

# 차량 현가장치 선형 발전기 구조 검토 및 발전량 향상을 위한 다자유도 선형 발전기

최지현<sup>1</sup>, 김진호<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>영남대학교 기계공학과 전기모터 및 액츄에이터 연구실

## Multi Degree of Freedom Linear Electric Generator for Structural Concerns and Electric Generation Improvement of the Linear Electric Generator in a Vehicle Suspension

Ji-Hyun Choi<sup>1</sup>, Jin Ho Kim<sup>1\*</sup>

Electric Motor and Actuator Laboratory, Department of Mechanical Engineering,  
Yeungnam University

**요약** 현가장치에 적용 가능한 공진형 선형 발전시스템은 차량이 노면을 주행 시 발생하는 진동에너지를 수집하여 자가 발전기능을 수행하는 시스템으로써, 작은 노면 진동을 증폭하여 큰 발전량을 유도하기 위해 공진 현상을 적용하였다. 시스템의 진동변위 해석을 통해 세 가지의 각기 다른 발전기 아마튜어의 동적 거동을 시뮬레이션하였고, 이를 전자기 유한요소해석을 통해 실제 발전량을 계산 및 비교분석 하였다. 또한, 차량 노면주행 시, 다양한 가진 주파수에 공진현상을 적용하기 위해 발전기 아마튜어의 수를 증가시키는 다자유도 발전기로의 설계 개선을 수행하여 공진 점의 변화를 확인하고 이에 따른 발전량의 변화를 확인하였다. 최종적으로 동일한 제한조건(설치공간)하에서 약 35% 축소된 아마튜어를 설계하여 이전 대비, 1Hz 및 4Hz 가진환경에서 8.5 %, 13.8 % 감소하였고, 15 Hz의 가진 환경에서는 14.7 %의 증가 현상을 확인하였다.

**Abstract** A resonance linear electric generator in a vehicle suspension is a system that performs self-electric generation by collecting the vibration energy when a vehicle runs on a road, and takes the resonance phenomenon to derive large electric generation from slight road surface vibrations. In this paper, the motions of an armature in three different electric generator structures were simulated and the actual generation quantity was calculated and compared with these results. Furthermore, when the vehicle runs on the road, the design improvement for a multi-degree of freedom electric generator was conducted to make the resonance respond to various excitation frequencies, and the change in the resonance points and generation quantity were identified.

**Key Words** : Armature, Linear electric generator, Multi degree of freedom, Resonance, Vehicle suspension

### 1. 서론

최근 수평 또는 수직방향의 선형 운동으로 전력을 생산하는 선형 발전기가 널리 사용되고 있다[1]. 이러한 수직형 선형 발전기들은 Fig. 1, Fig. 2와 같이 소형의 크기에서는 휴대용 조명장치나 통신장치의 간이 충전을 위한 인력을 이용한 초소형 발전기, 크기는 해상 수면에서

파력에너지를 추출하는 대형 발전기까지 그 활용도와 구조가 다양하다[1,2]. 하지만 선형 발전기들은 작동 속도가 일정하게 유지되는 로터리방식 발전기에 비해 아마튜어의 위치에 따라 속도의 변화가 크고, 발전가능향상을 위해서 반경방향이 아닌 길이방향의 크기변화가 요구되므로 이에 따른 제약이 존재한다[3].

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(213C000619)

\*Corresponding Author : Jin Ho Kim(Yeungnam Univ.)

Tel: +82-53-810-3835 email: jinho@ynu.ac.kr

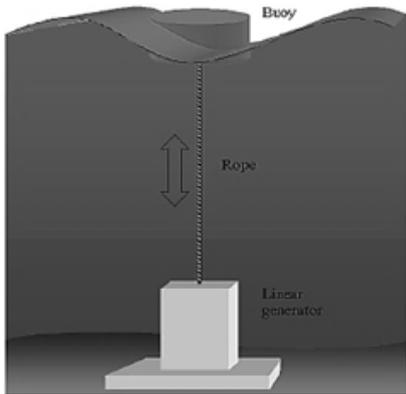
Received June 11, 2014

Revised (1st August 11, 2014, 2nd August 13, 2014)

