

회전하는 타이어의 동특성을 고려한 진동에너지 하베스터 성능 예측

나혜중*.#

*영남대학교 공업기술연구소

Performance Prediction of Vibration Energy Harvester considering the Dynamic Characteristics of Rotating Tires

Hae-Joong Na*.#

*Institute of Industrial Technology, Yeungnam UNIV.

(Received 02 September 2020; received in revised form 28 September 2020; accepted 05 October 2020)

ABSTRACT

In general, tires require various sensors and power supply devices, such as batteries, to obtain information such as pressure, temperature, acceleration, and the friction coefficient between the tire and the road in real time. However, these sensors have a size limitation because they are mounted on a tire, and their batteries have limited usability due to short replacement cycles, leading to additional replacement costs. Therefore, vibration energy harvesting technology, which converts the dynamic strain energy generated from the tire into electrical energy and then stores the energy in a power supply, is advantageous. In this study, the output voltage and power generated from piezoelectric elements are predicted through finite element analysis under static state and transient state conditions, taking into account the dynamic characteristics of tires. First, the tire and piezoelectric elements are created as a finite element model and then the natural frequency and mode shapes are identified through modal analysis. Next, in the static state, with the piezoelectric element attached to the inside of the tire, the voltage distribution at the contact surface between the tire and the road is examined. Lastly, in the transient state, with the tire rotating at the speeds of 30 km/h and 50 km/h, the output voltage and power characteristics of the piezoelectric elements attached to four locations inside the tire are evaluated.

Key Words : Vibration Energy Harvesting(진동에너지하베스팅), Piezoelectric Element(압전소자), Tire(타이어), FEM(유한요소해석), Output Voltage(출력전압), Power(전력)

1. 서 론

자동차는 단순히 내연기관으로 구동하는 이동

수단에서 안정성과 편리성을 추구하는 스마트 전자제품으로 변화되고 있다. 차량 운전자의 안전을 보장하고 편의를 돕기 위한 제품으로는 차량용 레이다, 타이어 공기압 감지 시스템, 원격시동 장치, 지리정보 시스템 등이 있다^[1]. 그 중에서 차량의 하중을 지지하면서 구동력 및 제동력 전달, 차량

Corresponding Author : veritas0811@ynu.ac.kr

Tel: +82-53-810-3891, Fax: +82-53-810-4685

방향 선회 및 유지, 노면의 충격완화작용 등의 기능을 하는 유일한 부품이 타이어다. 이러한 기능을 만족하기 위해서 타이어에 각종 센서를 내장하여 유용한 제어 정보를 실시간 측정할 수 있는 연구가 꾸준히 진행되었다^[2]. 그런데 타이어의 다양한 정보를 실시간 측정하고 전송하기 위해서는 각각의 센서를 구동할 수 있는 배터리와 같은 안정적인 전원공급 장치가 필요하다. 일반적으로 타이어에 장착되는 배터리는 평균 수명이 짧아 주기적으로 교체되어야 하고 그에 따른 비용이 추가될 뿐만 아니라 장착 공간이 작아 크기가 제한된다는 문제점이 있다^[2]. 그래서 최근에는 전력 소모가 아주 작은 저전력 MEMS 부품을 타이어에 사용하거나 배터리에 의존하지 않는 에너지 하베스팅 기술을 접목한 자체 전원공급 장치 개발에 주목하고 있다^[3-4]. 에너지 하베스팅은 주변의 분산된 에너지를 수집하여 사용 가능한 전기 에너지로 변환하는 기술^[6-7]로 타이어 내부에서 발생하는 진동 및 동역학 에너지로부터 에너지 변환 방식을 통해 전기 에너지를 만들고 저장하여 센서 장치에 전원을 공급하는데 적용되고 있다. 이에 에너지 하베스팅 방법을 적용한 타이어와 관련된 기술들이 잇따라 소개되고 성능평가를 위한 다양한 실험적, 해석적 연구결과가 발표되었다. 그중에서 진동 에너지 하베스팅은 진동이나 충격 등의 운동에너지를 전기 에너지로 변환해주는 기술로 압전물질을 이용하는 방식과 자석과 코일을 이용한 전자기발전방식 등이 있다^[2, 8-9]. 타이어 환경특성을 고려한 연구도 진행되었는데 Kim, S. W.^[10]은 타이어 변형률이 압전물질에 물리적 힘을 가하는 이론적 방법을 통해 동적 특성을 분석하고 타이어 시험기에 시험을 수행하여 이론적 해석의 타당성을 입증하였다. Seo, J. H. 외 3인 등은 타이어 내부에 전자기형 하베스터를 장착하여 타이어가 회전할 때 발생하는 전압을 무선으로 측정하고 해석을 통한 예상전압과 비교하였다^[5]. 최근에는 압전과 열전 에너지 하베스팅 등의 하이브리드 에너지 하베스터 개발도 이루어지고 있는데 Jeong, K. M. 외 4인 등은 패턴형상을 고려한 타이어의 회전효과에 따른 정상상태 조건에서 열-기계적 온도분포를 예측한 연구결과를 소개하였다^[11]. 타이어 환경분석을 위한

연구 외에 노면에서 차량으로 전달되어 소산되는 진동에너지를 활용한 공진형 발전기의 에너지 변환 가능성도 검토되고 있다^[5]. 이처럼 타이어와 관련된 에너지 하베스팅 연구가 다양하게 진행되고 있지만 타이어용 진동에너지 하베스터 성능 위주의 실험적 평가에 국한되고 타이어 환경 및 노면과의 접촉면 등을 고려한 에너지수확 시스템에 대한 분석 연구가 부족하다.

