

금속 부품의 결함 판단을 위한 고유 주파수 분석 시스템 개발

이충석 · 김진영 · 강준희⁺

Development of the Natural Frequency Analysis System to Examine the Defects of Metal Parts

Chung Suk Lee, Jin Young Kim, and Joonhee Kang⁺

Abstract

In this study, we developed a system to detect the various defects in the metallic objects using the phenomenon that the defects cause the changes of the natural resonant frequencies. Our system consists of a FFT Amp, an Auto Impact Hammer, a Hammer controller and a PC. Auto Impact Hammer creates vibrations in the metallic objects when tapped on the surface. These vibrational signals are converted to the voltage signals by an acceleration sensor attached to the metallic part surface. These analog voltage signals were fed into an ADC (analog-digital converter) and an FFT (fast fourier transform) conversion in the FFT Amp to obtain the digital data in the frequency domain. Labview graphical program was used to process the digital data from th FFT amp to display the spectrum. We compared those spectra with the standard spectrum to find the shifts in the resonant frequencies of the metal parts, and thus detecting the defects. We used PCB's acceleration sensor and TI's TMS320F28335 DSP (digital signal processor) to obtain the resolution of 2.93 Hz and to analyze the frequencies up to 44 kHz.

Keywords: Natural Frequency, Metal, ADC (analog-digital converter), FFT (fast fourier transform)

1. 서 론

고유 주파수는 물체가 자유 진동할 때 가지는 주파수를 말한다. 외부에서 고유 주파수와 같은 주파수의 진동이 가해지면 공명현상이 발생한다. 자동차의 경우 동작하는 기계적 부품들의 고유주파수가 같으면 공명현상이 발생하여 소음과 떨림을 유발한다[1]. 특히 자동차의 제동 시 브레이크디스크와 라이닝의 마찰에 의하여 제동하는데 두 부품의 고유주파수가 같으면 큰 소음과 떨림이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 설계 시 각 부품의 고유주파수 대역을 측정 분석하는 연구가 진행되고 있다[2-4]. 이 외에도 항공기, 회전기계, 보, 교량, 해양구조물 등과 같은 구조물의 손상을 탐지 하고 손상된 부분의 위치를 확인하는 연구들이 진행되고 있다[5,6].

결국 산업현장에서 생산하는 제품 또는 다양한 부품에 균열,

구멍, void와 같은 결함이 있다면 결국 제품의 불량률 초래하므로 기업은 막대한 경제적 손실이 야기될 수 있다. 따라서 생산된 제품의 결함을 실시간으로 찾아내고 보완 할 수 있도록 도와주는 시스템이 필요하다[7-9].

고유 주파수와 강성, 질량과의 관계를 살펴보면 고유주파수는 물질의 강성에 비례하고 질량에 반비례 한다. 따라서 제품에 크랙이 존재할 경우 물질의 강성이 감쇄된다[10-12]. 고유진동수는 식 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 k 는 stiffness를 의미하고 m 은 mass를 의미한다.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

본 연구에서는 구조물 등 크기가 큰 제품이 아닌 자동차에서 사용하는 다양한 크기가 작은 금속 부품들의 결함을 판단하는 시스템을 설계하고 제작하였다. 시스템은 크게 하드웨어, 펌웨어, 소프트웨어의 3가지 영역으로 구분된다. 하드웨어는 오토 임팩트 해머, 해머 컨트롤러, FFT Amp, 센서(가속도 센서, 사운드 센서)로 구성된다. 펌웨어는 FFT Amp를 구동하는 소프트웨어이며, 소프트웨어는 PC에 설치되어 FFT Amp의 각종 설정, 측정 데이터 분석 및 저장을 담당한다. 데이터 분석 및 설정을 위한 PC 소프트웨어는 National Instrument 사의 Labview로 개발하였다. 본 연구에서는 PCB사의 130E20 사

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. 22, 2015, Revised : May. 7, 2015, Accepted : May. 22, 2015)

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.

