

# ADAMS/Rail의 철도차량 표준모델을 이용한 철도선로의 설계

## The optimal design of rail track using a standard vehicle model of ADAMS/Rail

조연호\*  
Cho, Yon-Ho

곽재호\*\*  
Kwak, Jaeho

---

### ABSTRACT

At an early design stage of rail track, dynamic analyses using a standard vehicle model of ADAMS/Rail are employed. In the real field, it is very difficult to find an optimal solution on the designing of rail track considering future operating vehicles because the construction of rail track should be done in the advance of vehicle selection and operation. Using a standard vehicle model of ADAMS/Rail, however the better selection among designed rail tracks is possible by comparing the dynamic analysis.

---

### 1. 서론

선로의 설계는 경제적, 지형적인 제약을 수반하고 있기 때문에 초기단계에서는 설계의 자유도에 한계가 있을 수 밖에 없다. 이런 점들로 인해 선로 설계의 경우 최적 설계라기보다는 몇 가지 설계안을 통해 최선의 설계안을 선택하는 방법으로 진행되기도 한다. 이때 제안된 여러 설계안 중에서 선로의 선택에 있어서 중요한 기준이 될 수 있는 차량의 주행특성을 이용하여 설계안을 검토하고 최선의 설계안이 선택될 수 있도록 지표를 마련해 볼 수 있다. 이러한 설계방법은 차량에 대한 구체적인 정보가 확립되기 전에 선로에 대한 설계가 먼저 이루어지기 때문에 정량적인 해석은 매우 어렵다. 하지만, 표준차량 모델을 이용한 동역학적 해석을 통해 제시된 선로 설계안의 비교 검토가 가능하므로, 제시된 설계안 중에서 최적의 설계안을 해석을 통해 미리 검증해 볼 수 있다.

더구나, 자갈선로의 경우 완공 후 차량운행의 증가에 따라 선로의 미소변형이 발생하면서 최적화가 자동적으로 이루어지는 경향이 있지만, 최근에 시공이 증가하고 있는 슬라브선로의 경우 이러한 변형이 적어 차량의 특성이 선로와 맞지 않는 경우 심한 환경 소음과 마모 등을 유발할 가능성이 매우 높다 [1]. 따라서 시공이 증가하고 있는 슬라브선로의 초기 설계단계에서 차량의 주행 특성을 미리 해석한 후 설계에 반영할 필요성이 더욱 더 높아지고 있다.

본 논문에서는 ADAMS/Rail에서 제공하는 ERRI(European Rail Research Institute) 표준 차량을 이용하여 제안된 선로 설계안의 여러 가지 주행 특성을 해석한 후 최상의 해석 결과를 나타내는 선로 설계안을 선택하도록 객관적 지표를 제시한다. 지표로 사용될 계산 항목은 차량의 동적 특성을 평가하는 탈선계수, 운중감소율, 횡압, 승차감 등이다. 이 값들은 UIC규격과 ISO규격에 따라 해석 결과로부터 도출되는 가속도 결과와 특정 방향의 힘을 재구성하여 나타내게 된다[2,3].

