

고속선/기존선 연계운행에 대한 고속철도 차량의 승차감에 관한 연구

A study on the Ride Comfort for High Speed Train on the High Speed Line/Conventional Line

김영국* · 김석원** · 박찬경** · 김기환***

Y. G. Kim, S. W. Kim, C. K. Park and K. H. Kim

Key Words : High Speed Train (고속철도 차량), On-Line Test (시운전 시험), Ride Comfort (승차감), Ride Index (승차감 지수), Frequency Weighting Curve (주파수 보정곡선), Accelerometer (가속도계), rms(실효치)

ABSTRACT

Recently, the ride comfort problem becomes increasingly important because of today's needs for train speedup. The concept of ride comfort is equivocal. Generally, it is defined as the body vibration. The commercial high-speed train must be run the compound line in Korea which is composed of high-speed line and conventional line. In this paper, the ride comfort has been reviewed by the various experimental methods when the high-speed train is operated on both lines. The results show that the high-speed train has no problems from the viewpoint of the comfort ride during the operation on both lines.

1. 서론

철도 교통은 다른 교통수단에 비해 승객과 화물을 많이 수송할 수 있을 뿐만 아니라 안전성, 정시성(定時性) 및 환경 친화성 등의 장점을 갖고 있다. 철도를 다른 교통수단과의 경쟁력을 강화시키기 위해서는 열차의 속도 및 여객수송의 품질 향상 등이 필요하다. 특히, 승객이 여객수송의 품질에 대해 최종적으로 평가한다는 점을 감안할 때 승차감을 일정한 수준이상으로 향상시키는 것이 필수적이다. 승차감은 인간이 감정으로 느낄 수 있는 다양한 요소(진동, 소음, 온도, 습도, 조도, 개인 공간, 좌석의 질감, 천장의 높이, 전망, 통풍 등)들이 복합적으로 결합되어 나타나지만, 이러한 제반 요소들을 모두 고려하여 정량적으로 승차감을 평

가하는 것은 대단히 어려운 일이다. 일반적으로 철도에서는 측정된 진동가속도를 인간의 등가 감용량으로 정량화시켜 평가하는 방법을 사용하고 있다^{(1)-(3),(6)}. 철도분야의 승차감은 다양한 평가방법으로 각종 규격에서 제시하고 있으며⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾, 가속도 실험값 이용법, 통계적 방법, Wz 방법 등이 주로 사용되고 있다. 이들은 서로 다른 방법과 기준으로 승차감을 평가하기 때문에 철도 승차감을 측정해야 하는 철도의 사용주체들은 승차감 평가방법 선정에 혼란을 느낄 수 있으나, 차후에는 철도의 승차감을 명확한 평가방법과 평가기준을 제시하고 있는 국제철도협회(UIC, International Union of Railways)의 규격이 많이 사용될 것으로 예상된다.

드디어 국내에서도 고속철도가 개통되어 국민의 철도에 대한 관심이 어느 때보다도 높은 상태로 고속철도 차량(KTX)이 경부선(서울-부산)과 호남선(용산-목포)을 하루에 수십 회씩 운행하고 있다. 고속철도 차량이 운행되는 경부선과 호남선은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 고속선로와 기존선로로 구성되어 있으며, 현재 고속선로는 경부선이 총 연장

* 한국철도기술연구원
E-mail : ygkim@krii.re.kr
Tel : (031) 460-5612, Fax : (031) 460-5649

* 한국철도기술연구원

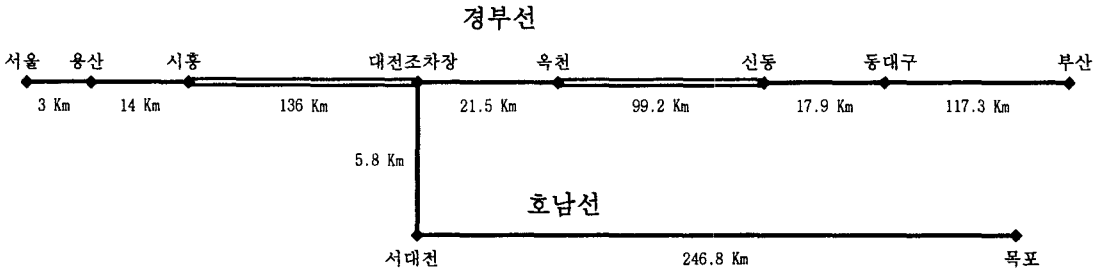


Fig. 1 High-speed line and Conventional line

길이 약 409 km 중 57.5%, 호남선이 총 연장길이 약 403 km 중 33.8%를 차지하고 있다.

