

# 현가장치 설계변수 변화에 따른 전동차 상하진동의 영향

## Effects of the design parameters of the suspension system on the bounce of an electric railway car

박기수\*                      최연선\*\*  
Park, Ki-Soo                Choi, Yeon-Sun

---

### 국문요약

본 연구에서는 지하철용 전동차의 현가장치를 구성하는 1차 현가장치 및 2차 현가장치의 강성 및 감쇠지수 변화가 전동차의 상하진동에 미치는 영향을 분석하였다. 실제 운행 중인 전동차에 대하여 액슬박스, 대차, 객차에서 측정된 진동 데이터를 바탕으로 대차와 차체로 구성된 2자유도계 해석모델을 생성하였고, 실측된 윤축의 진동을 입력신호로 하여 수치해석을 수행하였다. 1, 2차 현가장치의 강성 및 감쇠지수의 변화에 따른 응답을 고찰한 결과, 차량의 상하진동에 지배적인 영향을 주는 설계변수는 2차 공기스프링의 강성임을 알았다. 또한 이러한 결과는 ADAMS/RAIL 전산해석을 통해서도 검증할 수 있었다.

---

## 1. 서 론

지하철이 도시근교의 출·퇴근 유동인구를 흡수함에 따라 수송에 따른 사용자의 편의를 위해 기존 전기동차의 속도를 증가시킬 필요가 있다. 그러나 고속의 주행 시 철도차량의 진동과 소음이 증가하여 승차감의 저하를 가져올 수 있다.

이러한 철도 차량의 전동차 소음과 관련해서 최경진[1~3]은 철도 차량의 상하 진동의 원인이 객차와 대차의 질량비와 1차 현가장치와 2차 현가장치의 강성비에 좌우된다 하였으며, 홍용기[4]는 한국형 고속 열차의 객차 진동이 현가장치 중 2차 현가장치인 에어스프링의 강성에 좌우된다고 하였다. 이에 본 연구에서는 지하철용 전기동차의 1, 2차 현가장치 설계변수들이 대차 및 객차의 상하진동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

## 2. 전동차 주행 시험

철도차량의 상하진동의 동특성을 파악하기 위해 먼저 전기동차 주행시험을 수행하였다. 측정 구간은 선로가 비교적 직선 구간이며 전기동차가 고속으로 주행하는 구간을 선택하였다. 액슬, 대차, 객차의 상하 진동을 측정하기 위해 각각의 위치에 가속도계를 설치하였고, 열차 주행속도를 측정하기 위해 차륜에 타코센서를 설치하였다. 그림 1은 센서 부착 위치를 나타낸 개략도이다.

---

\* 성균관대학교  
E-mail : haesahwa@skku.edu  
TEL : (031)290-7501

\*\*성균관대학교, 정회원  
E-mail : yschoi@yurim.skku.ac.kr  
TEL : (031)290-7440

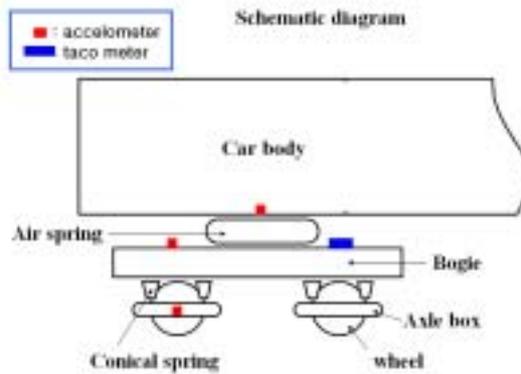


그림 1 센서 부착 위치

승차감에 영향을 주는 저주파 성분과 충격진동소음에 영향을 주는 고주파 성분까지 고려하기 위하여 샘플링 주파수는 10 kHz로 하였으며 주행속도는 타코센서를 이용하여 측정하였다. 센서에서 측정된 신호를 Anti-aliasing filter를 거쳐 A/D 변환 후, DASYLab[5]을 이용하여 PC에 저장하였으며, 저장된 신호는 MATLAB을 이용하여 분석하였다.

### 3. 전동차 주행 시험 결과

그림 2와 그림 3은 속도에 따른 각 부위의 3초간 실효값(RMS, root mean square)에 대하여 평균값을 취한 데이터이다. 같은 속도 대역에서도 상당히 많은 산포를 보이는 것은 속도 이외의 요소가 진동을 유발한다는 것을 의미한다. 평균값에 근거하여 1차 현가장치에서는 수직진동이 약 15% 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 2차 현가장치에서는 대차의 수직진동 대비 약 23% 감소가 되는 것을 알 수 있다.

