

# 전후동력 새마을호 철도차량의 진동성능 개선에 관한 연구

홍용기\*, 함영삼\*\*, 박찬경\*\*\*

## A Study on the Vibration Performance Improvement of Push-Pull Power Motor Coaches

Y.K. Hong, Y.S. Ham, C.K. Park

### ABSTRACT

This study had been performed to estimate for vibration characteristics of the Power Motor Coaches with Diesel-Hydraulic Drive and to secure a dynamic characteristic construction technology of another rolling stock. Air bags, springs and dampers of Bogie are carefully reviewed in order to improve ride quality. Dynamic analysis had been performed using VAMPIRE program, which had been developed by BRR, and the analysis results had been compared with test data to verify.

### 1. 서 론

#### 1.1 연구배경

전후동력 새마을동차의 PMC(Power Motor Coaches)는 동력을 발생하는 기관이 장착된 동력차로서 반객실을 사용하고 있는 PMC는 객실전용 객차에 비하여 진동이 다소 높아 승차감이 110dB를 초과하는 경우도 나타나고 있다.<sup>(1)</sup> 현재 우리나라의 철도는 경부선의 경우 궤도의 곡선반경이 1000m 이하인 커브가 상·하행선 합계 680개소에

312.2 km로 전체의 약 35%를 차지하고 있다.<sup>(2)</sup>

이러한 궤도의 악조건 때문에 외국의 고속철도에 비하여 저속인 140km/h의 최고속도로 운행되며, 새마을열차 중에서 특히 전후동력새마을동차의 PMC는 엔진이 장착됨으로 인하여 전·후위 대차의 하중 편중이 발생되어 우수한 승차감을 확보하지 못하고 있는 것이 현실이다. 또한, 차량의 장기간 사용으로 대차 스프링계 제요소의 변화에 의해 승차감 저하 우려가 있으므로 PMC차량의 진동특성을 규명하고, 타 철도차량의 운동특성을 규명할 수 있는 전문기술 확보가 필요하다.

승차감에 영향을 미치는 주요인자는 차량속도, 선로 불규칙도, 대차의 1,2차 현가장치로 크게 구분할 수 있는데, 차량속도와 선로 불규칙도는 문제해결에 비용과 시간상 여러가지 제약조건이 따르

\*한국철도기술연구원 차량연구부장

\*\*한국철도기술연구원 차량연구부 차체연구팀장

\*\*\*한국철도기술연구원 차량연구부 선임연구원

기 때문에 본 연구에서는 1,2차 현가장치의 각종 요소들을 조정하여 승차감을 개선하고자 한다.

철도차량의 운동은 복합적으로 발생하기 때문에 그 특성을 파악하여 대책을 수립하는 데에는 많은 연구와 노력이 요구되지만, 차량을 장기적으로 사용시에도 승차감이 저하되지 않도록 승차감을 확보할 수 있는 승차감 향상책을 종합적·전문적으로 연구 검토함으로써 승객에게 보다 안락한 여행을 제공하고 차량부품의 수명을 연장하는데 큰 도움을 줄 것으로 생각된다.

## 1.2 연구목적 및 범위

본 연구는 PMC차량의 진동특성을 규명하고, 최소의 예산과 인원으로 PMC객실의 승차감을 향상시키기 위한 최적의 방법을 도출하여 진동감쇠장치 및 주행장치 부품을 보완하고자 연구되었다.

PMC차량의 진동방지대책은 국내외 진동방지기술의 현황을 조사·분석하고, 철도차량의 진동에 대한 이론을 정립한 뒤 스프링과 댐퍼 등 현가장치의 구조와 특성을 검토하여 시뮬레이션에 의한 진동을 계산하고 적정 샘플 스프링 및 댐퍼를 선정된 뒤 실차에서 측정시험을 실시하여 시험데이터를 분석한 결과로 승차감 향상책을 제시하고자 한다.

시뮬레이션의 전처리과정으로 PMC차량의 주행부 구조를 검토하여 동특성 해석모델의 차량 데이터를 작성하였고 경부선에서 주로 사용되는 50kg·N 레일과 답면구배 1/40인 PMC차륜의 profile을 DB화하였다. 또한 국내 선로를 실제로 해석에 적용하기 위하여 우리나라 철도청에서 사용중인 모든 선로의 검측데이터를 입수하여 경부선 서울-대전 구간에서 400R, 600R, 800R, 1000R, 직선선로 등을 선정하고, 호남선 시험구간에서도 이론해석과 실차 측정결과를 비교하기 위하여 일부구간을 샘플링하여 VAMPIRE 프로그램의 INPUT 조건으로 변환하였다.

해석에 사용된 소프트웨어는 영국철도연구소(British Rail Research)에서 개발한 VAMPIRE로서 영국 국철에서의 실험을 통하여 그 신뢰성이 입증된 철도차량 전용 동특성 해석 프로그램을 이용하였다.

이론해석에 필요한 공기스프링 특성을 파악하고자 정치시험을 선행하였고 해석결과를 검증하고 실차적용여부를 판단하기 위하여 공기스프링의 스

프링상수를 개선하여 실차시험을 실시하였으며, 분석결과에 따른 승차감 향상책을 본 보고서에 기술하였다.

## 2. 철도차량의 진동기준

### 2.1 승차감 레벨 기준

승차감 레벨이란 진동가속도계로부터 얻은 신호를 감각보정하여 진동가속도 실효치와 진동 기준치의 비를 대수표시하고 승차감 레벨(Leq)이라 하여 다음과 같이 나타낸다.<sup>(3)</sup>

$$Leq(dB) = 20 \log \frac{Aw}{Aref}$$

여기서, Aw : 감각보정한 진동가속도의 실효치 %  
Aref : 진동의 기준치(Reference) 10<sup>-6</sup> %

우리나라에서 적용하고 있는 승차감 레벨의 기준치는 Table 2-1과 같다.