본 연구에서는 노면위로 회전하는 타이어의 동적 특성을 고려한 진동에너지 하베스팅 시스템을 개발하기 위해서 정적 상태(static state)와 동적 상태(transient state) 조건에서 유한요소해석을 통해 진동 하베스터에서 발생하는 전압과 전력을 예측하였다. 먼저, 모달해석을 이용하여 진동에너지 하베스터와 타이어 모델의 고유진동수와 모드 형상을 파악하여 회전속도에 해당되는 가진 주파수 영역과 비교·검토하였다. 정적상태 조건에서 타이어의 노면과의 접촉조건 및 접촉압력을 검토하여 타이어 내부에 부착된 진동에너지 하베스터의 전압 분포 등을 파악하였다. 마지막으로 타이어의 회전에 해당되는 가진 주파수와 최적 부하저항을 적용하여 타이어를 고속으로 회전시켰을 때의 타이어 변형에 따른 출력 전압 및 전력 특성을 예측하였다.

2. 진동에너지 하베스팅 개요

2.1 진동에너지 하베스팅 기본원리

타이어가 회전하면서 노면과 닿는 부분에 접촉면이 발생하면 타이어는 응력변화에 의한 변형률이 생긴다. 이때 타이어 내부에 부착된 진동에너지 하베스터에 응력이 가해져서 전압을 발생시키는 압전효과(piezoelectric effect)로 인해 Fig. 1과 같이 진동 에너지가 발생된다. 하베스터로부터 변환되어 발생하는 전기 에너지는 하베스터 압전재료의 특성에 따라 외부 자극에 선형성을 갖는다.

외부에서 유입되는 기계적인 에너지는 진동에너지 하베스터에서 교류 신호로 발생되고 이 전기 에너지는 정류회로를 거쳐 직류 신호로 변환되어 축전지 등에 저장된다. 여기서 에너지 변환 효율을 높이기 위해서는 외부 진동이 효과적으로 진동

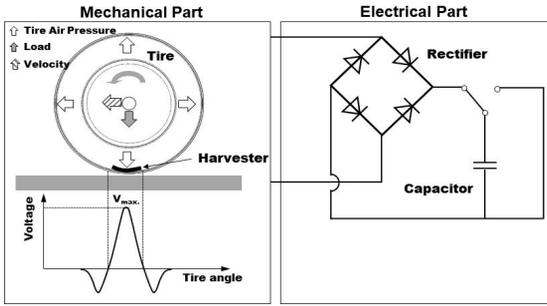


Fig. 1 Schematic of tire vibration energy harvesting system

에너지 하베스터에 전달할 수 있도록 기계적인 임피던스 매칭이 이루어져야 하고 하베스터 압전재료의 기계-전기 결합계수가 커야하며, 변환된 에너지를 외부회로로 전달하기 위해서 전기적인 임피던스 매칭도 이루어져야 한다^[12].

이와 같은 타이어 변형에 의한 진동에너지 하베스팅 원리는 기계-전기적 연성으로 결합된 모델로 나타낼 수 있고, 이때 진동에너지 하베스터의 성능 예측은 기계-전기적 연성 지배방정식과 경계조건을 이용한 유한요소해석 정식화로부터 가능하다.

2.2 진동에너지 하베스터 유한요소해석 정식화

진동에너지 하베스터의 응력과 전압의 관계는 유한요소에서는 변형률 S 와 전기장 E 를 이용하여 응력 T 와 전하 D 형식 (Stress-charge form)으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)의 항들 중 c^E 는 전기장 E 의 값이 고정된 상태에서의 강성이며, ϵ^S 는 변형률 S 의 값이 고정된 상태에서의 유전율을 의미한다.

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i &= e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik}^S E_k \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서,

T_{ij} : stress vector, c_{ijkl}^E : elastic stiffness

S_{kl} : elastic strain vector, e_{kij} : piezoelectric matrix

E_k : electric field intensity

D_i : electric flux density

ϵ_{ik}^S : dielectric permittivity

식 (1)로부터 영역 내 지배방정식과 경계조건을 고려한 후 요소 단계에서의 압전 구조물에 대한 유한요소 방정식은 다음과 같다^[13].

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\hat{U}} \\ \dot{\hat{\Phi}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} C_d & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\hat{U}} \\ \dot{\hat{\Phi}} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K_{UU} & K_{U\Phi} \\ K_{U\Phi}^t & K_{\Phi\Phi} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U} \\ \hat{\Phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{F} \\ \hat{Q}_e \end{pmatrix}$$

$$T_{ij,j} + f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (2)$$

$$D_{i,i} = 0, \quad T_{ij} n_j = t_i, \quad D_i n_i = -q_s$$

여기에서,

$M = \sum_e m$: mass, C_d : structural damping

$K_{UU} = \sum_e k_{uu}$: structural stiffness

$K_{U\Phi} = \sum_e k_{u\phi}$: piezoelectric coupling

$K_{\Phi\Phi} = \sum_e k_{\phi\phi}$: dielectric permittivity

$\hat{F} = \sum_e \hat{f}$: force, surface pressure, thermal strain

$\hat{Q}_e = \sum_e \hat{q}_e$: negative electric charge, surface charge density, volume charge density, thermo piezoelectric charge

U : displacement, V : voltage

식 (2)로부터 타이어의 내부에 부착된 진동에너지 하베스터 기계-전기 연성 해석은 수치해석 프로그램인 ANSYS에서 제공되는 Piezo & MEMS ACT 모듈을 사용하여 진행되었다.