---

\* UST 박사과정 한국철도기술연구원, 차량성능연구팀, 비회원

E-mail : ycho@krri.re.kr

TEL : (031)460-5275 FAX : (031)460-5279

\*\* 한국철도기술연구원, 차량성능연구팀

## 2. 본 문

### 2.1 해석 모델

선로의 초기 설계 단계에서 선로의 위치 및 구간 뿐 아니라 곡선반경, 캔트, 슬랙, 본 곡선 및 완화 곡선구간 길이 등의 기본적인 설계 요소의 결정이 중요하다. 선로의 설계는 지형적인 특성과도 맞물려 있기 때문에 구간의 설계에 있어서 어느 정도의 곡선 구간 설계가 불가피 하며 이를 최소화하기 위한 방향으로 설계가 진행되어야 할 것이다. 물론 이러한 설계의 결과로 발생하는 환경적인 문제와 경제적인 문제 역시 설계 초기 단계에서의 고려대상 중 하나이다. 하지만, 경제적인 문제와 환경적인 문제를 고려한 설계로부터는 대략적인 선로의 위치와 구간이 결정이 되며, 구체적인 선로의 설계를 위해서는 공학적인 접근이 필요하다. 이를 위해서 선로 상을 주행하게 될 차량의 주행 특성을 미리 해석함으로써 차량 주행 시에 최적의 상태가 될 수 있는 선로를 설계할 수 있게 된다. 선로의 설계는 여러 가지 사항을 고려하여 몇 가지 설계 안으로 축약될 수 있다. 이렇게 결정된 설계 제시안 중에 최적의 설계 안은 차량의 주행특성 해석 결과의 비교를 통해 가능하다.

해석에 사용할 차량 모델은 ADAMS/Rail이 제공하는 ERRI차량으로 선택하였다. 이 차량은 유럽 철도연합에서 표준화 하여 사용하는 표준 전동차 차량으로서 해석 모델로 사용하기에 차량의 구성이 적합하다고 판단된다. ADAMS/Rail에서 제공하는 또 다른 표준 차량인 Manchester 차량은 철도 차량 동역학 해석 시뮬레이션 프로그램들을 벤치마킹하기 위해 실시되는 Manchester Bench Mark에서 제안한 모델이다[4]. 앞서 소개한 두 가지 해석 모델의 자세한 사양과 제원은 ADAMS 매뉴얼을 참조하였다[5].

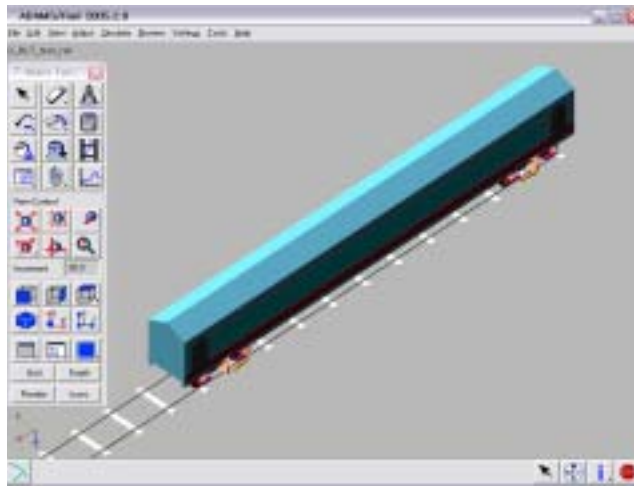


그림 1. 해석에 사용된 ERRI 차량 모델

표준 차량모델을 사용한 해석의 신뢰도를 높이기 위해 초기 선로 설계 단계에서 획득이 가능한 기본적인 차량의 데이터를 표준차량 모델에 적용하여 해석을 수행해 볼 수 있다. 다시 말해 표준 차량 모델에 획득한 실제 차량의 중량데이터와 차량의 기본 제원을 입력하여 실제 차량과 유사한 형태의 차량을 상정하여 해석에 사용한다. 이는 차량의 세부 설계 데이터에 포함되는 현가 장치계의 특성 값 또는 차량의 구체적인 설계 정보의 획득은 어렵지만, 차량의 중량과 길이 및 축간 거리등에 대한 대략적인 정보는 사전에 확보할 수 있기 때문이다.

그림 2는 이러한 정보를 바탕으로 ADAMS/Rail에서 차량을 모델링하기 위해 필요한 입력 값을 자동으로 계산하도록 제작한 Excel 프로그램 구동 화면이다.

