

차량 노면 진동을 이용한 공진형 선형 발전기 시스템의 강건최적설계

최지현^a, 김진호^{a*}, 박상신^a, 서태원^a**Robust Optimum Design of Resonance Linear Electric Generator for Vehicle Suspension**Ji Hyun Choi^a, Jin Ho Kim^{a*}, Sang-Shin Park^a, TaeWon Seo^a^a School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ., 280, Daehak-ro, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 712-749, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	18	June	2014
Revised	25	July	2014
Accepted	29	July	2014

Keywords:

Resonance
Linear electric generator
Road vibration
Taguchi method
Optimum design

ABSTRACT

To use vibration energy to generate electricity, a resonance vertical linear electric generator was applied to the suspension of a vehicle in a previous paper. However, the working conditions, including mass change in the vehicle body related to the cargo on board, number of passengers and the temperature difference caused by the operating environment, can influence the permanent magnet, which is the main component of the electric generator. Therefore, a robust optimum design is required to minimize the influences from the diverse operation conditions and maximize the electromotive force of the electric generator. In this paper, a resonance linear electric generator is introduced. Vibration response analysis to find the input velocity of the electric generator and an electromagnetic transient analysis to apply changes in the performance of the permanent magnet are performed. Finally, the optimum value of each design variable is derived using a Taguchi method.

1. 서론

현대의 자동차에서는 물리적 기계 부품들과 열 및 화학적 에너지를 사용하는 자동차 본연의 기계적 요소 이외에 차량 내 전자기기, 편의장치 등을 사용하는 고객의 빈도와 비중이 증가면서 요구되는 전기에너지의 양도 이전의 차량들에 비해 높아지고 있다^{1,2}. 이미 양산되어 활용되고 있는 대표적인 전기에너지 사용 기술인 하이브리드 차량에서도 정차 동작 시 발생하는 에너지를 전기에너지로 변환하는 회생제동 시스템, 배기가스의 열에너지를 활용하는 열전 발전기, 압전소자를 차량 타이어 내부에 장착시켜 발전 기능을 보조하는 등, 일반 배터리 및 내장 전지의 효율적인 방전 및 충전을

위하여 관련 기술이 계속 연구되고 있다³⁻⁵.

이러한 차량 내 전기에너지의 수요를 충족하기 위하여 피스톤과 선형 발전기를 결합시킨 free piston engine linear generator와 휠 내부에 설치되는 in-wheel 발전기 등 기존의 전통적인 발전기의 구조와 설치 위치를 개선한 다양한 차량용 발전기 기술들이 연구되고 있고⁶ 이전 연구에서 Fig. 1과 같은 차량의 현가장치에 적용하여 하체의 수직 진동에너지를 전기에너지로 변환할 수 있고 작은 입력 진동에도 큰 기전력을 기대할 수 있는 공진형 선형 발전기를 제안하였다. 강건최적설계 대상이 되는 선형 발전 시스템은 이전의 연구에서 발전기로서의 기본적인 발전기능과 개선 가능성을 확인하였으며, 본 연구에서는 선형 발전기가 양산차량에 설치되어 실제

* Corresponding author. Tel.: +82-53-810-2441

Fax: +82-53-810-4627

E-mail address: jinho@ynu.ac.kr (Jin Ho Kim).

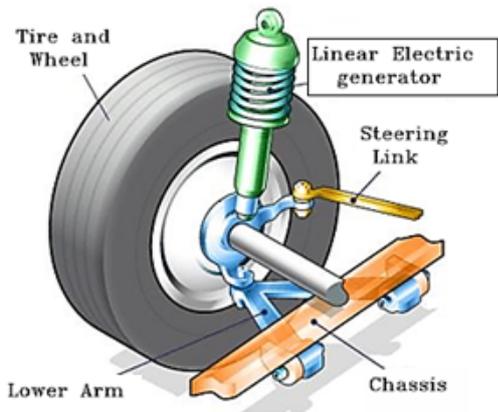


Fig. 1 Install position of the resonance linear electric generator

고객들이 사용하게 되는 다양한 운용 환경을 고려하여 원래의 성능을 최대한 유지하거나 최대한의 성능을 발휘할 수 있도록 하는 설계 변수들의 도출을 목표로 한다.

