

CARSIM- Simulink연동 해석을 이용한 전자기 현가장치의 상대변위 해석

김지혜*, 김진호
영남대학교 기계공학부

Analysis of relative displacement of electromagnetic suspension using CARSIM and Simulink

Ji-Hye Kim*, Jin-Ho Kim

Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University

요약 본 논문에서는 차량 주행 시 노면으로부터 진동 에너지를 흡수해 에너지 하베스팅을 통해 전기에너지 발생이 가능한 전자기 현가장치의 구조와 현가장치 내에 결합되어 전자기 댐퍼 역할을 하는 8극 8상의 선형 발전기의 구조를 검토하였다. 실제 주행 노면에 따른 전자기 현가장치의 에너지 하베스팅 효과를 비교하기 위해 차량 시뮬레이션 프로그램인 Carsim과 Simulink를 연동하여 민간 겸용 차량 모델을 사용해 두 가지 실제 노면인 아스팔트 노면과 비포장도로 노면 조건에 대한 모의 주행시험을 수행한 결과, 아스팔트 노면과 비포장도로에서 현가장치의 상대 변위 각각 8mm, 13mm의 결과가 나타났다. 다음으로 전자기 현가장치 내에 결합된 선형 발전기를 모델링 하여 도출한 현가장치 상대 변위 값을 적용해 상용 전자기 해석 프로그램인 ANSYS MAXWELL을 이용해 동일한 해석조건을 적용하여 해석 시간 0.3s 동안 전자기 시뮬레이션을 수행하여 시간에 따른 발전량 결과를 도출해 비교하였으며 비포장도로와 아스팔트 노면에서의 평균 발전량은 각각 198.6W, 98.7W로 비포장도로의 경우 103.7% 높은 값을 보이는 것을 확인하였다. 마지막으로 노면의 주파수와 현가장치 입력 변위가 발전 출력에 영향을 끼치는 민감도를 비교한 결과 두 변수의 민감도는 각각 1.725, 1.283으로 노면 주파수가 전자기 시뮬레이션 출력변수인 평균 발전량에 34.5% 높은 영향을 끼치는 결과를 확인하였다.

Abstract This study investigated the structure of an 8-pole 8-slot linear generator, which acts as an electromagnetic damper by combining the structure of an electromagnetic suspension device capable of generating electrical energy through energy harvesting by absorbing the vibration energy from the road surface while driving. To compare the energy harvesting effect of the electromagnetic suspension according to the actual road surface, a driving road test was simulated for two actual road conditions, an asphalt road surface and unpaved road surface condition, using a civilian combined vehicle model in conjunction with a vehicle simulation program, Carsim and Simulink. As a result, the relative displacements of the suspensions on the asphalt road surface and the unpaved road were 8 mm and 13 mm, respectively. By applying the suspension displacement value derived by modeling the linear generator coupled to the electromagnetic suspension, the simulation was then performed for an analysis time of 0.3s by applying the same analytical conditions using the commercial electromagnetic analysis program, ANSYS MAXWELL. The average power generation on the unpaved roads and asphalt roads was 198.6W and 98.7W respectively, which was 103.7% higher for unpackaged roads. Finally, to compare the sensitivity of the road surface frequency and the suspension input displacement to the power generation output, the sensitivity of the two variables was 1.725 and 1.283, respectively, and the road surface frequency had a 34.5% higher effect on the average power generation.

Keywords : Carsim, Energy Harvesting, Linear Generator, Simulink, Vehicle Suspension,

본 논문은 방위사업청이 지원하는 민간기술협력 프로그램(no. 16-CM-EN-17) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ji-Hye Kim(Yeungnam Univ.)

Tel: +82-53-810-2441 email: newthinking0202@gmail.com

Received February 2, 2018

Revised (1st March 19, 2018, 2nd March 26, 2018)

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

1. 서론

최근 자동차 산업의 발전에 따라 하이브리드 전기 자동차의 보급확대에 따라 전기에너지의 수요가 증가하고 있다 [1-2]. 이에 따라 차량 내에서 에너지를 재사용하는 기술이 적용 되어져 왔다. 대표적인 예가 전자기 댐퍼를 이용한 에너지 하베스팅 현가장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전자기식 현가장치는 차량 현가장치 내부에 선형 발전기를 설치하여 차량 주행 시 노면으로부터 발생하는 진동에너지를 회수하여 전기 자동차 내에 전력 공급이 가능하며 동시에 진동의 감쇠를 통해 승차감을 향상 시킨다 [3-5].

