

# 상용차용 마그네틱 현가기구 개발에 대한 연구

## A study on the magnetic suspension system for commercial vehicle

주형준† · 김대성\* · 이봉현\* · 김정인\* · 김찬중\*

Hyung-Jun Ju, Dae-Sung Kim, Bong-Hyun Lee, Jung-In Kim, Chan-Jung Kim

**Key Words** : Seat suspension(시트 현가), Magnet(자석), Commercial vehicle(상용차), Tranmissibility(전달률)

### ABSTRACT

The drivers of commercial vehicle easily feel tired because of a long time driving and bad road condition. Therefore it is very important to make the driver seat comfortable. This paper introduces the suspension system of driver's seat using magnetic force. The combination of linear spring and magnetic force can make nonlinear spring which has optimal stiffness for minimal vibration transmissibility. The vibrations of driver's seat floor are measured in various road condition. And the numerical simulations and experiments are performed to define the optimal parameter of magnetic suspension system.

석간의 힘의 관계를 시험 평가를 통해 검증하였다..

## 1. 서 론

상용차 운전자는 운전시간이 길고, 비포장도로 등으로 여건이 좋지 않은 주행조건에서 운전을 하므로 피로감을 쉽게 느끼고 집중력이 떨어지게 된다. 따라서 상용차는 일반적으로 운전자의 피로도 감소 및 안락성 유지를 위해 시트에 현가장치를 구성하는데 보통 스트링-댐퍼(Spring Damper)로 구성된 현가계를 이용하며, 일부 고급 상용차는 에어스프링(Air Spring)을 이용하여 안락성을 향상시키기도 한다. 본 논문은 자석을 이용하여 비선형 현가계를 구성함으로써 운전자의 안락성을 향상시키는 방법에 대하여 연구하였다. 국도, 고속도로, 시내도로 주행 및 비포장로, 특수로 주행을 통해 차량 운전석 바닥의 진동특성을 분석하였고, 현가계 모델링 및 수치해석을 통하여 현가계 강성에 따른 진동전달률을 분석하여 최적의 현가계 강성을 도출하였다. 또한 연구자

## 2. 상용차용 마그네틱 현가계 설계

### 2.1 상용차 주행 시 진동특성 분석

#### (1) 일반도로 주행시험

상용차의 차량 운전석 바닥 진동특성을 분석하기 위해 일반도로 주행 시 진동을 측정하였다. 가속도계를 운전석 바닥에 고정시키고 데이터 획득장치(Data Acquisition)를 이용하여 주행데이터를 측정하였다. 도로별 주행 시 특성을 보기 위해 고속도로, 국도평지, 국도 산악로, 시내도로, 비포장로를 주행하여 차량 운전석 바닥의 진동을 측정하였다.



Figure 1 Commercial bus

† 주형준 : 자동차부품연구원  
E-mail : hjju@katech.re.kr  
Tel : 041-559-3128 , Fax : 041-559-3340

\* 자동차부품연구원



Figure 2 DAQ system for vehicle road driving test

Figure 4는 측정된 차량 운전석 바닥의 가속도 진동신호를 보여주며, Figure 5는 주파수 도메인으로 변경한 차량 운전석 바닥의 PSD를 나타낸 그림이다.



Figure 3 Driving Test(National highways)

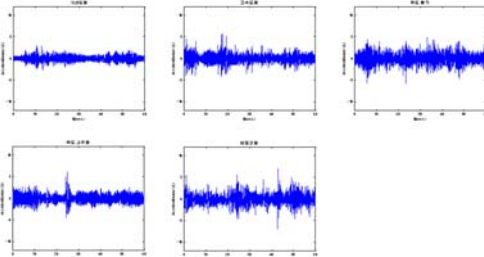


Figure 4 Time signals at driver seat floor (National highways)

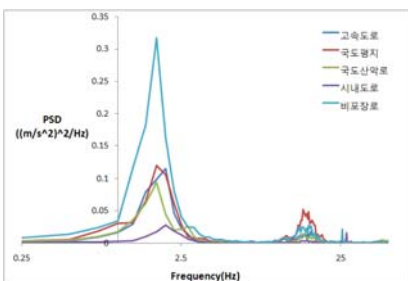


Figure 5 PSD of vibration signals at driver seat floor (National highways)

Figure 5의 PSD에서 2 Hz 부근의 첨두치는 차량 스프링 질량(Sprung Mass)의 공진으로 보이며, 20 Hz 부근의 첨두치는 차량 언스프링 질량(Un-sprung Mass)의 공진으로 사료된다.

