

# '97-신조 무궁화객차의 차량동특성 해석 및 시험 (Analysis and Test of Vehicle Dynamics for '97-New Mugunghwa Coaches)

양희주, 김진태, 김필환\*, 이찬우\*\*

## ABSTRACT

This paper describes the evaluation methods and criteria used to verify running performance of railway vehicle, and shows results of vehicle dynamics simulation and running performance tests for New Mugunghwa Coaches that were designed and manufactured by DHI in 1997.

Through running performance test of New Mugunghwa Coaches, Vibration, Ride Comfort were measured on the condition of service operation.

As a results, each simulation and test results meet the criteria proposed by Korean National Railroad(KNR) and Korea Railroad Research Institute(KRRI).

## 1. 서론

국가의 중요한 운송 수단중의 하나인 철도차량은 승객이나 화물을 정해진 시간 내에 안전하게 목적지에 도달하도록 하는 기능을 가지고 있다. 산업화의 발전으로 열차의 고속화가 요구되고 있지만 산악 지형이 많은 우리 나라에서는 경부선의 경우 궤도의 곡선 반경이 1000m이하인 곡선이 전체의 약 35%를 차지하고 있기 때문에 시간 단축을 위한 고속화에 어려움이 많다. 이러한 궤도의 악조건 때문에 최고 속도를 150km/h로 제한하여 운행하고 있다. 철도 차량의 주행시 발생하는 진동은 승객의 승차감을 좌우하는 중요한 인자이다. 승차감에 영향을 주는 진동 성분은 주행 안전에도 영향을 주며, 궤도 틀림과 차륜 답면 형상 등의 요인에 의해 차축에 진동을 일으키고 이 진동은 1차 현가 장치를 통해 대차프레임에 전달되어 다시 2차 현가 장치를 통해 차체에 전달된다.<sup>1)</sup>

본 논문에서는 당사에서 제작하여 철도청에 납품한 '97년 신조 무궁화 객차(이하 본 객차)에 대한 동특성 해석 결과와 현차 주행 시험을 통하여 얻은 결과를 비교하고, 각 결과가 철도청(이하 KNR)과 한국철도기술연구원(이하 KRRI)에서 제시한 사양을 만족하고 있음을 보이고자 한다.

## 2. 차량 제원

### 2.1 차체 및 대차

당사에서 제작한 본 객차의 차량 제원은 Table 1과 같으며, 객차용 대차의 1차 현가 장치는 웨브론 고무 스프링과 수직방향 댐퍼, 차체와 대차사이의 2차 현가 장치는 공기 스프링과 수직방향 및 좌우방향 댐퍼로 구성되어 있다. 차체 하부에 연결되어 있는 센터 피봇은 2개의 고무 부쉬 및 좌우방향 댐퍼를 통해 대차와 연결되어 있다.

\* 대우중공업 철도차량연구소

\*\* 한국철도기술연구원

Table 1. 차량 제원

항 목	차량 제원	비 고
차체 중량	27.89 ton	공차 상태
차체 최대 길이	23500 mm	
차체 최대 폭	3200 mm	
차체 최대 높이	4138 mm	
대차 중량	11.36 ton	2EA
대차 최대 길이	3460 mm	
대차 최대 폭	2730 mm	
대차 최대 높이	946 mm	
1차 현가 장치	쉐브론 스프링+수직 댐퍼	
2차 현가 장치	공기 스프링+좌우 댐퍼+수직 댐퍼	
기초 제동 장치	디스크 제동 와 안티 스키드	
고정 축거	2300 mm	
궤간	1435 mm	
최고 속도	150 km/h	
정 원(좌석수)	72명	만차시 : 정원의 200%

Photo. 1은 본 객차를 나타내며, Photo. 2는 본 객차에 적용된 150km/h이상까지 주행할 수 있는 경량 볼스타레스(Bolsterless)형 대차이다.

