

차량 현가장치적용 100W급 선형발전기의 다양한 구조 특성

김지혜*, 김진호
영남대학교 기계공학부

A Study on Various Structural Characteristics of 100W Linear Generator for Vehicle Suspension

Ji-Hye Kim*, Jin-Ho Kim

Division of Mechanical Engineering, Yeungnam University

요약 최근 하이브리드 전기자동차의 보급 확대에 따라 전기에너지 수요가 증가하고 있다. 본 연구에서는 전기에너지 수요에 대응하기 위해 에너지 하베스팅 기술을 이용해 자가발전이 가능한 3가지 구조의 현가장치 적용 선형 발전 시스템을 ANSYS MAXWELL을 사용하여 전자기 시뮬레이션을 통해 각 구조의 발전 특성을 비교 분석 하였다. 다음으로 각 모델에 대해 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO(Process Integration, Automation and Optimization)을 사용하여 최적설계를 수행하였다. 3가지 설계변수를 선정하여 실험계획법 기법 중 직교 배열표(Orthogonal Array)를 이용해 도출한 18개의 실험 점에 대해 전자기 해석을 통해 완성한 실험계획법을 바탕으로 근사 모델을 생성하였으며 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm)을 이용한 최적 설계를 수행하였다. 마지막으로 초기 모델과 동일한 해석 조건을 사용해 최적 설계 결과 모델에 대한 전자기 시뮬레이션을 통해 최적설계 결과를 검증 하였다. 각 선형 발전기 모델에 대해 최적의 구조에 대한 발전 특성을 비교한 결과 8pole-8slot, 12pole-12slot, 16pole-16slot 구조에서 최대 발전량은 각각 366.5W, 466.7W, 579.7W로 slot, pole 조합 수가 많아질수록 발전량이 증가하는 결과를 확인하였다.

Abstract Recently, the demand for electric energy has been increasing due to the spread of hybrid electric vehicles. In this study, to meet this demand, the ANSYS MAXWELL electromagnetic simulation system was used to compare the power generation characteristics of three types of suspension system that can generate electricity using energy harvesting technology. Next, the optimal design was determined for each model by using the commercial PIDO (Process Integration and Design Optimization) tool, PIANO (Process Integration, Automation and Optimization). We selected three design variables and constructed an approximate model based on the experimental design method through electromagnetic analysis for 18 experimental points derived from Orthogonal Arrays among the experimental design methods. Then, we determined the optimal design by applying the Evolutionary Algorithm. Finally, the optimal design results were verified by electromagnetic simulation of the optimum design result model using the same analysis conditions as those of the initial model. After comparing the power generation characteristics for the optimal structure for each linear generator model, the maximum power generation amounts in the 8pole-8slot, 12pole-12slot, and 16pole-16slot structures were 366.5W, 466.7W and 579.7W, respectively, and it was found that as the number of slots and poles increases, the power generation increases.

Keywords : Energy Harvesting, Evolutionary Algorithm, Linear Generator, Orthogonal Array, Vehicle Suspension

본 논문은 방위사업청이 지원하는 민군기술협력 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 January 17, 2018

Revised February 19, 2018

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

1. 서론

최근 자동차 산업의 발전에 따라 하이브리드 전기 자동차의 보급 확대에 따라 전기에너지의 수요가 증가하고 있다 [1-2]. 이에 따라 차량 내에서 에너지를 재사용하는 기술이 적용되어져 왔다. 대표적인 예가 전자기식 에너지 하베스팅 현가장치이다. 전자기식 현가장치는 차량 현가장치 내부에 발전기를 설치하여 차량 주행 시 노면으로부터 발생하는 진동에너지를 회수하여 전기 에너지를 생산이 가능하며 동시에 진동의 감쇠를 통해 승차감을 향상 시킨다 [3-5].