노면 가진 시, 발전기 아마튜어의 동적 해석을 위해 MATLAB을 활용한 진동 변위해석이 수행되었으며 최적설계의 발전성능검증을 위해 상용 전자기 유한요소 소프트웨어 ANSYS MAXWELL으로 발전량 과도해석을 수행하였다. 진동의 원천이 되는 도로 표면의 조건, 선형 발전기의 운용 환경 온도, 차량의 적재량 증가, 탑승인원의 등으로 인한 차체 질량의 변화를 주요 고객제품사용조건으로 설정하고 제품의 강건한 성능을 위한 S/N 비, 민감도 분석을 통해 실제 영향도가 큰 사용조건 및 설계 변수를 선정하여 Taguchi 법을 활용한 강건설계를 수행하였다.

2. 선형 발전기 구조와 설계변수

2.1 공진형 선형 발전기의 구조

공진형 선형 발전기는 Fig. 2와 같은 영구자석과 코어로 이루어진 아마튜어를 발전기의 운동자로, 권선 다발을 붙인 솔레노이드를 고정자로 하여 중앙 축을 현가장치의 댐퍼로 공유하는 구조이다. 이러한 구조는 현가장치 구성 요소의 질량, 스프링 강성, 감쇠계수에 기인한 복잡한 하체의 진동시스템에 큰 영향을 받지 않고 본 선형 발전기의 특징인 공진 현상의 발생을 위한 설계가 용이하다는 장점이 있다. Fig. 3은 현가장치와 결합된 선형 발전기의 3자유도계 진동 시스템의 자유물체도이다. 노면의 불규칙적인 상태 인하여 발생한 수직방향의 진동은 타이어와 휠을 거쳐 감소되어 현가장치와 발전기에 동시에 전달이 되고 현가장치는 원래의 기능인 진동력 감쇠, 선형 발전기는 상하로 지지되어 있는 스프링에 의해 반복적인 수직 운동을 하게 된다. 일반적인 포장도로에서의 평균적인 노면 진동 주파수를 4 Hz로 선정하고, 이에 따라 영구자석과 코어의 두께(질량), 발전기 스프링의 강성을 설계하여 발전기 시스템의

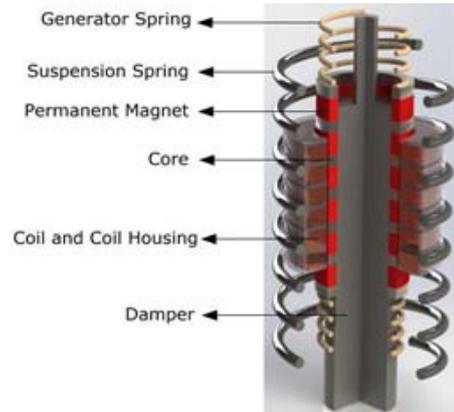


Fig. 2 Structure of the resonance linear electric generator

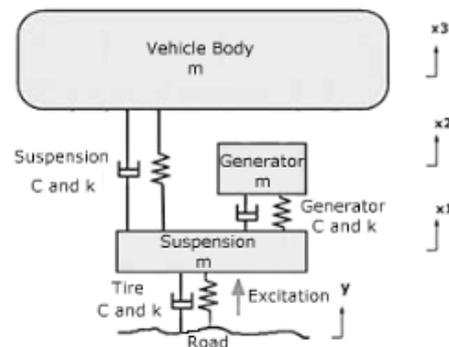


Fig. 3 Free body diagram of the suspension and linear electric generator system

고유주파수가 입력 주파수와 최대한 일치되도록 하여 공진 현상이 발생하도록 유도한다.

2.2 공진형 선형 발전기의 설계 변수

강건최적설계의 목적함수는 망대 설계 목표인 발전기 기전력의 최대화로 하여, 시스템의 설계 변수 선정은 발전기의 성능에 영향을 끼칠 수 있는 기계 요소들의 크기에 따라 Fig. 4와 같이 영구자

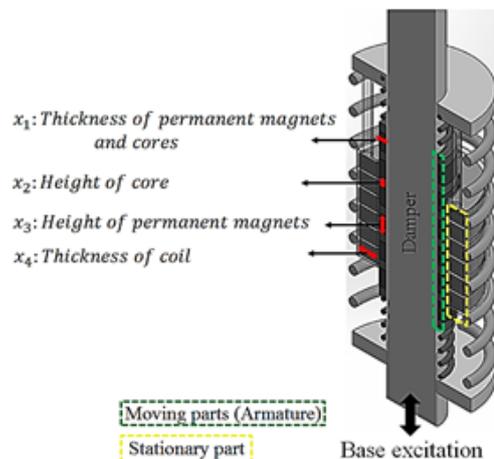


Fig. 4 Design variables

석과 코어의 두께, 코어의 높이, 영구자석의 높이, 코일의 두께로 4가지의 변수로 지정하였다.