Table 2-1 승차감 기준

항목 등급	승차감 레벨(dB)	구 분
A	103 미만	우 수
B	103 이상 108 미만	양 호
C	108 이상 113 미만	보 통
D	113 이상 118 미만	불 량
E	118 이상	극히불량

국제 승차감 규격(ISO 2631) 기준과 유럽철도 승차감 규격(ORE B6) 기준 및 우리나라 철도청 전후동력 새마을열차 제작시방서의 승차감 기준을 비교하여 보면 Table 2-2와 같다.

Table 2-2 세계각국의 승차감 기준 비교

단위 : dB(RMS값)

승차감		좌우	상하	비 고
적용기준	피로한계	110	115	-승차시간 4:10 기준
	유지한계	105	110	
유럽철도승차감규격 ORE B6		112 (0.42g)	115 (0.56g)	-4:10 기준 -RMS값:5Hz 최대치 적용
KNR PMC 제작시방서 3.5.4		110	110	

## 2.2 진동성능 판정기준

진동가속도 측정데이터는 측정구간을 100m 간격으로 나누어 이 구간 내에서 최대치의 진진폭(peak to peak)을 취하며 그때의 속도를 같이 읽고, 이를 같은 속도별로 모아서 평균한다.

진동가속도 방향에 따른 속도별 진동가속도의 판정기준은 우수구간(A), 양호구간(B), 보통구간(C), 주의구간(D), 불량구간(위험구간, E)으로 구분한다.

## 3. 동특성 해석기술

철도차량의 동특성 해석 기술은 차량의 주행 안전성과 안정성을 확보하고 양호한 승차감을 갖는 차량을 개발하는 데 없어서는 안될 중요한 기술이다. 국내에서도 이와 관련된 연구가 조금씩 수행되어져 왔으나 대부분 150km/h 내의 저속용 차량에 관한 연구일 뿐 아니라 해석범위도 매우 기본적인 사항에 국한되어서 철도차량 개발에 활용되는 범위가 지극히 제한되고 있는 형편이다.

차량의 동적 특성을 해석하기 위해서는 컴퓨터 프로그램의 활용이 필수적이거나 이와 같은 프로그램 개발에는 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라 신뢰도를 확인하기가 곤란하므로 철도차량의 동특성 해석은 상업용 프로그램을 구입하여 목적에 맞게 활용하면서 추가로 필요한 프로그램을 개발하는 것이 경제적 측면이나 연구효율 측면에서 효과적이다.

### 3.1 이론해석의 필요성

어떤 물리계의 동적인 특성을 이론적으로 해석한다는 것은 매우 어려운 일이다. 특히 철도차량과 같이 비선형 요소가 많고 차륜과 레일사이에서 복잡한 접촉현상이 발생하는 동적 시스템의 거동을 이론적으로 정확하게 해석하기란 거의 불가능한 일인지도 모른다. 그럼에도 불구하고 이론해석이 철도차량의 개발에 필수적인 것은 차량 개발에 수반되는 시행착오를 최소화 할 수 있다는 데 있다. 특히 최근에는 전산기법의 발달로 이론해석으로도 상당히 정확한 계산결과를 얻을 수 있어서 이론해석의 필요성이 더욱 커지고 있다고 볼 수 있다.

차량에 대한 동특성 이론해석을 통해서 계산할 수 있는 사항으로는 사행동과 관련되는 임계속도, 곡선통과성능, 승차감, 주파수 응답특성, 탈선계수 등을 들 수 있으며 차량의 형태에 따라 기관차, 객차, 화차, 관절형차, 이축차량, 스티어링 대차, 틸팅차량, 편성차량 등으로 구분할 수 있다.

특히 시험에서는 상상할 수도 없는 극한 상태에서의 해석이나 반복계산이 가능하며 차량이나 선로조건의 변경이 용이해서 매우 능률적으로 계산할 수 있는 장점이 있다.

따라서 설계 단계 이전에 이와 같은 이론해석이 반드시 필요하며 설계요소들에 대한 영향도 설계와 병행해서 계속 검토 할 필요가 있는 것이다.

차량이 완성된 다음에는 시험을 수행하게 되는데 이 때도 이론 해석을 병행하므로서 시험기간과 절차를 대폭 간소화할 수 있어서 이론해석은 차량 개발에 있어서 매우 중요한 역할을 하게 되는 것이다.

### 3.2 철도차량용 동역학 해석 프로그램

철도차량의 동역학 해석을 위하여 국내에서 개발된 각종 전산 프로그램들이 많이 있지만 이와 같은 각종 프로그램들은 실제 설계에 반영하는데 많은 제약사항을 갖고 있으며 다분히 설계경향 판단용 또는 전시용으로 사용되고 있는 측면도 부인할 수 없는 것이 사실이다. 이들 프로그램은 차량 모델로부터 운동방정식을 직접 유도하기 때문에 프로그램에 오류가 포함되어 있을 가능성이 높을 뿐만 아니라 국내 여건상 각종 차량 물성치나 궤도특성을 정확하게 확인하기 곤란하므로 계산 결과만 가지고 프로그램의 신뢰성 확인을 하기가 매우 어렵다.

특히 이와 같은 전산 프로그램은 시험을 통한 확인이 필수적인데도 이러한 과정을 거치기가 어려워 국내의 전산 프로그램은 실용화에 한계를 갖고 있는 실정이다.

최근에는 동역학 해석의 상업용 프로그램들이 많이 개발되어져 사용되고 있으며 일명 다물체 동역학(Multibody dynamics)으로 불리우는 새로운 전산기법은 사용자가 운동계의 미분방정식을 직접 유도하지 않고 단지 계의 구성요소(질량, 강성, 댐핑, 비선형 특성 등)만을 정의하여 주변 프로그램 스스로 운동방정식을 작성하여 해석하는 기법으로서 ADAMS, DADS 등이 대표적인 소프트웨어로

알려져 있다.

철도차량 동역학 해석에 이와 같은 상용 프로그램의 적용도 일부업체를 중심으로 시도되었으나 철도 차량 특유의 차륜/레일 상호관계 해석기법의 복잡성 때문에 활발하게 사용되지는 못하고 있는 실정이다.

이러한 이유로 여러 철도 선진국에서는 철도차량 전용 동역학 해석 프로그램을 만들어서 시판하고 있으며 여러 철도운영주체 및 제작자들이 이를 적극적으로 활용하고 있다.