차량 현가장치 적용 발전기는 크게 두 가지 종류로 나뉜다. 첫 번째는 회전형 발전기로 유도전류를 통해 감쇠력을 회전형 영구자석을 이용해 전기 에너지를 발생시킨다. 1987년 차량 현가장치에 적용하기 위한 회전형 액츄에이터에 관한 특허가 출원되었으며, 2007년에는 Ball-screw 장치를 기반으로 한 에너지 회생 댐퍼의 시제품이 개발되었다 [6-7]. 2009년에는 유압 전동식 회전형 회생 댐퍼에 대한 특허가 출원되었다 [8]. 그러나 이러한 회전형 발전기는 회전형 운동을 선형 운동으로 변환시키기 위한 동력변환장치를 필요로 한다. 두 번째는 선형 발전기로 선형 운동을 통해 감쇠력을 제어하고 전기 에너지를 발생시킨다. 1989년 차량 현가장치에 적용하기 위해 영구자석을 포함한 선형 발전기를 이용한 댐퍼가 제안되었으며, 2010년에는 2.01W급 차량 현가장치 선형발전기 시제품이 개발되었지만 에너지 감쇠율에 비해 발생하는 전력이 작다 [9-10]. 2012년에는 자기 유동 감쇠기와 선형 에너지 하베스터를 통합하여 자가 발전 및 자가 감지가 가능한 댐퍼가 구현되었으며, 2014년에는 여러 영구자석 배열 조합을 선형 발전기에 적용해 초기 모델 대비 약 3.8배 발전량을 향상시킨 연구가 진행되었지만 발전기 크기에 비해 발전량이 부족하다 [11-12].

본 연구에서는 에너지 하베스팅을 통해 자가발전이 가능한 차량 현가장치의 구조를 검토하고 동적 특성을 분석하였으며 현가장치와 결합된 선형 발전기에 다양한 영구자석과 전자기 코일의 조합을 적용해 전자기 해석 프로그램인 ANSYS MAXWELL을 사용하여 발전 효과를 비교 및 검토하여 영구자석과 전자기 코일의 조합이 발전량에 끼치는 영향을 분석하였으며 제한된 발전기 크기 내에서 가장 효율적인 구조를 선정해 초기 선형 발

전기 모델과 발전량을 비교하였다. 이러한 발전기의 구조가 발전 효과에 끼치는 영향을 분석함으로써 고효율 선형 발전기의 구조 설계가 가능했으며, 증가하고 있는 하이브리드 차량의 주행을 위한 모터 구동 및 브레이크의 제동 위한 효율적인 배터리 충전을 통해 전기 에너지 수요에 대응할 뿐 아니라 승차감의 향상도 기대할 수 있다.

2. 전자기 현가장치 적용 선형발전기의 설계

2.1 전자기 현가장치의 구조

현가장치는 에너지 소산 장치로 차축과 차체 사이에 설치되어 차량 주행 시 노면으로부터 발생하는 진동에너지를 소산시켜 차량을 보호하고 승차감을 향상시킨다. 현가장치 내 스프링이 노면으로부터 진동에너지를 흡수하며 댐퍼가 유체의 유동을 통해 스프링의 운동을 제어하기 위해 왕복 운동을 한다. 기존 유압댐퍼는 Fig. 1(a)과 같이 피스톤 운동을 가능하게 하는 피스톤 로드와 유체로 채워진 내통, 피스톤이 압축될 때 유체가 차는 외통으로 구성되어 있으며 피스톤 로드의 인장과 압축이 피스톤의 왕복운동을 발생시키며, 이 때 발생하는 유압으로 스프링의 운동이 억제 된다. 본 연구에서 사용한 에너지 하베스팅 현가장치는 Fig. 1(b)와 같이 영구자석과 전자기 코일과 댐퍼로 구성된다. 이러한 에너지 하베스팅 현가장치는 댐퍼가 노면 진동에 의해 왕복 운동을 하면서 영구자석과 전자기 코일 사이 자기의 흐름을 통해 전기 에너지 생산이 가능하다.