운드센서와 352C34 가속도센서를 사용 하였다. 실제 생산 현장에서는 사운드 센서를 사용하거나 가속도 센서를 사용하는 데, 일반적으로 외부 소음에 민감한 경우에는 가속도 센서를 주로 사용하고 있다. 그리고 사운드 센서는 가속도 센서와 달리 접촉식이 아닌 장점이 있어 크기가 작은 제품이나 모양이 복잡한 제품을 테스트할 때 사용한다.

2. 연구 방법

2.1 하드웨어 개발

Fig. 1은 고유 주파수 분석 시스템의 하드웨어 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 주요 구성요소로는 트리거 신호를 해머 컨트롤러에 보내고 가속도 센서의 신호를 받아 데이터를 처리하는 FFT Amp, 해머의 세기와 동작 속도를 컨트롤 하는 해머 컨트롤러, 일정한 타격을 자동으로 금속 제품에 타격을 가해주는 오토 임팩트 해머로 구성 되어있다.

2.1.1 해머 컨트롤러 설계

해머 컨트롤러는 오토 임팩트 해머를 구동시키는 역할을 수행한다. 본 연구에서 임팩트 해머는 전자식 솔레노이드를 사용 하였으며 해머가 구동하기 위해서는 구동 신호가 필요하다. 해머 컨트롤러는 해머 구동신호를 제어 하도록 개발 하였다. 또한

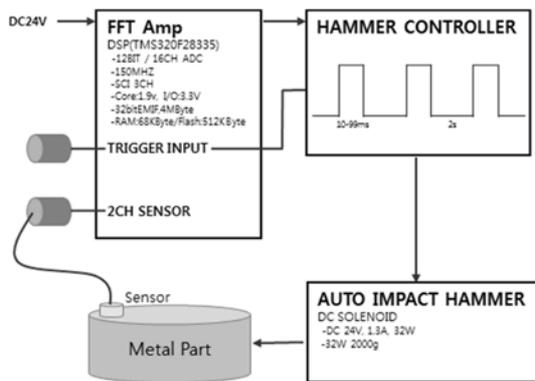


Fig 1. Hardware block diagram.

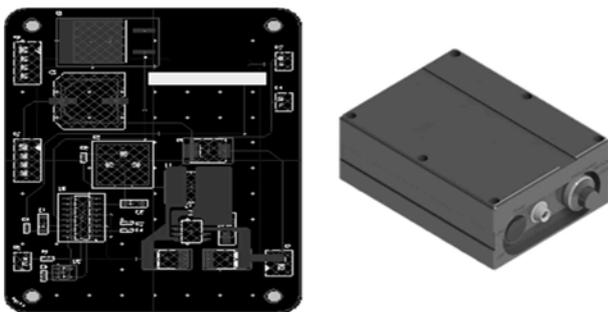


Fig. 2. Hammer Controller PCB layout & case

해머는 타격 속도와 타격 간격을 조절 할 수 있도록 설계하였으며 타격 시 가해지는 힘도 조절할 수 있도록 컨트롤러를 구성하였다. Fig. 2는 오토 임팩트 해머의 PCB layout 과 case모습을 나타내고 있다.

2.1.2 FFT Amp 설계

FFT Amp는 사운드 센서 또는 가속도 센서를 통해 입력된 신호를 ADC 변환을 하고 FFT 연산을 통해 스펙트럼 데이터를 분석하는 기능을 수행한다. Anti-aliasing 필터를 내장하였다. 뿐만 아니라 측정된 데이터를 PC에 전송하도록 통신기능을 탑재 하였다. TI TMS320F28335 DSP칩을 탑재하여 복잡한 FFT 연산을 빠른 속도로 처리 하도록 하였다[13,14]. 본 연구에서 개발한 FFT Amp의 주파수 분해능은 2.93 Hz 이며, 측정 주파수 범위는 0~44 kHz까지 분석 할 수 있도록 개발 하였다. 실제 산업현장에서 바로 적용이 가능하도록 각종 설정을 저장 할 수 있는 EEPROM을 탑재 하였다. Fig. 3은 FFT Amp의 PCB layout 과 case모습을 나타내고 있다.