따라서, 고속철도차량은 고속선로와 기존선로를 연계하여 운행되어야 하며, 이에 따라 열차운행 속도의 차이는 물론 승객이 느끼는 승차감도 차이가 있게 된다. 이들에 대한 평가가 KTX와 한국형 고속철도 시제차량(HSR 350x)의 고속선로와 기존선로에 대한 반복적인 시운전 시험을 통해 이루어졌다. 본 연구에서는 고속철도차량의 고속선로와 기존선로 연계운행에 대해 승객이 느끼는 승차감을 통계적 방법과 가속도 실효값 이용 방법으로 평가하고 이들의 관계를 분석 고찰하였다.

2. 승차감 평가방법 및 평가기준

2.1 평가방법

Fig. 2는 철도의 승차감을 평가하기 위한 평가 흐름도를 나타낸다. 차체 중앙바닥 및 대차 중앙의 차체바닥에 설치된 3축 가속도센서로 직접 측정되거나 테이프 레코더에 저장된 진동가속도 신호를 저주파 밴드필터를 통과시켜 샘플링 동안에 발생할 수 있는 신호왜곡에 따른 오차를 제거시킨 후에 디지털 신호로 변환시킨다. 디지털 신호로 변환된 1개 블록(5초 동안 측정 데이터)의 신호에 대해 푸리에변환을 사용하여 주파수영역으로 변환시킨 후에 해당 평가법이 사용하는 주파수 범위(ISO 규격: 0.5~80Hz, Wz 평가: 0.5~30Hz, UIC 규격: 0.4~80Hz)에서 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 구한다. 동일한 방법으로 연속적인 60개 블록에 대해 반복적으로 각 주파수에 대한 진동가속도의 파워를 계산한다. 계산된 60개 블록의 진동파워를 해당 평가법에 따른 주파수 보정을 행한 후에 각 평가법에 따른 평가지수를 구하게 된다.

□ 실효값을 이용한 평가방법

실효값을 이용한 평가방법은 기본적으로 특정한 시간동안 측정된 진동 가속도의 주파수 보정된 파워 실효값(제곱근)을 이용하며, 식(1)로 구할 수 있다. 즉, 측정구간에 따라 적당한 블럭수를 선택하여 그 측정구간에서 계산된 평균 파워에 해당 방향의 주파수 보정을 행한 후 실효값을 구한다.

$$a_{r, m, s, i} = \sqrt{\int_{0.5}^{80} G_i(f) B_i^2(f) df} \quad (i=x, y, z) \quad (1)$$

여기서, G_i : 가속도 파워, B_i : 주파수 보정 함수

□ 통계적인 평가방법

통계적인 평가방법은 x, y, z 방향에 대해 해당 방향에 적합하게 주파수 보정된 60개 블록의 실효값 중에서 누적빈도가 95%인 실효값을 사용하여 식(2)으로부터 승차감 지수를 구한다.

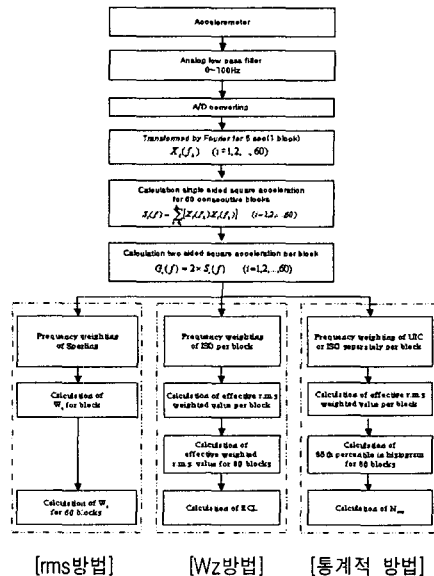
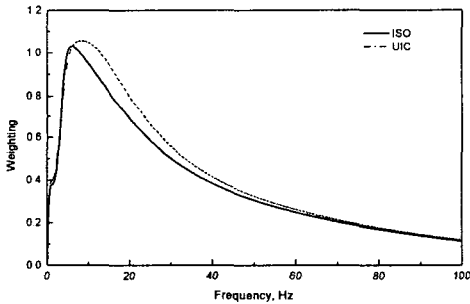


