한국수소 및 신에너지학회 논문집(2009. 2), 제20권 제1호
*Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*(2009. 2), Vol. 20, No. 1, pp. 64~72

# 초소형 동력 에너지원으로서의 타이어 휠 진동 모드 측정

**신유환*, 이윤표*†**
*한국과학기술연구원 에너지메카닉스연구센터

# Measurement on Vibration Mode of Tire Wheel as a Energy Source of Micro Power

**YOUHWAN SHIN*, YOONPYO LEE*†**
**Energy Mechanics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, P.O.BOX 131, Cheongryang, Seoul, 130-650, Korea*

## ABSTRACT

In order to convert efficiently vibration energy of a car tire wheel into electrical power by using piezoelectric materials, the design of the materials must be performed for the dynamic characteristics of the piezoelectric materials to be matched with them of the vibration energy sources well. An accelerometer was installed on the tire wheel with a slip ring to investigate the dynamic mode of the wheel as one of the vibration energy sources. During road test, the measurement on the vibration mode of the tire wheel was performed with variations of car speed and road condition. The experimental data were analyzed details for availability as a micro power source for wireless TPMS(Tire Pressure Monitoring System).

**KEY WORDS** : Micro power(초소형 동력), Energy scavenging(에너지 획득), Vibration energy(진동 에너지), Road test(주행 시험), TPMS(타이어 압력 모니터링 시스템)

## Nomenclature

a : normalized centrifugal acceleration
g : gravity, m/sec$^2$
N : revolution per minute of tire wheel
r : radius, m

### Greek

$\omega$ : angular velocity, rad/sec

†Corresponding author : yplee@kist.re.kr

## 1. 서 론

주위에서 쉽게 낭비되는 유휴 에너지로부터 극소량의 동력(micro power)을 얻고자 하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있으며, 연구 방법도 낭비되는 에너지의 종류, 또는 미소 동력을 획득(energy harvest 또는 scavenging)하는 방법 등에 따라 아주 다양한 형태로 이루어지고 있다. 즉, 배터리나 연료의 주입, 보충 없이 빛, 온도, 진동, 인체의 동작 등 주변에서 쉽게 얻을 수 있는 에너지원으로부터 동력을 얻는 것이다.

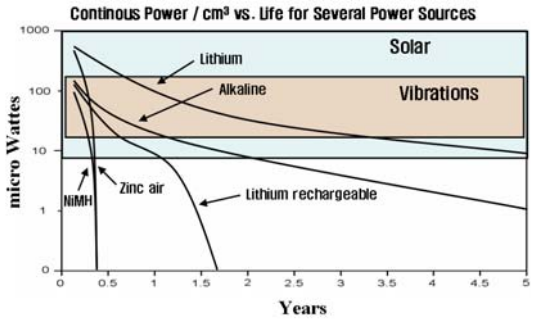


Fig. 1 Comparison of power from vibrations, solar, and various battery chemistries (Roundy et al., 2003)[1)]

많이 사용되는 충전용 배터리라 하더라도 시간 경과에 따라 출력이 급격히 하강하게 되는데(Fig. 1), 일반적으로 충전용 리튬 배터리인 경우 45 μW/cm3, 재충전용 리튬 배터리인 경우 7 μW/cm3 에너지 밀도를 얻을 수 있다[1)]. 그러나 비록 충전 배터리라 하더라도 3년 이후의 충전은 거의 불가능하다. 반면 주변에 산재한 열, 빛, 진동, 인간의 움직임 등으로부터 에너지를 획득하여 센서 등의 에너지원으로 이용할 수 있다면 배터리 교체 없이 지속적으로 구동 가능한 시스템이 구현될 수 있을 것이다[2)].

특히 U-빌딩, U-city 등의 제어에 이용되는 수백, 수천 개의 센서가 무선으로 네트워크를 구성하는 USN(ubiquitous sensor network)[3)] 등과 같이 수많은 센서가 필요한 곳의 배터리를 정기적으로 교체한다는 것은 많은 인력을 필요로 할 뿐 아니라 경제성도 없다. 또한 위치적으로 높은 곳이나 내장 센서의 경우 배터리 교환 자체가 불가능한 경우도 많다. 따라서 배터리 교체가 어렵고 시스템을 오래도록 안정적으로 유지하기 위해서는 배터리를 대체할 수 있는 자체 동력원이 필요하다.

시간적으로 지속 가능한 여러 유휴 에너지원 중에서 진동 에너지를 동력원으로 하고 압전재료(piezoelectric materials)를 이용하거나[5,6)] 전자기적 방법(electromagnetic)을 이용하여[7)] 전기 에너지로 변환하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 압전재료를 이용할 경우 압전재료의 동적 특성이 진동 에너지원의 동적 특성과 잘 일치하도록 소자 재료, 형상 및 두께 등을 설계하여야만 보다 효율적인 에너지 변환이 가능하다.

