다.

3.4 MDPS 소음진동 시험

MDPS를 생산하고 있는 작업현장에서는 작업자가 무항실에서 직접 듣고 양볼 판정을 하고 있으며, 본 연구에서 개발한 시스템과 비교 분석 실험을 진행하였다. 연구를 통해 개발된 시스템이 MDPS생산후 공장에서 출하 직전에 양품과 불량률을 검증하기 위한 용도로 사용 될 수 있는지 여부를 검증하고자 하였으며, 본 테스트는 MDPS 생산 공장에서 생산된 제품을 대상으로 실제 주행 차량에 부착하기 전에 테스트를 진행한 결과이다. 총 40개 조합의 구동 소음을 녹음하여 작업자에게 제공하였고, 작업자가 각각의 소음을 듣고 판정한 결과 값을 Table 2에 나타내었다.

Table 2를 통해 알 수 있듯이 숙련된 작업자의 경우 총 40개의 조합에서 2개의 판정 결과가 틀리게 나타났다. NG의 결과가 나와야 하는데 OK 판정을 내린 것을 확인하였다.

Table 3은 본 연구를 통해 주파수 분석을 수행한 결과를 나타내었다. 40개 조합 모두를 정상적으로 판단한 것을 알 수 있었다. MDPS 내부를 구성하고 있는 기어가 구동 하면서 불량인 motor나 column이 사용된 경우 정상인 경우와는 다른 주파수의 소음이나 진동을 발생시킨 것을 본 시스템이 잘 분석해 낸 결과라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량용 MDPS의 소음 진동을 측정하는 시스템과 이를 분석하는 프로그램을 개발하였다. 신호 분석기는 24bit ADC 2채널, 16bit ADC 1채널을 포함하였으며, 빠른 신호 처리를 위하여 150 MHz로 동작하는 디지털 시그널 프로세서를 사용하였다. 산업 현장 환경에서 동작하도록 방진 방수를 고려하여 디자인 하였다. 분석 프로그램은 MDPS의 이상 유무를 분석하기 위해서 주파수 분석 및 시간 파형을 분석할 수 있는 기능을 개발하였다. 이를 통해 숙련된 작업자의 도움 없이도

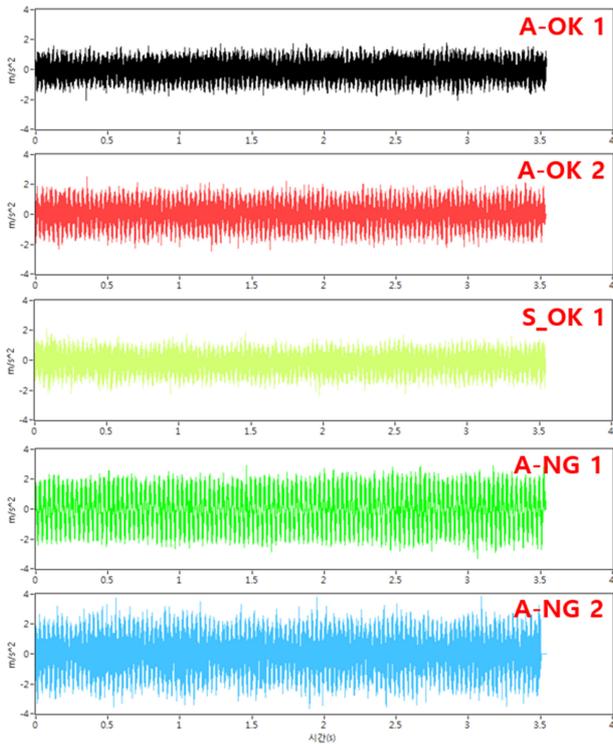


Fig. 9. Vibration signals from the acceleration sensor attached to the column part of the MDPS system constructed with various columns.

경하고 테스트를 진행하였다. 센서의 부착 위치에 따라 검출 효율이 향상 될 수 있는지 여부를 판단하기 위해 센서의 부착 위치를 변경하여 측정하였다. 앞선 실험과 같은 5개의 column 샘플을 테스트 하였고, 측정 시간도 동일하게 3.5초 동안 측정하였다. 그 결과를 Fig. 9에 시간파형으로 나타내었다. 모터에 부착하여 측정한 결과와 유사한 결과가 나왔다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 양품의 경우에는 진폭이 평균 $2m/s^2$ 이하이며, 불량 제품은 $2m/s^2$ 이상으로 측정되었다.