3. Taguchi 법을 이용한 강건최적설계

3.1 시스템 분석 및 검증 절차

먼저 1차 설계된 발전기 모델은 Fig. 5에 도식화 되어있는 절차대로 성능 검증을 위한 발전량 과도해석 수행 전, 입력항으로 사용될 주기함수 꼴의 발전기 아마튜어 속도항의 얻기 위해 MATLAB을 활용한 진동변위해석이 먼저 수행된다. 최초의 입력원인 노면의 주파수가 시스템에 입력되면 발전기 아마튜어의 변위와 속도를 예측할 수 있게 되고, 예측된 속도함수는 발전량 과도 해석에 다시 입력되어 최종적으로 발전기의 기전력 예상값을 도출하게 된다.

3.2 고객사용조건 선정

제안된 선형 발전기는 외부 영향을 거의 받지 않는 별도의 밀폐된 시스템의 내부나, 실내와 같은 환경이 아닌, 외부에 노출된 차량의 휠 하우스에 현가장치와 함께 설치되므로 가동 환경의 영향을 크게 받게 되고 고객의 사용 방법에 대해서도 영향을 받을 가능성이 있으므로 이를 반영한 강건한 제품 성능을 위해서는 Fig. 6과 같은 요인들을 고려한 설계가 요구된다.

고객제품사용조건 중 차체 질량의 변화는 발전기 아마튜어의 진동변위에 영향을 줄 것으로 예상하고 이 조건의 검증을 위해

MATLAB을 이용한 진동 변위해석을 통해 아마튜어의 진동 변위 변화를 비교하였다. 최소의 적재량(0 kg) 또는 탑승인원 1인의 상황을 최소의 차체 질량으로, 최대의 적재량(200 kg) 또는 탑승인원 4인의 상황을 최대의 차체 질량으로 설정하였다. 이는 하체부를 제외한 일반적인 세단 차량의 하체 및 샤시 무게의 약 30%에 해당하는 질량으로 충분한 하중 조건을 부여하였다고 판단된다. 시뮬레이션 한 결과는 Fig. 7과 같다. 그래프에서 보이듯이 진동 출력은 두 가지 적재량과 탑승인원 조건에 대해 비슷한 진폭, 주기, 주파수의 결과를 보였다.

이러한 결과로 상기 조건은 이 후의 강건설계에서 제외되었고, 노면의 상태를 평탄한 아스팔트 노면과 거친 비포장 노면으로 분류하여 각각의 4 Hz, 15 Hz의 평균입력 주파수를 반영하였다⁷⁾. 그리고 시스템을 사용하는 환경의 온도 조건은 ANSYS MAXWELL을 이용한 발전량 과도 해석 시, 네오디뮴 재질 영구자석의 자속 밀도 특성을 온도에 따른 B-H (자속밀도 대 자계 세기) 특성 그래프에 따라 반영하여 재현하였다.

3.3 S/N (신호 대 잡음) 비 및 민감도 분석

제안된 선형 발전기는 2.2절에서의 설계 변수와 4 Level의 수준수를 고려한 Table 1의 설정을 두고 Table 2의 수직행렬에 따라 Taguchi 법을 이용한 강건최적 설계를 수행하였다.

본 연구에서의 최적설계 목표 함수는 최대의 기전력 발생인 망대 특성이므로 S/N 비의 식은 다음 식 (1)과 같다.