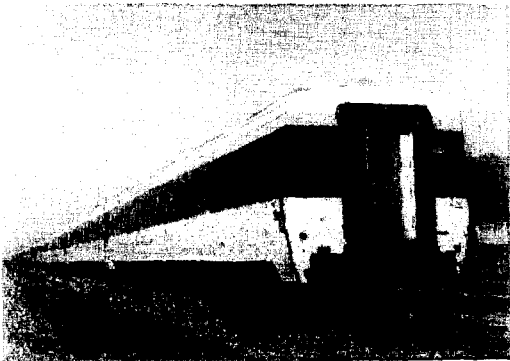


Photo. 1 신조 무궁화 객차

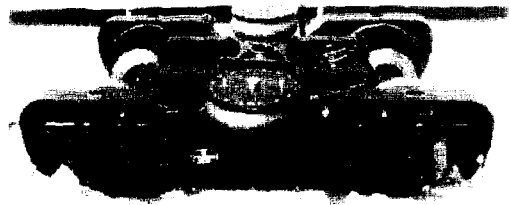


Photo. 2 신조 무궁화용 대차

## 2.2 차륜 및 레일

차륜 및 레일은 차량 운동에 영향을 미치는 외부 작용력이 가장 크게 나타나는 부분으로서 그 접촉 형상에 따라 각종 마찰력이 변하게 되어 차량 운동을 변화시키게 된다. 따라서 접촉 표면 형상은 차량 거동에 있어서 매우 중요한 역할을 하는 부분으로서 본 객차의 차륜과 국내 선로의 레일은 다음과 같다.<sup>2),4)</sup>

### 2.2.1 차 륜

차륜은 차축의 분담하중을 반씩 분담하고 레일위를 주행함과 동시에 차량의 진행 방향을 확실하게 레일의 진행방향으로 유도하는 역할을 하고 있다. 본 객차에 사용된 차륜은 수정된 Heumann

차륜으로서 차륜 직경이 860mm이고, 차륜간 풀랜지 후면간 간격이 1354mm이다.

### 2.2.2 레일

우리 나라 철도의 레일은 표준 궤간(1435mm)을 가지며, 주로 50kgN 레일을 사용한다. 레일의 무게는 일반적으로 단위 m당 중량 즉 kg/m으로 표시한다.

### 3. 해석 및 시험 기준

본 객차를 대상으로 차량동특성을 알아보기 위해 KNR 및 KRRI에서 적용한 평가 기준은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. 평가 기준

평가항목		허용한도	비고
임계속도		- 차륜마모시 165km/h이상 (최고운행속도 150km/h)	- 노후시 임계속도>최고운행속도x1.1 (10% 안전율) - 차륜마모시 유효답면구배 0.4적용
진동가속도		- 보통구간 중간 기준 (Fig. 6, Fig. 7 참조)	- 10Hz Low-pass Filtering - 100m 단위당 해당 구간내의 최대 진폭과 속도를 기록하여 속도별 평균치 계산
곡선부 횡가속도		- 0.08g 이내	- 0.1Hz Low-pass Filtering
승차감	상하	- 110dB 이내	- 구간 RMS - ISO 2631 Filtering
	좌우	- 110dB 이내	- 구간 RMS - ISO 2631 Filtering
탈선계수 (Q/P)		- 빈도누적확률에 따라 0.8~1.1까지 허용	- 30Hz Low-pass Filtering - 0.5m 단위당 해당구간의 최대값을 탈선계수 대표값으로 읽는 후 0.05 단위로 구분하여 빈도누적확률 계산 - 빈도누적확률 0.1%일 때 동적탈선 계수 1.1까지 허용
운중감소율 ( $\Delta P/P$ )		- 빈도누적확률에 따라 최대 80%(0.8)까지 허용	- 30Hz Low-pass Filtering - 0.5m 단위당 해당구간의 최대값을 운중감소율 대표값으로 읽는 후 0.05 단위로 구분하여 빈도누적확률 계산 - 빈도누적확률 0.1%일 때 동적운중 감소율 80%까지 허용