실제 자동차가 도로 주행을 할 때 타이어 휠에 전해지는 진동은 자동차 주행상태, 즉 도로면 상태, 주행속도 및 차량의 가속, 감속 등에 따라 다양한 진동 모드로 표현된다. 타이어 또는 휠의 진동에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있지만 대부분이 타이어 또는 휠 자체의 설계에 목적을 두고 진동의 영향을 고찰하고자 하였다[8-10)].

본 연구에서는 자동차 주행시 타이어 휠에 나타나는 여러 진동 모드에 대해 측정하고, 각 모드 중 지배적인 진동 성분 및 특성 등을 파악하고자 하였다. 또한 연구 결과를 TPMS(tire pressure monitoring system) 등과 같은 타이어 진동 에너지를 동력원으로 하는 압전 소자의 형상, 두께 등의 설계시 동적 특성 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 타이어 휠 진동 측정 시스템

### 2.1 진동 측정 및 신호 저장 모듈

타이어 휠의 진동은 타이어 휠에 가속도계를 장착하고 타이어 회전 및 외부 충격(도로 등)에 의한 가속도를 측정하게 된다. 가속도계는 센서 작동에 필요한 동력(excitation power)이 공급됨으로써 동작을 하게 되며, 가속도 변화에 따른 전기적 변화(전압변동) 데이터를 측정 모듈을 통해 저장된다. 이런 일련의 프로세스를 위해 진동 측정 모듈을 설계하고 제작하였다. 모듈을 통해 최종적으로 PC로 데이터가 전송되어 후처리 과정을 거치게 된다.

Fig. 2는 본 연구에서 설계 및 제작한 진동 측정 모듈에 대한 개략적인 구성을 나타낸 것이다. 가속도 센서로부터 가속도 변위 신호를 증폭하고, 아나로그 신호를 디지털화하여 RAM에 실시간으로 저장한다. 측정이 끝나면 PC의 명령에 의해 RAM에 저장된 측정 신호를 후처리를 위해 PC로 전송하게 된다. Fig. 3은 본 실험을 위해 제작된 진동 측정 모듈의 사진을 보여주고 있다. 모듈은 온도계 및 습도계가 장착되어 있고, 마이크로프로세서 및

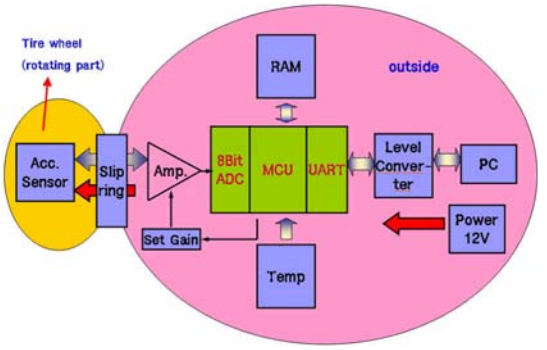


Fig. 2 System diagram for measurement of tire wheel vibration mode

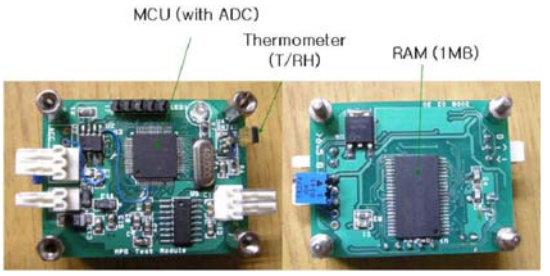


Fig. 3 Circuit board for measurement of tire wheel vibration mode

Table 1 Performance specification of measurement module

| Components | Specifications |
|---|---|
| Accelerometer | 50 g, 40 mV/g, 0-800 Hz |
| MCU | 8 bit microprocessor |
| RAM | 8 Mbits |
| Sampling rate | 5700 s/s, 3 min |
| Amplifier gain | x1, x2, x4.7, x10, x20, x47 |
| UART (RS232) | 115,200 bps |
| ADC | 10 or 8 bits |
| Slip ring | 10 ports |

측정 데이터의 저장을 위한 RAM으로 구성되어 있다. Table 1은 제작된 측정 모듈의 시스템 사양을 나타낸 것이다.