본 연구에서는 대표적인 철도차량 전용 동역학 해석 프로그램으로 사용되고 있는 영국의 VAMPIRE를 활용하였다.

■ VAMPIRE(Vehicle dynAmics Modelling Package In a Railway Environment)

영국철도연구소(BRR : British Rail Research)에서 20여년 동안 개발되어 왔던 각종 차량 동특성 해석용 프로그램들을 하나의 패키지로 통합하여 판매하고 있는 프로그램이다.

과거의 프로그램과 비교하여 볼 때 특정한 모델이 아니더라도 모델링이 가능하며 편성열차나 관절형 열차도 계산이 가능하다. 또 과거에는 운동방정식을 직접 도출해야 했으나 기하학적 데이터의 입력만으로 계산이 가능하며 200 자유도까지는 계산에 큰 문제가 없는 것으로 알려지고 있다.

계산속도는 50자유도를 갖는 모델이 1km의 선로를 200km/h로 주행하는 경우 386PC는 10분, 486PC는 2분, SUNII는 1분, SUN10은 30초 정도가 소요된다.

해석범위로는 고유진동수 및 안정성 해석, 주파수 응답 해석, 시간영역 해석, 원곡선에서의 주행 특성 해석(기하학적 준정적 해석) 등을 들 수 있다. 입력으로는 원심력이나 공기역학적 저항 등을 외력으로 표현이 가능하며 차륜과 레일의 기하학적인 데이터를 입력하여 본 계산전에 이들간의 접촉 계산을 미리 수행하여 이 계산 결과를 차량 동역학 계산의 data base로 활용한다.

견인전동기도 중량이동 계산을 위하여 모델링이 가능하며 shear spring 모델링, 수직·횡방향의 선로 불규칙도, 분기기 등의 모델링을 위한 kink, 좌우측상의 피칭을 고려한 8자유도를 갖는 차축 모델링, 사용자 정의가 가능한 능동 현가장치와 틸팅 장치의 입력 가능성 등이 큰 특징이다.

계산결과는 크게 안전성, 승차감, 궤도반력 등으

로 구분된다. 안전성을 나타내는 계산결과로는 탈선계수, 차륜/레일 마모지수, 차량한계 등을 들 수 있으며 승차감과 관계되는 계산결과로는 안정성, 차체 가속도, 승객 승차감 그리고 궤도반력으로는 궤도에 작용하는 수직력과 횡력을 들 수 있다.

계산방법은 준정적 평형해석과 선형 행렬해석, 비선형 시간응답 해석 등의 세가지로 구분할 수 있다.

준정적 평형해석을 통하여 윤중감소, 차량한계 침입여부, 차륜/레일간의 작용력과 마모계수 등을 계산할 수 있으며 선형 행렬해석을 통하여 고유치와 안정성 해석, 주파수 응답계산 등을 수행하여 승차감, 하중이동 등을 구할 수 있고, 비선형 시간응답 해석을 통해서 각종 충격력, 시간 응답 등을 구한다.

4. 차량 동특성 분석

4.1 모델링

VAMPIRE를 이용 동특성 이론해석을 위해서는 차량, 궤도 및 차륜/레일 형상을 모델링 해야 하며 그 내용은 다음과 같다.

4.1.1 차량 모델링

차량모델링에 사용된 좌표는 Fig. 4-1에서와 같이 오른손 좌표계를 기본으로 사용하였으며 각 모델구성요소별 특성치는 다음과 같다.

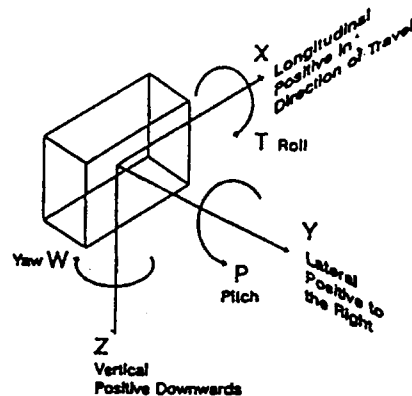
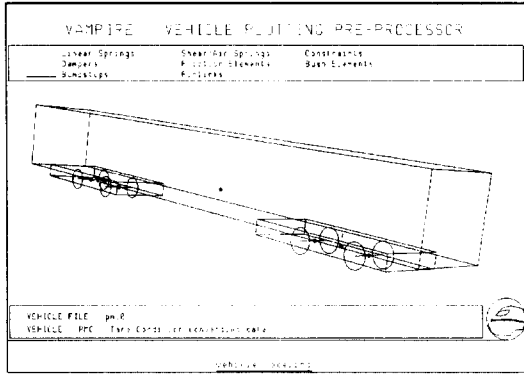


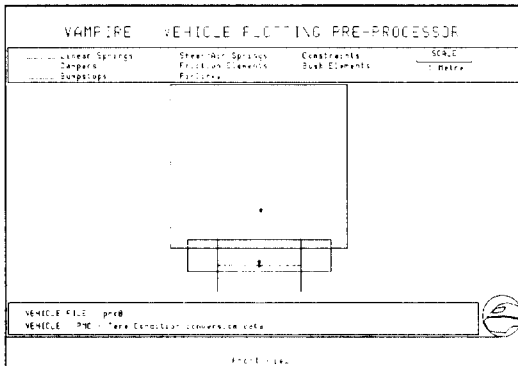
Fig. 4-1 차량 모델링 좌표계

가. 구조물 (MASS)

Fig. 4-2에서 보듯이 PMC 차량의 MASS 모델



(a) 전체



(b) 전면

Fig. 4-2 차량 모델링

링은 차체, 대차, 및 각 차륜셀으로 구성되며 본 보고서에서는 각각 6자유도를 갖는 자체 진동모드가 없는 강체(Rigid Body)로 모델링 하였다.