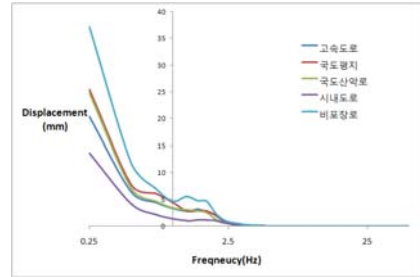


Figure 6 Oscillating displacement of driver seat floor(National highways)

측정된 가속도를 식(1)로 변환하면 Figure 6과 같은 진동변위를 구할 수 있다.

$$D \cos(\omega t) = -\frac{A}{\omega^2} \cos(\omega t) \quad \text{식(1)}$$

Figure 6에서 보는 바와 같이 2.5 Hz 이하의 저주파대역은 진동변위가 크며 고주파로 갈수록 진동변위가 작아짐을 알 수 있다.

(2) 특수로 주행시험

상용차의 험로 주행 시 진동특성을 알아보기 위해 특수로 주행시험을 수행하였다



Figure 7 Driving Test(Proving ground)

자동차부품연구원의 벨지안로 및 표준악로를 시속 10 km로 주행하면서 운전석 바닥 진동을 측정하였다. 일반도로에서의 주행결과와 같이 스프링 질량 공진이 첨두치로 나타나고 언스프링 질량 공진은 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 특수로 주행 시 저속으로 주행하였으며 일반도로 대비 저주파의 가진이 주요하기 때문이다.

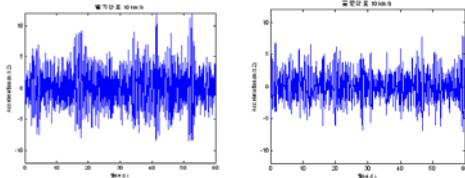


Figure 8 Time signals at driver seat floor (Proving ground)

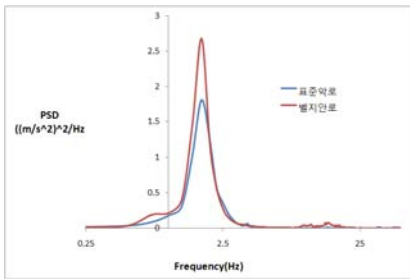


Figure 9 PSD of vibration signals at driver seat floor (Proving ground)

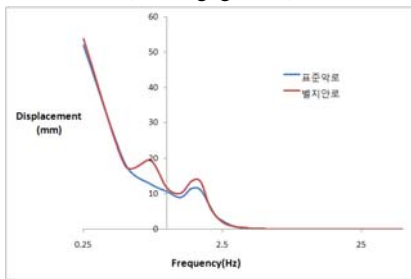


Figure 10 Oscillating displacement of driver seat floor (Proving ground)

(3) 노면 진동 특성 선정

상용차의 사용용도에 따라 두가지 노면을 설정하였다. 주로 온로드(on-road)를 주행하는 상용버스 및 상용트럭의 경우 유럽자동차연합회에서 정의한 노면 빈도를 고려하여 온로드용 차량 운전석 진동을 설정하였고, 건설장비 및 특수차량 등 주로 오프로드 (Off-road) 및 험로를 주행하는 차량을 위해서는 특수로에서 시험한 벨지안로, 표준악로를 기본으로 하는 오프로드용 차량 바닥진동을 설정하였다. 따라서 상용차용 차량 현가계 개발 시 차량의 사용용도에 맞춰서 현가계의 설정을 다르게 구성하여 안락감을 최대화 할 수 있는 최적화가 요구된다.

Table 1 온로드 차량 주행 노면 빈도 (CARLOS Europe)

고속도로	국도 평지	국도 산악로	시내도로	비포장로
30	29	14	23	4

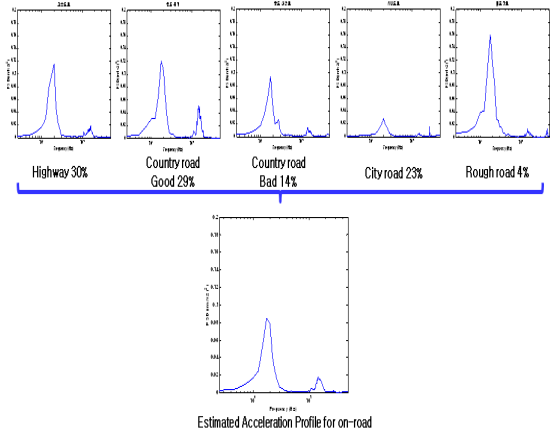


Figure 11 Estimated acceleration profile of driver seat floor (for on-road condition)