## 2.2 측정 소프트웨어의 구성

제작된 측정 모듈을 통해 진동 측정의 시작과 정지를 제어하고, 측정된 데이터의 저장 및 pc로 전송하는 작업 등을 제어하고, 통신하기 위한 운용 프로그램을 visual basic을 이용하여 구성하였다. 프로그램 실행시 윈도우 창을 통해 측정의 시작, 정지 및 데이터 전송 등 통신뿐만 아니라 측정시 측정시간, 비례치(gain) 등을 조절할 수 있으며, 통신 상태를 확인할 수 있다.

## 2.3 진동 측정 모듈 작동 예비 테스트

본 연구에서 설계, 제작된 진동 측정 모듈에 대한 테스트를 수행함으로써 모듈의 각 요소들(마이크로프로세서 기판, 가속도 센서 및 슬립 링(slip ring) 등)에 대한 원활한 작동 여부 및 성능 등에 대해 분석, 평가하였다.

### 2.3.1 마이크로프로세서 테스트

마이크로프로세서가 측정신호를 제대로 계측하는지 여부를 판단하기 위해 함수발생기(function generator) 및 오실로스코프 등을 이용하여 실제 신호와의 왜곡 여부 등을 관찰하였다. 각 주파수별 신호를 측정하여 pc로 전송된 측정 데이터를 원신호와 확인한 결과 각 주파수별 신호가 왜곡 없이 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

실제 도로 주행시에 나타나게 될 진동 신호는 여러 주파수대의 복잡한 신호가 불규칙하게 혼합되어 있을 것이므로 이에 대한 테스트도 미리 수행해 볼 필요가 있다. 이를 위해 각 주파수별 신호가 혼합되어 나타날 경우에 대한 테스트를 수행하였으며 그 결과는 Fig. 4에서 보여주고 있다. 측정 결과 및 측정 신호에 대한 FFT 결과로 볼 때 주파수별 신호도 잘 측정이 됨을 알 수 있다.

### 2.3.2 슬립 링 및 가속도 센서 테스트

가속도 센서가 장착되는 자동차 타이어 휠은 회전부이고 측정, 통신 모듈 및 pc 등 나머지 시스템은 모두 회전하지 않는 고정부에 속하므로 회전부에서 고정부로의 전기 신호를 교환해야 한다. 이를 위해 슬립 링이 필요하다. 슬립 링의 역할은 회전

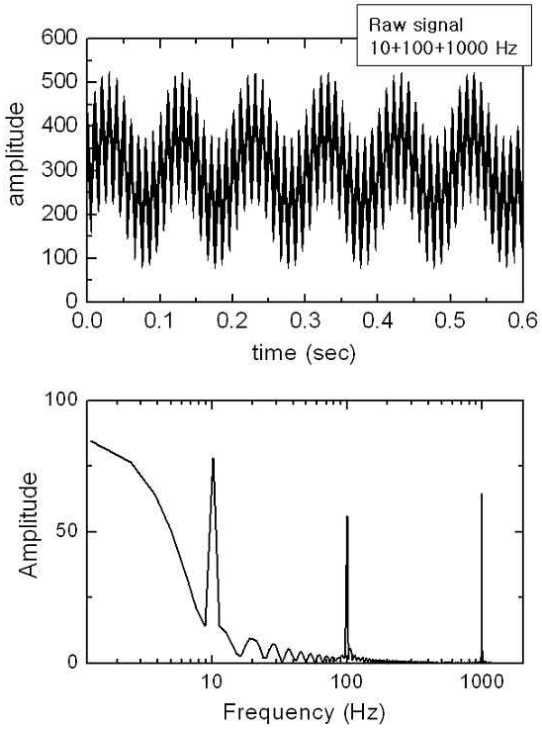


Fig. 4 Preliminary test of microprocessor (raw signal and FFT)

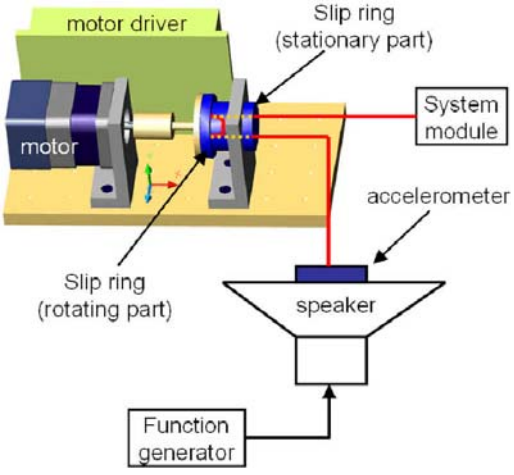


Fig. 5 Slip ring and accelerometer test system

부와 고정부 사이를 전기적으로 연결해 줄뿐만 아니라 슬립 링을 통과한 신호에 왜곡이 가능하면 적어야하며, 노이즈 없이 원 신호를 잘 전송해 주어야 한다.