3. 유한요소 모델

타이어의 정적해석 및 동적해석을 통해 진동에너지

지 하베스터에서 발생하는 출력전압과 전력을 예측하기 위해서 유한요소모델 선정, 재료 특성, 모델링 및 동특성을 고려할 수 있는 수행조건들을 결정하였다.

3.1 타이어 모델

본 연구에서는 중형 세단에 사용되는 크기를 대상 모델로 선정하였으며 Fig. 1의 (a)는 타이어 전문생산 회사에서 제공하는 타이어의 형상과 규격이다^[14]. 타이어의 크기는 단면폭/편평비/림 외경의 순서로 표기된다. 해석에 사용한 타이어 모델은 215-55R-16으로 단면폭 215 mm, 편평비 55%, 림 외경 16 inch, 마지막으로 타이어 외장은 대략 650 mm이다.

Fig. 2 (a)의 타이어 크기를 토대로 유한요소모델을 생성하기 위해서 Fig. 2의 (b)와 같이 모델링하였다. 타이어 트레드(tread)와 휠(wheel)의 패턴은 제조사나 차량 등에 따라 복잡하고 다양한 형상을 가지지만 해석 예측 가능성을 확인하기 위해서 형상을 단순화하였다. 그리고 타이어의 구조는 고무층인 트레드, 브레이커(breaker), 카커스(carcass)로 구성된다. 트레드는 노면과 직접 접촉하는 부분으로 고무층에 해당된다. 브레이커는 트레드와 카커스의 중간에 위치하는 코드 벨트(cord belt)로써 외부로부터 충격이나 외부 간섭에 의한 손상을 방지하기 위해 여러 겹을 사용한다.

카커스는 타이어가 받는 하중을 지지하고 외부 충격을 흡수하여 공기압을 유지시켜주는 기능을 한다^[15].

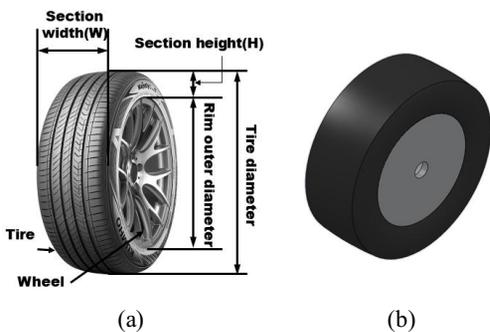


Fig. 2 Tire specifications for Sedans

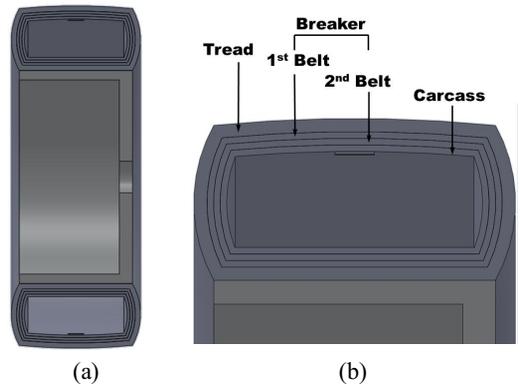


Fig. 3 (a) Cross section and (b) Inner material parts of Tire

Table 1 Material Properties

Component	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (Pa)	Poisson's Ratio
Tread	1500	3.2E+8	0.45
Nylon Belt	1150	8.1E+8	0.44
Steel Belt	2500	2.7E+10	0.45
Carcass	1150	1.2E+9	0.35
Aluminum Alloy	2770	7.1E+10	0.33
Concrete	2300	3E+10	0.18

타이어의 구조는 Fig. 3과 같이 트레드, 브레이커에 해당되는 섬유 벨트와 스틸 벨트, 마지막으로 카커스로 구성하였다.

타이어 내부 재료의 특성은 트레드는 고무소재, 브레이커는 각각 나일론 벨트와 금속 벨트, 마지막으로 카커스로 구성하였고, 휠은 가볍고 강성이 좋은 알루미늄 알로이 휠로 정했다. 타이어와 접촉되는 도로면은 콘크리트로 하되 마른 상태의 콘크리트와 타이어의 마찰계수는 0.8로 결정하였다^[16-17]. Table 1은 타이어 내부 재료와 도로면의 콘크리트의 재료 물성치이다.

3.2 진동에너지 하베스터 모델

타이어 내부에 부착할 진동에너지 하베스터는 길이가 너무 길면 회전하는 타이어에서 나오는 모든 변형률이 하베스터에 전달되지 못하기 때문에

타이어가 변형되는 부분보다 넓게 하는 것은 적당하지 않다^[10]. 따라서 타이어와 노면과의 접촉면적을 고려하여 크기를 결정해야 한다. 해석에 사용된 진동에너지 하베스터(디지털에코사, DE-H)는 길이 50 mm, 너비 30 mm, 두께 0.5 mm 패치 형태의 직육면체에 해당된다. 또한 타이어 내부에 부착되기 위해 사용된 접착제는 합성수지의 일종인 Resin Epoxy이며 뛰어난 접착력, 우수한 방청력, 기계적 물성과 전기 절연성을 갖고 있다. 해당 Epoxy는 진동에너지 하베스터와 타이어를 부착하도록 Fig. 4와 같이 타이어 곡면에 맞게 모델링하였다. 또한 Table 2와 Table 3은 해석에 사용된 접착제와 하베스터의 물성치이다.

