

전자기해석 및 시뮬레이션을 적용한 차량용 마사지 시트 액츄에이터 개발

Development of Massage Seat Actuator for Automobile using Electromagnetic Analysis and Simulation

정 명 진*★

Myung-Jin Chung*★

Abstract

Recently, researches about automobile seat having function to support the comfort to driver and passenger during the driving are conducted in various fields including automobile seat having massage function. The effect of massage depends on the pattern of massage such as time, magnitude, and shape. In this paper, linear motor actuator, which is used as driving method in the automobile massage seat, and electromagnetic analysis method, which is used to improve the magnetic efficiency in the design of actuator, is proposed. Electromagnetic analysis using finite element method is conducted in the design of linear motor actuator. Input voltage shape for massage pattern is calculated by simulation using mathematical model of actuator. Performance test for massage pattern generation is conducted with automobile massage seat having developed actuator and controller. It is verified that developed actuator system is applicable in the automobile massage seat.

요 약

최근 운전자와 승차자의 편안함을 제공할 수 있는 기능을 보유한 자동차 시트에 대한 연구가 마사지 기능을 갖는 자동차 시트를 포함하여 다양한 분야에서 수행되고 있다. 마사지 효과는 시간, 크기, 형상과 같은 마사지 패턴에 의존한다. 본 연구에서는 차량용 마사지 시트의 구동장치로 사용되는 선형모터 액츄에이터와 액츄에이터의 효율향상 설계를 위한 전자기해석 및 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 선형모터 액츄에이터 설계에 유한요소 기법을 적용하여 전자기 해석을 수행하고, 액츄에이터의 수식모델을 사용한 시뮬레이션을 통해 두드림 마사지 패턴 구현을 위한 전압 파형을 도출하였다. 제작된 액츄에이터와 제어기를 차량용 마사지 시트에 장착하여 마사지 패턴 생성에 대한 성능검증을 통해 개발된 액츄에이터의 적용 가능성을 확인하였다.

Key words : Massage seat, Actuator, Automobile, Electromagnetic analysis, Simulation, Massage pattern

* Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University

★ Corresponding author

E-mail : mjchung@kpu.ac.kr, Tel : +82-31-8041-0461

※ Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(NRF-2018R1D1A1B07041829).

Manuscript received Mar. 8, 2019; revised Jun. 17, 2019; accepted Jun. 17, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

최근 운전자와 승차자의 편안함을 제공할 수 있는 기능을 보유한 자동차 시트에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다[1-5]. 자동차 시트는 운전자와 차량을 연결하는 도구로써 장시간 운전 시에도 신체의 편안함을 제공하여 운전자의 피곤함을 최대한 줄일 수 있어야 한다. 장시간 운전하는 운전자의 대부분이 허리통증을 느끼게 되는데, 운전자의 허리통증을 줄여주기 위한 방법으로 통증 완화, 인체 기능 개선, 피부와 근육조직의 혈액 순환 증가, 고혈압 및 저혈압 감소, 심장 박동수 안정화 등의 효과가 있는 마사지가 제안되고 있다[6]. 자동차 시트에 마사지 기능을 구비한 차량용 마사지 시트는 사용되는 구동장치에 따라 기계식 마사지 시트와 공기압식 마사지 시트로 분류된다. 기계식 마사지 시트는 지지면적이 넓고, 조립이 용이한 반면, 돌출량을 크게 할 수 없으며, 중량이 무거운 단점을 가지고 있다. 공기압식 마사지 시트는 돌출량 조절이 용이하고, 중량이 가벼우며, 반응속도가 빠른 반면, 조립시 공기셀이 손상될 수 있으며, 공기 배출 소음이 발생하는 단점을 가지고 있다. 따라서, 기존의 기계식 마사지 시트와 공기압식 마사지 시트의 장점을 유지하며 단점을 개선할 수 있는 마사지 시트에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[7-9].