Table 2 오프로드 차량 주행 노면 빈도

벨지안로	표준악로
50	50

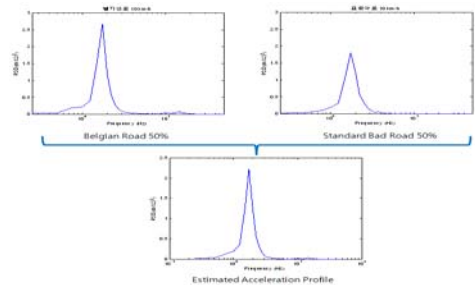


Figure 12 Estimated Acceleration Profile of driver seat floor (for off-road condition)

2.2 마그네틱 현가계 특성 분석

(1) 진동 전달률 해석을 통한 강성 최적화

상용차의 주행 시 차량 실내 바닥의 진동이 시트에 전달되는 진동전달률을 분석하여 최적의 강성을 구하였다. 운전자 바닥의 진동이 운전자에 전달되는 진동전달률을 구하기 위해 다음과 같이 모델링을 구성하였다.

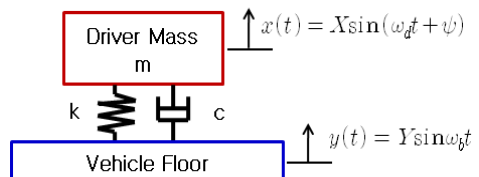


Figure 13 The modeling of the driver seat suspension

위의 2자유도 모델링의 운동방정식을 구하면 다음

과 같다.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0$$

$$m\ddot{x} + \dot{c}\dot{x} + kx = cYw_b \cos w_b t + kY \sin w_b t$$

본 운동방정식을 통하여 차량 운전석 바닥진동이 운전자에 전달되는 진동전달률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{X}{Y} = \left[ \frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2},$$

$$r = \frac{w_b}{w}, \zeta = c/(2mw), w = \sqrt{k/m}$$

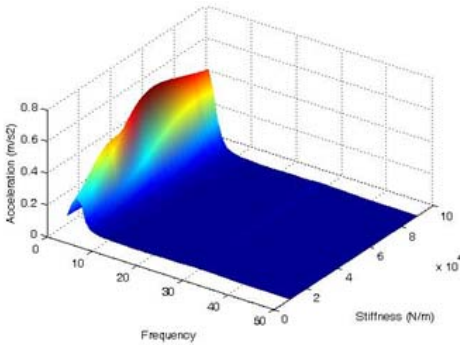


Figure 14 The acceleration transmissibility ratio of the driver seat suspension

차량 시트 강성 10,000N/m~90,000N/m까지 구간의 강성을 변경시키면서 각 주파수에 대한 진동 전달률을 구하면 Figure 14와 같다.

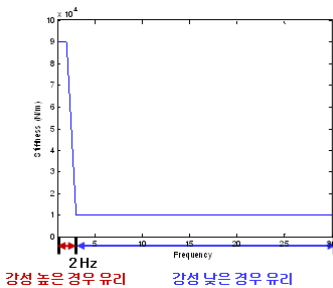


Figure 15 Define of stiffness for minimal transmissibility

각 주파수에서의 진동 전달률이 최소가 되는 강성을 구해 보면 Figure 15와 같으며, 2Hz 미만의 저주파에서는 강성이 높은 경우가 유리하고, 2Hz 이상의 주파수에서는 강성이 낮은 경우가 차량 시트 진동 전달률에서 유리한 것을 알 수 있다.

(2) 마그네틱 현가계 설계변수 설정

마그네틱 현가계는 선형스프링과 자석을 조합하

여 변위에 따라 강성이 변하는 비선형 스프링을 구현하는 시스템이다. 따라서 진동변위량이 큰 저주파에서는 강성이 강하고, 진동변위량이 작은 고주파에서는 강성이 약한 시스템을 구현하는 것이다.