이러한 에너지 하베스팅 현가장치는 두 가지 형태로 분류가 가능하다. 첫 번째는 선형 진동을 토크로 변환해 유도 댐핑력을 제어하는 회전형 타입으로 1987년 차량 현가장치 댐퍼에 적용되는 회전형 액추에이터에 대한 특허가 등록되었으며 2007년에는 볼-스크류 기구를 이용한 재생 댐퍼의 시제품이 개발되었다 [6-7]. 하지만 이러한 회전형 발전기를 이용한 현가장치는 회전운동과 선형 운동 사이에 변환기구가 필요로 하는 단점이 있다. 두 번째 형태는 선형 진동 운동으로부터 전기에너지를 발생시키는 선형 발전기로 1989년 영구자석을 이용한 선형 발전기를 사용해 차량에 적용 가능한 댐퍼가 제안되었으며, 2010년 적은 공간 내에서 진동 에너지 회수가 가능한 전자기 댐퍼가 연구되어졌다 [8-9]. 본 연구에서는 전자기 현가장치가 장착된 차량 모델에 대해 차량 시뮬레이션 프로그램인 carsim을 simulink와 연동하여 실제 저마찰의 아스팔트 노면과 고마찰의 비포장 도로 노면에 대한 모의주행시험을 통해 현가장치 상대변위를 도출하였다. 마지막으로 도출한 상대변위 결과를 8극 8상 구조의 선형 발전기에 적용해 전자기 시뮬레이션을 수행해 주행 노면이 발전량에 미치는 영향을 확인 하였다.

2. 전자기 현가장치 구조

차량 현가장치는 에너지 소산 장치로 차축과 차체 사이에 설치되어 차량 주행 시 노면 마찰에 의해 발생하는 진동에너지를 소산시켜 차량을 보호하고 승차감을 향상 시킨다. 현가장치 내 스프링이 노면으로부터 진동에너지를 흡수하며 댐퍼가 유체의 유동을 통해 스프링의 운동

을 제어하기 위해 왕복 운동을 한다. 본 연구에서는 노면으로부터 흡수한 진동에너지를 이용해 전기에너지 발생이 가능한 에너지 하베스팅 현가장치의 구조를 검토하였다. 에너지 하베스팅 현가장치는 Fig. 1과 같이 진동에너지를 소산시키는 댐퍼와 흡수한 진동에너지를 통해 전기에너지를 발생시키는 영구자석과 전자기 코일로 구성된 선형발전기 그리고 노면 마찰에 의한 진동에너지를 흡수하는 현가장치 스프링으로 구성되어 있다. 에너지 하베스팅 현가장치 내에서 전자기 댐퍼 역할을 하는 선형발전기는 Fig. 2와 같이 영구자석(Permanent magnet)과 솔레노이드 코일(Solenoid coil)이 8극 8상을 이루며 크게 이동자와 고정자로 구성되어 있다.