### 4. 동특성 해석결과<sup>3)</sup>

본 객차를 대상으로 차량동특성을 알아보기 위해 사용된 프로그램은 철도차량 동특성해석 전용 프로그램인 VAMPIRE 이다. 차량 및 차륜/레일 모델링은 2절에 기초하였으며, 궤도 불규칙도는 국내 2급 경부선 일부구간의 선로로서 KRRI에서 제공받아 해석에 사용하였다. 또한 차량의 주행 속도는 경부선 2급 선로에 규정된 각 곡선구간별 최고속도를 적용하였으며, 직선 구간에서는 최고 속도 150km/h까지 적용하여 해석하였다. 각 항목별 동특성 해석 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. 동특성 해석결과

평가항목		허용한도	해석결과
임계속도		- 차륜마모시 165km/h이상 (최고운행속도 150km/h)	- 차륜 신조시 : 274 km/h - 차륜 마모시 : 166 km/h
진동가속도		- 보통구간 중간 기준	- Fig. 6, Fig. 7 참조
곡선부 횡가속도		- 0.08g 이내	- 400 R : 0.077g - 600 R : 0.051g
승차감	상하	- 110dB 이내	- 100 km/h : 104 dB - 120 km/h : 105 dB - 150 km/h : 106 dB
	좌우	- 110dB 이내	- 100 km/h : 102 dB - 120 km/h : 104 dB - 150 km/h : 106 dB
탈선계수 (Q/P)		- 빈도누적확률에 따라 0.8~1.1까지 허용	- 400R : 최대치 0.80 - 800R : 최대치 0.74 - 1000R : 최대치 0.63 (Fig. 1참조)
운중감소율 ( $\Delta P/P$ )		- 빈도누적확률에 따라 최대 80%(0.8)까지 허용	- 400R : 최대치 0.77 - 800R : 최대치 0.60 - 1000R : 최대치 0.52 (Fig. 2참조)

동특성 해석 결과, 각 평가항목은 모두 허용한도이내에 드는 양호한 결과가 나왔다. Fig. 1은 곡선 반경별 탈선계수 해석 결과이며, Fig. 2는 곡선 반경별 운중감소율 해석 결과이다.

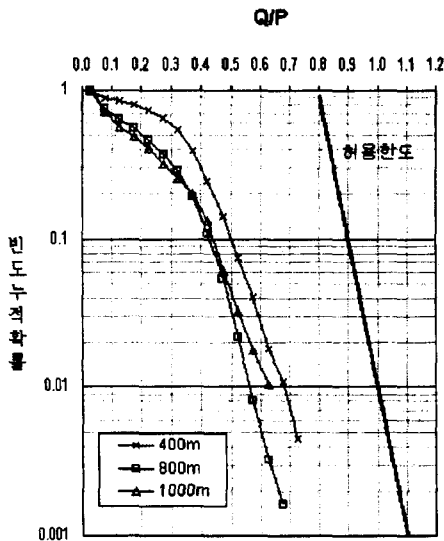


Fig. 1 곡선 반경별 탈선계수 해석결과

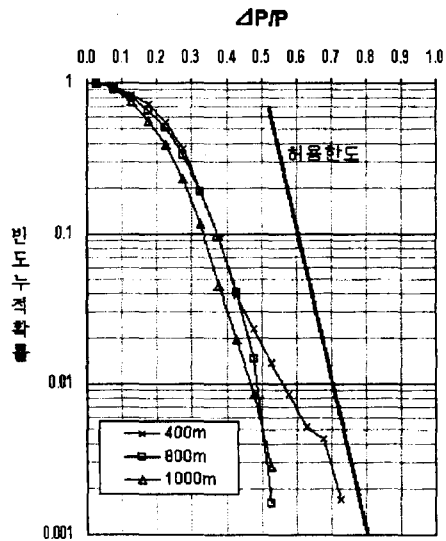


Fig. 2 곡선 반경별 운중감소율 해석결과

### 5. 시험 방법 및 시험 결과<sup>5)</sup>

본 객차의 진동가속도, 횡가속도, 승차감을 규명하기 위해 실차주행시험을 실시하였다.