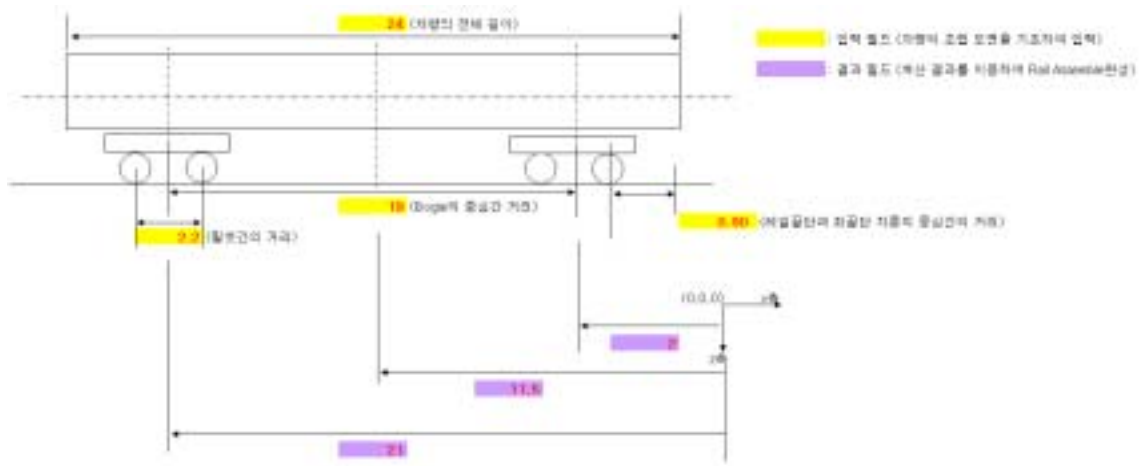


그림 2. ADAMS/Rail의 입력 값을 계산하는 Excel 프로그램

## 2.2 선로 설계안

선로의 설계는 여러 가지 제약조건을 고려하여 대략적인 선로의 위치가 결정이 된 후 구체적인 세부 설계가 실시된다. 세부 설계에서 선로에 대한 중요한 설계 요소인 곡선 반경, 캔트, 슬랙, 곡선 구간정보 등이 결정되는데, 이 때 동역학적 해석을 통해 제안된 설계안의 세부 세부사항을 검토한 후 최종 설계안의 선정에 도움을 주게 된다. 아래는 민자 사업으로 추진되는 경전선의 특정 구간 선로 설계 시 제안된 3가지 선로 안에 대한 정보이다.

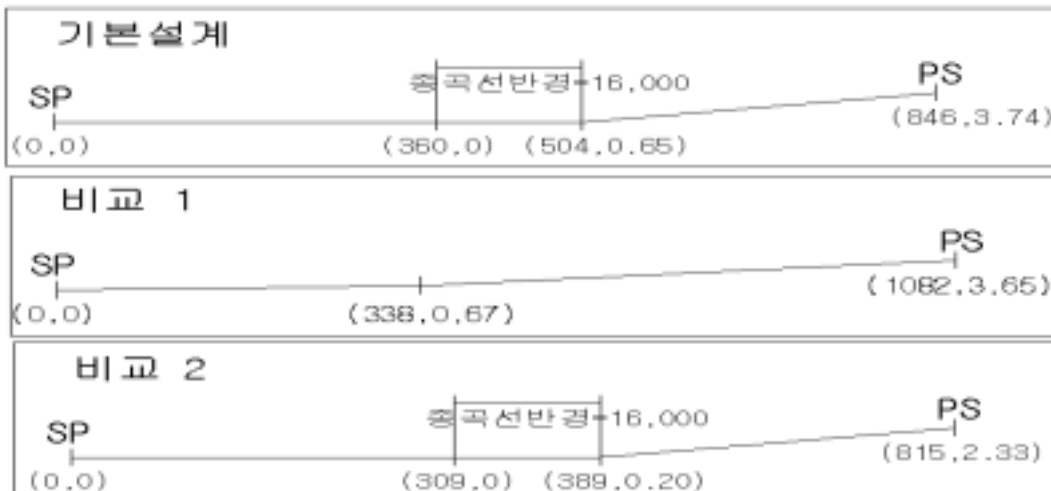


그림 3. 제안된 선로 설계 안

선로 설계상에서 표시된 기본적인 정보를 바탕으로 ADAMS/Rail에서 해석을 진행하기 위해 선로 데이터를 작성하는 과정을 거친다. 선로 설계의 세부데이터에 포함되는 내용은 구간거리, 구간정보, 캔트, 곡선반경 등이며 주어진 데이터로부터 다음의 수식에 따라 곡선 통과 등가 속도를 계산할 수 있다.