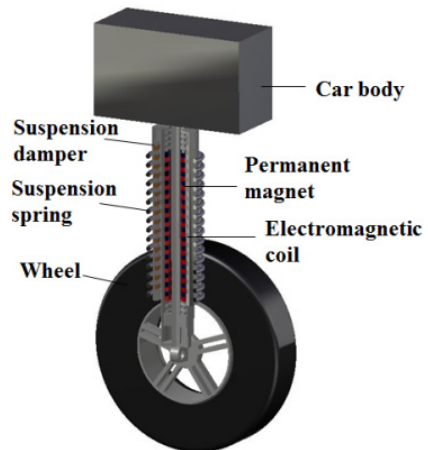


Fig. 1. Structure of electromagnetic suspension

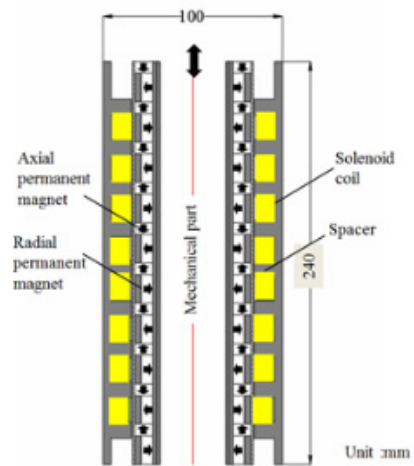


Fig. 2. Structure of linear generator

선형발전기의 이동자는 축 방향 영구자석(Axial permanent magnet), 반경 방향 영구자석(Radial permanent magnet)과 자기 투자율이 높은 스페이서(Spacer)가 번갈아 가며 배열되어 있으며 고정자는 솔레노이드 코일과 스페이서가 번갈아 배열되어 있다. 축 방향 영구자석과 반경 방향 영구자석은 각각 Nd-Fe(Neodymium Ferrite)자석인 40SH, 50SH를 사용 하였으며 스페이서는 S20C를 사용하였다. 노면 마찰에 의한 차체와 휠 사이에 진동에너지가 발생하게 되며 현가장치 내 선형발전기의 이동자가 왕복운동을 하면서 이동자와 고정자 사이 공극에서 자속의 흐름에 의해 전기에너지가 발생한다.

3. CARSIM-Simulink를 이용한 차량 주행 모의시험

3.1 CARSIM 차량 모델

Carsim이란 다양한 환경에서 차량의 모의시험을 통해 환경에 대한 차량의 반응을 분석할 수 있는 차량 동역학 시뮬레이션이며 Simulink란 MATLAB내 존재하는 시스템을 블록선도를 기반으로 설계해 주행 모의시험 및 시뮬레이션이 가능하게 하는 도구이다. 최근 Carsim과 Simulink를 연동하여 차량 동역학 시뮬레이션 및 차량 주행 모의시험 등 다양한 차량 연구 및 시뮬레이션이 이루어지고 있다. 2010년에는 직렬형 하이브리드 차량에 대해 Carsim - Simulink 연계 해석을 통해 차량 동적 특성을 고려한 조종 안정성 및 연비에 대한 시뮬레이션이 수행되어졌으며, 2012년에 횡방향 미끄럼 각을 최소화하기 위한 최적의 토크 분배를 위해 인휠-전기자동차의 차량 시뮬레이션에 관한 연구가 진행되었다 [10-11]. 최근에는 차량 동역학 모델의 Carsim-Simulink 시뮬레이션을 통해 yaw모멘트 제어를 통해 차량의 조향 속도가 제어되어 차량의 주행안정성 개선이 확인되었으며, 몇 가지 일반적인 주행 조건에서 CarSim-Simulink 시뮬레이션을 이용해 제어기의 토크 배분 효과와 4 륜구동 전기자동차의 안정성과 핸들링 성능 검토가 수행 되어졌다 [12-13]. 본 연구에서는 Carsim-Simulink 연동 시뮬레이션을 통해 2가지 조건의 실제 노면에서 전자기 현가장치가 설치된 대상 차량 모델에 대한 현가장치 상대변위를 도출하였으며 주행 모의시험 대상 차량 모델은 Fig. 3에 나타난 실제 차량 모델이며 차량의 주요 특성에 대한 정보를 Table 1에 나타내었다.



Fig. 3. Vehicle model for simulated driving test

Table 1. Vehicle model characteristics

Sprung mass	2257 kg
Unsprung mass	100 kg
Front wheel - Rear wheel	2946 mm
Internal engine model	250kw
Speed of vehicle	50km/h

3.2 Carsim 모의주행시험

본 논문에서는 차량 모의시험을 위해 먼저 MATLAB Simulink를 이용해 Fig. 4에 나타난 차량 주행 시뮬레이션 제어를 위한 블록선도를 설계하였다. 주행모의시험 출력변수로는 타이어와 만나는 노면의 변위와 차체 및 휠의 진동 변위 그리고 현가장치의 변위와 현가장치의 댐핑력을 설정하였다. 평평한 아스팔트 노면과 거친 비포장 도로인 두 가지 실제 노면을 적용한 주행모의시험을 통해 현가장치의 상대변위를 도출하였다. Fig. 5(a)는 주행거리에 따른 실제 아스팔트 노면의 거칠기 변위를 나타내며 Fig. 5(b)는 마찰이 크고 거친 비포장 도로의 변위를 나타내며 각 노면 거칠기의 최대변위는 약 6mm, 11mm이다.