Fig. 2 Processing flow chart

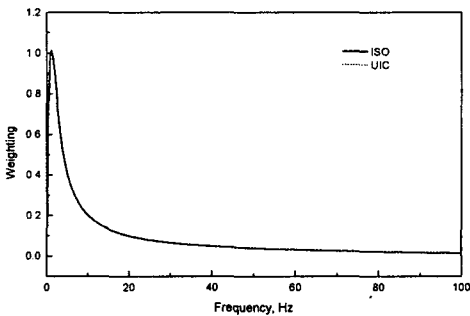
$$N_{MV} = 6\sqrt{(A_{ux95})^2 + (A_{uy95})^2 + (A_{wz95})^2} \quad -- \quad (2)$$

2.2 주파수 보정곡선

동일 크기의 강도를 갖는 진동이 인간에게 작용하였을 때에 인간이 느끼는 감응은 진동주파수에 따라 차이를 나타내며, 이를 함수화시킨 것이 주파수 보정곡선으로 철도 승차감 평가법마다 Fig. 3과 같이 서로 다른 주파수 보정곡선을 사용하고 있다. ISO 평가법에서는 ISO 2631-1(1997)에서 정의된 주파수 보정곡선이 사용되며, 수직방향과 수평방향에 대해 4~12Hz와 0.6~2Hz에서 민감(주파수 보정값 0.9이상)하다. 또한, UIC 평가법의 주파수 보정곡선에서는 수직방향은 4~16.5Hz에서, 수평방향은 0.6~2Hz에서 민감하며, 수평방향은 ISO 평가법과 동일한 주파수 보정곡선이고 수직방향은 ISO 평가법과 거의 유사한 형태를 갖지만, 0.6~3Hz와 8~16Hz에서 주파수 보정치가 약간 크다.



(a) For vertical direction



(b) For lateral direction

Fig. 3 Frequency weight curve

2.3 평가기준

1장에서 살펴본 바와 같이 승차감 평가방법과 기준은 다양하다. 경부고속철도의 승차감은 계약서에 명기되어 있으며, 이 계약서에 따르면 열차속도 300 km/h에서 10분 동안의 가속도 실효치(1분 간격) 평균이 ISO 2631/1 (1985) 규격의 2시간 피로능률한계를 기준을 넘지 않도록 규정하고 있다. 2시간 피로능률한계는 가속도 실효값으로 상하방향 0.257 m/sec², 수평방향 0.183 m/sec²이 된다. 한국형 고속철도차량의 승차감은 시방서에 UIC 513R 규격의 "Deluxe rolling stock" 기준으로 평가하도록 되어 있다.

3. 승차감 평가 및 고찰

3.1 시운전 시험용 계측시스템

승차감을 평가하기 위한 계측시스템은 한국철도기술연구원에서 이미 개발하여 확보하고 있는 Fig. 4의 승차감 측정시스템⁽¹⁾을 사용하였으며, 이에 대한 자세한 사양은 Table 1과 같다. 또한, 이 승차감 측정기는 UIC규격에 의한 승차감의 평가뿐만 아니라 ISO규격 및 "Sperling"에 의한 승차감의 평가도 가능하도록 설계되어 있다. 가속도 측정을 위해 사용된 센서는 3축 가속도계이다.