2.2 펌웨어 개발

Fig. 4는 FFT Amp에 탑재되어 있는 DSP의 연산 과정을 나타낸 다이어그램이다. 펌웨어 개발 툴은 TI사의 code composer studio를 사용하였다.

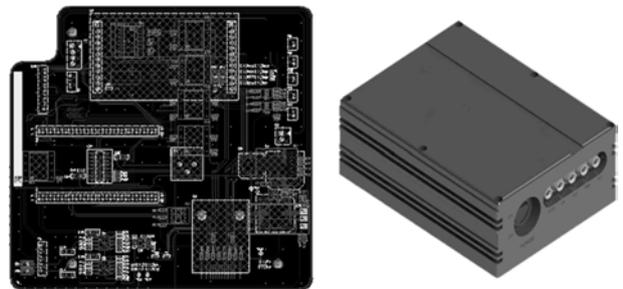


Fig. 3. FFT Amp PCB layout & case

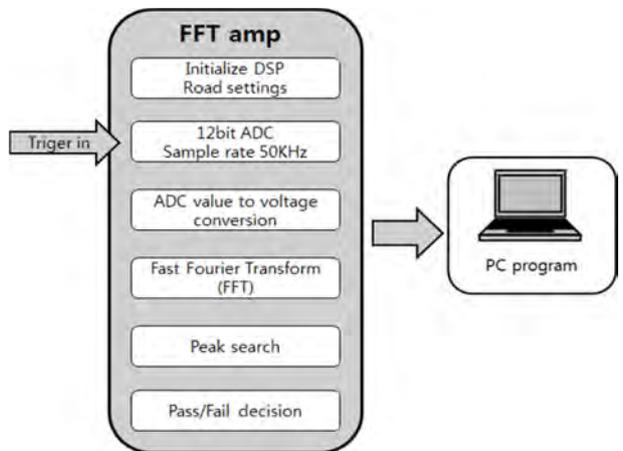


Fig. 4. Firmware block diagram

FFT Amp가 부팅이 되면 DSP는 초기화 작업이 시작된다. 이때 EEPROM으로부터 저장된 설정 값을 불러와 ADC데이터의 개수, sample rate, peak의 영역 범위를 저장하게 된다. 초기화 작업이 완료된 DSP는 외부 또는 PC로부터 트리거 신호가 들어오면 가속도 센서로부터 입력되는 아날로그 전압신호를 ADC 연산과정을 거쳐 디지털 ADC 값으로 변환한다. ADC 값은 다시 전압(V) 단위로 변환하는 과정을 거쳐 FFT 연산을 하게 된다. FFT의 결과로 설정된 영역 안에서 peak 값을 찾아 주고 합격 조건에 만족 하는 범위 안에 있는지 확인하여 합격/불량을 결정한다. 이 모든 과정이 끝나면 ADC 스펙트럼, FFT 스펙트럼, peak 값, 합격/불량 결과를 PC로 전송하게 된다.

2.3 소프트웨어 개발

소프트웨어는 기능에 따라 3가지 모드로 구동된다. 모드는 Experiment, Setup, Data로 구분된다. Fig. 5는 Experiment 모드를 나타내고 있다. FFT 스펙트럼 데이터 분석을 위해 그래프의 스케일을 Linear 또는 Log스케일로 선택할 수 있게 하였다. FFT 스펙트럼 데이터를 분석하여 합격 불량을 판단하고 Pass/Fail로 표시 되도록 하였다. 합격 불량 히스토리는 텍스트 파일로 저장하도록 하였다.