#### 5.1 시험 일정 및 구간

1) 시험 일정 : 1997년 11월 17일(월) ~ 1997년 11월 19일(수)

2) 시험 열차 조건 : 공차

3) 시험 열차 운행구간

. 1997.11.17 (서울 → 대전 → 동대구 → 부산)

. 1997.11.18 (부산 → 대전 → 익 산 → 광주)

. 1997.11.19 (광주 → 익산 → 서대전 → 서울)

## 5.2 진동 가속도

### 5.2.1 측정 위치 및 측정조건

열차 진행 방향의 선두 대차 센터 플레이트 위쪽 상판에서 측정하며, 정상(영업)운전 조건으로 운행할 때 나타나는 진동을 측정한다.

### 5.2.2 진동 측정 장치 조정 방법

고주파 진동성분을 제거하기 위하여 차체 진동은 10Hz, 대차와 기타 부위는 30Hz의 필터를 사용한다. Photo.3은 실차시험에 사용된 측정장비이고, Photo. 4는 진동가속도계 취부도, Fig. 3은 시험 장치의 Block Diagram이다.



Photo. 3 측정 장비(진동가속도, 횡가속도)

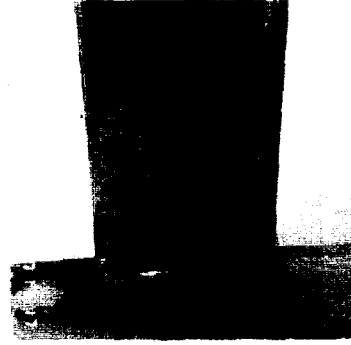


Photo. 4 진동가속도계 취부도

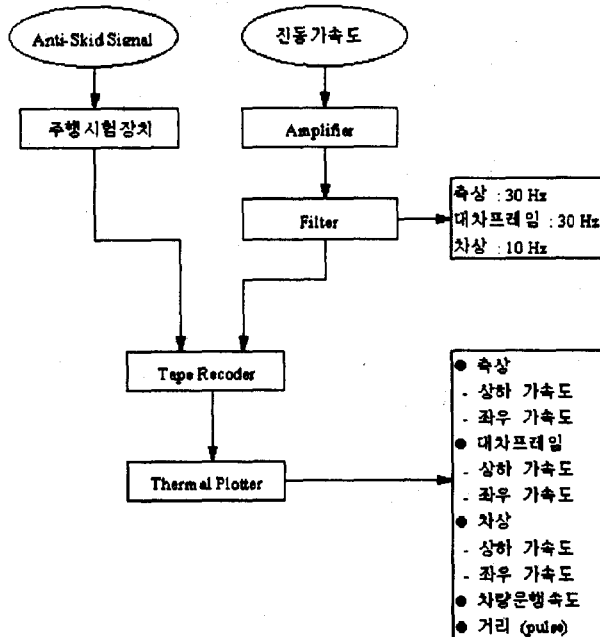


Fig. 3 시험 장치의 Block Diagram

### 5.2.3 진동 파형 정리 방법

진동 측정 데이터는 측정 구간을 100m단위로 이 구간 내에서 최대 진폭을 취하여 그때의 속도를 같이 읽고, 이를 같은 속도별로 모아서 평균한다. 이 값을 진동가속도로 환산하여 그래프로 작성하며, 속도 구분은 10km/h단위로 하여 90km/h부터 진동 값을 정리한다. 진동 파형을 읽을 때는 최대치의 전진폭(Peak-Peak)으로 하고, 진동가속도 단위를 2a(g)로 표시한다.

### 5.2.4 진동 성능 판정기준 및 시험결과

진동가속도 방향에 따른 여객차 진동 성능 기준은 KRR에서 정한 기준을 따른다. Table 4와 Table 5는 차상 진동가속도의 속도별 시험평균값이며, Fig. 4와 Fig. 5는 여객차 진동가속도 기준과 시험결과값을 나타낸 그래프이다. 상하 진동가속도는 우수구간에 들었으며, 좌우 진동가속도는 양호구간에 들었다. 본 객차의 곡선 반경별 차체 정상 횡가속도 기준치는 0.08g이내이며, 시험결과는 Table 6에 나타내었다. 기준치인 0.08g 이내에 드는 결과가 나왔다.