본 연구에서는 차량용 마사지 시트의 구동장치로 선형모터 액츄에이터를 제안하고, 액츄에이터의 효율향상 설계를 위한 전자기 해석 및 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 기존의 솔레노이드 방식이나 보이스코일 방식과 달리 선형모터 방식을 적용함으로써 자기효율 향상, 이동속도 및 이동거리 개선을 구현 하였다. 또한, 고무봉을 사용하여 신체에 직접적인 두드림 자극을 줄 수 있는 구조를 적용하였으며, 전후 두드림 진동의 세기 및 주파수를 제어할 수 있는 제어기를 적용하였다. 액츄에이터의 효율향상을 위해 유한요소 기법을 사용하여 전자기 해석 및 설계를 수행하였으며, 액츄에이터의 수식모델을 적용한 시뮬레이션을 통해 두드림 패턴 구현을 위한 전압 파형을 도출하였다. 액츄에이터와 제어기를 제작하여 모듈 성능시험과 차량용 마사시 시트에 장착하여 마사지 패턴에 대한 성능을 검증하였다.

II. 액츄에이터 구성

차량용 마사지 시트의 구동장치로 사용되는 선형모터 액츄에이터는 그림 1과 같이 추력을 생성하기 위한 두 쌍의 자석과 코일, 초기 추력 및 위치를 설정하기 위한 스프링과 스톱퍼, 두드림 타격을 위한 고무봉으로 구성된다.

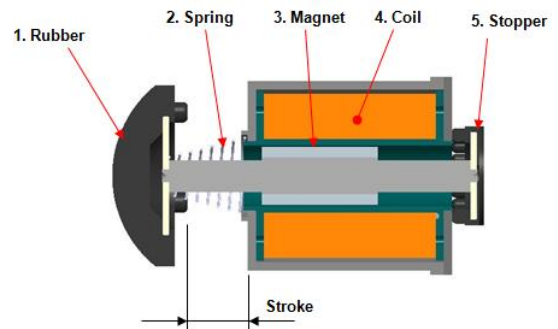


Fig. 1. Configuration of linear motor actuator. 그림 1. 선형모터 액츄에이터의 구성

선형모터 액츄에이터의 동작원리는 보이스코일 액츄에이터와 유사하나 내부구조는 기존의 보이스코일 액츄에이터와 다른 구조를 갖는다[10]. 선형모터 액츄에이터는 그림 2와 같이 자석의 N극과 S극 사이에서 발생하는 자기장 내에 놓여 있는 코일에 전류가 흐르면 플레밍의 왼손법칙에 의해 추력이 발생하게 된다.

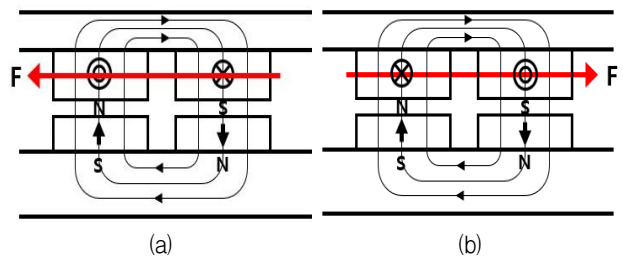


Fig. 2. Thrust force according to current flowing through coil; (a) forward force and (b) backward force. 그림 2. 코일에 흐르는 전류 방향에 따른 추력

전기신호에 의해 도선에 흐르는 전류의 방향을 바꾸게 되면 발생하는 추력이 반대가 되어 전후 방향의 구동력이 발생하며, 자석에 연결된 마사시용 고무봉이 전후로 진동하여 전후 두드림 자극을 생성하게 된다.

III. 액츄에이터 설계

차량용 마사지 시트의 구동장치에 사용되는 선형 모터 액츄에이터에 요구되는 동작거리(stroke), 평균추력, 공진주파수, 최대가속도 등을 만족하도록 전자기해석 기법을 적용하여 액츄에이터를 설계한다. 액츄에이터의 추력은 자석에 의해 발생하는 자기장의 세기인 자속밀도와 코일의 길이 및 코일에 흐르는 전류에 의해 생성되며 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{F}(t) = \vec{B} \times n\vec{l}i(t) \quad (1)$$

여기서, $F(t)$ 는 추력, B 는 자속밀도, n 은 코일 권선수, l 은 자기장에 놓이는 코일 길이, $i(t)$ 는 코일에 흐르는 전류를 나타낸다.