또한, 해석을 수행하기 전 진동에너지 하베스터의 기본적인 특성을 파악하기 위해서 발생전압에 의한 변형 곡선을 확인하였다. Fig. 5는 하베스터의 한쪽 끝은 고정시키고 0 V에서 100 V까지 전압 변화시켰을때 하베스터의 변위 특성을 나타낸 그래프이다. 전압 변화에 따라 하베스터가 선형적으로 변형되는 것을 알 수 있다. 따라서 타이어가

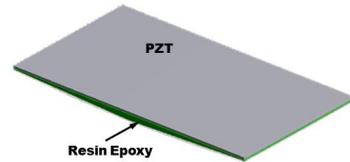


Fig. 4 Resin Epoxy and PZT

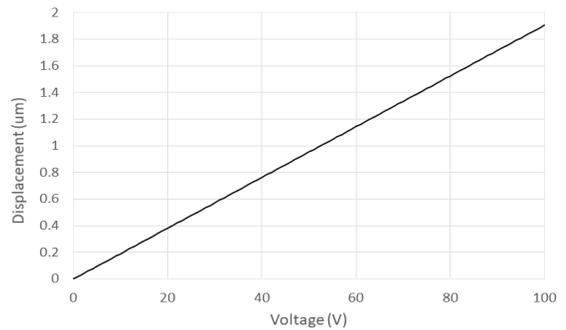


Fig. 5 The displacement-voltage relation of harvester

변형되면 하베스터가 변형되고 이에 전압이 발생되어 최종적으로 하베스터의 전력을 예측할 수 있다.

Table 2 Properties of the resin epoxy

Component	Density (kg/m ³)	Young's Modulus(Pa)	Poisson's Ratio
Resin epoxy	1160	3.8E+9	0.35

Table 3 Material Properties

Property	PZT(DE-H)	
	Density(kg/m ³)	-
Piezoelectric Strain (C/m ²)	e ₃₁	-40
	e ₃₃	10.2
	e ₁₅	31.8
Permittivity at Constant Stress	ε ₁₁ ^S	510
	ε ₃₃ ^S	2700
Stiffness at Constant E field	C ₁₁ ^E	1.2E+11
	C ₁₂ ^E	6.9E+10
	C ₁₃ ^E	-6.6E+10
	C ₃₃ ^E	9.6E+10
	C ₄₄ ^E	2.3E+10
	C ₆₆ ^E	2.4E+10

3.3 해석 조건

타이어에 부착할 하베스터(이하 압전소자라고 함.)는 타이어 내측 중심 4곳에 부착되고 Fig. 6의 (a)처럼 압전소자 1(PZT 1)이 초기 노면에 접촉되고, 타이어가 회전하면 압전소자 2(PZT 2)에서 순차적으로 노면에 접촉되도록 모델링하였다. 또한, 압전소자는 Fig. 6의 (b)처럼 타이어 중심 방향으로 폴링(poling) 되도록 하였는데 초기에 압전소자 1과 3은 하중방향, 압전소자 2와 4는 전방으로 폴링하였다. 압전소자 상부는 전압이 발생하지만 Epoxy와 접촉되는 압전소자 하부는 0 V(Ground)로 설정하여 전위차가 발생하도록 하였다.

다음은 타이어 내부 공기압과 하중 조건을 적용해야 하는데 일반적으로 차량 주행 시 주입하는 공기압은 약 36~37 psi이며 250 kPa에 해당된다. 지면에 가해지는 타이어 하중은 중형차 공차중량 1,520 kg에 평균 성인 남성 운전자 1명의 몸무게

인 80 kg을 추가하였다. 이를 4개의 타이어로 나누어 Fig. 7처럼 타이어에서 지면방향으로 400 kg(3924 N)이 작용하도록 산정하였다. 마지막으로 타이어의 구동에 따라 노면의 이동이 발생하지 않도록 노면으로 모델링한 빔의 하부는 모든 방향의 이동을 구속시켰다. 위의 해석조건들을 이용하여 최종적인 유한요소모델은 타이어, 휠, 압전소자, 접착제용 Epoxy, 그리고 노면으로 구성된다. Fig. 8은 해석 수행을 위한 28,018개의 절점과 8,477개의 요소로 구성된 유한요소모델이다.

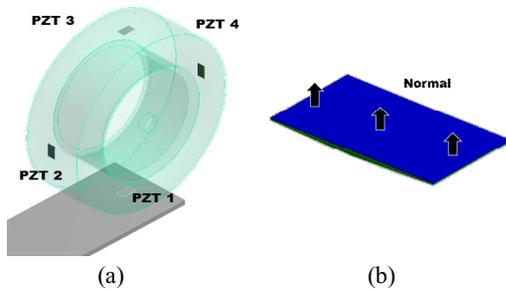


Fig. 6 (a) PZT attached to the inside of a tire and (b) Poling direction(normal)