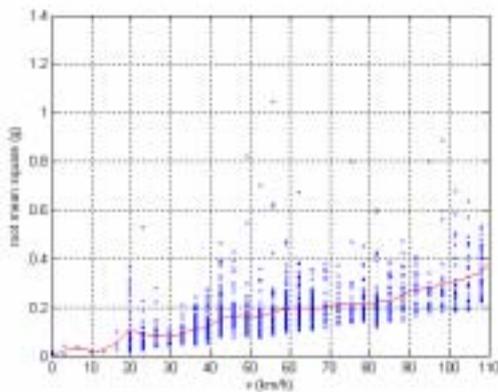


그림 2 대차 진동

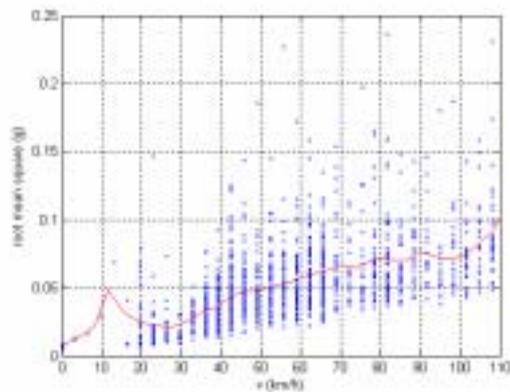


그림 3 객차 진동

#### 4. 2 자유도계 모델

시험 시 윤축에서 측정한 가속도 신호와 속도 신호를 바탕으로 아래와 같은 2자유도계 모델을 구성하였다.

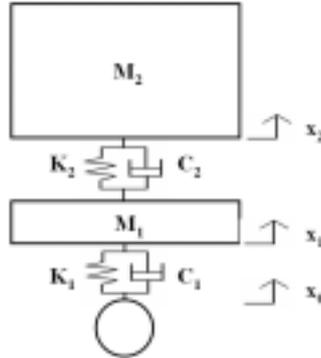


그림 4 2 자유도계 모델

고유진동 주파수 영역을 파악하기 위해 모델을 선형시스템이라고 가정하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다. 선형 시스템이므로 해를  $f_j(t) = F_j e^{i\omega t}$ ,  $x_i = B_i e^{i\omega t}$  로 가정하여 전개하면 각 시스템에 대한 정상상태의 응답을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} &= \{f(t)\} \\
 \{B\} &= ([K] - \omega^2[M] + i\omega[C])^{-1}\{F\} \\
 x_{is} &= \sum_{j=1}^n T_{ij}(i\omega_j) F_j e^{i\omega t}
 \end{aligned}$$

그림 5 및 그림 6은 도출된 응답을 바탕으로 가진 주파수에 따른 1, 2차 시스템의 응답을 도시한 것이다. 1 Hz 및 11 Hz에서 시스템의 고유진동이 발생함을 확인할 수 있으므로 시스템의 특성에 기인한 고유진동 주파수는 20 Hz 미만의 영역에 있다고 할 수 있다. 표 1은 해석에 사용된 변수 및 입력 수치를 나타낸다.

변수	입력값
m <sub>1</sub>	1,500 kg
m <sub>2</sub>	10,500 kg
c <sub>1</sub>	16,078 Ns/m
c <sub>2</sub>	4,475 Ns/m
k <sub>1</sub>	6,800,000 N/m
k <sub>2</sub>	529,740 N/m