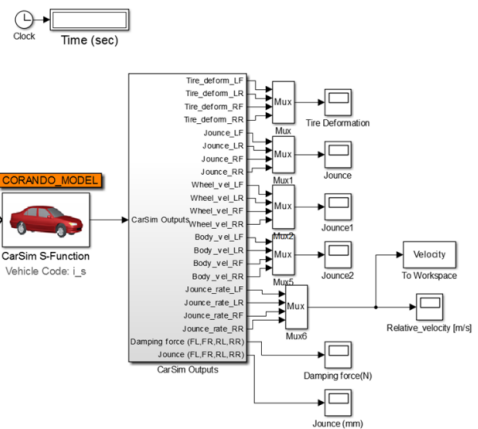
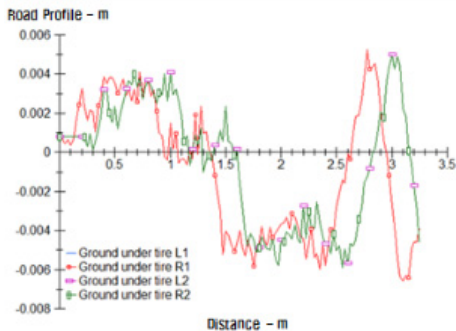
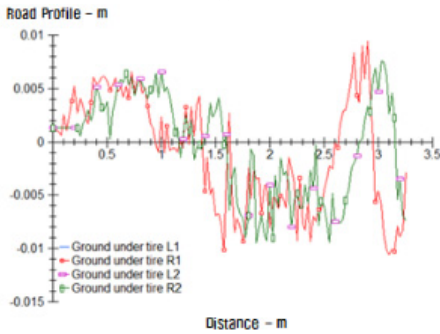


Fig. 4. Block diagram for road test



(a)



(b)

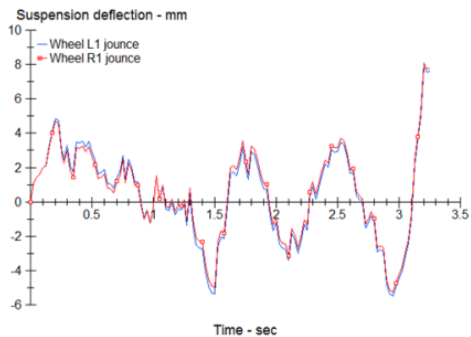
Fig. 5. Actual vehicle driving conditions

(a) Asphalt road surface

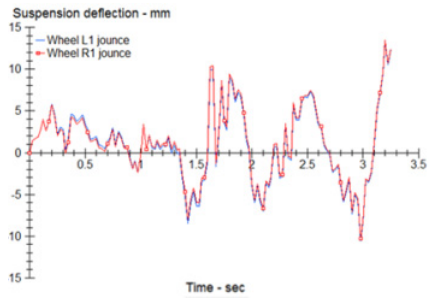
(b) Unpaved road surface

3.3 Carsim simulation 결과

두 가지 실제 노면 조건을 바탕으로 Carsim을 통해 모의주행시험을 수행한 결과 저마찰 아스팔트 노면의 경우 Fig. 6(a)와 같은 현가장치 변위를 도출되었으며 최대 변위는 약 8mm로 낮은 현가장치 상대 변위 값을 보이고, 반면 마찰이 크고 거친 비포장도로에서의 현가장치 변위 결과는 Fig. 6(b)와 같이 최대 변위가 약 13mm로 노면 주파수가 높은 현가장치 변위 값을 보인다.



(a)



(b)

Fig. 6. Relative displacement of vehicle suspension

(a) Asphalt road surface

(b) Unpaved road surface

4. 발전량 검증

Carsim-Simulink를 이용한 모의주행 시험을 통해 도출한 2가지 현가장치 상대변위 값인 8mm와 13mm를 적용해 전자기 시뮬레이션을 수행하기 위해 먼저 상용 전자기 해석 프로그램인 ANSYS MAXWELL을 이용해 Fig. 7과 같은 8극8상의 축 대칭 선형발전기를 모델링 하였으며 해석 모델에 대한 치수 정보를 표3에 나타내었다. 이동자의 속도는 식(1)의 A값에 Carsim 시뮬레이션을 통해 도출한 현가장치 변위를 각각 적용하였다. 슬레노이드 코일에 Fig. 8의 외부회로를 인가하였으며 해석 시간 0.3s, 시간 간격을 0.005s로 설정하여 transient해석을 수행하였다.