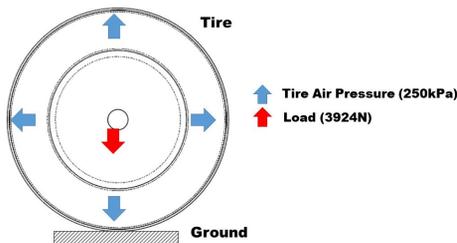


Fig. 7 Tire pressure and load

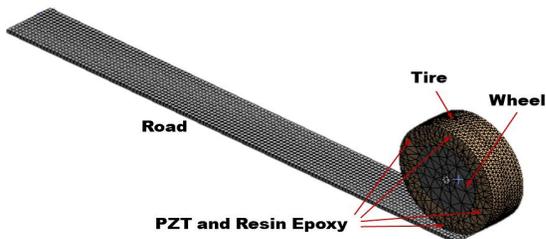


Fig. 8 Finite element analysis model

4. 유한요소해석

Fig. 8의 유한요소모델로부터 정적상태와 동적상태 조건에서 타이어의 동적특성을 고려한 유한요소해석을 수행하고, 압전소자에서 발생하는 출력전압과 전력 특성을 예측하였다.

4.1 모드해석

모드 해석을 통해 타이어와 압전소자별 고유진동수 및 이에 대응하는 고유진동모드 형상을 계산하였다. 해석 결과, 타이어와 압전소자의 고유진동수 대부분이 고주파수대역에서 발생하였으나 동적해석 시 타이어 회전 속도가 저주파수대역이기 때문에 고주파수대역은 검토 대상에서 제외하고 1~3차 모드만을 확인하였다. Fig. 9의 타이어의 경우, 수직하중과 접선방향의 노면과의 마찰력으로 인해 328 Hz에서 1차 굽힘 모드가 나타나고 446 Hz와 449 Hz에서 forward/backward 하는 travelling mode와 같은 형상이 나타났다^[8].

압전소자의 모드해석은 압전재료의 특성을 파악하기 위해서 다른 고정 조건 없이 해석을 수행하였다.

Fig. 10의 해석 결과, 고유진동수가 고주파수대역에서 발생하였고 대칭모드 형상을 가짐을 알 수 있다.

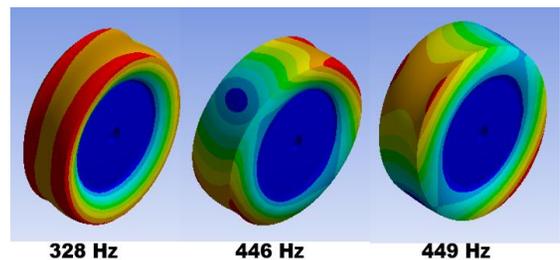


Fig. 9 Mode shapes of tire model

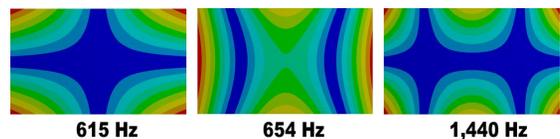


Fig. 10 Mode shapes of piezoelectric element model

4.2 정적해석

타이어의 하중 및 차체 중량에 따라서 타이어 변형량의 접촉면 길이가 달라진다. 부하저항이 없는 개방 회로(open circuit) 상태에서 노면에 접촉된 타이어에 하중을 주어 변형이 일어났을 때, 타이어의 변형 형상과 접촉면을 검토하고 압전소자에서 발생하는 전압을 확인하였다.

Fig. 11의 (a)를 살펴보면 타이어가 바닥면에 접촉하면서 변형이 일어난 것을 알 수 있다. 접촉면에서는 타이어 내측에서 변형되었고 접촉면을 벗어나는 부분에서는 타이어의 외측으로 변형되었다. 다시 말해서, 타이어가 회전하면 노면과 접촉 전에 타이어가 외측으로 변형되고 접촉되는 순간에는 타이어가 내측으로 변형되었다가 접촉 후에는 다시 외측으로 변형된다는 것이다. 이 순간에 압전소자는 전압의 부호가 변경되면서 전위차가 발생된다. 그리고 Fig. 11의 (b)는 타이어가 하중에 의해 노면과의 접촉되는 순간 접촉면의 압력 분포를 나타낸 것이다. 타이어의 중심부에서 압력이 가장 크기 때문에 해당 위치에 압전소자를 부착하였다. 또한, 압력을 받는 부위 길이가 45 mm 정도이기 때문에 길이가 최대 50 mm인 압전소자를 타이어 내부 가운데에 부착하는 것이 가장 효율적으로 전압을 생산할 수 있다.

Fig. 12는 타이어가 노면과 접촉 후 접촉면에서 발생하는 50 mm 길이의 압전소자 1(PZT 1)에서 전압 분포를 나타낸 것이다. 압전소자의 좌우측과 가운데 부위는 각각 다른 방향으로 변형되어 전압이 서로 다른 부호를 가진다. 이것은 압전소자가 둥근 타이어에 부착되어 타이어의 변형에 따라 변형되기 때문이다.

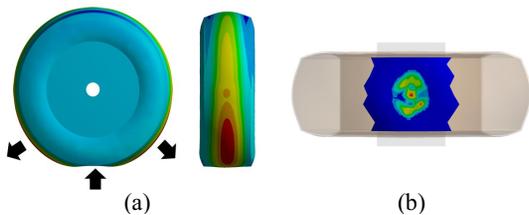


Fig. 11 (a) Tire deformation and (b) pressure distribution parts by load and contact with road surface

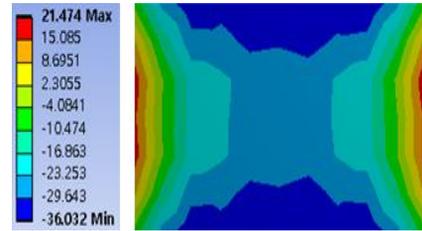


Fig. 12 Piezoelectric element voltage distribution(PZT 1)

따라서 압전소자의 길이는 타이어와 노면과의 접촉면을 고려하여 결정해야 전압 손실을 최소화할 수 있다.