나. 스프링 (SPRING)

PMC용 대차는 1차 현수장치에 동일한 특성을 갖는 코일스프링 16개와 2차 현수장치에 에어스프링 4개를 포함 총 20개의 스프링 요소를 가지고 있으며 에어스프링에 대한 특성치는 도면 11342-30007(철도칭)과 단품상태의 스프링 특성치 시험을 통하여 산출하였고, 코일스프링은 도면 217259 (대우중공업, '88 PMC)의 특성치를 이용하였다.

각각의 모델링은 Fig. 4-2에서와 같이 VAMPIRE의 Shear Spring 모델을 적용하였다.

다. 댐 퍼

PMC용 대차는 1차 현수장치에 수직댐퍼(도면 11342-40021) 8개와 2차 현수장치에 수직댐퍼(도면 11342-40011) 4개, 좌,우방향 수평댐퍼(도면 11342-40022) 4개, 및 요댐퍼(도면 11342-40003) 4개로 구성되어 총 20개의 댐퍼 요소를 가지고 있으며, VAMPIRE의 Damper 모델로 Fig. 4-2와 같이 모델링을 하였다.

라. 부 쉬(Bush)

PMC용 대차는 차륜중심과 대차프레임 간에 이중 리프스프링(도면317219, 2668-T3-6-1, 대우중공업) 링크구조를 갖고 있으며 이를 차륜중심의 부쉬(도면 220117, 대우중공업)구조에 스프링 특성을 합성하여 VAMPIRE의 BUSH 모델로 8개를 모델링 하였다. 또한 대차중심에 차체와 연결되는 고무부쉬도 동일한 모델을 이용하여 Fig. 4-2와 같이 모델링 하였다.

마. 운동제한 요소 (Bumpstop)

PMC차량은 차체와 대차중심간에 횡방향으로 운동이 제한되는 Bumpstop을 갖고 있으며 여유치는 20mm로서 VAMPIRE의 BUMPSTOP 모델을 이용 하였다.

4.1.2 궤도 모델링

궤도의 모델링은 크게 불규칙도(Irregularity) 및 곡선도(Curving)로 표현할 수 있으며, 국내 궤도특성이 고려된 데이터를 사용하기 위해서 궤도검측차에서 검측한 궤도 데이터를 이용하여 Vampire에서 요구하는 특성치로 변환하였다.

이는 국내 전국선로를 포함하고 있어 그전산 용량이 방대하기 때문에 본 보고서에서는 서울 → 대전간의 곡선 곡률반경 400m, 600m, 800m, 1000m 및 표준선구와 호남선의 이리 → 장성간의 일부 임의구간을 선택하여 사용하였다.

4.1.3 차륜/레일 모델링

차륜과 레일의 표면 접촉형상은 동특성 해석을 위한 작용력 계산에서 매우 중요한 요소로서 차륜의 경우 도면 11343-20002를, 레일의 경우 도면 550 - 0011을 사용하였다. 또한 차륜과 레일의 접촉표면을 Fig. 4-3에서 보듯이 양레일 중심선을 기준으로 한 좌표값으로 정량화하였으며, 접촉 특성치는 레일에 대한 차륜의 상대 변위를 좌우 24mm씩 이동하면서 산출하였다.

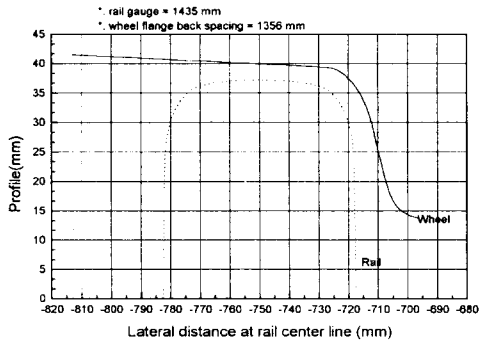


Fig. 4-3 차륜 및 레일 모델링

## 4.2 고유치 해석(Eigenvalue Analysis)

VAMPIRE의 고유치 해석을 통하여 차량모델의 고유 진동수와 이에 따른 모드해석 및 선형 주행 안정성에 대한 분석을 하면 다음과 같다.

### 4.2.1 고유 진동수(Natural Frequency)

4.1절에서 모델링된 PMC차량을 매우 낮은속도로 선형 접촉이론을 적용하여 주행 시뮬레이션을 하면 속도의 영향을 무시할 수 있는 차량의 고유 진동수와 자유도별 진동 모드를 산출할 수 있으며, 차체와 관련된 고유진동수를 살펴보면 Table 4-1와 같다.

### 4.2.2 선형안정성해석(Linear Stability Analysis)

PMC 차량에 대한 선형 안정성 해석은 차량 속도와 차륜의 표면 기울기(Conicity)값을 변화시키면서 고유 진동수에 대한 최소 진동 감쇄모드(Least Damped Mode)를 계산하며, 만일 계산된 최소 진동 감쇄모드가 음수값을 가지고 있다면 해당 진동수에서 진동이 감쇄될 수 없고 따라서 계속적으로 발산되어 차량이 불안정하게 된다. Fig. 4-4에서 보듯이 차륜의 표면 기울기에 따라 동적 거동이 결합된 고유진동수에 해당되는 최소 진동 감쇄모드는 차량 속도가 증가함에 따라 감소하고 있음을 볼 수 있다. 여기서 PMC차량 차륜의 접촉빈도를 표준편차 2.5mm, 평균값을 0으로 하는 정규분포 곡선을 이용 등가 표면 기울기를 계산하면 대략 0.1정도이며 이때 해당되는 임계속도(Critical Speed)는 대략 270km/h로서 이 이상의 속도에서는 차량이 불

Table 4-1 PMC 차량의 차체 진동모드

모드 번호	자유도	진폭	phase lead (degrees)	비 고
3	M1Y	1.0000	0.0	M1 : 차체 X,Y,Z,T,P,W ; 각 자유도 방향
	M1Z	0.0185	186.6	
	M1T	0.4736	4.1	
	M1W	0.0112	353.7	
4	M1X	0.9519	0.2	
5	M1Y	0.9909	188.1	
	M1Z	0.0883	208.1	
	M1T	1.0000	0.0	
	M1W	0.0576	154.5	
6	M1X	0.0108	354.7	
	M1Y	0.6728	157.2	
	M1Z	0.0212	199.3	
	M1T	0.3856	320.2	
7	M1W	1.0000	0.0	
	M1Y	0.0197	238.9	
	M1Z	1.0000	0.0	
	M1T	0.0354	27.8	
8	M1P	0.0176	206.7	
	M1X	0.1207	47.0	
	M1Z	0.2724	9.1	
	M1P	0.4756	338.6	

안정하게 된다. 이는 PMC차량의 운행 최고속도인 140km/h보다 크기 때문에 주행 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

또한 이를 속도와 차륜의 표면기울기에 따른 최소 진동 감쇄모드의 음수값을 갖는 영역분포를 살펴보기 위해서 Contour 곡선을 이용하면 Fig. 4-5와 같이 차량의 불안정 영역을 쉽게 볼 수 있다.