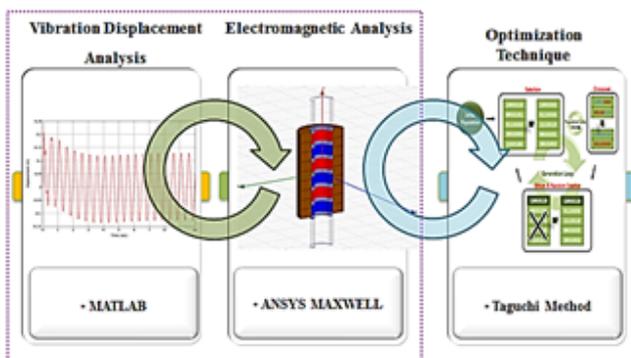


Fig. 5 Analysis procedure

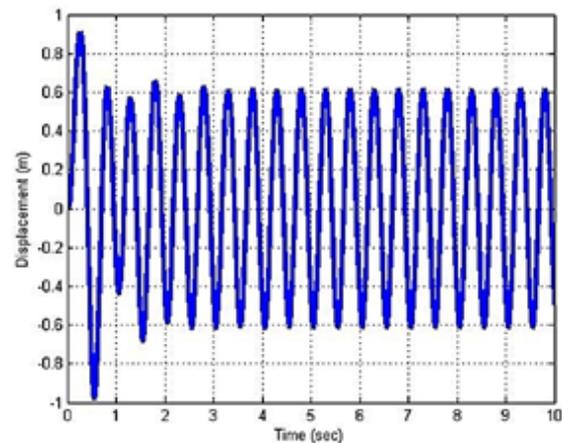


Fig. 7 Vibration displacement of the electric generator armature

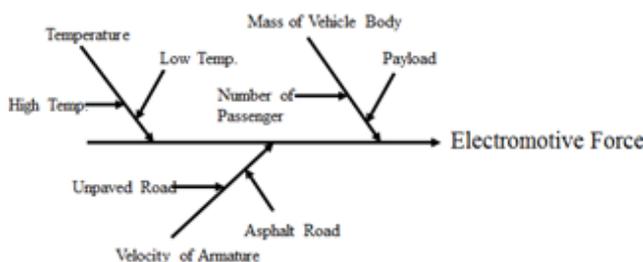


Fig. 6 Factorial analysis diagram of customer service conditions

Table 1 Level with design variable

Design Variables	4 Levels			
	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
A [mm]	5	16.7	28.3	40
B [mm]	5	11.7	18.4	25
C [mm]	10	23.3	36.9	50
D [mm]	5	20	35	50

Table 2 Orthogonal array

	Design Variables				Customer service condition		S/N Ratio [dB]
	A	B	C	D	Asphalt Low Temp.	Unpaved High Temp.	
					EMF (Electromotive Force) [mV]		
1	1	1	1	1	243.57	323.21	14.2
2	1	2	2	2	392.73	465.90	13.4
3	1	3	3	3	591.25	611.45	18.7
4	1	4	4	4	711.44	863.22	18.2
5	2	1	2	3	1001.4	1244.1	17.3
6	2	2	1	4	344.73	462.24	15.3
7	2	3	4	1	938.49	1100.8	19.9
8	2	4	3	2	1102.6	1307.3	18.4
9	3	1	3	4	849.13	905.71	17.1
10	3	2	4	3	1205.9	1398.5	18.8
11	3	3	1	2	995.43	1132.6	16.4
12	3	4	2	1	1054.8	1221.7	18.2
13	4	1	4	2	1390.7	1530.2	19.4
14	4	2	3	1	1671.2	1756.4	18.6
15	4	3	2	4	1427.2	1643.9	21.4
16	4	4	1	3	993.82	1182.4	14.5

$$SN = -10 \log \left| \frac{\left(\frac{1}{y_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{y_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{y_n}\right)^2}{n} \right| \quad (1)$$

n : Number of Customer Service Condition

y_n : Value of Cost Function in N

이 강건설계 방법은 제어가 불가능한 인자는 잡음 인자로 설정하고, 제어 가능한 요소를 조절하여 S/N 비를 통해 잡음에 강한 인자를 설정할 수 있는 방법이다. 본 설계에서 잡음 인자는 Level 2 수준으로 3.2절에서 제시된 노면 상태 조건, 온도 조건을 반영하였다. 상기의 조건들을 적용하여 발전량 과도 해석을 수행한 결과는 기전력으로 도출되며 Table 2에 해석 결과를 나타내었다. EMF는 해석의 결과 값인 기전력(V)을 의미한다.

위의 직교배열표와 S/N 비의 결과에 따라 4 Level의 민감도 분석 결과 Fig. 8과 같은 각 설계변수들의 민감도 반응 그래프를 얻었으며 이 결과들의 정량적인 비교를 위해 다시 동일한 스케일의 그래프로 재생성 하였다.