4.3 동적해석

도로교통법 시행 규칙 제 19조(자동차 등과 노면전차의 속도)에 따라 주거지역, 상업지역 및 공업지역 내 모든 일반도로의 최고속도를 기존 60 km/h에서 50 km/h로, 좁은 골목과 같은 동네도로는 30 km/h로 제한된다^[19]. 본 논문에서 타이어의 회전 속도를 30 km/h와 50 km/h로 설정하고 타이어를 회전시켜 시간에 따른 전압량을 파악하였다.

그리고 압전소자는 최적 부하저항을 연결하여 발생하는 출력 전압과 전력을 도출하였다. 부하저항은 주파수에 따라 변하므로 가진주파수에 맞추어 부하저항을 계산하고 해당 저항을 Fig. 13과 같이 압전소자와 연결하면 압전소자에 전류가 흐르게 되어 전력을 구할 수 있다. 30 km/h 주행 시 가진주파수는 4.1 Hz이고 50 km/h 주행 시 가진주파수는 6.8 Hz일 때, 최적 부하저항은 각각 557 kohm, 317 kohm이다.

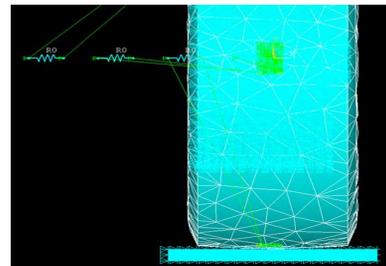


Fig. 13 Optimal load resistance circuit model connected to piezoelectric element

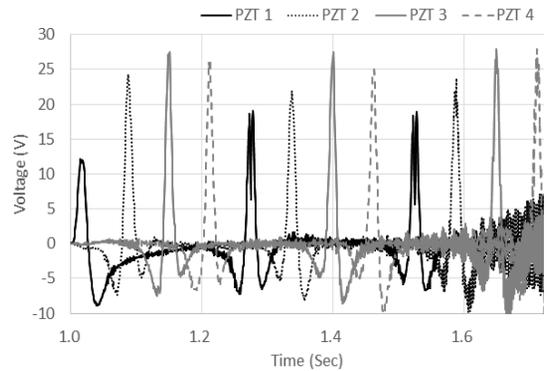
그리고 부하저항이 추가된 동적상태 해석과정은 초기 1초까지는 정지상태에서 타이어가 공기압과 하중에 의해 접촉이 수렴되도록 하였고 1초 이후부터 타이어의 회전각을 일정하게 변화시켜 등속운동상태에서 안정적으로 해석이 되도록 하였다. 그리고 압전소자에서 출력되는 전압을 정류과정을 거쳐 직류로 변환한 후 전력을 예측해야 하지만 본 연구에서는 압전소자에서 발생하는 전압을 단락 회로(short circuit) 상태에서 외부회로가 있는 것으로 가정하고 단순 전력량을 산출하였다.

(1) 저속주행

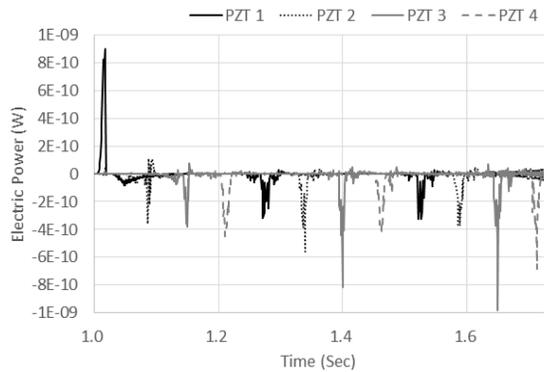
타이어 직경이 650 mm이면 타이어 원주는 2,050 mm가 된다. 주행속도가 30 km/h 일 때 1초당 약 4회전 일어나므로 타이어는 1회전에 0.24초가 걸리는데 반복 회전을 통해 4개의 압전소자의 전압 특성을 확인코자 최소 2회전 이상 구동하도록 계산하였다.

Fig. 14는 30 km/h 회전 시 타이어 내부에 부착된 4군데 위치에서의 압전소자별 출력전압과 전력을 나타낸 결과이다. Fig. 14 (a)의 4개의 압전소자별 출력 전압은 -10 V에서 30 V까지 변화하면서 동일한 패턴으로 나타났다. 또한, 압전소자에서의 출력전압은 타이어가 회전할때마다 모두 조금씩 높아졌다. 특히, 압전소자 1(PZT 1)은 타이어와 노면과의 접촉면에 해당되기 때문에 처음에는 다른 압전소자보다 출력전압이 작다가 회전하면서 점점 더 상승하는 것을 알 수 있다.