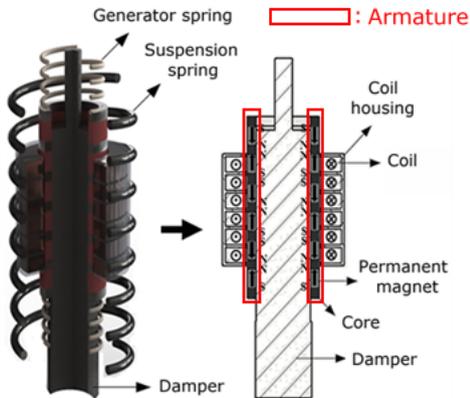
Accepted September 11, 2014



[Fig. 1] Compact portable linear electric generator for recharge



[Fig. 2] Buoy linear electric generator for wave-power generation



[Fig. 3] Structure of the resonance linear electric generator

이러한 단점의 극복을 위해 Fig. 3과 같은 공진형 선형 발전기는 발전기에 입력되는 진동에너지의 활용을 극대화하기 위하여 공진 현상을 적용하여 발전량을 향상시켰

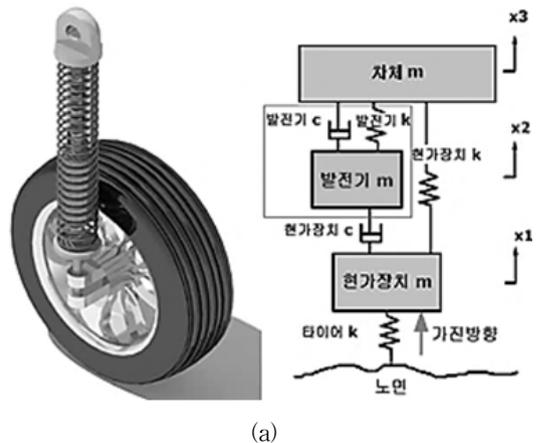
다[4]. 특히 본 연구에서 제안 할 현가장치 공진형 선형 발전기는 외부(노면)으로부터의 외력이나 차량 내부에 존재하는 잔여 진동 중 수직 방향의 선형운동을 발전의 원천으로 활용하는 발전기로서, 한정된 공간인 차량 휠 하우스 내의 현가장치에 설치되어 전기 동력공급을 보조 할 수 있다. 본 연구의 목적은 먼저 현가장치와 발전기가 결합된 다양한 설계 안들을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 발전량을 비교 검증한다.

또한, 다양한 외부 노면진동 주파수에서 공진의 발생을 유도하기 위하여 영구자석과 코어로 이루어진 아마튜어를 추가하여 다자유도 발전기 시스템을 제안하고 이전의 1자유도계 시스템과의 발전 성능을 비교 검토한다.