3.4 2차 유한요소해석 검증

Fig. 9와 같은 2극 3상 형태의 1차 발전량 과도해석의 결과들과 3.3절의 S/N 비 및 민감도 분석에 따라 민감도 반응성이 가장 낮은 설계 변수의 배제 및 S/N 비가 가장 크게 나온 수준 수의 설계 변수

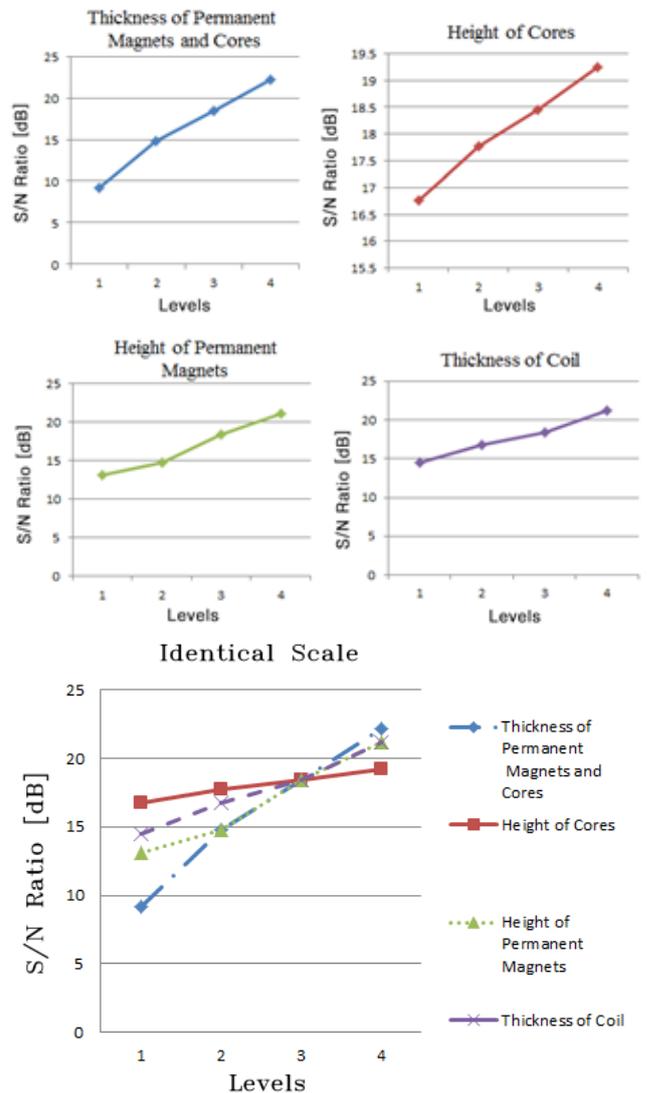


Fig. 8 Sensitivity response results for each design variable

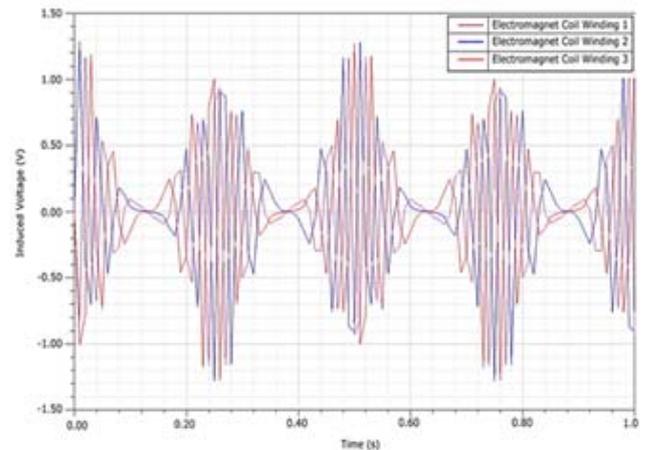


Fig. 9 1st EMF transient analysis of the system

의 값을 최적의 값으로 가정하여 2차 발전량 과도해석 및 시스템의 외부 가진에 대한 응답 공진 주파수는 Fig. 10, 11과 같다. Fig. 10