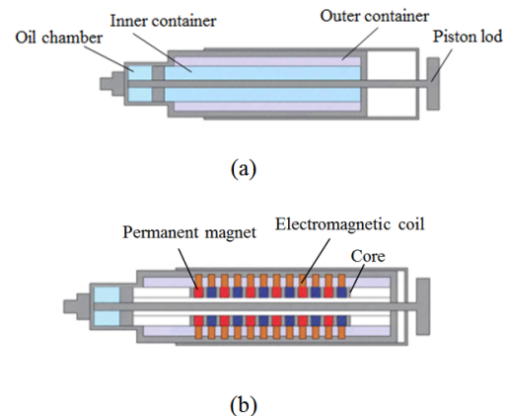


Fig. 1. Structure of suspension (a) existing suspension (b) electromagnetic suspension

2.2 선형 발전기의 구조

본 연구에서 설계한 현가장치 적용 선형 발전기는 Fig. 2와 같이 지름 100mm, 길이 240mm의 전체 구조를 가지는 축대칭 모델이며 크게 이동 자와 고정자로 구성된다. 이동 자는 현가장치가 노면 진동에 의해 왕복운동 시 축 방향으로 운동하며 반경 방향 영구자석과 축 방향 영구자석이 번갈아가며 장착되어 있고, 반경 방향 영구자석은 코어와 나란히 배열되어 있으며, 이 때 코어는 자기장의 전도체 역할을 한다. 고정자는 전자기 코일과 코어로 구성되며 이동 자를 감싸고 있다. 이동 자가 축 방향 운동 시 고정 자 사이 공극에 의해 자속의 흐름이 생겨 전기에너지가 발생한다.

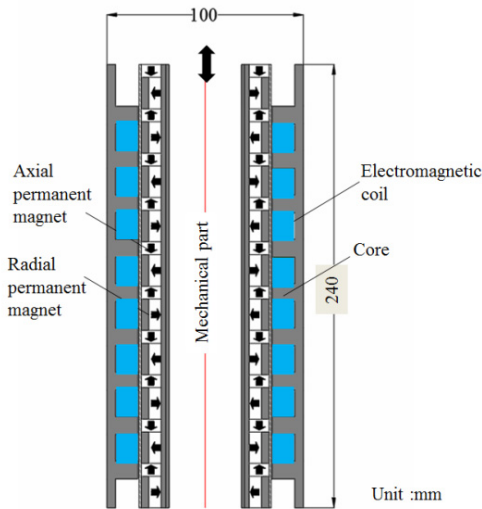


Fig. 2. Structure of linear generator

축 방향 영구자석은 니켈-구리가 주성분인 네오디뮴 자석의 한 종류인 DDP-N40SH를 사용하였으며 반경 방향 영구자석은 DDP-N50SH를 사용하였다. 그리고 영구 자석 사이에 자속이 흐르는 경로 역할을 하는 Steel1008 재질의 Core를 배열하였고 고정 자의 Core 또한 같은 재질을 사용하였으며 0.6mm 직경의 전자기 코일을 사용하였다.

2.3 전자기 시뮬레이션

차량 현가장치 적용 선형 발전기의 최적설계를 위한 특성 분석을 위해 전자기 시뮬레이션 프로그램인 ANSYS MAXWELL 프로그램을 통해 Fig. 3과 같이 동

일한 전체 길이 240 mm와 직경 100 mm을 갖는 3가지 다른 구조의 초기 선형발전기를 모델을 설정 하였다. 첫 번째 선형발전기는 8극 8상의 영구자석과 전자기 코일의 조합을 갖는 모델이며 극 간격을 좁혀가며 영구자석과 전자기 코일 조합의 수를 점점 늘려 12극 12상, 그리고 16극 16상 구조의 모델을 선정하였으며, 각 초기 모델에 대한 극 간격 및 코일 턴 수와 저항에 관한 정보를 Table 1에 나타내었다.

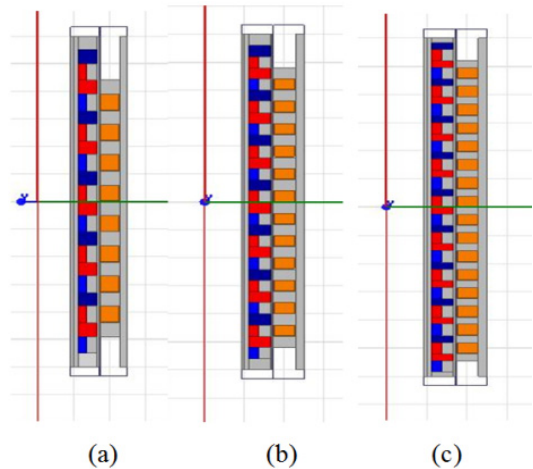


Fig. 3. Initial model of linear generator (a) 8slot-8pole model (b) 12slot-12pole model (c) 16slot-16pole model