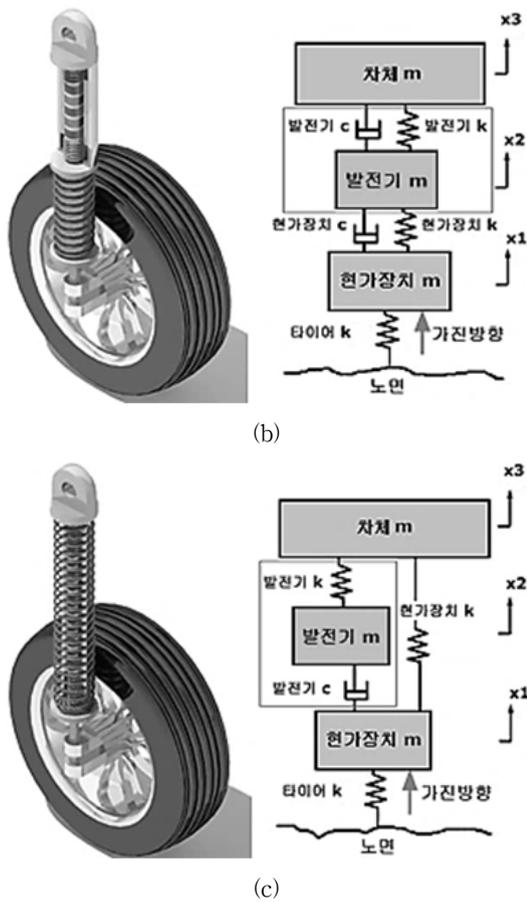
## 2. 공진형 선형 발전기 설계

### 2.1 선형 발전기 구조

한정적인 설치 공간에 대한 제약과 이미 그 자체로 발전기 자체의 질량-감쇠기-스프링 진동계와 유사한 자동차 현가장치의 진동계 구조로 인해 현가장치와 결합되어 사용될 공진형 선형 발전기는 다음 Fig. 4와 같은 다양한 방식으로 그 구조를 가질 수 있다. 현가장치 선형 발전기 시스템은 크게 차체, 발전기, 현가장치로 이루어지는 3개의 질량부가 스프링 및 감쇠기로 입력된 외력에 대해서 작용하는 구조이며 세가지 구조 안은 현가장치 상에서 공진형 선형 발전기가 위치하는 장소의 차이에 따라 구분된다.



(a)



[Fig. 4] Three structures of the linear generator  
 (a) Generator and suspension spring are separated  
 (b) Generator and suspension spring are connected  
 (c) Suspension damper as a shaft of the generator

$$W = V \cdot i = i^2 R = \frac{(Blv)^2}{R}$$

$$W = F \cdot v = c \cdot v \cdot v$$

$$\therefore C = \frac{(Bl)^2}{R}$$

발전기의 감쇠계수는 대부분이 전기적 시스템에서 비롯되는 전기적 감쇠계수이다. 이러한 전기적 감쇠계수는 위와 같은 수식의 순서에 따라 예측 가능하며. 여기서 B는 공극에서의 자속밀도, l은 코일의 길이, R은 코일의 내부저항을 의미한다. Fig. 4 (a)는 현가장치의 감쇠기 바로

위에 발전기의 축과 아마튜어 및 고정자가 위치해 있으며 발전기 아마튜어의 상하운동 피치 길이와 현가장치 감쇠기의 상하길이를 더한 길이의 현가장치 스프링이 시스템 전체를 감싸고 있는 형태이다. (b)의 구조는 (a)와 유사하나 발전기 시스템이 현가장치 시스템의 스프링 상수의 영향을 받도록 스프링 외의 상부에 설치되어있는 형태이다. (c)는 발전기 아마튜어의 축이 현가장치 시스템의 감쇠기로서 역할을 부담하는 축-감쇠기 일치 형태이다. 이러한 각각의 발전기 모델들은 다음과 같은 사양의 동일한 상수 값들을 부여하여 구조의 차이에 대한 사항만을 비교하게 된다.

[Table 1] Mechanical specification of the linear electric generator and suspension

	Mass m (kg)	Damping coefficient c (kg/s)	Spring constant k (N/m)
Tire (and wheel)	None		190,000
Suspension	59	798	16,182
Electric generator	(3 values for each design model)		
Vehicle body	290	None	

### 2.2 진동 변위 해석 및 구조 선정

제시된 선형 발전기 구조 안 중에서 가장 높은 기전력을 낼 수 있는 모델의 선정을 위해, 동일한 외부 진동이 각 발전기 시스템에 입력된다는 조건 하에서 발전기의 모델링을 통해 각 발전기 아마튜어의 운동 진폭 크기를 계산하였고 이에 따라 발전량 시뮬레이션을 수행하였다. 각 시스템은 Fig. 4의 자유물체도에 따라 아래와 같은 삼원 일차 진동 방정식으로 모델링하고 수치해석을 통하여 발전기 아마튜어의 진동 변위에 대한 계산을 수행하였다. Fig. 5는 각 구조 안에 일정한 외부 가진을 실시하였을 때의 발전기 아마튜어의 진동 변위 결과 그래프이다.