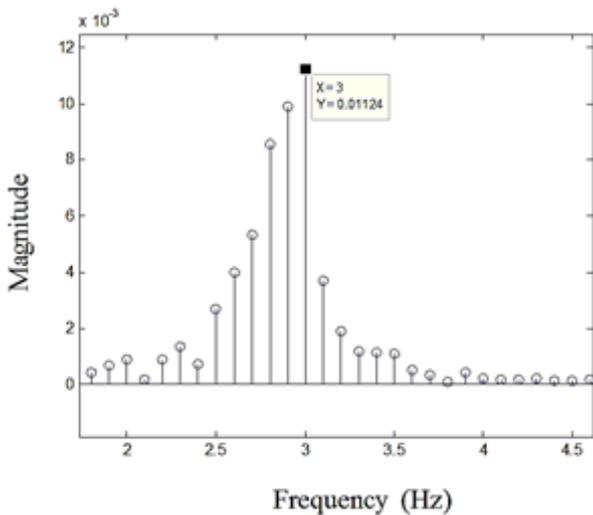


Fig. 10 Resonance frequency of the system

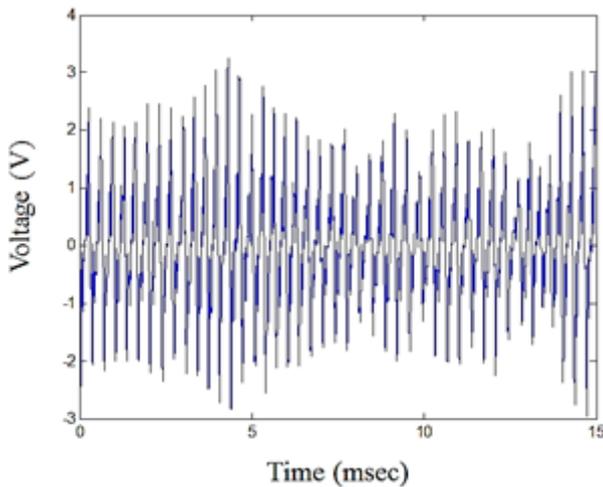


Fig. 11 2nd EMF transient analysis of the system with optimized design variables

의 y축 최대값의 수치는 현가장치 공진형 선형 발전기 시스템의 공진주파수를 나타내며 Fig. 11는 MAXWELL 상의 최적 모델에서 2극 3상 중 1개 상만의 데이터를 정량적으로 다시 나타낸 결과이다.

4. 결론

강건한 선형 발전기의 성능 유지 또는 최대한의 성능 발휘를 위한 고객 사용 조건의 고려에는 차체 질량, 운용 온도, 노면 주파수

의 세가지 조건이 고려되었으나 수치해석적 진동 응답 변위 해석의 결과로써 차체 질량의 조건은 제외되고 나머지 두 조건을 강건설계에 적용하였다. 그리고 민감도 분석 결과, 가장 영향이 큰 설계변수는 영구자석과 코어의 두께이며, 가장 영향이 작은 변수는 코어의 높이로 나타났으며, 최적 설계 변수 값을 적용 했을 시, 발전기 시스템의 응답 공진 주파수는 사전에 입력한 4 Hz의 평균 입력 주파수에 근접한 약 2.8~3 Hz의 수치를 보여 주었으며 2차 발전량 과도해석의 결과로써 평균적으로 약 1.72 V의 기전력을 발생시켰다. 더욱 향상된 성능의 공진형 선형 발전기의 강건 설계를 위해서 공극의 두께, 코일의 규격과 같은 추가적인 설계 변수와 더 증가된 수준 수의 수직행렬을 적용 한다면 더욱 향상된 기전력을 기대할 수 있을 것으로 예상할 수 있을 것이다.

References

- [1] Peter, C., Crecelius, D., 1999, Vehicle alternator/generator trends toward next millennium, IEEE Proceedings of the IEEE International 1 433-438.
- [2] Shin, D., Jin, B. J., 2013 Inspection of Battery Plate of Electric Vehicle Using Four Cameras, Proceedings of the Conference on Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 21-21.
- [3] Manla, G., White, M., Tudor, J., 2009, Harvesting Energy from Vehicle Wheels, International Conference on Power System Technology 288-293.
- [4] Ikoma, K., Munekiyo, M., Furuya, K., Kobayashi, 1998, Thermoelectric Module and Generator for Gasoline Engine Vehicles, IEEE In Thermoelectrics, Proceedings ICT 98. XVII International Conference 464-467.
- [5] Panagiotidis, M., Delagrammatikas, G., Assanis, D., 2000, Development and Use of a Regenerative Braking Model for a Parallel Hybrid Electric Vehicle, SAE Technical Paper, No. 2000-01-0995.
- [6] Mikalsen, R., Roskilly, P., 2007, A Review of Free-Piston Engine History and Applications, Applied Thermal Engineering 27:14 2339-2352.
- [7] Thomas, D. G., 2007, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, USA.