압전소자의 출력전압 그래프 형태를 구체적으로 확인하기 위해서 Fig. 15의 압전소자 1(PZT 1)의 출력전압을 살펴보면, 시간변화에 따라서 - 전압과 + 전압이 반복적으로 나타난다. - 전압이 나타나는 것은 압전소자가 부착된 타이어 하부가 노면에 접촉하기 바로 전과 노면에서 떨어진 후이다. 이것은 압전소자의 상부(타이어와 부착되어 있는 얇은 반대쪽면)가 압축력을 받았기 때문이다. 반대로 + 전압이 나타나는 것은 타이어의 하부가 노면에 접촉하는 순간 압전소자의 상부가 인장력을 받기 때문이다. 나머지 압전소자 2~4(PZT 2~4)도 압전소자 1(PZT 1)과 동일한 형태의 출력전압 경향을 가진다.



(a)



(b)

Fig. 14 (a) Output voltage and (b) Electric power of piezoelectric elements in 4 positions at 30 km/h

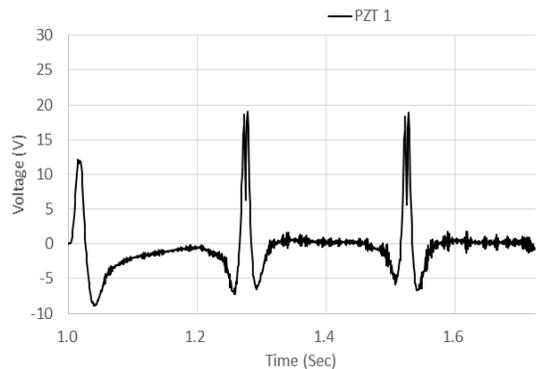


Fig. 15 Output voltage of piezoelectric element 1(PZT 1)

다음은 부하저항에 의한 압전소자의 전력도 타이어가 회전할 때마다 모두 조금씩 높아졌다. Fig. 14 (b)의 전력을 살펴보면 압전소자 1(PZT 1)이 초기에 전력이 높은 이유는 0에서 1초동안 타이어가 정지된 상태에 있을 때 타이어의 공기압 및 하중에 의해 변형이 생긴 상태에서 회전함에 따라 순간 전력이 높게 나타났다. 그리고 총 4개의 압전소자 중에서 압전소자 3(PZT 3)이 순간 최대 전력이 1 nW 정도 높게 나타났다.

주행속도가 50 km/h 일 때 1초당 약 7회전 일어나므로 타이어는 1회전에 약 0.15초가 걸린다. 앞서 저속주행처럼 반복 회전을 통해 전압 특성을 확인코자 고속주행도 최소 2회전 이상 구동하도록 설정한 후 해석을 진행하였다.

(2) 고속주행

Fig. 16은 50 km/h 회전 시 타이어 내부에 부착된 4군데 위치에서의 압전소자별 출력전압과 전력을 나타낸 결과이다. Fig. 14의 결과와 유사하게 4개의 압전소자별 출력 전압은 -10 V에서 30 V까지 변화하면서 동일한 패턴으로 나타났다. 또한, 압전소자에서의 출력전압은 타이어가 회전할 때마다 모두 조금씩 높아졌다. 특히, 압전소자 1(PZT 1)은 타이어와 노면과의 접촉면에 해당되기 때문에 처음에는 다른 압전소자보다 출력전압이 작다가 회전하면서 점점 더 상승하는 것을 알 수 있다. 다음은 Fig. 16 (b)의 부하저항에 의한 압전소자의 전력을 살펴보면 압전소자 1(PZT 1)이 초기에 순간 전력이 0.8 nW 정도 높은 것을 제외하고는 모두 전력이 미세하게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 노면 위에 회전하는 타이어의 특성을 고려한 진동에너지 하베스터의 성능을 예측하기 위해서 정적 상태와 동적 상태 조건에서 유한요소해석을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 타이어의 동특성을 고려하기 위해서 실제 타이어 크기, 휠, 재료 물성, 타이어 내부에 부착된 압전소자 선정 및 크기, 접촉제용 에폭시 수지, 그리고 노면특성을 적용한 유한요소모형을 구성하였다. 따라서 타이어의 패턴을 제외한 실제와 유사한 해석 환경에서 반복성과 재현성을 시도해 볼 수 있을 것으로 사료된다.
2. 타이어와 압전소자의 모달 해석을 수행한 결과, 고유진동수가 대부분 고주파수대역이고 모드 형상은 1차 굽힘, 2, 3차는 대칭형을 보였다. 동적 해석 시 타이어 회전 속도가 저주파수대역이기 때문에 공진특성이 고려 대상이 아님을 확인하였다.
3. 타이어에 작용하는 하중과 공기압에 대한 정적 해석을 통해서 압전소자의 길이는 타이어와 노면과의 접촉면을 고려하여 결정해야 전압 손실을 최소화할 수 있다.
4. 타이어 내부에 부착된 4개 지점의 압전소자 동

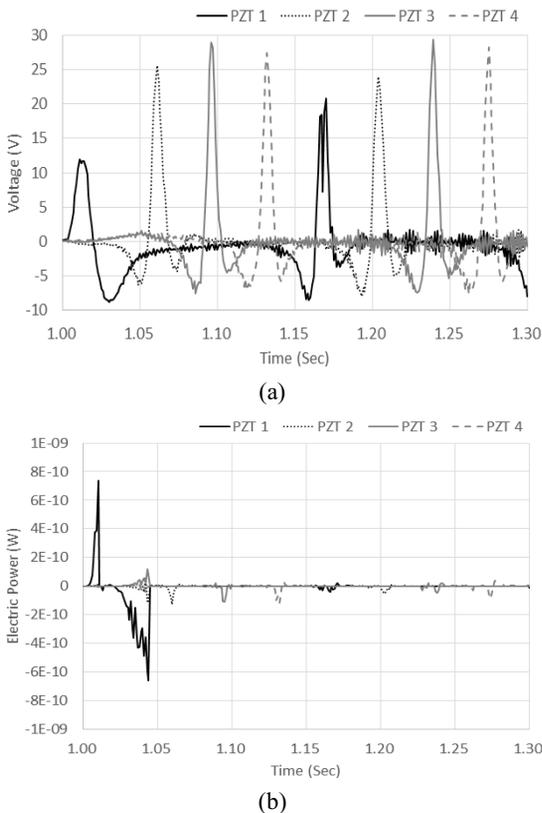


Fig. 16 (a) Output voltage and (b) Electric power of piezoelectric elements in 4 positions at 50 km/h