#### Vibration Equations for Each Model

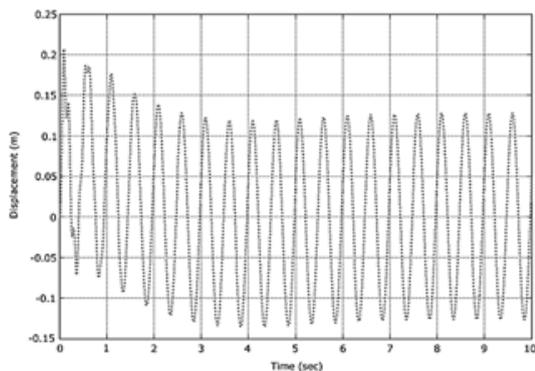
$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_3 \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_3 = \sin 4\pi t \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + (c_1 + c_2)\dot{x}_2 - c_3 \dot{x}_3 + k_3 x_2 - k_3 x_3 = \sin 4\pi t \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 + c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 - k_3 x_2 + (k_2 + k_3)x_3 = \sin 4\pi t \end{cases} \quad (a)$$

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_2 \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = \sin 4\pi t \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + (c_2 + c_3)\dot{x}_2 - c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_2 - k_3 x_3 = \sin 4\pi t \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 + c_3 \dot{x}_3 - k_3 x_2 + k_3 x_3 = \sin 4\pi t \end{cases} \quad (b)$$

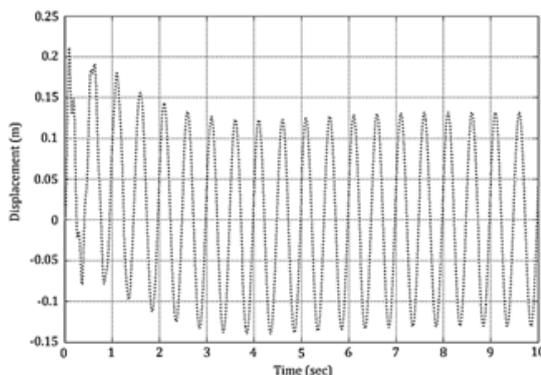
$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_2 \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_3 = \sin 4\pi t \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 + k_3 x_2 - k_3 x_3 = \sin 4\pi t \\ m_3 \ddot{x}_3 - k_2 x_1 - k_3 x_2 + (k_2 + k_3)x_3 = \sin 4\pi t \end{cases}$$

(c)

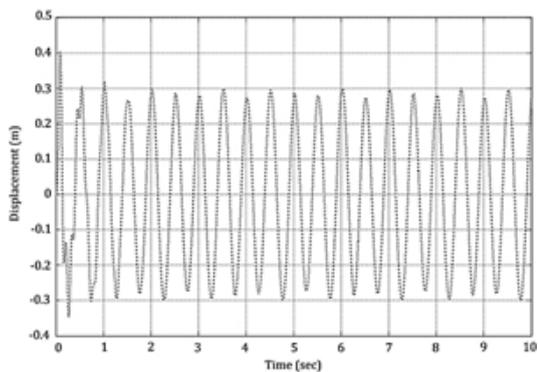
각 발전기의 아마튜어의 진동변위를 비교해 보면, Fig. 5의 (a), (b)와 달리 (c) 발전기 구아마튜어의 변위는 양 방향(상, 하) 모두 유사한 진폭만큼의 변위를 보이며, 초기 과도구간에서도 변위가 안정적이다. 그리고 과도 상태 후 안정상태의 진폭 역시 (c)안이 가장 높게 나온다.



(a)



(b)



(c)