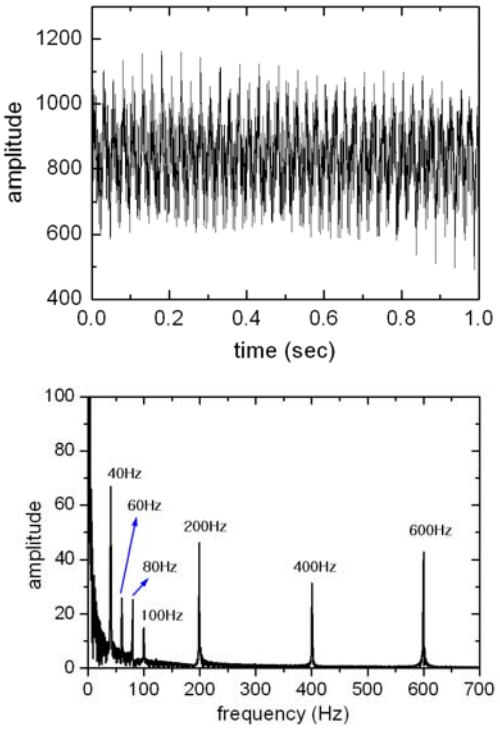


Fig. 6 Slip ring and accelerometer test results for frequency mixed with several different components

슬립 링 및 가속도 센서에 대한 테스트를 수행하기 위하여 Fig. 5와 같은 테스트 장치를 구성하였다. 스피커에 가속도 센서를 위치시킨 후 함수발생기를 이용하여 여러 주파수 성분으로 가진한 후 신호를 측정하여 후처리 및 분석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 슬립 링은 Michigan Scientific Corp.의 SR/ERT-10 모델이며, 가속도 센서는 Measurement Specialties Inc.의 4000A 모델을 각각 사용하였다.

Fig. 6은 주파수를 20 Hz - 600 Hz 사이의 여러 주파수가 혼재해 있는, 좀 더 실제 도로 주행 상황에서의 신호와 유사한 경우에 대해 테스트를 수행한 결과를 보여주고 있다. 가속도 센서의 신호를 FFT를 통해 분석한 결과 측정할 전 영역에 대해 실제 도로 상태 및 주행 상태와 관계없이 측정이 가능할 것으로 생각된다.

Fig. 7 Experimental simulation test rig for vibration mode of rotating tire wheel

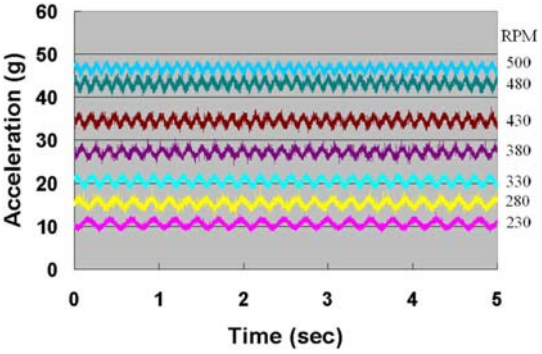


Fig. 8 Time variation of acceleration with rotational speed of tire wheel

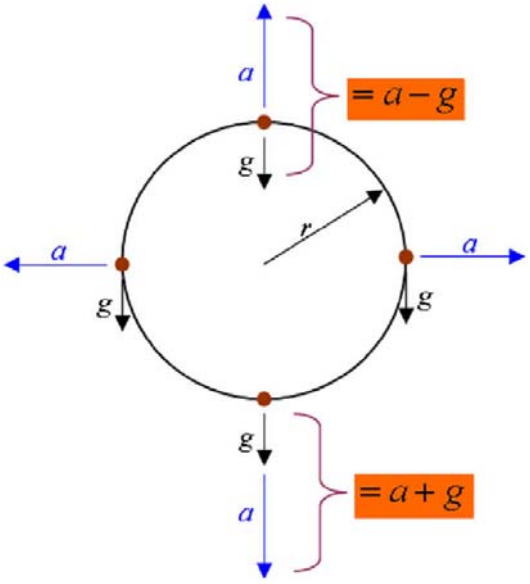


Fig. 9 Analysis on variation of acceleration of rotating tire wheel

## 3. 타이어 휠의 모의 진동 실험

### 3.1 실험장치

최종적으로 실차에 의한 도로 주행 테스트 전에 사전 점검을 위해 실험실 내에서 타이어 휠의 모의 진동 실험을 수행하기 위해 Fig. 7과 같은 모의 진동 시험기를 제작하였다. 시험기 내부에는 모터가 커플링으로 구동축과 연결되어 있고, 구동축은 시험기 외부에 타이어 휠을 장착할 수 있게 구성되어 있다.