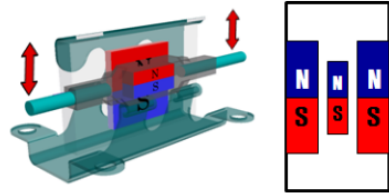


Figure 16 The structure of magnetic suspension system

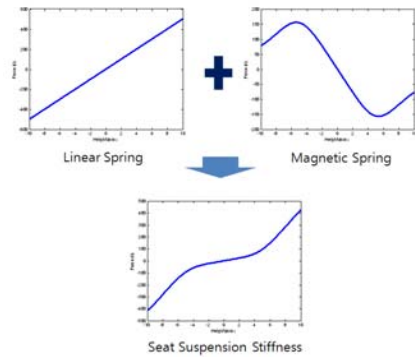
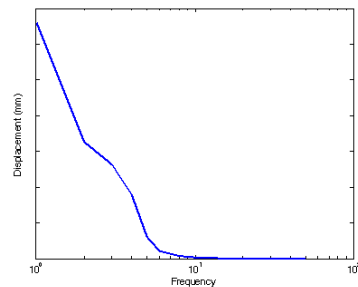


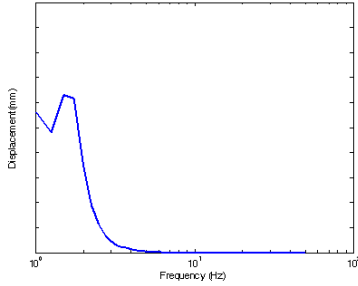
Figure 17 The principle of magnetic seat suspension

자석의 N극과 S극을 동일 위치에 배치하여 중립 지점에서 척력이 발생하고, 중립지점을 벗어나면 인력이 발생하여 중립지점에서 변위가 작은 진동은 강성을 작게 중립지점에서 변위가 큰 진동을 강성을 크게 하는 현가시스템이다.

앞에서 정의한 온로드 및 오프로드 가속도 값을 변환하여 진동변위를 구하면 Figure 18과 같다. 시험결과를 바탕으로 상용차의 차량 용도에 따라 마그네틱 현가계의 자석 사이즈 및 NS극 배치 간격을 설정할 수 있다.



(a) on-road condition



(b) off-road condition

Figure 18 Oscillating displacement of vehicle floor in

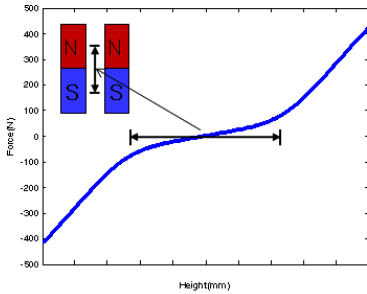


Figure 19 Define the magnetic size and the location of NS pole

자석의 종류는 페라이트, 알니코, 네오디뮴계 등 다양하며, 같은 계열이라도 성분, 크기, 환경에 따라 자력의 세기가 다르다. 자력을 변경시킬 때의 시트 현가계의 강성을 분석하면 Figure 20과 같다. 자력의 세기가 너무 커 선형스프링의 강성을 넘어서면 불안정한 현가시스템으로 변하게 되고, 너무 작을 경우 비선형 스프링의 효과가 줄어들게 되어 설계자의 최적 선택이 요구된다.

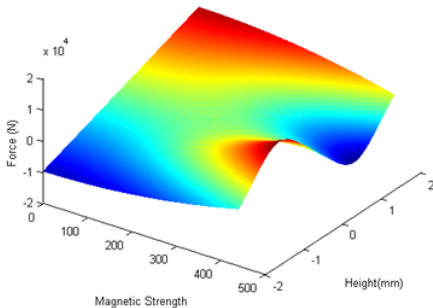


Figure 20 The stiffness of the driver seat suspension according to magnetic strength

또한 자석간의 간격에 따라 자석간의 힘이 변화하는데 자석 간격이 가까울수록 힘이 커지게 된다. 따라서 자석의 간격설정에 따른 시트현가계 강성 변화를 파악하기 위해 마그네틱 현가계의 자석간격을 조절하였을 때의 전체 시트 현가 강성을 Figure 21과 같이 분석하였다. 자석의 간격이 좁을 수록 자력이 세져 장점이 있으나 제품 제작가공성을 고려하여 설정하여야 한다.

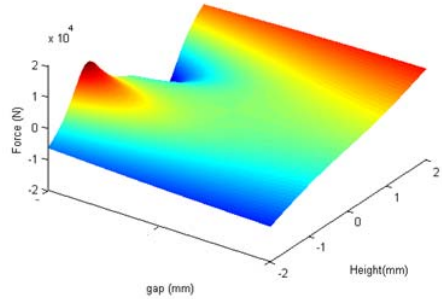


Figure 21 The stiffness of the driver seat suspension according to gap between the magnet

### 2.3 마그네틱 현가계 특성 시험

#### (1) 마그네틱 현가계 특성 평가

현가계에 들어가는 자석을 선정하기 위해 자력특성을 측정하는 시험을 수행하였다. 자력의 크기가 시트의 선형스프링의 강성에 영향을 줄 수 있을 만큼 커야 하므로 희토류계 자석인 네오디뮴계(NdFeB Magnet) 자석을 선정하였다. 네오디뮴계 자석은 자력밀도가 높고, 자력대비 가격이 낮으며, 가공성이 양호하고, 산화에 강한 특징이 있다.