[Fig. 5] Armature vibration displacement of each structure

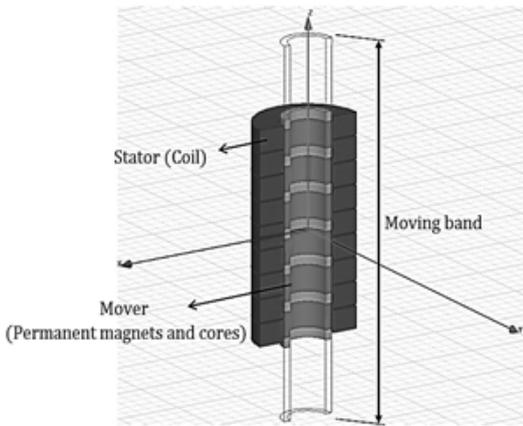
### 3. 발전량 검증 과도 해석

이번에는 각 발전기 구조의 발전량 비교분석 위한 유한요소해석을 수행하였다. 상용 전자기 유한요소해석 소프트웨어 ANSYS MAXWELL이 활용하여 즉 영구자석과 코어로 이루어진 아마튜어, 슬레노이드 코일로 이루어진 스테이터로 구성된 자기회로를 Fig. 6과 같이 유한요소 모델링하였다. MAXWELL상의 발전기 과도해석에서는 MAXWELL Circuit 애드온에서 설계된 외부회로(부하회로)를 발전기 해석모델에 연결시켜 부하해석을 진행하였다. 본 연구에서 확인이 필요한 물성치는 전력이므로 유도전류, 유도전압의 결과가 필요하다. 유도전류는 사전에 MAXWELL 유저가 유용적으로 설정하는 사항에 따라 유도전압에 대한 시뮬레이션 결과가 도출된다. 즉, 본 연구에서 진행된 시뮬레이션에서는 각 해석마다 동일한 유도전류를 설정하였고 해석결과 물성치인 유도전압의 비교로 전력에 대한 성능 검증이 가능하다. 먼저 선형 발전기 시스템의 해석을 위한 입력항을 규명하기 위해 이미 상수로써 정해져 있는 해석용 모델의 영구자석, 코어의 규격에서 질량  $m$ 을 계산하고, 공진 현상의 유도를 위해 위의 질량 값과 일반적인 포장도로의 주된 노면 진동주파수인 4Hz를 이용하여 발전기의 스프링 상수  $k$ 를 계산하였으며 습득된  $m, c, k$ 의 정보를 이용하여 MatLab 상의 시스템의 진동변위응답해석을 통한 MAXWELL 과도해석의 입력항을 도출하였다. 아마튜어를 각각의 진폭과 속도만큼 수직 운동시켜 진폭1, 진동수 4Hz 성분을 가진 주기함수 형태의 외부 가진이 입력되었을 때 각 발전기 구조 안의 진동 변위를 기반으로 한 근사적인 속도 항은 각각 다음과 같다[5].

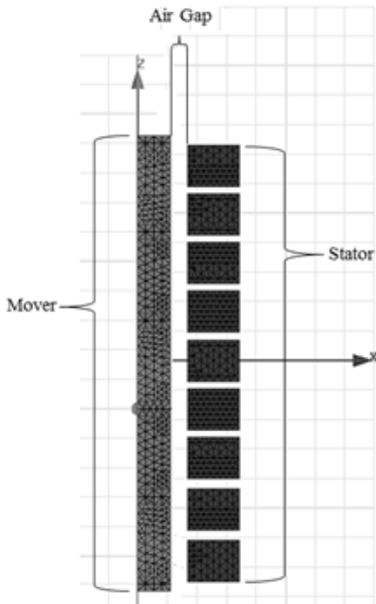
$$\text{Input Velocity (m/s)} \quad 0.12 \cdot 4\pi \cdot \cos(4\pi \cdot t) \quad (a)$$