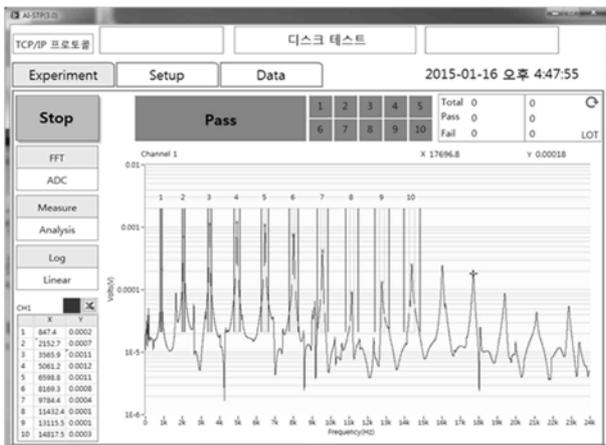


Fig. 5. Software Experiment front panel.

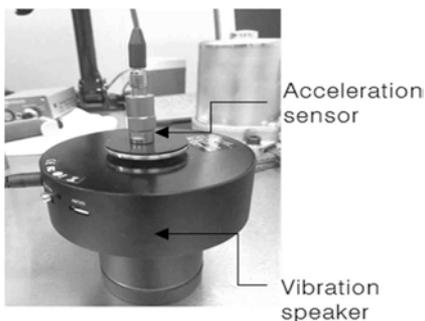


Fig. 6. Frequency Input-Output test.

3. 테스트 결과

3.1 주파수 입출력 테스트

Fig. 6은 개발된 시스템의 주파수 분석 성능의 정확도와 반복성 테스트 사진을 나타내고 있다. 테스트 방법은 가속도 센서를 진동 스피커에 부착 시킨 후 일정한 주파수로 스피커를 진동시켰다. 센서를 통해 주파수 측정 및 분석을 수행 하였다. 테스트에서 사용된 가속도센서의 감도(Sensitivity)는 $10.2 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ 이었다.

Table 1은 1,000 Hz 에서 20,000 Hz 까지 테스트한 결과를 나타내고 있다. 테스트는 각 주파수 마다 10회 반복하여 테스트한 평균값을 나타내었다. Input frequency는 진동 스피커에 입력해준 주파수를 의미하며, Output frequency는 가속도 센서와 FFT Amp를 통하여 측정된 주파수의 값을 나타내고 있다. Input-Output frequency는 입력 주파수와 측정된 주파수의 차이를 의미한다. Measuring efficiency 는 입력주파수와 측정된 주파수의 차이의 오차율을 나타내고 있다. 오차율의 최소값은 0.001%이고 최대값은 0.06%이었다. 낮은 주파수에서 오차율이 높은 주파수 대역보다 큰 것을 알 수 있으며, 최대값이 0.06%로 오차가 매우 작은 것을 알 수 있다.

Table 1. Frequency Input-Output test result

Input frequency (Hz)	Output frequency (Hz)	Input - Output frequency (Hz)	Measuring efficiency (%)
1000	1000.6	0.6	0.060
2000	2001.2	1.2	0.060
3000	2998.9	1.1	0.037
4000	3999.6	0.4	0.010
5000	5000.2	0.2	0.004
6000	6000.8	0.8	0.013
7000	7001.4	1.4	0.020
8000	7999.1	0.9	0.011
9000	8999.8	0.2	0.002
10000	10000.4	0.4	0.004
11000	11001	1	0.009
12000	12001.6	1.6	0.013
13000	12999.3	0.7	0.005
14000	13999.9	0.1	0.001
15000	15000.6	0.6	0.004
16000	16001.2	1.2	0.008
17000	17001.8	1.8	0.011
18000	17999.5	0.5	0.003
19000	19000.1	0.1	0.001
20000	20000.8	0.8	0.004

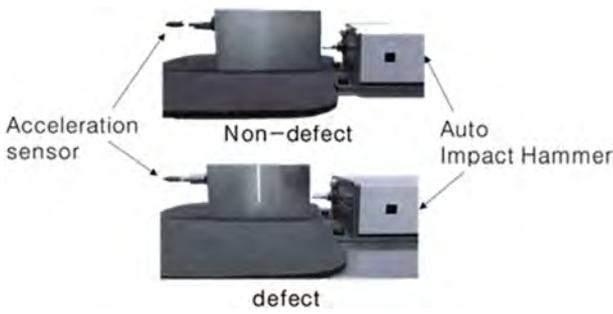


Fig. 7. Steel material defect analysis test.