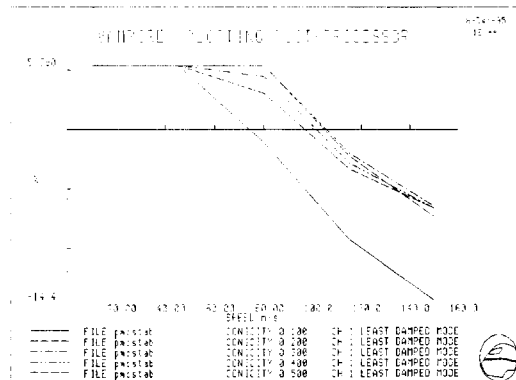


Fig. 4-4 속도 및 차륜의 표면기울기에 따른 최소 진동감쇄모드의 변화

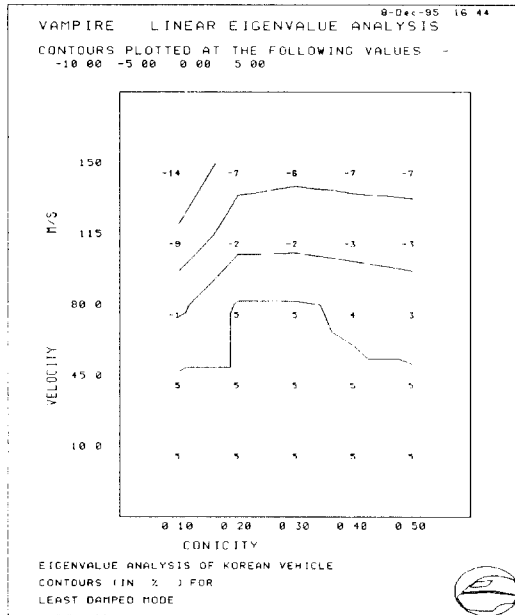


Fig. 4-5 차량의 표면기울기 및 속도에 따른 안정성 contour curve

### 4.3 현차량 승차감 분석

승차감 분석은 비선형 시간응답 분석을 통하여 산출하였으며, 이는 차량, 궤도 및 차량-레일의 상호작용 조건등이 비선형 요소를 포함하고 있는 경우를 고려하여 계산되어지며 비교적 정확한 결과를 산출할 수 있는 대신에 계산 시간이 많이 소요되는 단점을 갖고 있다.

현 차량의 승차감은 4.1절에서 모델링된 궤도에 따라 실 주행속도 ( $= 4.5\sqrt{R}$ , R:곡률반경)를 적용하여, 후대차의 좌측 전차륜 중심, 후대차 좌측 에어스프링의 하측 대차프레임부위 및 상측 차체부위, 객실바닥판의 후대차 중심부위에서 각각 가속도값을 산출하여, RMS값으로 변환하고 이를 실측에서 적용하고 있는 가속도 필터(Low pass filter, 차체의 경우 10Hz, 이외 30Hz)기준을 적용하여 변환하면 곡률반경이 현저하게 나타나는 track1-4 및 6의 경우는 좌우 방향이 상하방향보다 크게 나타나며, 이는 곡선부위에서의 궤도특성에 기인한 경우로서 차량의 특성치 변환으로만 해결하기에는 한계가 있는 사항으로 판단된다.

또한 호남 직선구간인 Track 6-1의 경우 경부 직선구간인 Track5와 주행속도가 동일함에도 가속

도 RMS값들이 매우 낮게 형성되고 있으며 이는 호남선의 궤도 조건이 경부선의 것보다 현저히 양호한 것으로 판단된다.

또한 승차감은 상기결과중 차체 바닥판 부위에서 측정된 ch1의 값을 인간공학적 승차감에 영향을 주는 주파수 대역에 가중치를 주는 필터(ISO 2631)를 적용하여 산출하면 Table 4-2와 같다.

여기서 대부분의 경우 곡선구간에서는 상하방향보다는 좌우방향이, 직선구간에서는 좌우방향보다 상하방향의 가속도 값이 크게 나타나고 있는 경향을 볼 수 있다.

Table 4-2 현차량 승차감 계산 결과(dB)

주행궤도	주행속도 (km/h)	궤도 곡률반경 (m)	filtering 구분	차체 승차감	
				좌우 방향	상하 방향
track1 (경부)	90	400	NF	116.87	109.02
			F	109.83	105.65
track2 (경부)	110	600	NF	111.37	107.73
			F	107.83	104.88
track3 (경부)	130	800	NF	119.40	106.80
			F	113.46	104.40
track4 (경부)	140	1000	NF	115.79	111.66
			F	112.03	110.78
track5 (경부)	140	직선	NF	109.08	111.78
			F	107.90	110.35
track6 (호남)	130~140	혼합	NF	111.58	106.48
			F	104.75	104.59
track 6-1 (호남)	140	직선	NF	104.31	107.41
			F	102.76	105.74

### 4.4 개선방안 분석

#### 4.4.1 개선안 판단

현 차량의 승차감 개선은 차량 안전성에 영향이 없는 범위에서 최소한의 설계변경으로 개선방안이 수립되는 것을 원칙으로 하고 이를 위해서 대차 현수장치의 동적요소 중 차량의 동적거동에 크게 영향을 미치는 스프링 요소들의 특성변화에 따른 차체의 승객위치에서 가속도 영향 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Table 4-3과 같다.