Table 4. 차상 상하 진동가속도 시험 결과

항목 속도(km/h)	상하 진동가속도 시험평균값				기준치
	밀양-동대구	김천-대전	익산-논산	회덕-천안	
90	-	0.065g	-	0.054g	0.213g
100	0.066g	0.070g	0.058g	0.071g	0.225g
110	0.076g	0.066g	0.054g	0.076g	0.238g
120	0.071g	0.068g	-	0.070g	0.250g

Table 5. 차상 좌우 진동가속도 시험결과

항목 속도(km/h)	좌우 진동가속도 시험평균값				기준치
	밀양-동대구	김천-대전	익산-논산	회덕-천안	
90	-	0.058g	-	0.037g	0.144g
100	0.071g	0.071g	0.046g	0.057g	0.150g
110	0.078g	0.084g	0.033g	0.068g	0.156g
120	0.058g	0.050g	-	0.053g	0.163g

Table 6. 차체 정상 횡가속도 시험결과

곡선반경(m)	속도(km/h)	차체 정상 횡가속도 시험평균값		기준치
		경부선	호남선	
400	90	0.080g	0.074g	0.08g 이내
600	110	0.079g	0.060g	
800	130	0.076g	0.055g	

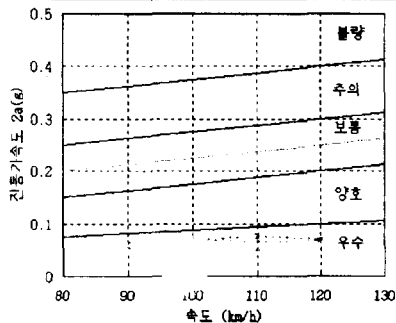


Fig. 4 차상 상하 진동가속도 시험결과

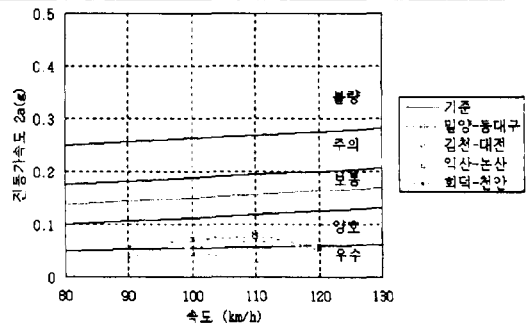


Fig. 5 차상 좌우 진동가속도 시험결과

### 5.3 승차감<sup>5)</sup>

#### 5.3.1 측정 위치

차량의 진행 방향으로 보아 후위 대차의 중심에 가장 가까운 좌측 좌석 중에서 측정한다.

#### 5.3.2 측정 조건

Triaxial Seat-Accelerometer(3축 방식형 가속도계)를 지정된 좌석에 놓고 측정자가 편안한 자세로 앉아서 측정하며, 규정 속도 이하의 서행 개소와 역에서의 정차시는 데이터 처리에서 제외시킨다.

#### 5.3.3 승차감 기준 및 시험결과

본 객차의 승차감 레벨 기준치는 제작시방서상에 명시된 110dB이하로 규정하고 있다. Table 7은 본 객차의 승차감 시험결과이며, 양호구간에 드는 결과가 나왔다.

Table 7. 승차감 시험결과

구분		승차감 시험 결과		기준치
		상하	좌우	
수원-천안	110~130 km/h	106 dB	105 dB	110 dB 이내
천안-대전	100~130 km/h	105 dB	103 dB	
대전-김천	100~120 km/h	106 dB	105 dB	
김천-동대구	100~120 km/h	106 dB	104 dB	
동대구-밀양	100~120 km/h	105 dB	105 dB	
논산-익산	100~110 km/h	104 dB	102 dB	
장성-광주	140~150 km/h	106 dB	105 dB	