$$V = A \cdot 2\pi f \cdot \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

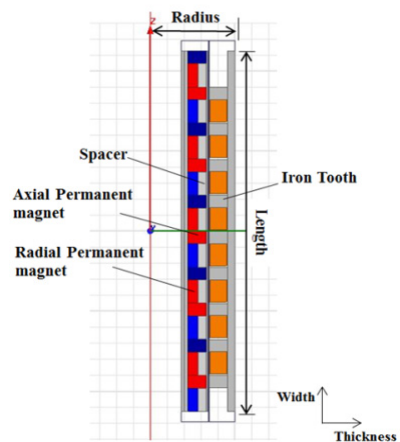


Fig. 7. Axisymmetric linear generator

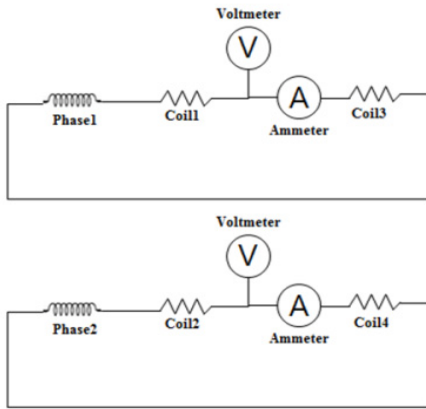


Fig. 8. External circuit for solenoid coil

Table 2. Dimension of linear generator

Length (mm)	240
Radius (mm)	50
Spacer thickness (mm)	2.0
Radial PM thickness (mm)	7.0
Axial PM thickness (mm)	5.0
Iron tooth width (mm)	6.4
Iron tooth thickness (mm)	13.85
Pole pitch (mm)	23

Fig. 7의 선형발전기 모델에 대한 전자기 시뮬레이션을 통해 도출한 발전량 그래프를 Fig. 9에 나타내었으며 각각 최대 발전량은 563.8W, 240.3W로 평균 발전량을 비교해 Fig. 10에 나타내었으며 현가장치 변위가 13mm인 경우 평균 발전량은 198.6W로 8mm인 경우보다 103.7% 높은 발전량 결과가 나왔다. Fig. 11은 비포장도로 노면에서의 현가장치 변위 13mm를 적용해 시뮬레이션을 한 결과 도출된 flux 선도이다.

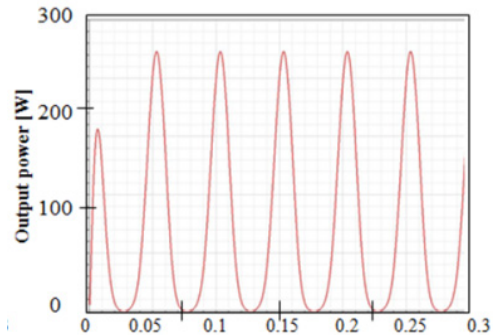
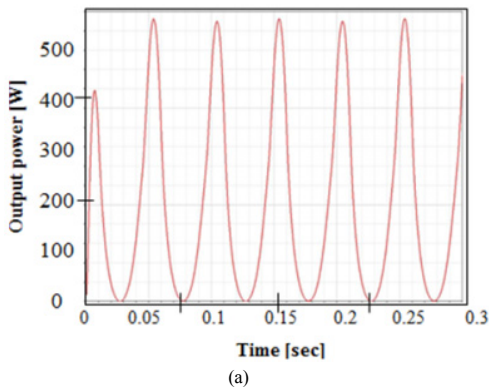


Fig. 9. Power results of electromagnetic simulation
(a) Unpaved road surface
(b) Asphalt road surface