두 경우를 비교해 보면 가속도 값의 진폭이 motor에 센서를 부착한 경우보다 column에 부착한 경우가 더 작은 것을 알 수 있다. Fig. 10은 주파수 분석을 수행한 결과를 나타내고 있다. 주파수분석 그래프를 보면 불량 제품에서 이상 피크들이 현저하게 높게 나오는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 motor 와 column이 조합된 MDPS의 소음진동 검사를 위해서 최적의 센서부착위치를 column에 부착하는

Table 2. Results of the manual test by a trained expert. Reds are the misjudged cases.

column motor	A-OK1	A-OK2	A-NG1	A-NG2	S-OK1
OK1				NG	
OK2				OK	
OK3				NG	OK
OK4	OK		NG	NG	
OK5				NG	
OK6				OK	
NG1	NG	NG	NG	NG	NG
NG2	NG	NG	NG	NG	NG

Table 3. Results with our analysis system. No misjudged cases were reported.

column motor	A-OK1	A-OK2	A-NG1	A-NG2	S-OK1
OK1			NG	NG	
OK2			NG	NG	
OK3			NG	NG	OK
OK4	OK		NG	NG	
OK5			NG	NG	
OK6			NG	NG	
NG1	NG	NG	NG	NG	NG
NG2	NG	NG	NG	NG	NG

빠르게 양불 판정을 수행할 수 있도록 하였다. 원활한 분석을 위해 Band Sum, Time RMS, Time Count 등의 기법을 추가하여 분석을 수행 하도록 하였다. 뿐만 아니라 측정결과를 그래프로 표시하고 합격, 불량률을 나타내도록 하여 이상 발생을 작업자가 확인할 수 있도록 하였다. 현장에서 제공한 MDPS의 정상, 불량 샘플들에 대하여 진동의 세기 및 주파수 분석을 통해 합격 불량 판정이 가능하였다. 현재 현장에서 사용되고 있는 숙련된 작업자가 귀로 측정하는 경우 95%의 검출률을 보였으며, 본 연구에서 개발한 시스템은 100%의 검출률을 나타내었다. 다만 40개의 제한된 샘플을 사용하였기 때문에 보다 높은 신뢰성을 위해서는 생산라인에 적용하여 다수의 샘플을 대상으로 한 테스트가 필요하다 할 수 있다. 귀로 듣고 판단하는 방법은 작업자의 컨디션 등에 의한 영향을 받을 수 있기 때문에 자동화 검

출 시스템이 생산라인에 적용되어 기존 검사 방식을 대체하면 빠른 검사 속도로 인한 생산성 향상 및 높은 검출률에 의한 품질관리의 향상에 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2017년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] Kiheon Kim, Changjun Kim, Hyunsoo Sin, and Changsoo Han, "Development of R-MDPS Control Algorithm Using HILS," *The Kor. Soc. of Automotive Engineers*, pp. 800-805, 2007.
- [2] Kiheon Kim, Changjun Kim, Hyunsoo Kim, and Changsoo Han, "Development of a R-MDPS Control Algorithm Using the CarSim Model and Steering System Model," *The Kor. Soc. of Automotive Engineers*, pp. 856-860, 2006.
- [3] Jeong-Tae Kim, Dongho Yoo, Ju-Min Lee, and Kwang-Woong Kim, "Simulation Study on the Vibration Caused by Motor in MDPS System," *The Kor. Soc. of Automotive Engineers*, Vol. 2009(11), pp. 2476-2484, 2009.
- [4] Seungryul Choi, Pilgu Kim, and Kyungrok Choi, "Study on the MDPS Vibration Analysis," *Journal of The Kor. Soc. of Automotive Engineers*, Vol. 2009(11), pp. 2274-2283, 2009.
- [5] Seungryul Choi and Hyungjoo Kwon, "Study on the MDPS Vibration Analysis," *The Kor. Soc. of Automotive Engineers*, Vol. 2009(4), pp. 554-559, 2009.
- [6] Seung-Seok Lee and Ki-Bok Kim, "Recent Research Trend for Nondestructive Testing Technology," *Journal of The Kor. Soc. for nondestructive testing*, Vol. 24(1), pp. 64-85, 2004.
- [7] Cheol-Oh Kim and Kye-Young Lim, "A Study on the Light control using DSP FFT processing Module of Audio and Vibration Signals," *Journal of The Kor. Inst. of Illuminating and Elec. Installation Engineers*, Vol. 2011(5), pp. 81-83, 2011.
- [8] Jae Sung Lee and Myung Hoon Sunwoo, "Design of New DSP Instructions and Their Hardware Architecture for High-Speed FFT," *Journal of the Inst. of Electronics Eng. of Korea*, Vol. 39(11), pp. 62-71, 2002.