타이어 휠의 바깥 면에 Fig. 7과 같이 가속도계를 부착하였으며, 휠의 회전축 방향 외부에는 가속도 센서에 동력을 공급하고 센서로 부터의 출력을 전달하기 위한 슬립 링이 커플링으로 연결되어 있다. 슬립 링의 고정부는 알루미늄 프레임으로 고정되어 있고, 가속도 센서로 부터의 출력을 진동 측정 모듈로 전송되고 저장된다. 최종적으로 pc로 전송되어 신호 분석을 위한 후처리 과정을 거치게 된다.

### 3.2 측정 결과 및 분석

Fig. 8은 타이어 휠의 회전속도 변화에 따른 가속도 변화량을 나타낸 것으로서 타이어 휠의 회전수가 증가할수록 가속도는 급격히 증가한다. 즉 회전수가 2배 증가할 때 가속도는 제곱에 비례하게 되어 4배 증가하게 되는데, 이것은 원심가속도를 정의하는 식 (1)을 통해 알 수 있다. 회전시 가속도는 원심가속도에 의해 지배되고, 원심가속도의 크기는 회전수의 제곱에 비례한다.

$$a = \frac{r \cdot \omega^2}{g} \tag{1}$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \tag{2}$$

식 (1)에서 원심가속도 $a$는 편의상 중력가속도(g)에 대해 무차원화 하였다.

타이어 휠이 회전하고 있을 때 휠의 각 위치에서 작용하는 가속도를 나타내는 중력가속도는 항

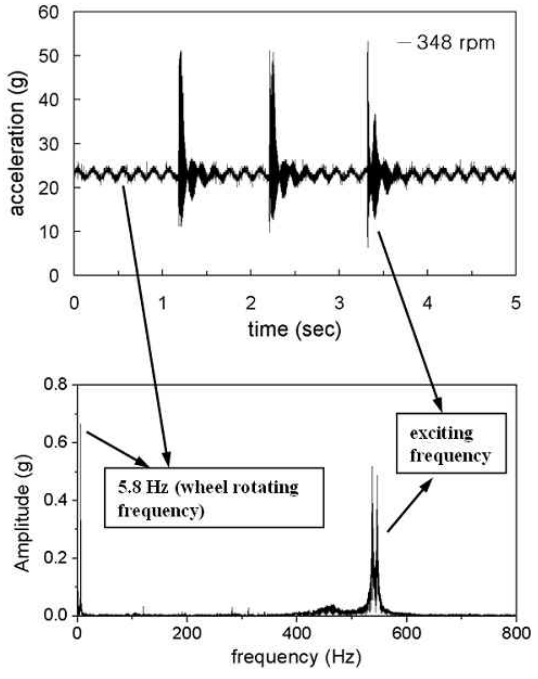


Fig. 10 Acceleration mode of rotating tire wheel added an exciting vibration by rubber hammer

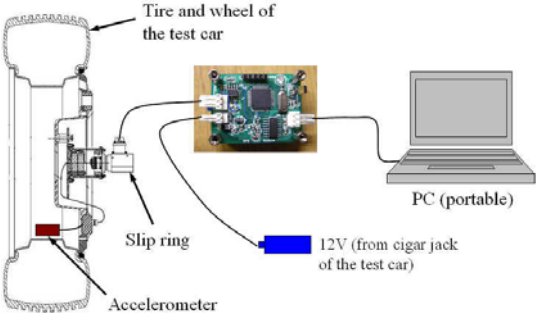


Fig. 11 Schematic diagram of measurement process on vibration mode of car tire

상 수직방향으로 작용하지만, 원심가속도는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 회전의 바깥방향으로 작용한다. 따라서 다른 외력이 작용하지 않을 경우 타이어 휠의 가속도는 이론적으로 원심가속도(a)를 기준으로 ±g 만큼의 편차를 보이며 주기적으로 반복하게 될 것이다. 이러한 현상은 측정 결과(Fig. 8)에 대한 주파수 분석을 통해 쉽게 관찰할 수 있다. 이 때 가속도 변화에 대한 진폭은 대체로 1g 보다 작다. 이것은 타이어 휠에 작용하는 가속도 성분이 원심가속도를 중심으로 수직으로 g만큼의 진폭을 보이기 때문이다.

만약 타이어 휠 회전 시 임의의 외력이 가해지면 가해진 외력의 특성에 해당하는 가속도 변화가 발생할 것이고 이를 FFT를 통한 주파수 분석을 하면 그 외력의 특성을 관찰 할 수 있을 것이다. Fig. 10은 일정한 속도로 회전하는 타이어 휠에 고무망치를 이용해 측정시간 5초 동안 임의의 간격으로 3번 충격을 가한 후 가속도 변화를 측정하고 이를 FFT한 것이다. 가해진 임의의 충격에 대한 구체적인 정보를 알 수는 없지만 대체로 약 550 Hz 정도의 주파수 성분을 보이며, 평균적으로 약 0.5g에 해당하는 가속도 크기를 보이는 것을 알 수 있다.