자속밀도는 자석의 세기와 두께, 코어 및 공극으로 구성되는 자기회로에 의존하게 된다. 전자기해석 툴에 액츄에이터의 설계 파라미터 값을 적용하여 자속분포와 추력을 구할 수 있다. 표 1은 전자기해석에 사용된 액츄에이터의 물리적, 기계적 및 전기적 상수 값을 나타낸다. 그림 3은 자석과 코일의 상대위치(액츄에이터의 동작거리: $\pm 3\text{mm}$)에 따른 자속분포를 나타내며, 그림 4는 코일 고정시에 자석(Load)의 위치(액츄에이터의 동작거리)에 따른 발생 추력을 나타낸다. 코일에 1.2A의 전류가 흐르는 경우에 8.2N의 최대 추력 및 5.8N의 최소 추력이 발생한다.

Table 1. Physical, geometrical, and electrical constants of actuator used for electromagnetic analysis.

표 1. 전자기해석에 사용된 액츄에이터의 물리적, 기계적 및 전기적 상수

Parameters		Value	Unit
Physical constants	Saturation flux density	1.5	T
	Cohesive force	$847 \cdot 10^5$	A/m
	Permeability of core	$2 \cdot \pi \cdot 10^{-3}$	H/m
	Permeability of air	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	H/m
	Resistivity of coil	$1.72 \cdot 10^{-8}$	Ωm
Geometrical parameters	Thickness of magnet	3.0	mm
	Length of magnet	11	mm
	Diameter of coil	0.6	mm
	Turns of coil	204	mm
	Air gap	2	mm
Electrical parameters	Current	2.4	A
	Resistance	1.68	Ω
	Inductance	0.02	mH

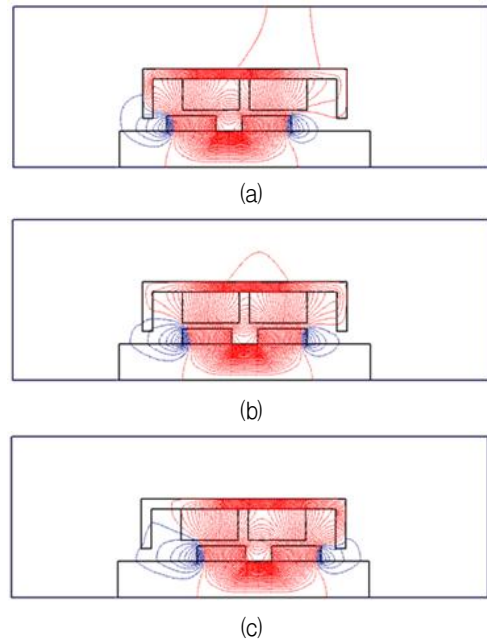


Fig. 3. Magnetic field distribution according to relative position of magnet and coil; (a) 2mm (-3mm), (b) 5mm (0mm), and (c) 8mm (+3mm).

그림 3. 자석과 코일의 상대위치에 따른 자속분포

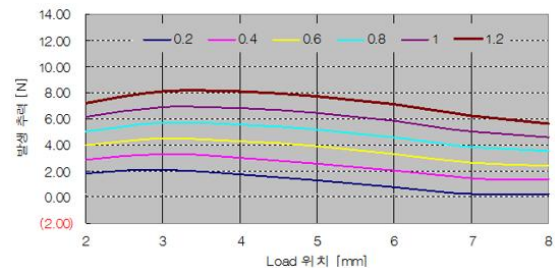


Fig. 4. Trust force according to position of magnet.

그림 4. 자석(Load)의 위치에 따른 발생 추력

IV. 시뮬레이션

차량용 마사지 시트의 구동장치에 사용되는 선형 모터 액츄에이터를 그림 5와 같이 회로와 기구로 구성되는 개요도로 나타낼 수 있다[11].