표 1 입력 데이터

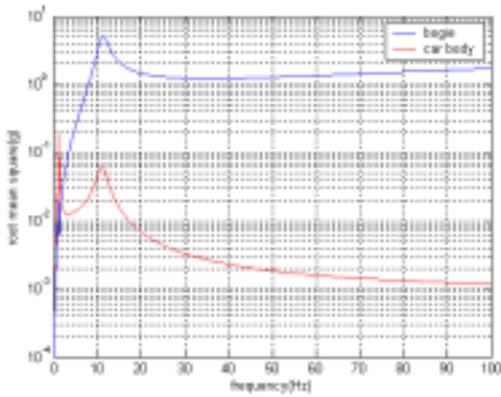


그림 5 주파수 응답함수

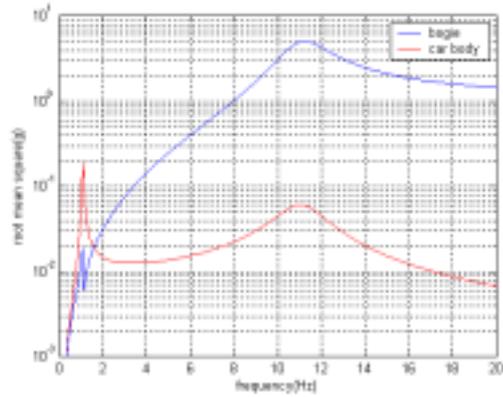


그림 6 주파수 응답함수(0~20 Hz)

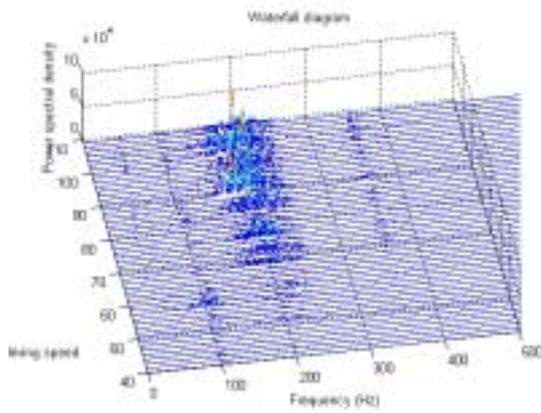


그림 7 윤축  
위터폴 다이어그램

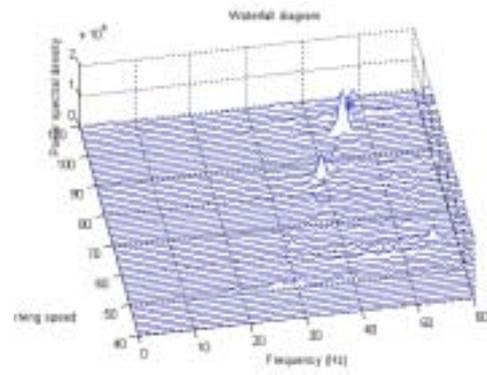


그림 8 윤축 위터폴 다이어그램  
(0~60 Hz)

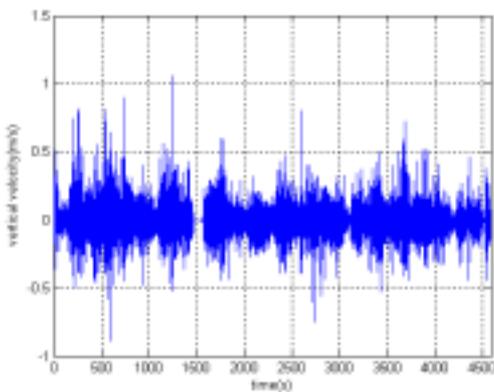


그림 9 상하진동 - 속도

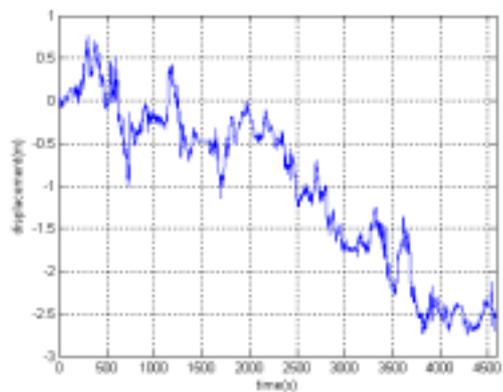


그림 10 상하진동 - 변위

그림 7과 그림 8은 속도 증가 구간에서의 윤축 진동에 대한 위터폴다이어그램이다. 0~20 Hz 대역에서는 피크가 발생하지 않는 것은 윤축의 가진에 의해 시스템의 공진을 발생시키지 않기 때문이다. 따라서 강성 변화 고려 시 공진의 영향을 고려하지 않았다. 그러나 200 Hz 및 350 Hz 대역에서 피크가 발생하는 것으로 보아 부품의 고유진동수에 의한 공진이 발생할 수는 있다.