이러한 임의의 충격에 대한 실험은 실차에 의한 도로 주행 테스트에 대비해 미리 간단한 방법으로 예비 테스트를 시행해 본 것이며, 그 결과 도로 주행 테스트에서도 본 측정 모듈은 잘 작동할 것으로 생각된다. 물론 실제 도로 주행 실험에서의 신호는 훨씬 복잡하고, 다양한 형태로 관찰 될 것으로 예상된다.

## 4. 실차 타이어 휠의 진동 실험

### 4.1 도로 주행용 실험장치

타이어 휠의 모의 진동 실험을 통한 측정 시스템의 예비 테스트를 수행한 결과 시스템의 1차 적인 신뢰성을 확인할 수 있었다. 앞 절에서 간략히 언급한 바와 같이 실제 도로 주행에서는 타이어 휠의 회전 외에도 도로 상태 및 자동차 주행 속도 등 운전 상태에 따라 매우 복잡하고 다양한 형태의 진동 모드가 관찰될 것이다. 이러한 진동 모드를 효과적으로 측정하고 관찰하기 위해 Fig. 11과 같이 실 도로주행 진동 모드 측정 시스템을 구성하였다.

전체적인 측정 시스템의 구성은 타이어 휠 모의 진동 측정 시스템과 동일하지만 동력 공급원은 자동차 배터리의 12 V 직류를 시거잭(cigar jack)을 통하여 공급받게 하였다. 실험용 자동차가 전륜 구

Fig. 12 Measurement device setup for road test

Fig. 13 Road test

동형으로서 앞바퀴에 가속도계를 장착하면 좀 더 다양한 진동 모드가 관찰될 수 있지만 앞바퀴는 자동차 방향 전환 등으로 틀어지므로 슬립 링 등을 장착하고 지탱할 프레임의 구조를 고려하여 뒷 타이어 휠에 가속도계 및 슬립 링을 장착하였다.

## 4.2 도로 주행 실험 결과 및 분석

타이어 휠에 가속도계를 장착한 후 타이어를 씌우지 않은 상태에서 측정시스템의 작동 상태 등을 미리 파악하기 위한 예비 테스터를 수행하였다. 그 결과 별다른 문제점이 없는 것으로 평가되어 휠에 타이어를 씌운 후 실제 도로 주행 테스트를 수행하기로 하였다. Fig. 12는 도로 주행 실험을 하기 위해 가속도 센서 및 슬립 링 등을 타이어 휠에 장착하고 타이어를 씌운 상태, 즉 도로 주행 실험 직전의 모습을 나타낸 것이다.

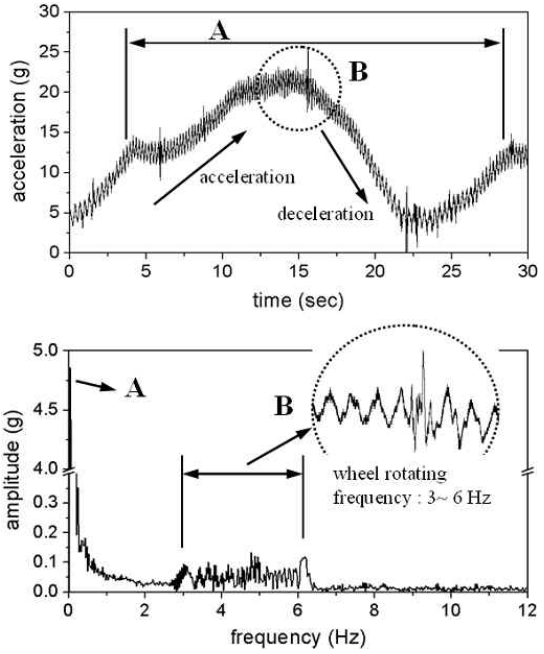


Fig. 14 Acceleration and deceleration mode of rotating tire wheel during road test (maximum car speed: about 40 km/h)

도로 주행 실험은 우선 연구원 내의 차량 통행이 한적한 시간 및 도로를 이용하여 비교적 저속에서 수행하였다. Fig. 13은 연구원 내에서 도로 주행 실험을 수행하고 있는 장면을 보여주는 것이다. 실제 도로 주행 실험에서도 비교적 저속이지만 측정시스템은 별 문제없이 잘 작동하였다.