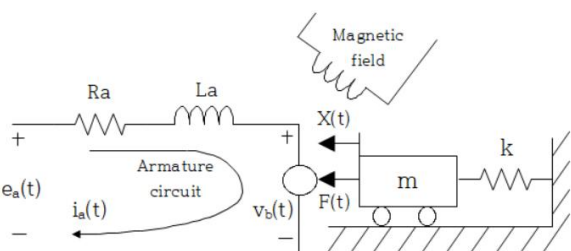


Fig. 5. Schematic diagram of linear motor actuator.

그림 5. 선형모터 액츄에이터의 개요도

자석을 고정자계로 전압이 인가되는 코일을 저항 (R_a), 인덕터(L_a), 역기전력($v_b(t)$) 성분으로 표현하며, 자석이 부착된 고무봉을 질량(m)성분으로 하고 스프링을 스프링(k) 성분으로 표현할 수 있다. 그림 5에서 인가된 전압($e_a(t)$)에 의해 코일에 흐르는 전류($i_a(t)$)의 관계는 식(2)와 같다[11].

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + v_b(t) \quad (2)$$

여기서, $v_b(t) = K_b \frac{dx(t)}{dt}$ 이며 K_b 는 역기전력 상수를 나타낸다.

그림 5에서 발생된 추력($f(t)$)에 의해 고무봉이 이동하는 변위($x(t)$)의 관계는 식(3)과 같다.

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + kx(t) = f(t) \quad (3)$$

여기서, $f(t) = nBli(t) = K_f i(t)$ 이며 K_f 는 추력 상수를 나타낸다.

식(2)와 식(3)을 라플라스변환하여 인가된 전압에 대한 고무봉의 변위의 관계식을 세우면 식(4)와 같다.

$$X(s) = \frac{K_f}{(R_a + L_a s)(ms^2 + k) + K_f K_b s} E_a(s) \quad (4)$$

MATLAB(Simulink) 툴을 사용하여 그림 6과 같이 선형모터 액추에이터를 표현하고, 표 1의 기계적 및 전기적 상수를 사용하여 입력 전압에 따른 고무봉의 변위를 확인할 수 있다.

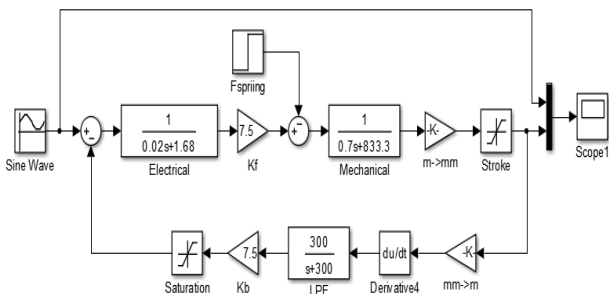


Fig. 6. Block diagram of linear motor actuator.
그림 6. 선형모터 액추에이터의 블록선도

그림 7은 선형모터 액추에이터에 인가되는 입력 전압 형상에 따른 고무봉의 마사지 패턴 변위 형상에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

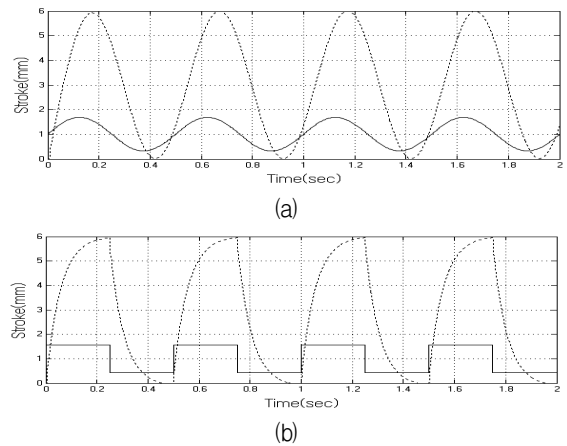


Fig. 7. Massage pattern displacement(dotted line) profile according to applied input voltage(solid line) shape; (a) sine, and (b) square.