$$Cant=11.8 * V^2/R, \quad V=\sqrt{cant*R/11.8}, \quad (\text{단위: cant: mm, V: km/h, R: m}) [6,7]$$

이때 해석 프로그램의 특성에 맞도록 선로 데이터를 특정 포맷으로 작성해야 되는데, 이를 보다 용이하게 하기 위해 아래와 같은 도표를 이용하면 편리하다.

도표 1. 제안된 선로 설계의 세부 데이터

기본설계	Start	SP	PC	CP	PS	End
	시작점	완화곡선구간시작	본곡선시작	본곡선끝	완화곡선끝	끝점
거리(M)		0	272	574	846	
구간정보(M)		0	272	302	272	
Cant(mm)		0	160	160	0	
Curvature(m)		0	1500	1500	0	
곡선통과등가속도(kph)	39.62	142.61	<-- 등가 곡선통과 속도 = 'sqrt(c*R/11.8)			
실주행속도(kph)	80		Cant= 11.8*V^2/R			

대안_1	Start	SP	PC	CP	PS	End
	시작점	완화곡선구간시작	본곡선시작	본곡선끝	완화곡선끝	끝점
거리(M)		0	272	810	1082	
구간정보(M)		0	272	538	272	
Cant(mm)		0	160	160	0	
Curvature(m)		0	2000	2000	0	
곡선통과등가속도(kph)	45.74	164.68	<-- 등가 곡선통과 속도 = 'sqrt(c*R/11.8)			
실주행속도(kph)	80		Cant= 11.8*V^2/R			

대안_2	Start	SP	PC	CP	PS	End
	시작점	완화곡선구간시작	본곡선시작	본곡선끝	완화곡선끝	끝점
거리(M)		0	272	543	815	
구간정보(M)		0	272	271	272	
Cant(mm)		0	160	160	0	
Curvature(m)		0	1500	1500	0	
곡선통과등가속도(kph)	39.62	142.61	<-- 등가 곡선통과 속도 = 'sqrt(c*R/11.8)			
실주행속도(kph)	80		Cant= 11.8*V^2/R			

선로의 데이터에 있어 가장 중요한 것은 선로의 불규칙도 데이터이다. 궤도의 불규칙도 데이터는 크게 5가지 불규칙도 데이터로 나누어 볼 수 있다. 즉, 궤간틀림(Gauge), 궤도 줄 틀림(Lateral), 수평틀림(Cross level), 궤도 면 틀림(Vertical), 곡선 줄 틀림 (Curvature)이다. 이 중에서 곡선 줄 틀림 (Curvature irregularity)은 ADAMS에서 표현 불가능 하다. 이는 ADAMS에서의 불규칙도 데이터의 표현은 Vampire와 같이 불규칙도 데이터를 정형적으로 입력하는 것이 아니고, 해석에 사용되는 레일의 좌표를 직접 입력하는 방법을 쓰기 때문이다. 다시 말해 불규칙도 데이터는 해석에 사용되는 왼쪽, 오른쪽 레일의 기본 좌표 값에 포함되어 입력이 된다. 더구나, ADAMS에서는 VAMPIRE와 같이 풍부한 라이브러리를 제공하지 않으므로, 대부분의 해석 데이터는 VAMPIRE의 데이터를 변환하여 사용하게 된다[8]. 해석에는 VAMPIRE에서 제공하는 track160.dat를 ADAMS포맷으로 변환한 데이터와 ADAMS에서 제공하는 mdi0001.idf를 사용하였다. track160.dat는 이름에서와 같이 160km/h의 속도 레벨에서도 승차감에 문제가 없는 선로 상태의 불규칙도 데이터 이고, mdi0001.idf는 track160.dat의 약 절반 수준정도의 불규칙도 데이터이다. 이는 KTX와 같은 고속열차용 신규레일의 불규칙도 정도 레벨의 데이터로 간주 할 수 있다. 본 해석에서는 200km/h 급의 운행 조건을 만족하는 신규 선로라는