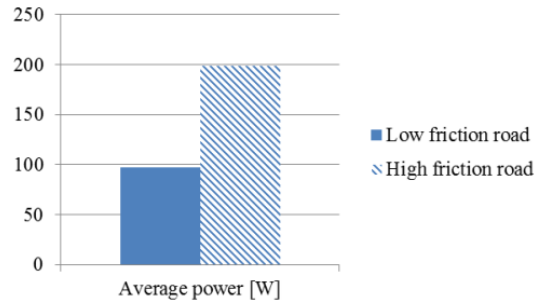


Fig. 10. Power results of electromagnetic simulation

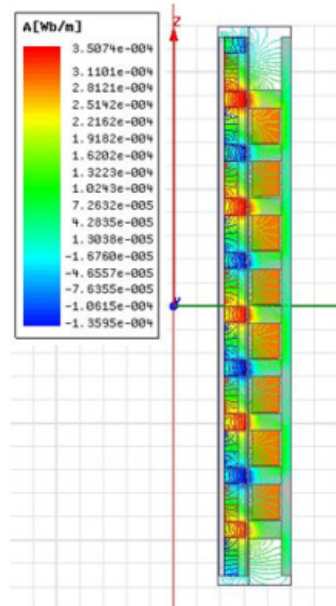


Fig. 11. Flux line of electromagnetic simulation

5. 노면 주파수와 현가장치 입력 변위의 민감도 분석

다음으로 선형발전기의 평균 발전량에 대해 노면의 입력 주파수와 현가장치 입력 변위의 민감도 분석을 수행해 두 가지 설계 변수의 발전 출력 성능에 대한 영향을 비교하였다. 먼저 민감도를 식 (2)과 같이 설계변수의 변화율에 대한 발전 출력 즉 평균 발전량의 변화율의 비로 나타내었다.

$$S = \frac{\frac{\Delta W}{W_{initial}}}{\frac{\Delta X}{X_{initial}}} \quad (2)$$

식(2)에서 S는 민감도이며 $\Delta X/X_{initial}$ 은 설계 변수의 초기 값 대비 변화율이며 $\Delta W/W_{initial}$ 은 그에 따른 평균 발전량의 변화율을 나타낸다.

초기 모델의 노면 주파수와 현가장치 입력 변위는 각각 10Hz, 5.6mm로 설정하였으며 노면 주파수와 현가장치 입력 변위의 정해진 범위 내에서 전자기 시뮬레이션을 통해 각 설계 변수의 평균 발전량에 대한 민감도 그래프를 Fig. 12에 나타내었다.

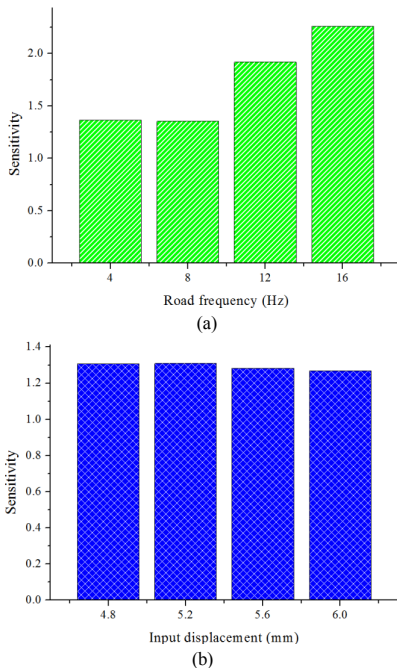


Fig. 12. Sensitivity to average power (a) road frequency (b) input displacement

다음으로 각 설계변수 민감도의 평균값을 구해 출력 변수인 평균 발전량에 미치는 영향을 비교하였다. 각 변수에 대한 평균 민감도를 식(3)에 나타내었다.

$$S_{average} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n}, n = 4 \quad (3)$$

식(3)을 통해 도출한 노면 주파수와 현가장치 입력변위에 대한 평균 민감도는 각각 1.725, 1.283으로 노면 주파수의 민감도가 34.5 % 더 큰 값을 보인다.

6. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅 전자기 현가장치의 구조를 검토하였으며, 실제 주행 노면에 따른 현가장치의 상대 변위를 도출하기 위해 CARSIM과 Simulink를 연동하여 두 가지 실제 노면인 아스팔트 노면과 비포장 도로에 대한 동일한 차량모델의 모의주행시험을 통해 현가장치 상대변위를 도출하였다.

모의주행시험 결과 아스팔트 노면과 비포장 도로에서의 현가장치 상대 변위의 최댓값은 각각 8mm, 13mm로 비포장 도로에서의 상대 변위가 62.5%크게 나오는 것을 확인하였다.