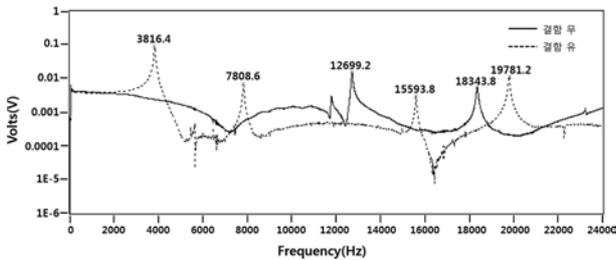


Fig. 8. Steel material FFT spectrum graph.

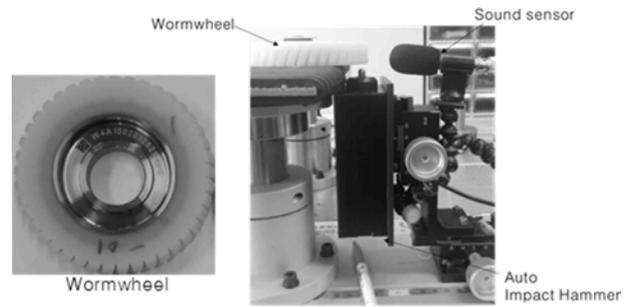


Fig. 9. Worm wheel defective product detect test.

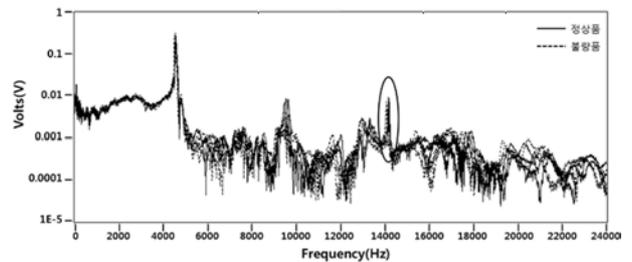


Fig. 10. Worm wheel FFT spectrum graph.

3.2 철강재료 결함 분석 테스트

Fig. 7은 공업용으로 만들어진 철강재료 S45C의 테스트 사진이다. 사진 위는 결함이 없는 시료이며, 아래는 결함이 존재하는 시료의 모습을 나타내고 있다. 시료의 왼쪽에 가속도 센서를 부착 시켰고 일정한 타격을 줄 수 있는 오토 해머를 사용하여 테스트 하였다.

Fig. 8은 이 두 시료를 동일한 조건에서 실험하였을 때 측정된 스펙트럼 그래프이며 FFT Amp의 주파수 분석 범위를 24 kHz까지 볼 수 있도록 설정 하였다. 실선으로 표시된 그래프는 결함이 없는 시료의 결과이고 점선으로 표시된 그래프는 결함이 존재하는 시료의 스펙트럼 결과를 나타내고 있다. 결함이 존재하는 시료의 peak값과 결함이 없는 시료의 peak값을 비교해보면 결함이 존재하는 시료의 경우 측정된 peak값이 3816.4 Hz, 7808.6 Hz 이었고 결함이 없는 시료의 peak값은 12699.2 Hz, 18343.8 Hz였다. 결함이 존재하는 시료의 peak 값이 결함이 없는 시료에 비해 낮게 측정 되었다. 이는 제품의 강성이 줄어든 결과로 판단된다.

3.3 Worm wheel 불량 판단 테스트

Fig. 9는 자동차 조향장치의 부품인 Worm wheel의 모습과 불량 판단 테스트 사진을 나타내고 있다. Worm wheel은 제조 과정에서 기공이 생길 시 기계적 특성의 저하를 가져올 수 있기 때문에 조향장치의 부품으로 사용될 수 없고 기공의 존재 여부에 따라 정상품과 불량품을 선별 해야 된다[15].