가정 하에 두 가지 불규칙도 데이터를 모두 해석에 포함시켰으며, 최종적으로는 mdi0001.idf를 포함한 해석을 평가 기준으로 삼았다. 다음 그림은 VAMPIRE의 Track160.dat와 ADAMS에서 제공하는 mdi0001.idf의 특성을 나타내는 그래프이다.

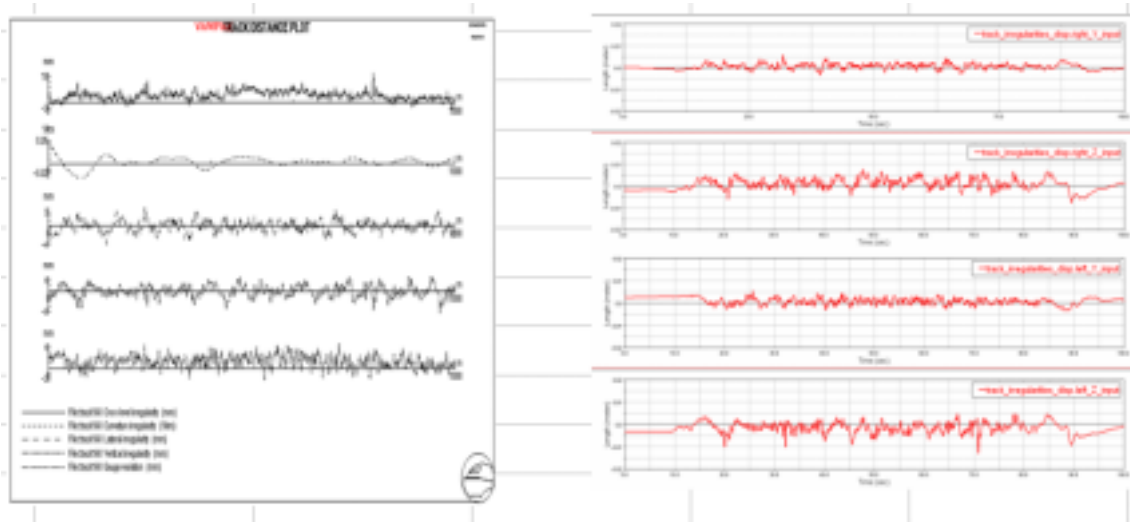


그림 4. 궤도 불규칙도 데이터

### 2.3 해석 수행

ADAMS/Rail을 이용한 해석은 Preload, Linear, Dynamic 해석으로 나누어 볼 수 있다[5]. 일반적인 동역학 해석은 차량의 안정성(Stability)과 안전도(Safety)를 계산하기 위한 Dynamic해석에서 이루어진다. Preload 해석은 궤도 위에 놓인 차량의 정적평형상태를 계산하여 해석 모델에 적용하는 과정이다. Dynamic해석을 수행하기 전에 반드시 Preload 해석을 수행하는 것은 바로 정적평형 상태를 고려한 해석을 수행하여야 관성에 의한 외란을 줄이고 정확한 해석을 수행 할 수 있기 때문이다. Linear 해석은 차량이 가진 고유모드를 해석함으로써 차량의 동적안정성을 평가한다. Dynamic 해석은 실제 주행이 이루어지는 선로의 구체적인 정보와 차량의 정보를 이용하여 실제와 유사한 환경에서 해석을 수행함으로써 차량의 안정성 및 안전도를 평가하는 것이다[8]. 차량의 해석 속도는 최대 주행 속도와 더불어 곡선통과등가속도를 이용한 해석을 수행하기도 한다. 곡선통과 등가속도는 곡선주행을 직선주행과 거의 동일한 조건으로 진행할 수 있는 속도를 말한다. 즉, 원심력에 의해 궤도의 중심을 유지하며 차량이 진행하는 속도이다.