$$0.13 \cdot 4\pi \cdot \cos(4\pi \cdot t) \quad (b)$$

$$0.3 \cdot 4\pi \cdot \cos(4\pi \cdot t) \quad (c)$$



↓  
Cylindrical symmetric 2D model

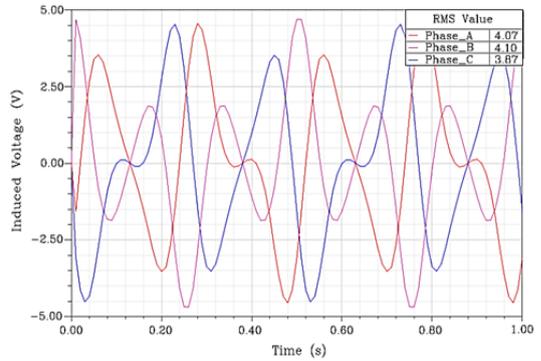


[Fig. 6] Finite element analysis model for the electric generator armature

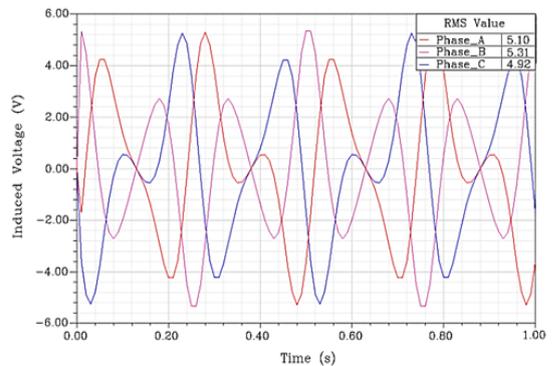
속도주기함수는 발전기의 자기회로 해석을 위한 유한 요소해석의 입력 항으로 활용되며 이에 따른 각 구조 안의 해석 결과는 Fig. 7과 같다.

본 발전기는 두 개의 영구자석에 세 개의 코일 와인딩이 대응하는 발전기의 최적 구조인 2극 3상 구조를 지향하며, 사용된 영구자석과 코일의 개수는 각각 6, 9개로 구성된다. Phase A, B, C는 각각의 2극3상 구조가 발생시

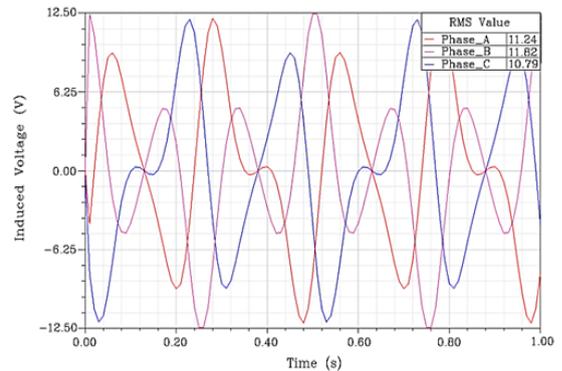
키는 유도전압을 나타내며 발전운동을 위한 수직운동의 시작 전, 각각의 초기 위치가 상이하므로 유도전압의 그래프 자체는 유사하나 상에서 차이가 나는 형태를 보이게 되었다.



(a)



(b)

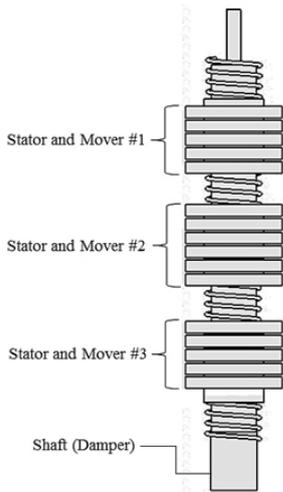


(c)

[Fig. 7] Electric generation transient analysis of each structure

#### 4. 발전기 시스템 다자유도화

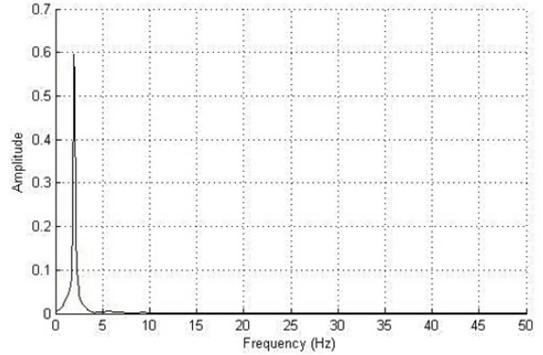
차량용 현가장치 선형 발전기는 작은 노면 진동 에너지로 발전량의 향상을 위해 공진현상을 활용한다. 공진 현상은 외부로부터의 가진 주파수와 발전기 아마튜어의 운동 내부 주파수의 설계 사양이 맞춰 질 수 있는가에 따라 그 발생 여부가 결정된다. 이전까지의 모델은 아마튜어의 질량 값과 발전기 스프링 상수 값에 따라 정해진 한 개의 공진주파수를 가지는 형태이므로 한정적인 노면 진동주파수에서 공진이 발생된다. 이에 따라 Fig. 8과 같은 구조로 아마튜어의 개수를 증가시켜 다수의 입력주파수에서도 최대한 공진현상을 유도할 수 있는 발전기의 구조 개선을 시도하였다. 단자유도계에 사용된 아마튜어의 구성품에 비해 35% 감소된 크기의 영구자석과 코어(요크)를 사용하였으며 변화된 만큼의 질량과 미설정된 스프링상수를 앞서 활용된 평균적인 노면 진동 주파수 4 Hz에 대응하도록 (공진 현상이 유도되도록) 설정하였다.