이 결과에서 보듯이 승차감은 차체와 직접 연결되어 있는 2차 스프링 조정시가 1차 스프링 조정시보다 변화량이 크고, 일반적으로 2차 스프링 보다 1차 스프링이 차량의 사행동에 대한 주행 안정성 및 조향성에 더욱 영향을 미치며 스프링계수

Table 4-3 스프링계수 조정에 따른 가속도

스프링 계수조정 변경비율		가속도 (RMS, %g)		비 고
		좌우	상하	
2차 스프링 (Air Spring)	UP	30%	0.376 0.367	주행궤도 : Track5 주행속도 : 140 km/h Filtering 스프링계수 변경은 좌우, 상하 방향 동일 비율로 계산된 값임.
		20%	0.355 0.355	
		10%	0.340 0.343	
	DOWN	10%	0.308 0.322	
		20%	0.292 0.312	
		30%	0.279 0.302	
		40%	0.269 0.295	
1차 스프링 (Coil Spring)	UP	30%	0.265 0.288	
		20%	0.327 0.356	
		10%	0.326 0.348	
	DOWN	10%	0.325 0.340	
		20%	0.322 0.324	
		30%	0.319 0.315	
		40%	0.317 0.307	
	50%	0.313 0.298		
	50%	0.308 0.288		

조정에 따른 호환성 문제등이 있기때문에 2차 현수장치의 스프링 계수를 최대한 호환성을 유지하며 조정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

PMC차량은 2차 스프링에 Air 스프링을 사용하고 있으며 스프링계수는 부가공기통의 공기량 변화, air 스프링의 고무재질 및 성형방법에 따라 조정이 가능하고 본 연구에서는 기존 사용 Air 스프링의 사양변경 없이 스프링 계수를 조정할 수 있는 부가공기통 추가 장착안을 결정하였다. 또한 승차감을 1~2dB 향상시키기 위하여 스프링계수의 조정은 부가공기 용량 대비 스프링계수 변화 곡선에서 40ℓ 정도의 부가공기통을 사용하면 대략 40%의 상하방향 스프링 계수 감소효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다.

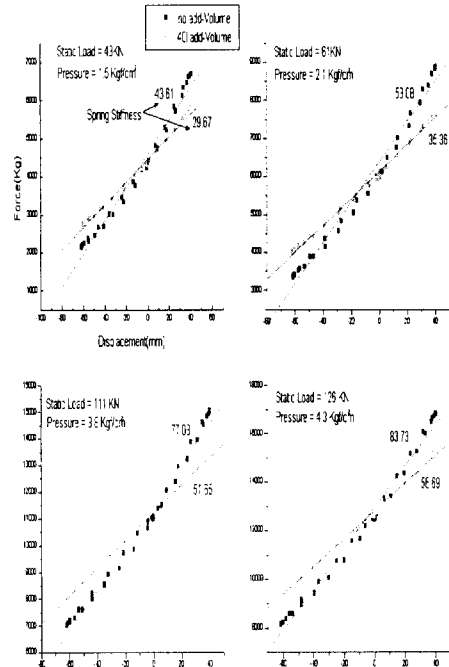
#### 4.4.2 Air 스프링 정하중 시험

Air 스프링 특성은 동하중 시험을 통하여 산출할 수 있으나 국내 시험기의 미보유로 인하여 대원강업(주)의 정하중 시험기를 이용하여 부가공기통이 연결된 Air 스프링 특성 시험을 실시하였다.

각각의 시험은 Air 스프링 도면의 사양에 준하여 실시하였으며, 그 결과 스프링 특성치는 Fig. 4-6에서 보는 바와 같이 약 30%정도 계수 감소효과를 볼 수 있었다. 여기서 PMC 차량의 차체는 54.97Mg으로서 2차 스프링인 Air 스프링의 지지하중이며 무게중심점의 좌우 편향을 무시할때

전,후의 Air 스프링의 분담 정하중은 각각 15.346 및 12.139Mg 으로서 상기 결과를 이용하여 보간법을 사용하면 현재 Air 스프링의 계수는 전,후 각각 0.94MN/m 및 0.79MN/m임을 알 수 있으며 보도공기통 장착 Air 스프링 계수는 전,후 각각 0.64MN/m 및 0.53MN/m임을 알 수 있다.

또한 좌우방향의 스프링계수는 상하방향의 스프링 계수 정하중 시험과 동일하게 수행되어 산출하여야 하나 현재 국내 시험기로서는 시험여건이 갖추어져 있지않아 상하방향의 스프링 계수 조정 변화율과 동일하게 산정하였다.



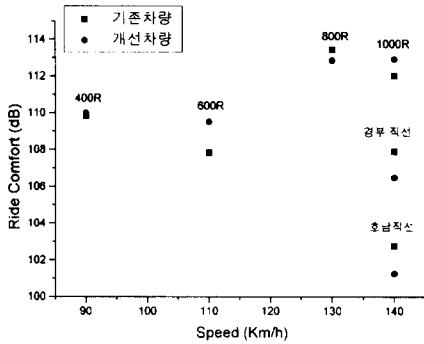
PMC Airbag Test Results

Fig. 4-6 Air 스프링 정하중 성능시험 결과

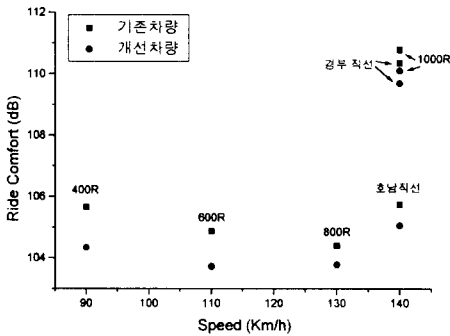
#### 4.5 개선차량 승차감 분석

4.4절에서 개선된 Air 스프링을 이용하여 4.3절의 주행 조건과 동일하게 승차감을 분석하면 Fig. 4-7과 같다. 여기서 개선차량의 경우 곡선 및 직선구간에서 상하 및 좌우방향의 가속도경향은 현차량과 유사하게 나타나고 있다.