개발한 주파수 분석 시스템으로 기공의 존재 여부에 따른

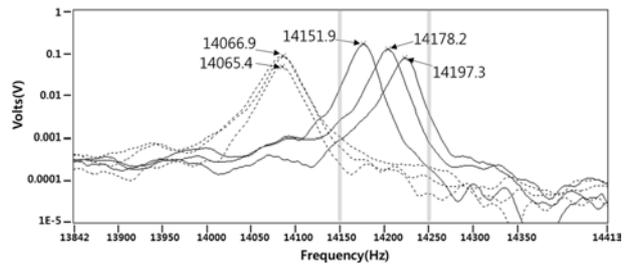


Fig. 11. Worm wheel FFT spectrum expand graph.

불량품 선별이 가능 한지 선별하기 위하여 사운드센서를 사용하여 음향 데이터를 수집하였다. 사용된 사운드 센서의 감도는 45 mV/Pa 이었다. 기공이 존재하지 않는 정상인 3개의 제품과 기공이 존재하는 불량인 3개의 제품을 동일한 조건에서 테스트한 결과 Fig. 10과 같은 FFT 스펙트럼을 얻을 수 있었다. FFT Amp의 주파수 범위는 철강재료와 마찬가지로 24 kHz로 설정하여 테스트하였다. 정상품은 실선으로 불량품은 점선으로 표시 하였다.

Fig. 11은 Fig. 10의 동그라미 부분(14 kHz 대역)의 영역을 확대한 그래프이다. 14 kHz 대역을 선택한 이유는 정상품과 불량품의 스펙트럼 차이가 확연한 구간이기 때문이다.

정상품은 14.1 kHz 에서 14.25 kHz(마진100 Hz)인 구간에서 peak이 존재한다. 반면 불량품은 14.1 kHz 에서 14.25 kHz 사이를 벗어나는 결과를 보였다. 불량품의 주파수 값이 정상품에 비해 100 Hz 이상 낮게 측정되었으며 이는 Worm wheel제조시에 생긴 기공에 의한 효과로 판단된다.



Fig. 12. Input shaft heat-treat check test.

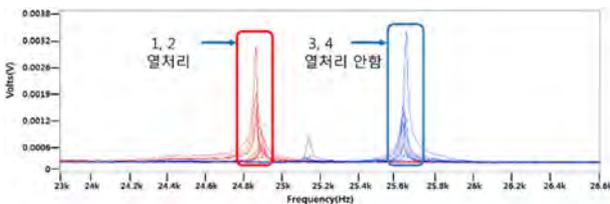


Fig. 13. Input shaft heat-treat check test result graph.

3.4 Input shaft 열처리 유무 판단 테스트

Fig. 12는 자동차 부품으로 사용되는 Input shaft의 제품사진과 테스트 사진을 나타내고 있다. Input shaft의 크기가 너무 작아서 수동 해머를 사용하여 테스트를 진행 하였다. Worm wheel 테스트와 마찬가지로 사운드센서를 사용하였다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 1, 2 번 샘플은 열처리 과정을 거친 부품이고 3, 4번 샘플은 열처리가 되어있지 않은 부품을 나타내고 있다.

Fig. 13은 샘플당 5회씩 테스트 하여 얻은 FFT 스펙트럼을 나타내고 있다. Fig. 13이 나타내는 바와 같이 열처리를 한 1번 2번 샘플은 24.8 kHz대역(마진100 Hz)에 주요 peak이 형성되었다. 그러나 열처리를 하지 않은 3번과 4번 샘플은 25.6 kHz대역(마진100Hz)에 주요 peak이 형성된 것을 알 수 있다. 본 연구를 통하여 개발된 주파수 분석 시스템으로 테스트한 결과 열처리 유무를 정확히 판별 할 수 있었다. 열처리 유무에 따라 고유 주파수의 차이가 발생 하였으며 그 차이는 800 Hz 였다.