그림 7. 입력 전압 형상에 따른 고무봉의 마사지 패턴 변위 형상

V. 실험 및 고찰

차량용 마사지 시트에서 구동장치인 액추에이터를 제어해서 다양한 마사지 패턴을 생성하기 위해 그림 8과 같이 액추에이터 제어기를 구성한다. 액추에이터는 DC 모터와 같이 전기자 코일에 인가되는 DC 전류의 방향을 변환하여 양방향 구동을 구현할 수 있다. 전류의 크기 및 주파수를 조정하여 액추에이터의 동작거리 및 속도의 제어가 가능하다.

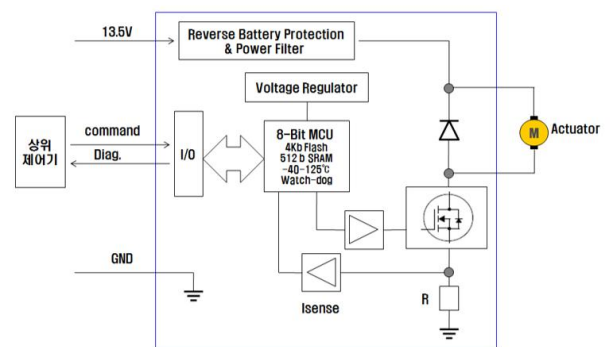


Fig. 8. Control block diagram of linear motor actuator.
그림 8. 선형모터 액추에이터의 제어기 구성

선형모터 액추에이터(그림 9)와 제어기(그림 10)를 제작하여 모듈 성능시험과 차량용 마사지 시트에 장착하여 마사지 패턴에 대한 성능을 검증한다. 그림 9(a)는 하우징에 고정되는 코일블록, 그림 9(b)는 고무봉에 고정되는 자석블록, 그림 9(c)는 조립된 액추에이터를 나타낸다.

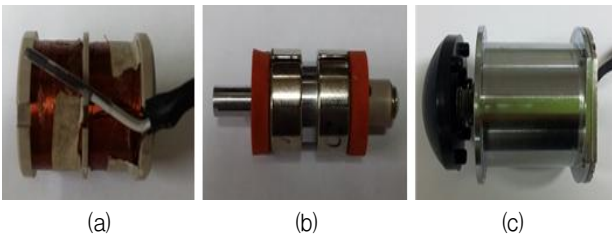


Fig. 9. Manufactured linear motor actuator: (a) coil block, (b) magnet block, and (c) assembled actuator.

그림 9. 제작된 선형모터 액츄에이터

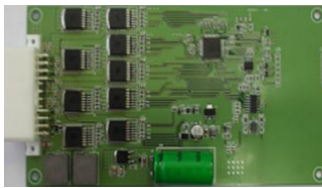


Fig. 10. Manufactured linear motor actuator controller.

그림 10. 제작된 선형모터 액츄에이터 제어기

선형모터 액츄에이터의 동작거리와 추력을 측정하기 위한 실험장치는 그림 11과 같다. 동작거리는 $\pm 3.0\text{mm}$ 로 측정되었으며, 추력은 그림 12와 같이 1mm 단위로 자석의 위치에 따라 코일에 정격전류 (2.4A)를 인가한 조건에서 스프링의 작용력이 포함된 추력(F_{measured})을 측정하고, 코일에 전류가 흐르지 않는 조건에서 스프링의 작용력(F_{spring})을 측정하여 제외함으로써 추력(F_{thrust})을 산출한다. 동작 거리에 대해 최대 추력은 15.7N(1.2A의 전류흐름으로 전자기해석에서 계산된 8.2N과 비교시 4.45%의 오차)이며, 평균 추력은 14.9N으로 측정되었다.