(a) 좌우방향



(b) 상하방향

Fig. 4-7 현차량과 개선차량 승차감 비교결과

상기 결과에서 일부 곡선구간의 좌우방향 차체 승차감이 불량하게 나타나고 있는데 이를 개선시키기 위한 방안으로 외국에서는 현수장치의 설계 시 센타핀의 영향이 무시될수 있는 틸팅대차를 개발하고 있으며 이는 차체와 대차사이에서 상대운동을 유연하게 하기 위해서 슬라이딩 링크를 사용하고 있다.

또한 궤도분야의 경우 곡선궤도를 최대한 직선화 시키거나 캔트량을 곡률반경과 차량 주행 속도간의 최적조건으로 설계가 이루어지면 곡선구간에서 차체의 좌우방향 승차감을 개선할 수 있을 것으로 판단되며, 이는 경부선에 비해서 호남선의 승차감이 양호함을 통하여 알 수 있다. 그러나 틸팅대차 및 궤도수정은 막대한 개발비 및 공사비가 소요될 것으로 판단되며 이는 본 연구의 목적인 최소한의 개선으로 승차감을

향상시키는 방향과는 거리가 있으며, 따라서 직선구간으로 국한하여 승차감 개선 효과를 볼 때 5절에서 제시된 공기스프링의 부가공기통 장착안은 매우 유용한 것으로 판단된다.

## 5. 실차시험

PMC 차량의 진동특성을 규명하고 최소의 투자로 PMC 객실의 승차감을 향상시키고자 수행하고 있는 본과제의 주요내용인 PMC 차량의 승차감 개선대책의 실차적용 가능성을 확인하기 위하여 부곡-목포간에서 실차 주행시험을 실시하였다.

### 5.1 시험항목

시험항목은 진동특성 파악을 위해 차체 및 대차의 진동가속도, 선로상태별 진동가속도를 측정하였고 승차감 분석을 위해 차체에서의 승차감을 측정하였다. 또한 이를 통하여 주행 안정성에 영향을 미치는 차체 횡방향 가속도를 분석하였다.

### 5.2 시험방법

제4장의 이론해석 결과 40ℓ의 부가공기통을 Air Bag에 연결하면 1dB 가량의 승차감 개선이 예상되어 부가공기통을 Air Bag에 3/4 inch 플렉시블 호스로 연결하였다. 시험열차를 편성하여 PMC 후부대차에 다음과 같이 모두 4위치에서 상하, 좌우 방향의 진동가속도를 계측하였다.

- ① 선로에서 검측되는 1차진동을 계측하기 위한 8위 축상측
- ② 2차현수장치인 공기스프링 하부 사이드 후레임
- ③ 공기스프링 상부 차체측
- ④ 객실내의 대차 중심

또한 객실측 대차 중심에서 승차감 측정기로 승차감을 측정하였다.

### 5.3 시험결과

#### 5.3.1 속도별·선로상태별 진동가속도

경부선과 호남선의 선로와 속도에 따른 진동가속도 측정결과는 Fig. 5-1~2와 같다. 기존차의 상하방향 진동은 경부선과 호남하선 일부구간이

95~120km/h 속도대역에서 보통구간이었으나 개선차에서는 양호 또는 우수구간으로 개선되었으며, 좌우방향 진동도 전반적으로 개선차의 성능이 우수하였다.

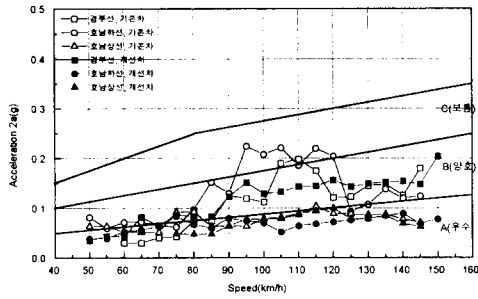


Fig. 5-1 상하방향 차체 진동가속도

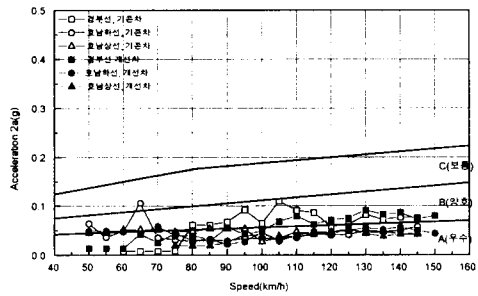


Fig. 5-2 좌우방향 차체 진동가속도

### 5.3.2 승차감

국제표준화기구(ISO)의 전신진동폭로에 관한 평가지침에 의해 각각 보정된 측정기를 사용하여 방석형 가속도계를 PMC 객실의 대차 중심 창측 좌석에 놓고 측정자가 편안한 자세로 앉아서 측정한 승차감 측정결과는 Table 5-1과 같다.

### 5.3.3 횡방향가속도

경부선과 호남선에서 곡선반경이 800m 이하인 곡선의 횡가속도 측정결과는 JR기준(0.08g)에 적용하면 기존차는 400R과 600R에서, 개선차는 400R에서 기준을 약간 초과하였지만 AAR기준(0.1g)을 적용하면 모두 한계치내에 들고 있다.<sup>(4)</sup>

Table 5-1 승차감 결과 비교

(단위 : dB)

구분	구간	기존차		개선차		비고
		상하	좌우	상하	좌우	
경부선	400R	108.4	107.2	108.0	107.0	
	600R	108.3	108.8	108.2	106.8	
	800R	107.5	109.4	107.0	106.8	
	1000R	111.6	116.9	108.5	109.7	
	75~80K	110.9	111.1	109.7	110.5	
	임의지점	107.8	110.6	106.9	106.6	
	김제~장성	105.9	105.4	103.4	104.3	
호남선	신태인~백양사	103.7	105.7	103.3	103.6	129km/h
	장성~신태인	104.9	105.2	103.1	103.0	130km/h

### 5.3.4. 주파수 분석

공기스프링의 진동감쇄모드를 살펴보면 부가공기통을 연결한 공기스프링에서 10~11Hz 주파수대역의 진동레벨은 거의 감쇄시킨 반면 1~2 Hz 주파수대역의 진동레벨이 조장된 것으로 미루어 볼 때, 1~2 Hz의 진동레벨은 차체진동모드인 것으로 예측된다. 이것은 고유치해석결과와도 잘 일치됨을 증명하고 있다.