본 해석은 150km/h와 200km/h 두 조건에 대하여 해석을 수행하였다. 이는 앞서 설명한 곡선 통과 등가 속도와 최대 주행 속도에 해당한다.

### 2.4 해석 결과

해석은 3가지 제시된 선로에서 150km/h와 200km/h의 조건으로 각각 해석을 수행한 후 차량의 안전성 평가기준인 탈선계수, 횡압, 윤중감소율을 비교하고 곡선훈과 통과시의 승차감을 ISO dB기준으로 해석해 보았다. 탈선계수, 횡압, 윤중감소율은 UIC518기준을 따라 데이터를 처리한 후 계산된 지표를 사용하고, 승차감의 경우 ISO2631기준과 UIC513기준을 따라 계산된 결과이다. 해석 결과의 분석에

사용된 가속도 데이터는 UIC규정의 약식 방법에 따라 차상 바닥의 선두대차의 중심, 차량중심, 후미대차의 중심에서 측정된 3방향의 값을 사용하였다. 해석 결과 중 윤중감소율은 30Hz Lowpass filter를 적용하고 횡압의 경우 20Hz Lowpass filter를 적용하여 계산 결과를 정리하였다[2,3]. 다음은 각각 해석의 결과물을 정리한 그래프 이다.

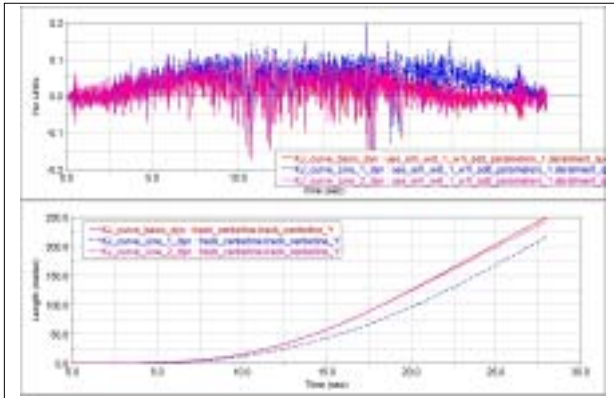


그림 5. 주행 궤도와 탈선 계수 그래프



그림 8. 탈선계수 그래프- 기본선로

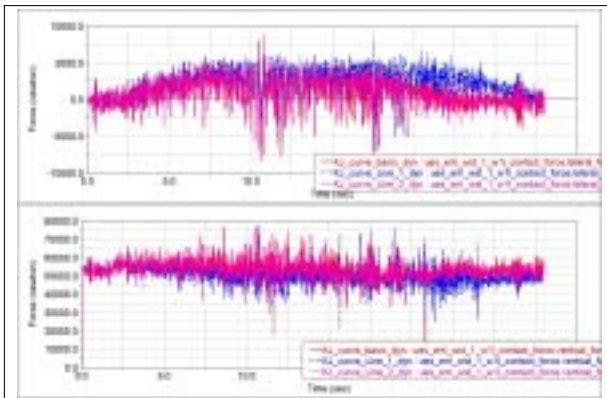


그림 6. 횡압과 수직력



그림 9. 탈선계수 그래프- 제시 1안

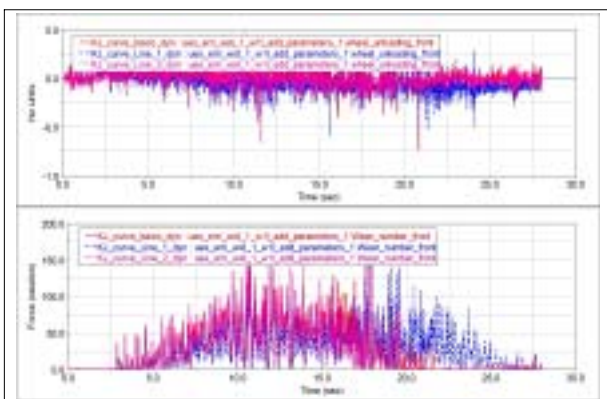


그림 7. 윤중감소율과 마모지수 그래프



그림 10. 탈선계수 그래프- 제시 2안

### 3. 결론

해석 결과 150km/h, 200km/h 모두 제시 1안의 탈선계수, 윤중감소율, 횡압, 승차감이 가장 좋게 나타났다. 이는 곡선 반경이 세 가지 선로 중에 가장 크기 때문이며, 동일한 곡선 반경을 갖는 기본 안과 제시 2안의 경우, 제시 2안의 본 곡선 구간이 상대적으로 짧기 때문에 해석 결과가 상대적으로 더 작게 나온다. 이를 통해 현재 제시된 3가지 안중에서는 제시 1안이 가장 최적의 궤도로 판단된다.

도표 2는 해석 결과를 정리한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 150km/h와 200km/h의 속도로 주행하는 차량의 선로별 동특성, 즉 탈선계수, 윤중감소율, 횡압, 승차감, 그리고, 차상 가속도의 RMS값을 비교해 봄으로써 선로의 특성을 쉽게 비교 분석할 수 있다.

도표 2. 주행 속도별 제안된 선로 설계안의 해석 결과 비교