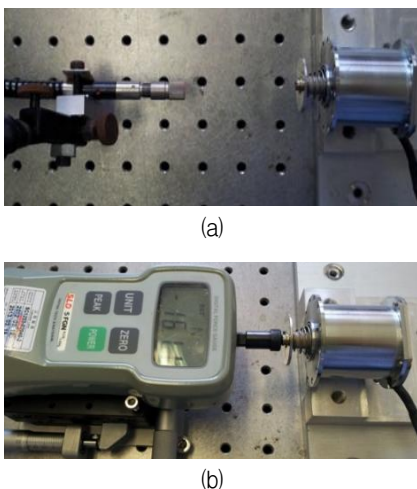


Fig. 11. Experimental setup for measurement of (a) stroke, and (b) thrust force.

그림 11. 동작거리 및 추력 측정 실험장치

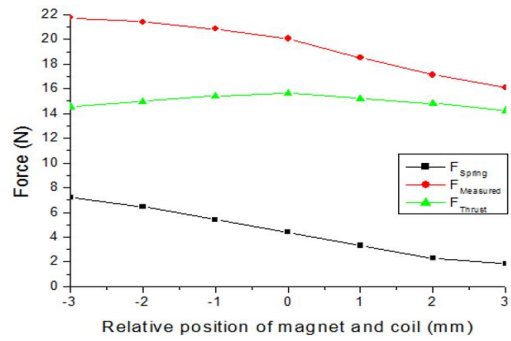


Fig. 12. Measured force according to position of magnet.

그림 12. 자석의 위치에 따른 추력 측정값

그림 13은 선형모터 액츄에이터의 전달함수를 측정하기 위한 실험장치를 나타낸다. 신호분석기에서 일정한 크기의 전압신호를 액츄에이터에 인가하고 레이저 변위계를 사용하여 액츄에이터의 주파수에 따른 변위를 측정한다. 그림 14는 측정된 전달함수의 크기와 위상 선도를 나타낸다. 10Hz - 100Hz의 동작 주파수 외부인 150Hz에서 공진주파수가 확인되었다.

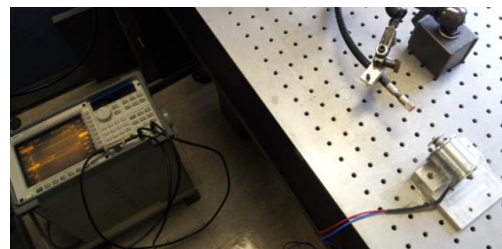


Fig. 13. Experimental setup for measurement of transfer function of linear motor actuator.

그림 13. 전달함수 측정 실험장치

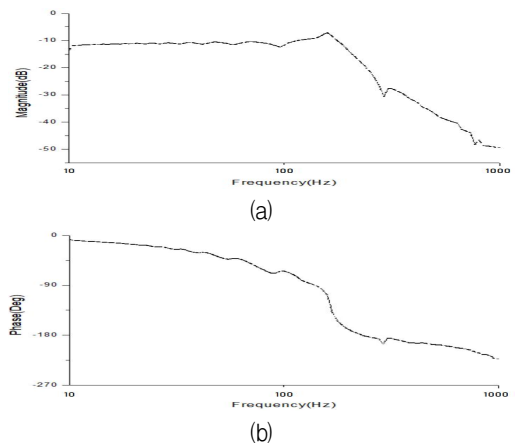


Fig. 14. Measured transfer function: (a) magnitude, and (b) phase.

그림 14. 측정된 전달함수

차량용 마사지 시트에서 마사지 패턴에 대한 성능을 검증하기 위한 실험장치는 그림 15와 같다. 그림 15(a)는 6개의 액츄에이터가 장착된 마사지 시트를 나타내며, 그림 15(b)는 6개의 액츄에이터에 의해 발생하는 마사지 패턴을 측정하기 위해 가속도계가 설치된 마사지 시트를 나타낸다.