### 5.3.5 시뮬레이션 결과와 비교 검토

시뮬레이션에서 40ℓ의 부가공기통을 연결하면 약 1dB 정도의 승차감 개선이 예상되었는데 실차 시험결과에서도 선로별·속도별로 약간의 차이는 있지만 승차감이 개선되는 경향이 일치하고 있다.

## 5.4 시험결과 고찰

PMC 차량의 진동특성을 이론적으로 해석하고 이를 검증하기 위하여 실차시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

곡선주행시의 승차감은 여러 구간을 분석하였지만 곡선거리가 짧기 때문에 측정구간마다 다른 결과가 도출되어 참고적인 자료로만 활용할 수 있는데, 곡선반경이 800m 이하인 경우는 최고속도가 125km/h로 제한을 받아 109dB 미만의 비교적 양호한 승차감 수준이었으며 곡선반경이 1000m일때는 곡선선로에서 속도제한이 거의 없기 때문에 상하방향 승차감은 112dB까지 높아진다. 그러나 승차감을 평가할때는 가급적 장거리를 누적시켜 평균하게 되므로 이보다는 양호해 질 것으로 예측

된다.

1차년도에 간이식으로 실시한 승차감측정결과에서도 직선구간에서 최고속도로 주행할 때의 승차감이 곡선구간보다 불량한 것으로 판명되었지만 금번 시험에서도 경부선 75~80km 지점에서 140km/h로 주행할 때 승차감은 111.9dB까지 계측되어 속도인자가 승차감에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

곡선구간을 포함한 임의의 선로에서 10km 이상의 거리를 누적시켜 승차감을 분석한 결과 좌우·상하방향 모두 기존차량보다 개선차량의 개선효과가 우수하여 108dB 미만의 양호한 승차감을 유지하였으며, 공기스프링의 상수 조절에 따른 최적댐퍼를 선택하기 위하여 댐핑력을 조절하였으나 댐퍼를 조절하는 데 투입되는 시간과 비용을 고려할 때 승차감의 개선효과는 극히 미약하여 댐퍼의 조절로는 승차감 개선에 한계가 있음을 확인하였다.

속도별 진동가속도값을 살펴보면 일부구간에서 기존차가 보통구간에 있었지만, 개선차에서는 전구간이 양호 또는 우수구간에 속해 주행안정성면에서는 대단히 안전한 것으로 판단된다. 곡선통과성능과 곡선통과시 전복에 대한 안전성 평가기준인 횡가속도를 살펴보면 기존차, 개선차 모두 AAR 기준인 0.1g 이내에 들고 있으며, 호남상선>호남하선>경부선 순으로 횡가속 성능이 양호한 것으로 나타나고 있다.

PMC차량의 진동특성을 승차감, 진동가속도 RMS 값, 진동감쇄량 등 여러 각도에서 분석·고찰한 결과 개선차량의 진동상태가 기존차량보다 양호하며, 경부선과 호남선을 비교할 때 호남선의 선로상태가 보다 양호한 것으로 나타났다.

## 6. 결 론

동특성 이론해석은 국내 기술축적을 위하여 독자프로그램을 개발하여야 하나 본과제의 기간 및 예산을 고려하여 외국에서 신뢰성이 입증된 프로그램(Vampire)을 도입하여 사용하였으며 이를 통하여 차량 사행동과 관련되는 안전성 해석, 승차감 해석, 차륜 마모해석등 실제 시험전의 성능예측과 연구방안 개념설정을 가능하게 하였다.

또한, 지금까지 국내에서 철도차량에 대한 이론해석을 수행하고 있는 여러 기관들이 있지만 외국의 선로 데이터를 사용하였던 바, 본 연구에서는

그동안 국내에서 확보하지 못한 선로의 검측데이터를 수집하여 경부선과 호남선 일부구간을 VAMPIRE 프로그램의 INPUT 조건으로 데이터를 변환하여 시뮬레이션을 수행하여 승차감 향상에 대한 가능방안을 제시하였고, 이에 따른 실제 실차시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최소한의 구조변경을 통한 PMC차량의 방진대책으로는 공기스프링의 상수 개선이 타당하며, 이론해석을 통하여 시뮬레이션을 수행한 결과 전체적으로 볼 때 1dB정도의 승차감 향상이 예측되었다.
2. 기존의 승차감 평가방법과 동일하게 승차감을 평가한 호남선 김제-장성 구간에서 좌우, 상하방향의 감쇄효과가 각각 0.5, 2.9dB 우수하여 차량을 장시간 사용시에도 108dB 미만의 승차감을 확보할 수 있다.
3. 실차시험데이터를 승차감, 속도대역별 진동레벨, 주파수 분석 등 여러 각도로 분석한 결과 부가공기통을 설치하여 개선한 차량의 진동성능이 기존차량보다 우수하였다.
4. Vampire 이론해석을 통하여 철도차량의 주행동특성 시뮬레이션 기법을 국내 궤도 데이터의 DB화와 함께 정립하였으며, 이를 통하여 향후 계속되는 기존선 고속화, 대구-부산간 고속철도 차량의 기존선 이용방안, 프랑스에서 도입되는 고속철도차량의 동특성 해석 및 한국형 고속전철 개발, 진동차 품질개선 및 도시철도차량 개발 등 여러 관련분야에 응용할 수 있는 전문기술을 확립하였다.

## 참고문헌

- (1) 철도기술연구소, 1991~1994, 신조차 시운전 성능시험 보고서.
- (2) 철도청, 1995, 보선업무자료.
- (3) 철도기술연구소, 1989, 철도차량의 승차감 측정방법, 철도기술연구보 VOL.23 NO1.
- (4) 철도기술연구소, 1985, 객차 진동가속도 측정조사 연구, 철도기술연구보 VOL.19.