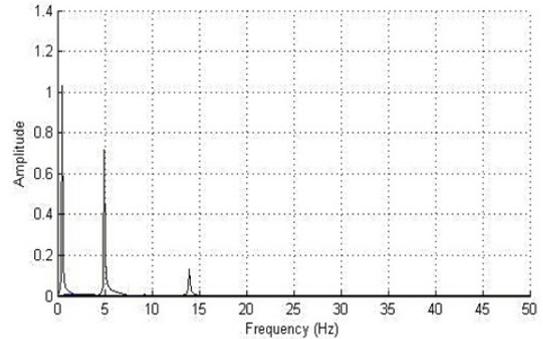
[Fig. 8] Multi degree of freedom model of the electric generator

기존의 4 Hz의 진동수의 가진 주파수를 기준으로 하여 차체의 가해지는 평균적인 주파수의 범위 1~15 Hz의 중, 최소치 1 Hz, 최대치 15 Hz의 추가적인 가진 주파수를 설정하여 총 3자유도 진동계를 이루는 발전기의 아마튜어에 고속 푸리에 변환법(FFT)을 통한 고유진동수 분석, 진동변위해석 및 발전량 과도해석을 수행하여 앞선 단계에서의 단자유도 진동계 발전기 모델과의 결과를 비교하여 다자유도 형태로의 개선 후 발전성능을 변화를

확인하였다. Fig. 9는 FFT 분석의 결과로써 아마튜어의 공진점을 보여주며 Fig. 10은 발전량 과도해석의 결과이다.



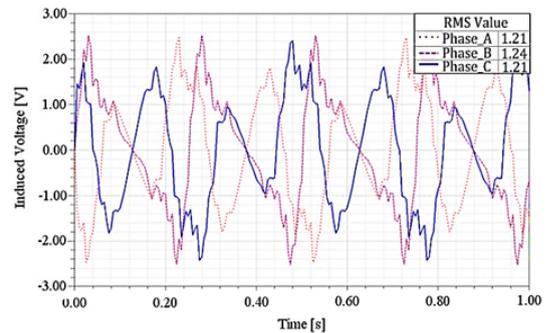
(a)



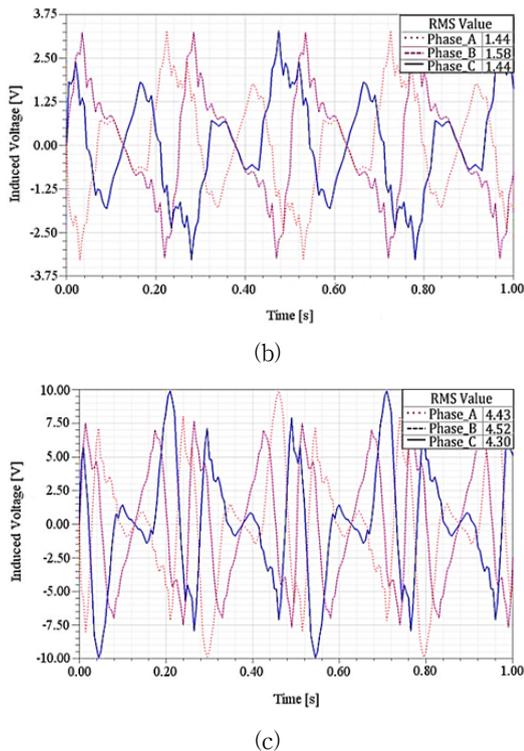
(b)