2 자유도계의 모델 해석은 4차 룬지-쿠타(Runge-Kutta)법[6]을 적용하여 객차 및 대차의 수직 진동 응답을 계산하였다. 룬지-쿠타법에서 가진력인 윤축 진동은 실측 데이터를 사용하였다. 아래 그림 9 및 그림 10은 윤축에서 측정된 수직 진동 데이터를 바탕으로 수직 속도 및 변위를 환산한 것이다.

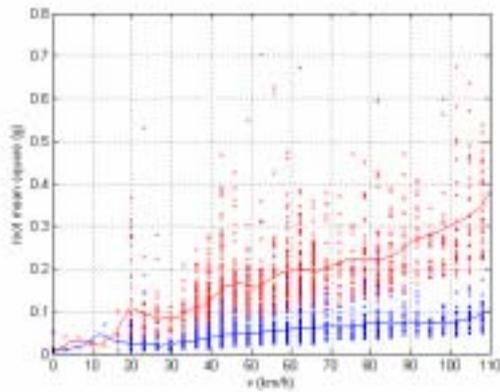


그림 11 속도별 실효값(실험)

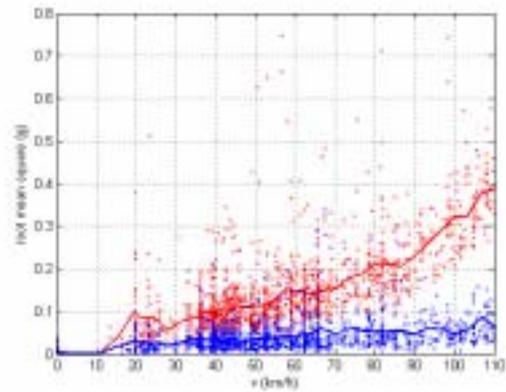


그림 12 속도별 실효값(해석)