적해석 결과, 저속주행(30 km/h)에서는 비교적 안정적인 출력전압과 전력값을 나타냈으나 고속주행(50 km/h)에서는 출력값이 미비하게 나타나는 결과를 얻었다. 최적의 부하저항을 적용하더라도 타이어의 내부 구조 상 강성이 높은 재료물성치를 적용하여 고속 회전 시 타이어의 변형이 작아 패치형태의 압전소자의 변형률이 작게 나타났고 그 결과로 미소전력을 얻은 것으로 판단되어 캔틸레버 빔 형태의 소자 변경과 더불어 타이어 구조 및 트레드 패턴형상 설계 개선 과정이 필요하다.

5. 저속 및 고속 주행 조건에서 시간에 따른 전압 및 출력 변화를 확인함으로써 에너지 변환 예측이 가능함을 알 수 있었고 실제 적합한 전력변환장치를 구현한다면 에너지 저장 예측까지 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Chun, J. K., and Cho, P. D, "Technical trend of tire pressure monitoring system", *Electronics and Telecommunications trends*, Vol. 20, No. 6, pp. 166-177, 2005.
2. Kim, K. W., "Energy harvesting technology for smart tire sensors", *Auto Journal*, Vol. 38, No. 1, pp. 54-58, 2016.
3. Seo, J. H., Jhang, K. Y., Lee, H. M., and Kim, Y. C., "Design of electromagnet energy harvester for sensor module of smart tire", *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 28, No. 6, pp. 742-751, 2018.
4. Sadeqi, S., Arzanpour, S. and Hajikolaie, K. H., "Broadening the frequency bandwidth of a tire-embedded piezoelectric based energy harvesting system using coupled linear resonating structure", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 2085-2094, 2015.
5. Choi, J. H., Shin, D. B., and Kim, J. H., "Design of resonance linear electric generator system for vibration energy harvesting in vehicle suspension", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 3357-3362, 2014.
6. Jeong, G. J., "Loss modeling and performance analysis of electromagnetic energy harvesting system using an intermittent energy capturing method", A Thesis for a Master, Chungnam National University, Republic of Korea, 2018.
7. Lee, S. J., Lee, S. W., Shin, H. G., Kim, G. M., and Choi, S. D., "Development of shoe-heating system based on piezoelectric energy harvesting", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 7, pp. 48-55, 2019.
8. Park, H. C., "Vibratory electromagnetic induction energy harvester on wheel surface of mobile sources", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 59-66, 2017.
9. Butt, Z, Pasha, R., Qayyum, F., Anjum, Z., Ahmad, N. and Elahi, H., "Generation of electrical energy using lead zirconate titanate(PZT-5A) piezoelectric material: analytical, numerical and experimental verifications", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 8, pp. 3553-3558, 2016.
10. Kim, S. W., "Experimental study on energy harvesting for environment analysis of tire", A Thesis for a Master, Sogang University, Republic of Korea, 2010.
11. Jeong, K. M., Kang, W. C. Park, Kim, H. S., and Kim, K. W., "Finite element analysis for temperature distribution prediction of steady rolling tires with detailed tread pattern", *The Transactions of the Korean Society Automotive Engineers*, Vol. 22, No. 1, pp. 117-125, 2014.
12. Choi, B. K., Lee, J. Y., Lee, W. H., and Oh, J. G., "A study on the energy scavenging system using piezoelectric effect", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 2, pp. 115-122, 2008.

13. Kim, J. Y., "Understanding piezoelectric vibration energy harvesting I - Fundamentals", HONGEUNG publishing company, 2018.
14. KUMHO TIRE CO., <http://www.kumhotire.com>. (accessed 30 Aug., 2020)
15. "Structure of tires", [http://www.terms.naver.com/structure of tires](http://www.terms.naver.com/structure_of_tires), .Knowledge Encyclopedia(accessed 30 Aug., 2020)
16. Bera, T. K., Bhattacharya, K., and Samantaray. A. K., "Evaluation of antilock braking system with an integrated model of full vehicle system dynamics", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 19, No. 10, pp. 2131-2150, 2011.
17. Zhao, Y. Q., Li, H. Q., Wang, J. and Ji, X. W., "Estimation of road friction coefficient in different road conditions based on vehicle braking dynamics", Chinese Journal of Mechanical Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 982-990, 2017.
18. Kim, S. J., and Savkoor, A. R., "Modal and vibration properties of contacted tires", Korean Society of Automotive Engineers, pp. 1197-1202, 1997.
19. Korea Legislation Research Institute, "Enforcement decree of the road traffic act", https://elaw.klri.re.kr/kor_service/lawView.do, May 28, 2018(accessed 1 Sep., 2020).