마지막으로 두 가지 노면 조건에서의 주행시험을 통해 도출한 현가장치 변위의 차이에 대한 발전량 추이를 비교하기 위해 상용 ANSYS MAXWELL을 이용한 전자기 해석을 수행하였다.

사용하여 8극 8상의 선형발전기 모델에 대한 전자기 시뮬레이션을 수행해 도출된 발전량을 비교한 결과 아스팔트 노면과 비포장도로에서 발생하는 평균 발전량은 각각 98.7W, 198.6W로 비포장도로에서 약 103.7% 더 효율적인 전기 에너지 발생이 가능하다는 것을 확인하였다.

마지막으로 노면 주파수와 현가장치 입력 변위가 평균 발전량에 끼치는 영향에 대한 민감도를 도출한 결과 두 변수의 민감도는 각각 1.725, 1.283으로 노면 주파수가 전자기 시뮬레이션 출력변수인 평균 발전량에 34.5 % 높은 영향을 끼치는 결과를 확인하였다.

References

- [1] G. Manla, N. M. White, J. Tudor, "Harvesting Energy from Vehicle Wheels", *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pp. 1389-1392, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/SENSOR.2009.5285831>
- [2] M. Wischke, M. Masur, P. Woias, "A Hybrid Generator for Vibration Energy Harvesting Applications", *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2009.
- [3] Z. Li, L. Zuo, J. Kuang, and G. Luhrs, "Energy-harvesting shock absorber with a mechanical motion rectifier", *Smart Materials and Structures*, vol. 22, pp. 1-10, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2012-71386>
- [4] E. Asadi, R. Ribeiro, M. B. Khamesee, A. Khajepour, "A new adaptive hybrid electromagnetic damper: modelling, optimization, and experiment" *IOP Int. Smart Materials and Structures*, Volume: 24, Number: 7, May 2015.
- [5] I. Martins, J. Esteves, G. D. Marques, F. P. D. Silva, "Permanentmagnets linear actuators applicability in automobile active suspensions," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 1, pp. 86 - 94, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2005.861167>
- [6] W. C. Kruckemeyer, H. C. Buchanan, Jr., and W. V. Fannin, "Rotational actuator for vehicle suspension damper", U.S. Patent 4 644 200, 1987.
- [7] Y. Zhang, K. Huang, F. Yu, Y. Gu, D. Li, "Experimental verification of energy-regenerative feasibility for an automotive electrical suspension system", *IEEE Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICVES.2007.4456407>
- [8] Y. Hua, H. Jiang, G. Geng, "Electronic differential control of 2WD electric vehicle considering steering stability", *AIP Conference Proceedings* 1820, 070005, 2017.
- [9] L. Zuo, B. Scully, J. Shestani, Y. Zhou, "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions", *Smart Materials and Structures*, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/4/045003>
- [10] J. H. Lee, K. J. Kim, "Study of the vehicle performance of a series hybrid vehicle using CARSIM and Simulink", *The Korean Society of Automotive Engineers*, 2949-2952, 2010.
- [11] X. Xin, W. Zhang, C. Shen, H. Zheng, "Control strategy of four-wheel independent drive electric vehicle based on vehicle velocity estimation and switchover", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 39, pp. 965, 2017.
- [12] H. W. Ha, J. M. Kim, B. G. Park, H. Y. Seo, J. M. Lee, "Simulations of In-wheel Electric Vehicle using Carsim and Simulink", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 374-375, 2012.
- [13] I. S. Suh, K. R. Hwang, M. Y. Lee, J. D. Kim, "In-wheel motor application in a 4WD electric vehicle with foldable body concept", *Electric Machines & Drives*

Conference (IEMDC) 2013 IEEE International, pp. 1235-1240, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2013.6556292>

김 지 혜(Ji-Hye Kim)

[정회원]



- 2013년 3월 ~ 2017년 2월 : 영남대학교 첨단기계전공 학사
- 2017년 2월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 공학석사

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계

김 진 호(Jin-Ho Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 공학사
- 2002년 2월 : 미) U.C. Berkeley 공학 석사(기계공학전공)
- 2002년 9월 ~ 2005년 9월 : 미) U.C. Berkeley 공학 Ph.D(기계공학 전공)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계