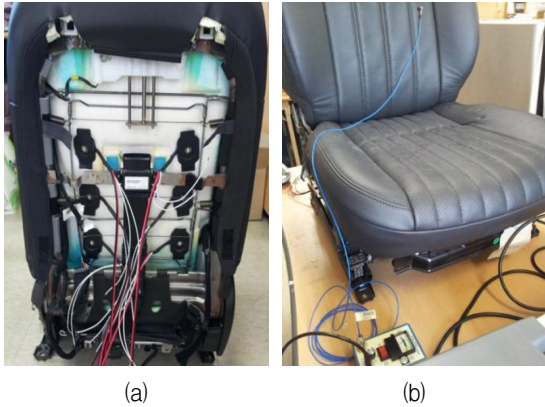


Fig. 15. Experimental setup for measurement of massage pattern; (a) massage seat installed with actuator, and (b) massage seat installed with accelerometer.
 그림 15. 마사지 패턴에 대한 성능 측정 실험장치

그림 16은 마사지 패턴에 따른 액츄에이터의 코일에 흐르는 전류파형을 나타낸다. 전류파형에 해당하는 추력이 마사지 시트에 두드림 자극을 발생하게 된다. 그림 17은 그림 15(a)와 같이 6개의 액츄에이터를 마사지 시트에 설치하고 각 액츄에이터에 그림 16과 같은 마사지 패턴을 인가하며 그림 15(b)와 같이 시트면에서 측정된 가속도 파형을 나타낸다. 그림 17로부터 모든 위치에서 유사한 마사지 패턴의 두드림 자극이 작용함을 확인할 수 있다.

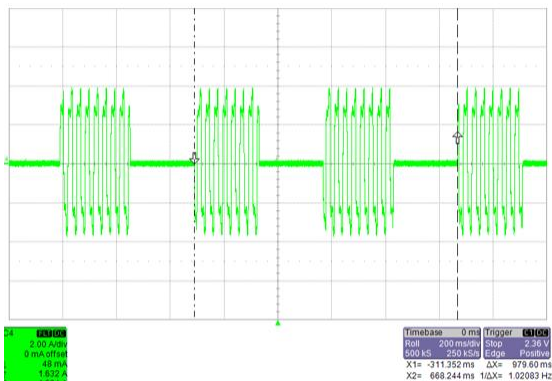


Fig. 16. Current flowing through coil of the linear motor actuator according to massage pattern.
 그림 16. 마사지 패턴에 따른 코일에 흐르는 전류 파형

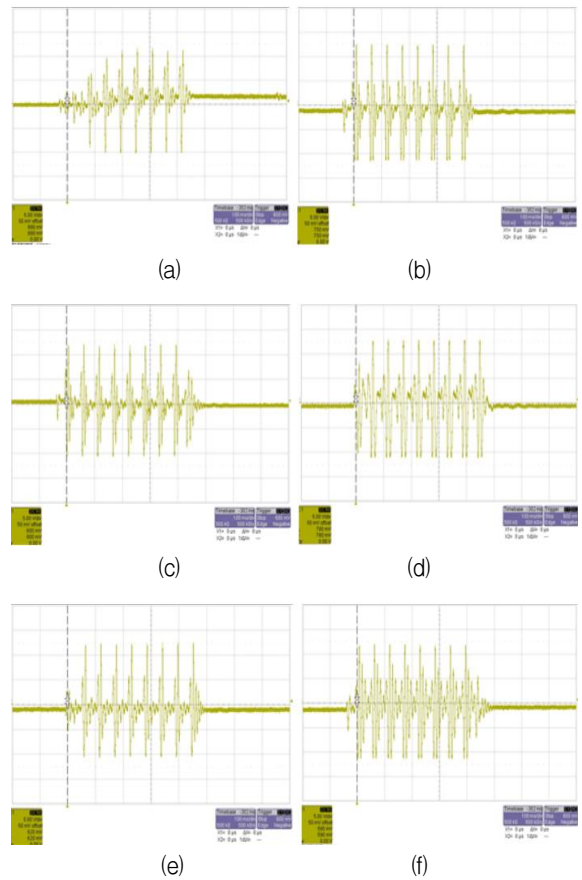


Fig. 17. Acceleration measured according to position of massage seat: (a) upper left, (b) upper right, (c) middle left, (d) middle right, (e) lower left, and (f) lower right.
 그림 17. 마사지 시트의 위치에 따라 측정된 가속도