[Fig. 9] Frequency response of the electric generator armature by FFT

- (a) Single degree of freedom armature
- (b) Multi degree of freedom armature



(a)



[Fig. 10] Electric generation transient analysis of multi degree of freedom armature  
 (a) Electromotive Force on 1 Hz of excitation frequency  
 (b) Electromotive Force on 4 Hz of excitation frequency  
 (c) Electromotive Force on 15 Hz of excitation frequency

## 5. 결론

차량의 노면 주행 시 발생하는 진동에너지를 활용하여 자가 발전이 가능한 현가장치 선형 발전기의 여러 가지 구조를 검토하였고, 현가장치의 댐퍼가 발전기의 축 역할을 하는 구조의 발전기가 가장 좋은 발전성능을 보였다. 또한 다양한 노면진동주파수에서 공진현상을 발생시키기 위해 아마튜어를 1개에서 3개로 증가시키는 다자유도 발전기를 제안 및 시뮬레이션하여 성능을 검토하였다. 노면 가진 주파수를 크게 3개로 분류, 발전기 시스템을 가진하여 입력항을 도출하였고 이에 따른 기전력 발생량은 1개의 아마튜어 (3 와인딩) 당, 각각 1.22 V, 1.48 V, 4.41 V 가 발생하였고 전체 발전기 기전력 약

3.66 V, 4.44 V, 13.25 V를 확인하였다. 영구자석과 코어의 설계는 유동적이지만 본 발전기의 설치 위치 상 (차량 하체의 휠 하우스) 그 크기의 증가에 대해 제한이 있을 수 있고, 이 두 부품이 이루는 아마튜어 전체의 질량의 변화에 따라서 공진 현상 유도를 위한 발전기 스프링의 설계가 요구되므로 아마튜어는 발전기의 기능에 밀접한 영향을 끼친다. 영구자석과 코어의 크기가 단자유도에서 다자유도의 모델로 변화 중에 약 35 % 감소하였으나 발생 기전력은 1 Hz, 4 Hz의 가진 환경에서 이전 수치 대비 8.5 %, 13.8 % 감소하였고, 15 Hz의 가진 환경에서는 14.7 %의 증가 현상을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 다자유도 공진형 선형 발전기의 설계가 좀 더 정밀한 공진 주파수 분석, 아마튜어 치수의 최적 설계와 같은 추가적인 설계과정을 거친다면 1개의 평균 가진 주파수에 대응하는 단자유도 발전기에 대비해 발전성능의 향상을 기대할 수 있을 것으로 예상되었다.

## References

- [1] Starnier, T., Paradiso, J.A., "Human Generated Power for Mobile Electronics", Low-power electronics design, pp. 1-35, 2004
- [2] Polinder, H., et al. "Linear generator systems for wave energy conversion." Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal. 2007.
- [3] Jung, Sang-Yong, et al. "Performance evaluation of permanent magnet linear generator for charging the battery of mobile apparatus." Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International. IEEE, 2001.  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IEMDC.2001.939356>
- [4] Ruellan, Marie, et al. "Electromagnetic resonant generator." Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005. Vol. 3. IEEE, 2005.  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IAS.2005.1518650>
- [5] Gillespie, T. D., "Fundamentals of Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers Inc. 1992.  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/R-114>

**최 지 현(Ji-Hyun Choi)**

[준회원]



- 2013년 3월 : 영남대학교 공학사 (철단기계전공)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야>

선형 발전기 및 액츄에이터 설계

---

**김 진 호(Jin Ho Kim)**

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 공학사 (기계설계전공)
- 2002년 5월 : 미) U.C. Berkeley 공학 석사 (기계공학전공)
- 2002년 9월 ~ 2005년 9월 : 미) U.C. Berkeley Ph.D. (기계공학전공)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 기계공학부 조교수

<관심분야>

초정밀 모터 및 액츄에이터 설계