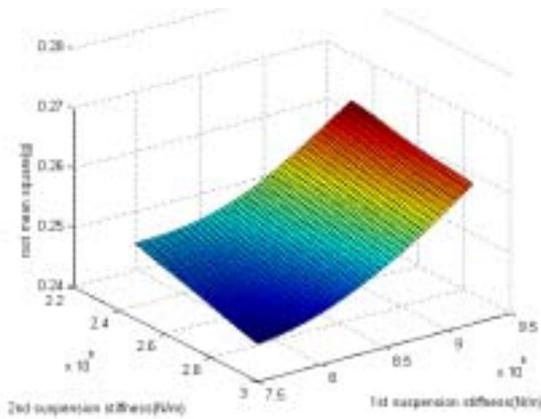


그림 13 강성 변화에 의한 대차응답

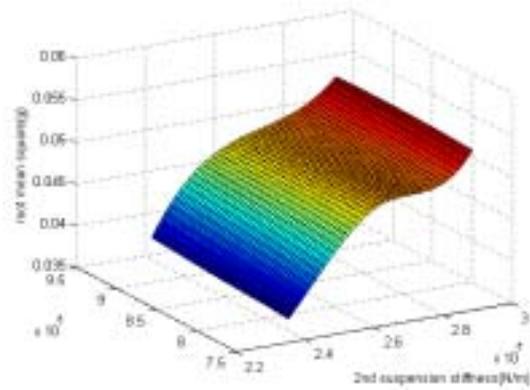


그림 14 강성 변화에 의한 객차응답

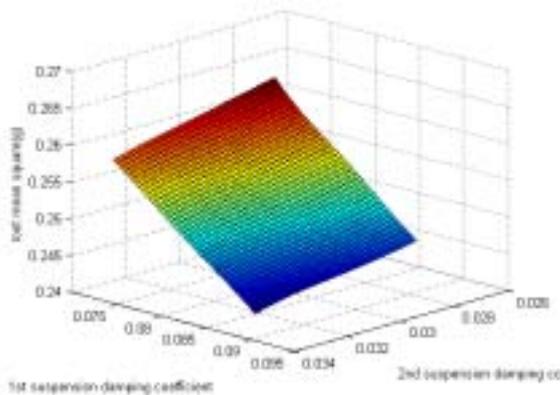


그림 15 감쇠 변화에 의한 대차응답

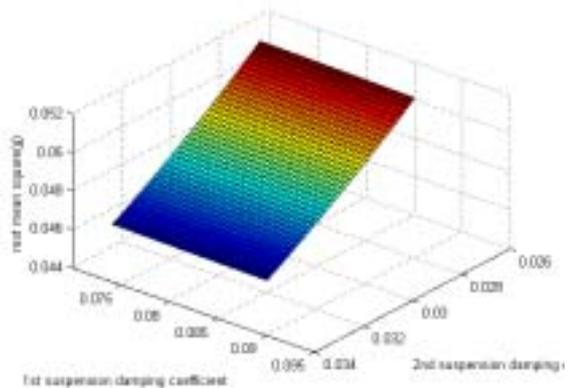


그림 16 감쇠 변화에 의한 객차응답

그림 11 및 그림 12는 위의 가진데이터를 바탕으로 수치해석 한 결과와 실험의 결과를 비교한 것이다. 실험 및 2 자유도계 모델의 응답이 비교적 유사함을 알 수 있다. 이 모델을 바탕으로 2 자유도계 모델의 현가장치 강성을 변화함에 따른 객차 및 대차의 진동 응답 변화를 해석하였다. 그림 13 및 그림 14는 1차 2차 현가장치의 강성을 표준 및 5%, 10% 증감시킨 후, 객차 및 대차의 응답 변화를 3차원 그래프로 도시한 것이다. 계산결과 대차의 응답은 1차 현가장치 또는 2차 현가장치의 강성 변화에 민감하지 않음을 알 수 있다. 그러나 객차의 응답은 2차 현가장치의 강성 변화에 민감함을 알 수 있으며, 1차 현가장치의 강성 변화는 객차의 진동 응답에 뚜렷한 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 1차 현가장치의 강성을 고정시키고 2차 현가장치의 강성을 감소시켰을 때 객차 진동 응답이 감소하는 것을 알 수 있으며 반대로 대차의 진동 응답은 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 19 및 20은 1차 및 2차 현가장치의 감쇠비를 변화해 가면서 응답을 고찰해 본 결과를 도시한 것이다. 객차 및 대차의 수직응답 모두 감쇠비를 증가시킬수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 현가장치의 강성 변화와 같이 1차 현가장치의 감쇠비는 대차에, 2차 현가장치의 감쇠비는 객차의 진동에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 감쇠비가 증가할수록 객차 및 대차의 진동이 저감함을 알 수 있다.

### 5. ADAMS/Rail[7] 시뮬레이션

위에서 확인한 강성 변화 효과를 확인하기 위해 상용 전산해석 프로그램인 ADAMS/Rail 을 이용하여 전기동차 1량에 대한 전산해석을 수행하였다. 그림 17은 ADAMS/Rail로 전기동차 1량을 모델링한 것이다[8]. 그림 18은 실험과 전산해석의 수치를 비교한 것이다. 객차는 비교적 비슷한 결과를 보여주나 대차의 진동은 저속 구간에서 약간의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 실험 중 저속 구간이 짧았으며, 이로 인한 저속 구간 데이터 부족이 원인인 것으로 판단된다.