Fig. 14는 연구원 내 도로 주행 실험 결과에 대한 가속도 변화 및 주파수 분석 결과를 보여주는 것이다. 주행 실험은 최저 약 20 km/h에서 최고 약 40 km/h의 속도 범위에서 수행되었다. 측정된 가속도 신호를 관찰해 보면 가속과 감속을 거쳐 다시 가속되는 주행 상태를 알 수 있으며, 최저속도에서 약 5 g, 최고속도 부근에서는 약 20 g에 해당하는 가속도 크기를 보이고 있다. 최고속도는 최저속도의 2배가 되는데 각가속도($\omega$)는 타이어 휠의 회전속도에 비례하지만 가속도는 각가속도의 제곱에 비례하므로 최고속도에서의 가속도는 최저속도에서의 가속도의 4배에 해당하는 것을 알 수 있다. 특히 가속도 신호의 21~24초 부근에서 관찰

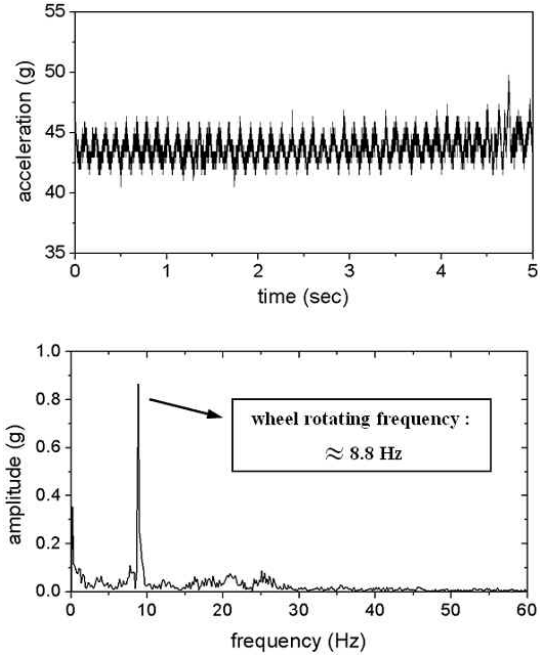


Fig. 15 Vibration mode of rotating tire wheel during road test nearly constant car speed (maximum car speed: about 60 km/h)

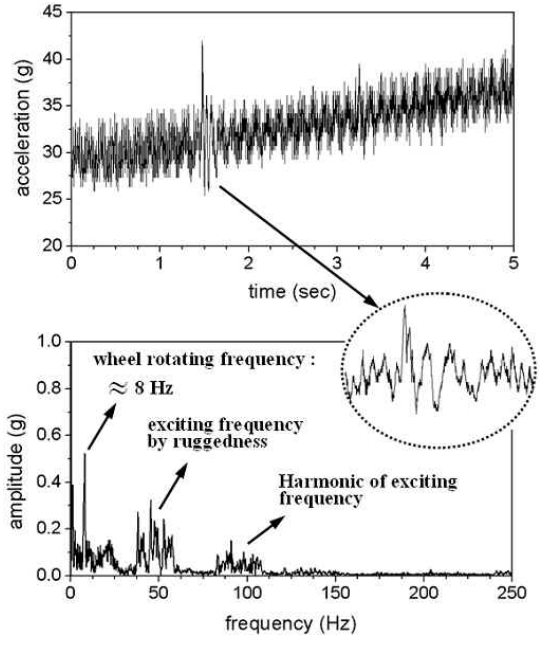


Fig. 16 Acceleration mode of rotating tire wheel by ruggedness on road edge speed

된 비교적 큰 진폭의 요동은 과속 방지턱을 통과할 때의 외란인 것으로 생각된다.

주파수 분석 결과를 보면 가속 및 감속 주기에 해당하는 낮은 주파수, 큰 진폭의 신호(A)가 관찰되고, 타이어 휠의 회전 주파수에 해당하는 3~6 Hz의 신호가 낮은 진폭으로 관찰되었다. 이 주파수 영역은 앞에서 설명한 최저속도와 최고속도의 영역에 해당하는 것이다.

Fig. 15는 가속과 감속이 반복되는 주행을 측정한 Fig. 14와 다르게 자동차의 주행 속도가 비교적 일정하게 유지되는 상태에서의 가속도 변화를 측정한 결과이다. 물론 이 경우에는 주행 시 특별한 외력은 작용하지 않은 상태이다. 주행 속도, 즉 타이어 휠의 회전 속도가 비교적 일정하게 유지될 경우 휠의 회전 주파수에 해당하는 특정 주파수만 크게 나타나고 다른 영역에서의 특징적인 주파수는 관찰되지 않았다. 이때 주 주파수는 약 8.8Hz정도이며, 시속 약 60km/h에 해당된다. 가속도 변화에 대한 진폭은 약 0.87g이다.