Table 1. Geometry of initial model

	8slot-8pole	12slot-12pole	16slot-16pole
pole pitch (mm)	22	16	13
number of coil turns (N)	254	171	150
resistance (ohm)	17.2	11.58	10.16

각 구조의 초기 모델에 대해 time step을 0.005s, stop time을 0.3s로 설정해 전자기 시뮬레이션에 대해 발생하는 발전량 및 자기력에 대한 결과는 다음 Fig. 4와 같이 나타났다. 또한 각 초기 모델의 전자기 해석 결과를 비교 분석해보니 극 간격의 감소와 극-상 조합의 수가 증가할수록 최대 발전량과 평균 발전량 및 발생하는 자기력이 커지는 것을 확인하였으며 Table 2와 같이 12slot-12pole 모델의 경우 8slot-8pole 모델에 비해 발전량과 자기력은

각각 38%, 33% 만큼 큰 값을 보였으며 16slot-16pole 모델의 경우 12slot-12pole 모델보다 발전량과 자기력은 각각 25%, 15%만큼 큰 값을 보였다.

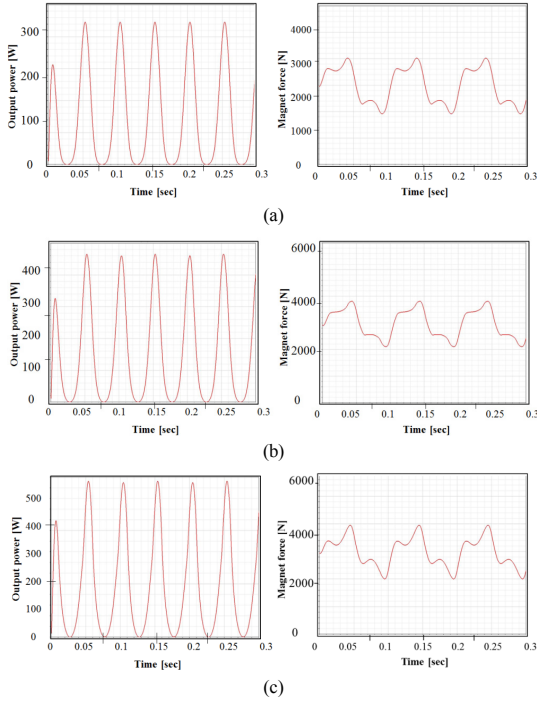


Fig. 4. Simulation result of initial model (a) 8slot-8pole model (b) 12slot-12pole model (c) 16pole-16slot model

Table 2. Simulation result of initial model

	Maximum power (W)	Average power (W)	Maximum axial force (N)
8pole 8slot model	22	16	13
12pole 12slot model	254	171	150
16pole 16slot model	17.2	11.58	10.16

3. 최적 설계

3.1 설계변수 및 제약조건

본 논문에서는 3가지 발전기 구조의 초기 모델에 대한 전자기 시뮬레이션을 통해 각 구조의 발전량 및 자기력 특성을 비교하였다. 하지만 발전기를 구성하는 이동

자 및 고정자의 치수가 변경되면 전혀 다른 결과가 나타날 수 있어 정확한 발전특성 비교를 위해 각 모델에 대해 최적설계를 수행하여 최적설계 결과를 비교하여 각 구조의 발전특성을 분석하였다. 최적설계에 앞서 먼저 효과적인 최적설계를 위해 발전 성능 및 자기력 결과에 가장 큰 영향을 끼치는 3가지 설계 변수로 Core tooth width, Axial pm width와 Radial pm thickness를 선정하였으며 이를 Fig. 5에 표기하였다. 다음으로 발전기 전체 직경과 길이 및 구조를 고려해 Table 3 과 같이 설계 변수 범위를 각각 설정하였다.