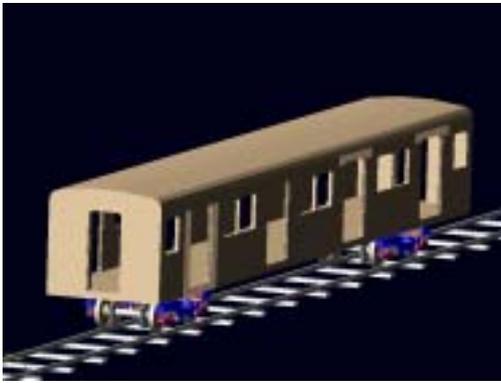


그림 17 ADAMS/Rail 전기동차 모델

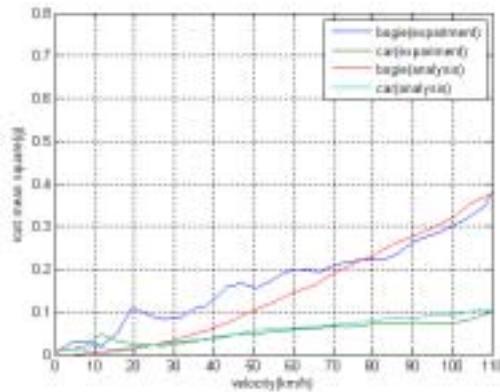


그림 18 실험값 및 전산해석 비교값

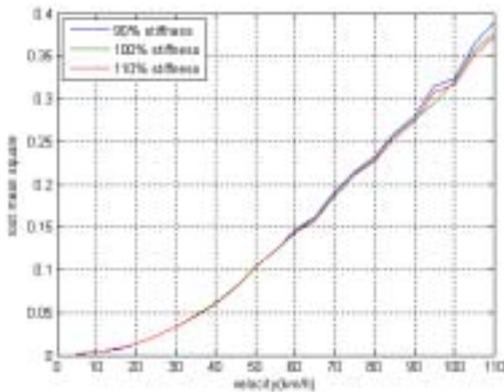


그림 19 대차 응답

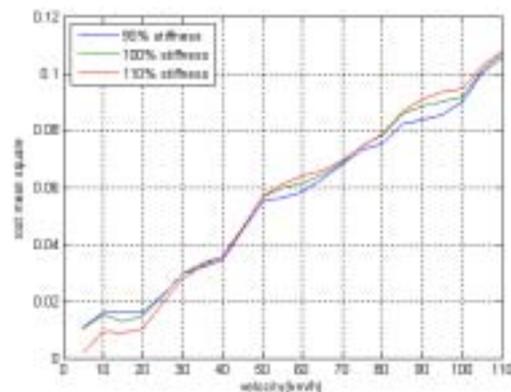


그림 20 객차 응답

표 2 2차 현가장치 강성 변화에 따른 응답 변화값

	2차 현가장치 강성		
	10% 감소	기존 설계	10% 증가
대차 실효값 (g)	0.3231	0.3202	0.3167
객차 실효값 (g)	0.0900	0.0916	0.0946

그림 19 및 20은 강성 변화에 따른 주행속도 각속도별 실효값 수치를 비교한 것이며, 표 2는 주행속도 100 km/h일 때 수직응답을 나타낸 것이다. 위의 결과로 부터 대체적으로 2차 스프링의 강성을 증가 시킴에 따라 대차의 응답은 증가하고, 객차의 응답은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 위에서 언급한 단순 2 자유도계 모델에서 도출된 강성 변화에 따른 응답 변화 추이를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

## 7. 결 론

전기동차 주행시험을 통하여 철도차량은 속도가 증가함에 따라 상하진동이 증가하나 차륜과 레일의 불균일도, 레일 이음매 등 충격성분에 의한 영향이 크다는 사실을 알 수 있다. 또한 2 자유도계 모델의 응답 분석을 통하여 1차 및 2차 현가장치의 강성 중 객차의 응답에 큰 영향을 미치는 요소는 2차 현가장치의 강성임을 알 수 있었다. 1, 2차 현가장치의 강성을 변화시키며 응답을 고찰한 결과, 대체적으로 2차 현가장치의 강성이 감소할수록 객차의 응답이 감소하는 것을 알 수 있다. 반면 대차의 수직진동은 증가하는 것을 알 수 있었다.

이에 대차 및 객차의 진동을 감소시키기 위해서는 레일 및 차륜에 의한 충격적인 요소를 최소화 시키는 것이 중요하고, 객차만의 진동을 저감시키기 위해서는 2차 현가장치의 강성을 감소시키는 것을 고려해 볼 필요가 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

주행 실험에 협조해 주신 철도공사 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 최경진, 장동욱, 유원희, 권영필 (2001) “여객차량 현가장치의 강성비 변화에 의한 진동 실험”, 한국소음진동공학회 2002년도 춘계학술대회논문집, pp.1110-1115.
2. 최경진, 장동욱, 유원희, 김완두 (2001) “여객차량의 질량비 변수가 상하진동에 미치는 영향”, 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회논문집, pp.1293-1299.
3. 최경진, 이동형, 문경호, 이현석 (1997) “수도권 통근용 전기동차 주행진동성능 실차시험”, 한국소음진동공학회 1997년도 추계학술대회논문집 pp.295-301.
4. 홍용기, 함영삼, 박찬경, 윤종민 (1995년) “철도차량 진동방지에 관한 연구”, 철도청
5. DasyLab User Manual, (1996년), DASYTEC
6. 용호택 (2005), “에너지 시스템 수치해석”, 도서출판 아진
7. Road Map to ADAMS/Rail Documentation (2005년), MSC soft
8. Rotem (2003) “KNR 경부선(160량) 전동차 정비지침서 제 4권”, 철도청