구 분	150km/h 주행시 해석결과			200km/h 주행 시 해석 결과		
	기본설계	제 시 1 안	제 시 2 안	기본설계	제 시 1 안	제 시 2 안
곡선(반경m)	1,500	2,000	1,500	1,500	2,000	1,500
탈선계수	0.098	0.086	0.091	0.186	0.155	0.177
윤중감소(+/-)(%)	47.28/-69.84	61.86/-70.02	47.29/-69.82	91.51/-26.85	93.35/-38.42	91.51/-26.85
횡압 (kN)	평균	1.176	2.274	1.124	1.014	0.980
	최대	5.535	6.005	5.535	16.958	8.832
승차감 (dB)	수직	98.820	98.870	98.710	100.756	100.636
	좌우	117.266	116.436	116.998	122.277	121.432
RMS (m/s <sup>2</sup> )	수직	0.087	0.088	0.086	0.087	0.088
	좌우	0.730	0.663	0.529	0.730	0.663

### 참고문헌

1. 서사범, “선로공학”, 열과알, 2002.
2. 김영국, 김석원, “UIC 및 ISO규정에 따른 철도 차량용 승차감 측정시스템 개발”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2003.
3. 박찬경, 김기환, “UIC 518의 진동 가속도 계측을 통한 한국형 고속전철의 350km/h 주행 동적 거동 평가”, 한국철도학회 논문집 제9권 제5호 pp1-6, 2006.
4. Simon Iwnicki, "THE MANCHESTER BENCHMARKS FOR RAIL VEHICLE SIMULATION", SWETS & ZEITLINGER PUBLISHERS, 1999.
5. "ADAMS Manual" (ADAMS View User's Guide, ADAMS Rail). MSC Software, 2002.
6. 이안호, 이덕영, “경량전철 선로설계 기준에 관한 연구”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2003.
7. Vijay K. Garg, Rao V. Dukkipati, "DYNAMICS OF RAILWAY VEHICLE SYSTEMS", Academic Press, 1984.
8. 조연호, 이강운, “ADAMS/Rail을 이용한 철도 차량 동특성 해석”, 철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 679-685, 2003.