3.2 승차감 결과 분석

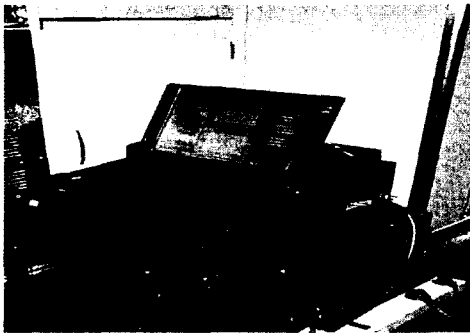
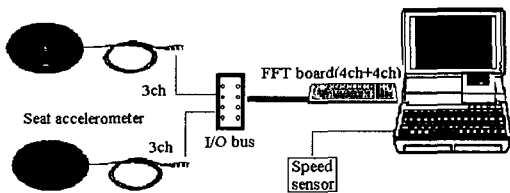
고속철도 차량이 경부선과 호남선에서 연계 운행을 실시한 한 예로써 Fig. 5는 열차 주행속도와 이동거리 선도를 나타낸 것으로 Fig. 1에서 보여준 고속선로 구간(시흥-대전 조차장, 옥천-신동)에서는 고속철도 차량이 300 km/h의 속도로 주행하였

Table 1 Specifications of ride comfort measuring system

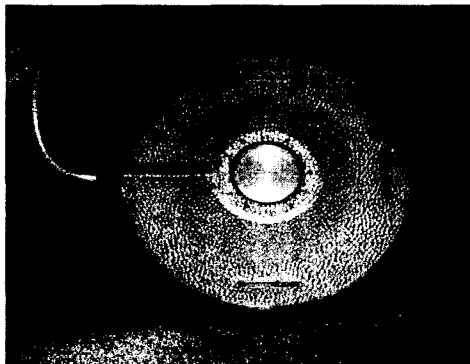
Item	Specification	Function	
1	FFT Board	- Input 8ch	- AC amp. - DC amp. - ICP amp. - Filter - A/D converter - FFT analyzer
		- 100mv-16V Input	
		- AC, DC, ICP Amp	
		- 90dB Aliasing Filter	
		- 16bits ADC	
		- Bandwidth: 5Hz-80kHz	
		- Sampling speed : 2x Bandwidth	
		- FFT speed: 5ms for 1K	
2	Accelerometer	- 3-axis seated type	
		- ICP Type	
		- Sensitivity: 1mV/(m/s ²)	

으며, 기존선로 구간에서는 호남선의 경우 최대 160 km/h, 경부선의 경우 최대 150 km/h의 속도로 주행하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 고속철도 차량이 경부선과 호남선을 Fig. 5의 나타낸 속도로 주행할 때 승차감을 평가한 결과이다. Fig. 6 (a)와 Fig. 7 (a)는 UIC 규격과 ISO 규격에서 제시하고 있는 통계적 방법으로 평가 한 결과로 고속선로와 기존선로 모두 UIC 규격을 적용한 경우가 ISO 규격을 적용한 경우 보다 크게 나타나고 있다. 이는 Fig. 3의 주파수 보정곡선에서 볼 수 있는 바와 같이 상하방향에 대해 5 Hz 이상의 주파수에서 UIC의 주파수

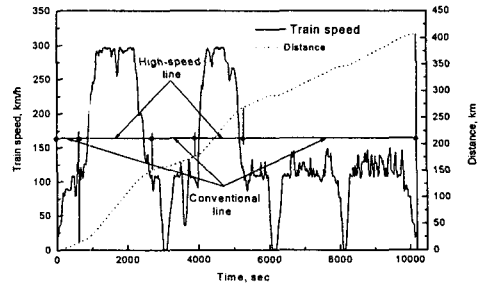


(b)

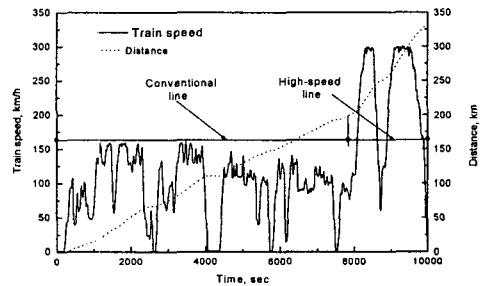


(c)

Fig. 4 Measuring system for ride comfort test (a) Schematic diagram, (b) Experimental set-up, (c) 3-axes seated accelerometer



(a)



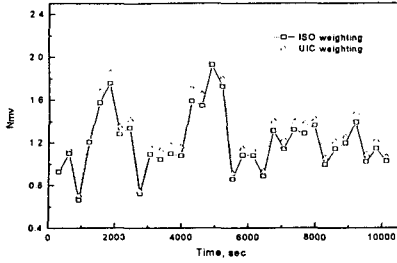
(b)