4. 결 론

본 연구에서는 산업현장에서 사용하는 금속부품의 결함을 판단하기 위한 고유주파수 분석 시스템을 개발하였다. 금속 부품에 고유진동수를 만들기 위한 오토 임팩트 해머, 해머 컨트롤러를 설계 제작하였고 센서로부터 수집된 데이터를 처리 하는 FFT Amp를 개발하였다. 또한 측정된 스펙트럼 데이터를 분석하는 소프트웨어를 개발하였다. 철강재료의 크랙유무, Wormwheel의 기공 존재 여부와 Input shaft의 열처리 유무를 테스트 하였다. 본 연구를 통하여 개발된 시스템으로 고유 주파수를 분석한 결

과 크랙의 유무, 기공의 존재 여부 열처리 유무를 정확히 판별 할 수 있었다. 본 시스템을 산업 생산 현장에 바로 적용 할 수 있을 것으로 생각되며 이를 통해서 생산된 제품의 안전성과 신뢰성 평가에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2014년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] D. C. Park, "Future Trend & Suggestion for vehicle noise & Vibration development", *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, Vol. 33, No. 6, pp. 18-23, 2011.
- [2] J. P. Park and Y. S. Choi, "Experimental analysis on brake squeal noise due to disk misalignment", *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, Vol. 12, No. 5, pp. 118-124, 2004.
- [3] J. H. Lim, S. J. Cho, Y. S. Choi, S. J. Choi, and G. J. Choi, "Brake squeal noise due to disk run-out", *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, Vol. 13, No. 3, pp. 41-47, 2005.
- [4] H. J. Cho, M. G. Kim, J. W. Maeng, and C. D. Cho "Analysis of the effect of mode shape on judder phenomenon in automotive disk brake", *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, Vol. 2, pp. 1056-1061, 2005.
- [5] H. Y. Hwang, "Damage detection of structure based on natural frequency ratio measurements", *J. of The Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 726-734, 2007.
- [6] H. I. Yoon and I. S. Son, "Dynamic behavior of rotating cantilever beam with crack", *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, Vol. 15, No. 4, pp. 620-628, 2005.
- [7] Y. S. ryong, "Non-Destructive Test", Sang Hakdang, Seoul, pp. 11-15, 2011.
- [8] S. Seok and K. B. Kim "Recent Research Trend for Non-destructive Testing Technology", *J. Korean Soc. Nondestruct. test.*, Vol. 24, No. 1, pp. 64-85, 2004.
- [9] J. H. Kim, J. S. Kim, J. Lee, N. G. Kwag, and B. Y. Lee, "The basic study on the method of acoustic emission signal processing for the failure detection in the NPP structures", *J. Korean Soc. Nondestruct. test.*, Vol. 29, No. 5, pp. 485-492, 2009.
- [10] H, Y, Hwang and J, Y, Lee "Damage detection of structure based on frequency response functions", *J. of The Korea Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 28, No. 2, pp. 46-57, 2000.
- [11] K. Hoon, S. H. Yoo, and S. W. Shin, "A simplified method for calculation of the natural frequencies using the stiffness contribution degree", *J. Archit. Inst. Korea.*, Vol. 23, No. 8, pp. 3-10, 2007.
- [12] K. C. Lim and S. H. Lim, "A study on torsional stiffness improvement of a vehicle", *T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 11, No. 1, pp. 47-54, 1997.

- [13] C. O. Kim and K. Y. Lim, "A study on the light control using DSP FFT processing module of audio and vibration signals", *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, pp. 81-83, 2011.
- [14] J. S. Lee and M. H. Sunwoo, "Design of new DSP instructions and their hardware architecture for high-speed FFT", *I. J. Electronics. Information. Engineers.*, Vol. 39, No. 11, pp. 62-71, 2002.
- [15] C. D. Lee and J. H. Kim, "Variability in the tensile properties of magnesium alloy on the microporosity variation", *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, Vol. 3, No. 6, pp. 1679-1684, 2007.