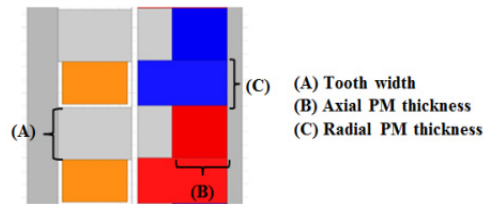


Fig. 5. Design variables of optimal design

Table 3. Boundary condition of optimal design variables

	8pole 8slot model		12pole 12slot model		16pole 16slot model	
	low	high	low	high	low	high
Tooth width	6	12	4	12	3	9
Axial PM width	8	14	3	12	4	8
Radial PM thickness	3	9	3	9	3	9

3.2 실험계획법

다음으로 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization)틀인 PIAO(Process Integration, Automation and Optimization)를 사용하여 실험계획법 기법 중 하나인 적은 실험 횟수로 최적의 결과를 얻을 수 있는 직교배열표(Orthogonal Array)를 이용해 3가지 설계 변수에 대해 3수준을 고려해 실험계획법을 세워 각 모델에 대해 18개의 실험 점을 얻었으며 전자기 시뮬레이션 프로그램인 ANSYS MAXWELL을 사용해 18개 실험 점에 대해 초기 모델 해석 시 사용한 물성, 해석 시간 및 해석 방법을 동일하게 유한요소해석을 수행하였다. 생성한 실험계획법의 결과로부터 다양한 근사 모델 중 크리깅(Kriging)모델을 생성하였다. 크리깅 모델은 대표적인 보간 모델로 설계변수가 많고 비선형성인 시스템에서 우수한 예측성능을 보이고 값을 알고 있는 주위 값들을 선

형적인 조합으로 예측하는 통계학적 기법이며 실험계획법을 통해 생성한 18개의 실험 점을 이용해 PIA_{NO} 프로그램에서 제공하는 근사화 기법을 이용하여 크리깅 모델을 생성하였다 [13].

3.3 최적화 기법

생성한 근사모델을 이용하여 최적화 기법 중 진화 알고리즘(Evolutionary Algorithm)을 이용해 최적설계를 수행하였다. 진화 알고리즘은 확률론적 최적기법 중 하나로 설정한 설계 변수인 부모 개체군으로부터 일정한 범위 내에서 확률 변수를 발생시켜 차기 개체군을 생성시킨다. 부모개체군과 차기개체군을 통해 원하는 설계 목표에 가장 근접한 변수를 선택해 설계 변수를 재구성한다. 근사화 기법을 이용해 크리깅 모델 성능 정확도를 확인하였고 진화알고리즘을 사용하여 모델을 도출한 결과 Fig. 6와 같은 발전량 및 자기력 그래프를 얻었으며 각각 초기모델에 비해 최대 발전량이 약 16%이상 증가하는 결과가 나타났다.

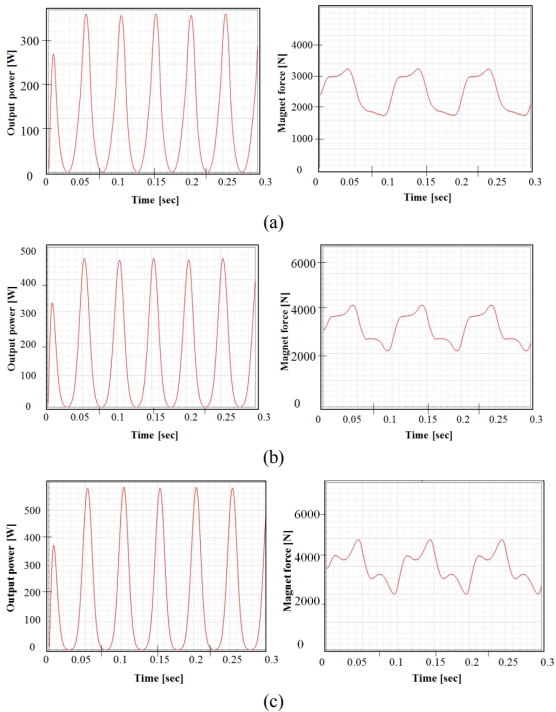


Fig. 6. Simulation result of optimized model (a) 8slot-8pole model (b) 12slot-12pole model (c) 16pole-16slot model

3.4 설계결과 검증

마지막으로 최적설계 결과의 검증을 위해 도출한 설계변수를 이용하여 전자기 시뮬레이션을 통한 발전기 모델의 발전량과 자기력 결과를 도출한 결과 3가지 모델에 대한 최적설계 결과를 전자기 시뮬레이션을 통해 검증한 결과 1% 이내의 오차가 나타났으며 이를 Table 4에 표기하였고 3가지 모델에 대한 시뮬레이션 결과인 최대 발전량과 자기력 수치를 나타내는 그래프를 Fig. 7에 나타내었다.