Fig. 5 Train speed and traveling distance, (a) Kyeongbu line, (b) Honam line

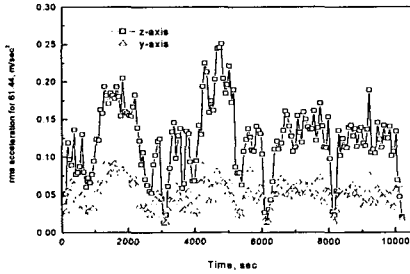
보정치가 ISO의 주파수 보정치보다 크기 때문이며, 실제로 고속철도 차량의 주파수 특성은 Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 5 ~ 15 Hz의 주파수에서 가속도가 크다. Fig. 6 (b)와 Fig. 7 (b)는 약 1분 간격의 가속도 실효값으로 승차감을 평가한 것으로 상하방향 가속도가 좌우방향에 비해 2배 이상의 크기를 갖음을 알 수 있고 이들은 경부 고속철도 제약서 상의 한계치를 초과하지 않는다.

Fig. 8은 고속철도 차량이 고속선로를 294.5 km/h, 기존선로를 143.6 km/h로 주행하는 경우에 고속철도 차량의 상하방향에 대한 주파수 특성을 나타낸 것으로 고속철도 차량이 고속선로와 기존선로를 주행할 때 거의 유사한 주파수 특성을 갖고 있으며, 고속철도 차량의 고유주파수는 대략 1.2 Hz, 3.1 Hz, 7.8 Hz, 10.9 Hz임을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 통계적 방법과 가속도 실효값에 의한 방법으로 평가된 고속철도 차량의 승차감 결과를 주행속도에 대해 나타낸 것이다. Fig. 6과 Fig. 7에서는 고속선로와 기존선로에 대한 선로

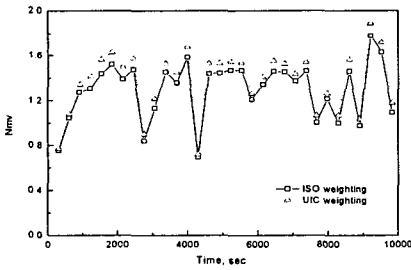


(a)

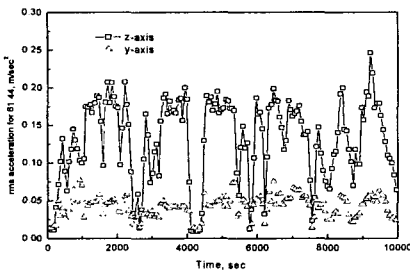


(b)

Fig. 6 Ride comfort in the Kyoungbu line, (a) by statistical method, (b) by rms method



(a)



(b)

Fig. 7 Ride comfort in the Honam line, (a) by statistical method, (b) by rms method