만약 도로 주행시 노면 상태가 변함에 따라 가속도 신호도 다른 특성을 나타낼 것이다. Fig. 16은 도로의 바깥 가장자리에 있는 차선(도로와 갓길을 구분하는 차선) 상에 안전 주행을 위해 마련된 작은 요철(ruggedness)위를 주행할 경우에 대한 가속도 변화를 측정한 것이다. 도로면이 비교적 고르고 양호한 상태에서 측정한 Fig. 15의 경우와 달리 타이어 휠의 회전 주파수 외에 좀 더 복잡한 신호가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 회전 주파수 영역에서의 진폭은 상대적으로 작게 관찰되었는데, 이는 차량의 속도가 일정하지 않기 때문이며, 여러 신호가 겹쳐 상대적으로 주 주파수 성분의 크기가 감소했기 때문이다. 주파수 분석 결과를 보면 상대적으로 고주파수 영역이 비교적 넓게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 주파수 성분은 요철에 의한 외란에 기인한 것으로 생각된다. 요철의 간격은 비교적 일정하다 할지라도 주행 속도가 변하므로 요철에 의한 외란 주파수는 비교적 넓은 영역의 주파수 특성을 보이고 있다.

## 5. 결 론

자동차 타이어 휠의 진동 에너지를 압전 재료를 이용하여 효율적으로 전기에너지로 변환시키기 위해서는 압전 소자의 동특성이 진동 에너지원의 동특성과 잘 일치되도록 형상 등을 설계해야 한다. 본 연구는 기본적인 진동 에너지원의 동특성을 파악하기 위하여 타이어 휠에 가속도계를 장착하고, 도로 주행 실험을 수행하였으며, 여러 진동 모드에 대해 분석하였다.

자동차 타이어 휠의 진동은 도로 주행시 주행 속도 및 노면의 상태 등 주행 상태에 따라 다양한 진동 특성을 나타내지만 휠의 회전 주파수 성분이 가장 지배적이다. 주행 속도에 따른 휠의 회전 주파수는 본 연구에서 사용한 중형 승용차를 기준으로 볼 때 약 15 Hz (100 km/h) 이하의 낮은 주파수 영역을 이루고 있으므로 압전 소자의 동적 특성을 이 주파수 영역과 일치하도록 설계를 하면 최적의 에너지 변환 효율을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 상대적으로 높은 주파수 성분을 보이는 가진 주파수(exciting frequency)는 노면의 상태에 크게 좌우되며 진폭이 상대적으로 작아 에너지원으로서의 활용성은 적다.

## 후 기

본 과제는 지식경제부 “자기유지 WBAN/USN용 u-scavenging 기술개발” 과제로 수행된 연구결과로 관계자에게 감사드린다.

## 참 고 문 헌

1) S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, “A Study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes,” Computer Communications, Vol. 26, 2003, pp. 1131-1144.
2) 한국과학기술연구원, “유비쿼터스 마이크로 동력원 개발에 관한 연구,” 기초기술연구회 보고서, 2008.
3) 표철식, 채종석, “차세대 RFID/USN 기술 발전 전망,” 한국통신학회지, 제 24권, 제 8호, 2007, pp. 7-13.
4) 금명훈, 김경호, 이승엽, 고병식, “압전 재료를 이용한 진동에너지 변환 전력발생 시스템 해석 및 설계,” 대한기계학회논문집 A권, 제 28권, 제 6호, 2004, pp. 717-725.
5) E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, L. Petit, and D. Guyomar, “A Comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems,” Sensors and Actuators A 126, 2006, pp. 405-416.
6) Y. B. Jeon, R. Sood, J.-h. Jeong, and S.-G. Kim, “MEMS power generator with transverse mode thin film PZT,” Sensors and Actuators A 122, 2005, pp. 16-22.
7) M. El-hami, P. Glynne-Jones, N. M. White, M. Hill, and S. Beeby, “Design and fabrication of a new vibration-based electromechanical power generator,” Sensors and Actuators A 92, 2001, pp. 335-342.
8) P. Kindt, P. Sas, and W. Desmet, “Measurement and analysis of rolling tire vibrations,” Optics and Lasers in Engineering, 2008.
9) 김병삼, “자동차 알루미늄 합금 휠의 진동 특성에 관한 연구,” 한국공작기계학회논문집, 제14권, 제3호, 2005, pp. 122-127.
10) T. K. Lee, and B. S. Kim, “Vibration analysis of automobile tire due to bump impact,” Applied Acoustics 69, 2008, pp. 473-478.