Table 4. Simulation result of optimal design

	8pole 8slot		12pole 12slot		16pole 16slot	
	max power (W)	max force (N)	max power (W)	max force (N)	max power (W)	max force (N)
initial	316.3	3084	436.6	4091	546.3	4687
optimal	367.8	3248	468.4	4048	577.2	4730.2
simulation	366.5	3245	466.7	4029	579.7	4733.6

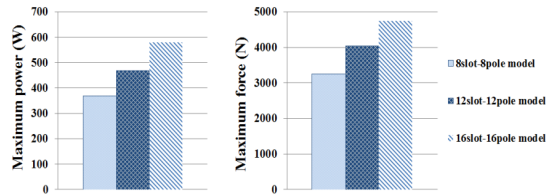


Fig. 7. Maximum power and maximum force of optimized model

4. 결론

본 연구에서는 현가장치 적용 선형 발전기의 구조를 검토하였으며 제한된 크기 내에서 3가지 구조의 선형발전기를 설계해 전자기 시뮬레이션인 ANSYS MAXWELL을 사용하여 발전량 및 자기력을 비교하였다. 12slot-12pole 모델의 경우 8slot-8pole 모델에 비해 발전량과 자기력은 각각 38%, 33% 만큼 큰 값을 보였다. 16slot-16pole 모델의 경우 12slot-12pole 모델보다 발전량과 자기력은 각각 25%, 15%만큼 큰 값을 보이는 결과를 얻었다. 마지막으로 정확한 분석을 위해 각 구조에 대해 상용 PIDO틀인 PIA_{NO}를 사용하여 최적설계를 수행하였다. 각 선형 발전기 모델에 대해 최적의 구조에 따른 발전

특성을 비교한 결과 8pole-8slot, 12pole-12slot, 16pole-16slot 구조에서 최대 발전량은 각각 366.5W, 466.7W, 579.7W 로 slot, pole 조합 수가 많아질수록 발전량이 증가하는 결과를 확인하였으며 초기 모델과 유사한 경향을 보이는 것을 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", *15th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, pp. 521-524, 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] Ehsan Asadi, Roberto Ribeiro, Mir Behrad Khamesee and Amir Khajepour "A new adaptive hybrid electromagnetic damper: modelling, optimization, and experiment", *IOP Int. Smart Materials and Structures*, vol. 24, no. 7, 2015.
- [5] Martins, I., Esteves, J., Marques, G.D. and Silva, F.P.D., "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 4644200, Feb. 17, 1987.
- [7] Zhang Y, Huang K, Yu F, Gu Y and Li D "Experimental verification of energy-regenerative feasibility for an automotive electrical suspension system", *IEEE Int. Conference on Vehicular Electronics and Safety (Beijing)*, 2007.
- [8] Avadhany S, Abel P, Tarasov V and Anderson Z, "Regenerative shock absorber", US Patent 0260935, 2000.
- [9] Karnopp D 1989 "Permanent magnet linear motors used as variable mechanical dampers for vehicle suspensions", *Vehicle System Dynamics*, vol. 18, Iss. 4, pp. 187-200, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423118908968918>
- [10] L Zuo, B Scully, J Shestani, Y Zhou "Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions", *Smart Materials and Structures* 19, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/19/4/045003>
- [11] Chao Chen and Wei-Hsin Liao "A self-sensing magnetorheological damper with power generation", *Smart Materials and Structures*, vol. 21, 2012.

- [12] Xiudong Tang, Teng Lin, and Lei Zou "Design and optimization of a tubular linear electromagnetic vibration energy harvester", *IEEE Transactions On Mechanics*, vol. 19, 2014.
- [13] Kim, J. G. and Lee K. H, "A Structural Design of Microgyroscope Using Kriging Approximation Model", *J. KSMPE*, vol. 7, no. 4, pp. 149-154, 2008.

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(기계공학전공)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계