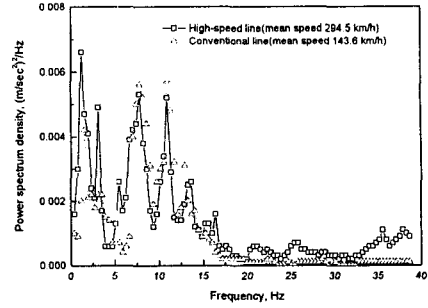


Fig. 8 Power spectrum density at High-speed line and Conventional line

특성이 고속철도 차량에 미치는 영향을 정확히 확인하는 것이 불가능하였지만, Fig. 9과 Fig. 10을 통해 고속선로와 기존선로에 의한 선로 특성이 고속철도 차량의 승차감에 미치는 영향을 확실히 확인할 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10에서 심볼 □과 심볼 △은 각각 고속선로와 기존선로에 대한 실제의 측정결과를, 실선과 일점쇄선은 측정결과를 통해 얻어진 회귀곡선으로 승차감 측정결과가 고속선로와 기존선로에 대해 서로 구분되며, 고속선로의 선로 특성이 기존선로보다 좋다는 것을 보여준다. 즉, 고속철도 차량이 고속선로를 300 km/h로 주행할 때와 동일한 승차감을 기존선로에서 얻기 위해서는 Fig. 9의 통계적인 방법으로는 170 km/h 이하로, Fig. 10의 가속도 실효값 이용방법으로는 150 km/h 이하로 고속철도 차량이 기존선로를 주행해야 한다. 이들 회귀곡선으로부터 고속선로의 300 km/h 주행시 승차감 지수는 1.7, 가속도 실효값 0.18 m/sec², 기존선로의 160 km/h 주행시 승차감 지수는 1.5, 가속도 실효값 0.19 m/sec²로 앞에서 설명한 기준치를 모두 만족하며, 이 값들은 승차감 기준치에 대해 약간의 여유가 있기 때문에 승차감만을 고려하여 기존선로에서의 속도 증가를 판단하면 약간의 속도 증가를 할 수 있지만, 실제 고속철도 차량의 속도 증가는 차량의 안전성 등이 종합적으로 고려되어야 하기 때문에 신중을 기할 필요가 있다.

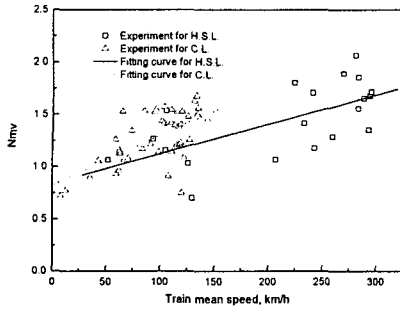


Fig. 9 Evaluation for ride comfort by statistical method

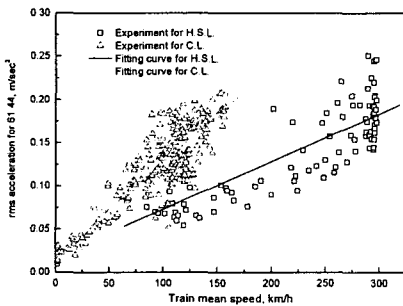


Fig. 10 Evaluation for ride comfort by rms method

4. 결론

이상의 연구를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 고속선로와 기존선로의 연계운행을 해도 고속철도 차량의 승차감에 문제가 없는 것으로 판단된다.
- (2) 승차감 측정결과가 선로 특성에 따라 구분되며, 고속선로에서의 속도에 대한 승차감 측정결과가 기존선로에 대해 완만함을 알 수 있었다. 즉, 고속선로를 300 km/h로 주행할 때의 승차감 평가 결과가 기존선로를 150 ~ 180 km/h로 주행할 때의 결과와 동일하다.
- (3) 고속철도 차량에 주파수 특성의 분석 결과, 고속선로와 기존선로에서의 주파수 특성이 거의 동일하며, 고유주파수는 대략 1.2 Hz,

3.1 Hz, 7.8 Hz, 10.9 Hz임을 알 수 있었다. 또한, 통계적 방법의 의한 고속철도 차량의 승차감 평가결과, UIC 기준에 의한 평가결과가 ISO 기준에 의한 평가결과보다 다소 큼을 알 수 있었다.

- (4) 향후 고속선로와 기존선로의 연계운행에 대한 많은 승차감 측정결과에 대한 분석을 통해 연구결과에 대한 신뢰성을 높여야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 고속철도 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 김영국 등, 1999, 철도용 승차감 측정시스템 개발, 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회.
- (2) 김영국 등, 2002, "철도 승차감 평가방법의 상호관계 분석", 소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, 한국소음진동공학회.
- (3) Suzuki, H., 1998, Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 212 Part F.
- (4) International Organization for Standardization, 2001, ISO Code 2631-4
- (5) Garg, V. K., et al., 1984, Dynamics of Railway Vehicle Systems, Academic Press.
- (6) European Rail Research Institute, 1993, "Application of ISO Standard to Railway Vehicles", B153/RP21
- (7) International Union of Railways, 1994, Guidelines for Evaluating Passenger Comfort in relation to Vibration in Railway Vehicles, UIC Code 513R.
- (8) 김영국 등, 2002, "신경회로망 모델을 이용한 철도 현가장치 설계변수 최적화", 소음진동공학회논문집, 제12권, 제7호, 한국소음진동공학회.