Figure 22 The magnet sample and tesla meter

자석의 자력밀도를 자력밀도측정기를 이용하여 측정하고 지그를 제작하여 자력을 측정하였다. 측정에 사용된 자석의 NS 가운데 자력밀도는 350 mT이며 샘플 2개를 1mm, 2mm, 3mm 간격으로 배치하고 액추에이터(Actuator)로 밀어 두 자석 사이의



힘을 로드셀(Load cell)로 측정하였다. 측정지그는 알루미늄으로 제작하였고, 자기력 변화로 인한 에디 커런트(Eddy current) 발생 및 자기저항을 줄이기 위해 액추에이터의 속도를 0.005m/sec로 하여 천천히 변화시켰다.



Figure 23 The setup of magnetic power test

측정된 자석간의 힘의 크기는 Fig.24와 같이 비선형적으로 나타남을 알 수 있다. 자석의 간격이 좁아질수록 자석간의 자력은 커지고 자석의 NS 간격에 따라 피크치의 간격이 결정됨을 검증하였다.

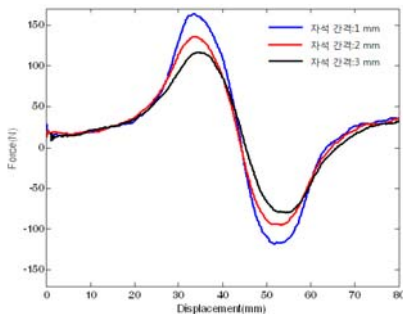


Figure 24 The result of magnetic power test

### 3. 결 론

본 논문은 상용차 운전석 시트의 안락성 개선을 위해 운전석 시트를 자석을 이용하여 구성하는 것을 연구하였다. 첫 번째로 상용차 다양한 도로조건 주행 시 운전자 바닥의 진동을 측정함으로써 운전석 바닥의 진동분포를 확인하였으며, 온로드용, 오프로드용 진동 패턴을 설정하였다. 두 번째로 차량 운전

석 바닥 진동이 운전자에 전달되는 전달률을 분석하여 진동전달을 최소화하는 강성을 구하였다. 세 번째로 앞에서 설정된 주행 시 진동패턴과 강성최적화를 바탕으로 마그네틱 현가계의 자력 선정, 자석 배치를 결정하였고, 시험을 통해 마그네틱 현가계를 검증하였다. 본 연구를 통해 상용차의 운전석 진동 패턴 분석 및 새로운 마그네틱 현가계의 강성 및 진동전달 특성을 분석하고, 마그네틱 현가계 설계 시 고려하여야 할 사항을 제시하였다.

### 후 기

본 연구는 중소기업청 중소기업혁신기술개발사업(마그네틱 현가기구 설계기술 개발)으로 수행된 연구로 관계자분들에게 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- (1) Jeon, G. J., Kim, M. S., Ahn, S. J., Jeong, W. B. and Yoo, W. S., 2010, "Human Response to Idle Vibration of Passenger Vehicle Related to Seating Posture", KSNVE, Vol.20 No.12, pp 1121~1127.
- (2) Song, P. G., Maksym Sporyagin, Yoo, H. Y., 2008, "Robust Design Optimization of the Vehicle Ride Comfort Considering Variation of Design Parameters", KSNVE, Vol.18 No.12, pp 1217~1223.
- (3) Seong M. S., Choi, S. B., Kim, C. H., Lee, H. K., Baek, J. H., Baek, J. H., Han, H. H., Woo, J. K., 2010, "Experimental Performance Evaluation of MR Damper for Integrated Isolation Mount", KSNVE, Vol.20 No.12, pp 1161~1167.
- (4) Cheung W. S., Kim, Y. T., Kwon, H. S., Hong, D. P., 2003, "Experimental Investigation of the Response Characteristics of Korean-seated Subjects under Vertical Vibration : (I) Apparent Mass", KSNVE, Vol.13 No.8, pp 645~650.
- (5) Ahn K. W., Kim, W. Y., Im, H. E., Hwang, W. G., 1999, "A Study on the Evaluation of the Ride Comfort of a large bus", KSAE, Vol.7 No.2, pp 343~351.
- (6) Inman, Daniel J, 2007, "Engineering Vibration", Prentice Hall.