### 6. 해석 및 시험결과 비교

주행안전성 관련 진동가속도, 횡가속도, 승차감에 대해 본 객차의 동특성 해석결과 및 실차 시험결과를 비교하면 다음과 같다. Fig. 6과 Fig. 7은 차상 상하/좌우 진동가속도 해석 및 시험 결과이며 Table 8은 차체 정상 횡가속도 해석 및 시험결과이고 Table 9는 승차감 해석 및 시험결과이다. 경부선 및 호남선에서 측정된 시험결과와 경부선 일부구간을 이용하여 얻은 해석결과와는 약간의 오차가 있지만 유사한 결과를 얻었다. 실차시험에서 측정하지 못한 임계속도, 탈선계수, 운중 감소율등 차량안전성 관련 항목에서도 해석에서 얻은 결과와 유사하게 나올 것으로 사료된다.

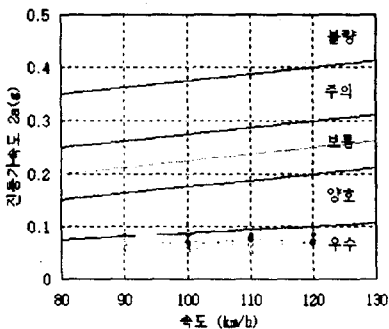


Fig. 6 차상 상하 진동가속도 해석 및 시험결과

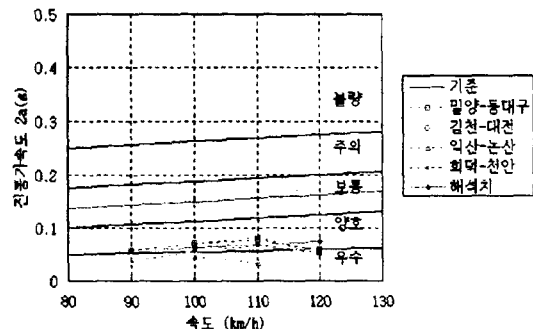


Fig. 7 차상 좌우 진동가속도 해석 및 시험결과

Table 8. 차체 정상 횡가속도 해석 및 시험결과

곡선반경(m)	속도(km/h)	차체 정상 횡가속도 시험평균값		해석결과	기준치
		경부선	호남선		
400	90	0.080g	0.074g	0.077g	0.08g 이내
600	110	0.079g	0.060g	0.057g	
800	130	0.076g	0.055g	-	

Table 9. 승차감 해석 및 시험결과

구 간	속도(km/h)	승차감 시험 결과		해석결과		기준치
		상하	좌우	상하	좌우	
경부선	100	104 dB	102 dB	104 dB	102 dB	110 dB 이내
	120	105 dB	103 dB	105 dB	104 dB	
호남선	150	106 dB	105 dB	106 dB	106 dB	

## 7. 결론

본 객차에 대한 해석 및 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다..

- 차상 상하 진동가속도는 우수 구간에 들었으며, 좌우 진동가속도는 양호 구간에 들었다.
- 차체 정상 횡가속도는 곡선 반경 400R, 600R, 800R에서 기준치인 0.08g이내로 나왔다.
- 승차감은 상하 104~106 dB, 좌우 102~106 dB로서 판정기준인 110 dB이내를 만족하였다.

위와 같이 동특성 해석 및 시험 결과가 유사하게 나옴으로서 해석에서 구한 임계속도, 탈선계수, 운중감소율등 차량 안정성 관련 항목에서도 시험치와 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

차량 동특성 해석과 경부선 및 호남선을 현차 주행하여 얻은 각종 시험 데이터 분석 결과, 본 객차는 모든 시험 항목에서 기준치이내에 드는 양호한 주행안전성을 지닌 차량으로 판명되었다.

## 8. 참고자료

- (1) Hideyuki Takai, Changes in Evaluation Method for Riding Comfort, RTRI Report Vol. 9, No. 8, 1995, August
- (2) Modern Railway Track, Coenraad Esveld, 1989.
- (3) VAMPIRE user's manual, British Railway Research
- (4) 철도 공학, 이종득, 노해출판사, 1989.
- (5) 철도기술연구보, 철도기술연구소, Vol. 23, No. 1, 1989.