VI. 결론

본 연구에서는 차량용 마사지 시트의 구동장치로 기존의 솔레노이드 방식이나 보이스코일 방식과 달리 선형모터 방식을 제안하였다. 선형모터 액츄에이터의 효율향상을 위해 유한요소 기법을 사용하여 전자기 해석을 통해 액츄에이터의 설계과라미터를 결정하였으며, 액츄에이터의 수식모델을 적용한 시뮬레이션을 통해 두드림 마사지 패턴 형상 구현을 위한 입력 전압 파형을 도출하였다. 제작된 선형모터 액츄에이터와 제어기의 모듈 성능시험(성능시험으로 측정된 추력은 전자기해석에서 추정된 추력과 4.45%의 오차를 가짐-전자기해석의 유용성 확인)과 차량용 마사지 시트에 장착하여 마사지 패턴에 대한 통합 성능시험(성능시험으로 측정된 마사지패턴 가속도 파형과 시뮬레이션으로 도출된 가속도 파형이 유사함-시뮬레이션의 유용

성 확인)을 통해 선형모터 액츄에이터의 설계에 적용한 전자기해석과 시뮬레이션의 유용성을 확인하였다. 또한, 제작된 선형모터 액츄에이터가 차량용 마사지 시트의 구동장치로 적용이 가능함을 확인하였다.

References

- [1] M. J. Chung, "Automobile power seat using motor current profile control technology," *j.inst. Korean.electr.electron.eng*, vol.23, no.1, pp.224-229, 2019. DOI: 10.7471/ikeee.2019.23.1.224
- [2] A. Lahiry, S. Chanana, and S. Kwnwar, "Automation in automobiles: power seat," in *Proc. of the 2nd International Conference on Machine Vision*, pp.158-160, 2009.
DOI: 10.1109/ICMV.2009.58
- [3] Y. Shi, I. T. Lee, A. M. Afsar, J. I. Song, "Development and performance analysis of an automotive power seat for disabled persons," *International journal of automotive technology*, Vol.10, no.4, pp.481-488, 2009.
DOI: 10.1007/s12239-009-0055-8
- [4] M. J. Chung, "Control Method of Automobile Power Seat Considering the Driver Sensibility," in *Proc. of The KSME 2015 Annual Meeting*, pp.3563-3565, 2015.
- [5] S. Y. Hwang, M. J. Chung, "Development of Automobile Power Seat Motor Controller Having Soft-Start and Soft-Stop Function," *Int. Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, vol.7, no.4, pp.225-229, 2015.
- [6] C. Y. Yook, "Physiological considerations and future aspects on general body massage," *Korea sport research*, vol.20, no.4, pp.53-63, 2009.
- [7] M. J. Chung and S. Y. Whang, "Development of massage seat actuator for automobile by using electromagnetic analysis," in *Proc. of KSME IT convergence conference*, pp.153-154, 2012.
- [8] M. J. Chung, "Development of actuator system for automobile massage seat," in *Proc. of the 29th Institute of Control, Robotics and Systems Annual Conference*, pp.273-274, 2014.

[9] T. H. Kim, "A study on optimal design of controller for driving the automobile massage seat," Master thesis, Korea Polytechnic University, 2012.

[10] M. J. Chung and S. Y. Son, "Development of compact auto focus actuator for camera phone by applying new electromagnetic configuration," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol.20, no.12, pp.2087-2093, 2006.

DOI: 10.1007/BF02916325

[11] Norman S. Nise, *Control Systems Engineering, 6th ed*, John Wiley & Sons, Inc. 2011.

BIOGRAPHY

Myung-Jin Chung (Member)



1989 : BS degree in Mechanical Engineering, Hanyang University.
1991 : MS degree in Production Engineering, KAIST.
2002 : PhD degree in Mechanical Engineering, KAIST.

1989~1997 : Research Engineer, Hyundai Electronics.
1997~2004 : Researcher, Hynix Semiconductor.
2004~current : Professor, Dept. of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University.