

열차 곡선부 노선 인근의 진동환경 예측 연구

A Study on the Prediction of Ground Vibration induced by Curved Above-ground Railway Lines

허 영*
Young Huh

요 약 문

본 논문은 열차 곡선부 노선에서 발생하는 진동크기의 예측을 위한 것으로, 곡선부를 주행하는 틸팅차량에 의해 발생하는 진동크기를 수치해석적으로 예측한 결과이다. 곡선부를 주행하는 틸팅차량에 의한 진동의 특징으로, 진동의 방향성분을 들 수 있다. 진동의 방향성분은 직선 구간에서는 수직성분이 월등히 우세하나, 곡선구간에서는 수평성분이 크게 증가한다. 틸팅차량의 경우, 일반열차에 비해 곡선구간에서의 높은 속도로 인해 수평성분이 크게 발생한다. 따라서 틸팅차량의 주행에 의한 인근 지역에서의 진동환경을 파악하기 위해서는 수직성분 뿐 아니라 수평성분의 정확한 파악도 필요하다. 이러한 진동의 방향성분은 근거리 또는 원거리 영역에 따라 달라져, 이의 파악을 위한 연구가 필요하다.

1. 서론

열차의 고속화를 위한 방법으로, 고속철도 외에 또 다른 방법인 틸팅차량의 도입은 고속철도에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있다. 가장 큰 장점으로서는 새로운 노선의 신설 없이 기존 노선의 개량만으로도 열차 운행을 고속화시킬 수 있다는 것으로, 현재 세계적으로 틸팅차량에 관한 개발을 시작 또는 사용 가능한 기술을 보유하고 있는 국가는 이탈리아를 비롯해 영국, 프랑스, 미국, 스웨덴, 스위스, 독일 등으로, 우리나라도 시급히 틸팅차량 기술 개발에 박차를 가하여, 이 분야에서의 기술력 확보 및 우위 선점에 도전하여야 할 것이다.

틸팅차량에 의한 열차의 고속화를 위해서는 열차 차량의 개발과 함께, 부수적으로 나타나는 문제들의 해결을 위한 연구가 수행되어야 한다. 이러한 문제들 중 하나로, 노선 인근에서 발생하는 진동문제는 열차의 고속화에 따라 나타날 수 있는 문제로, 열차 주행 시 발생하는 진동의 원인은 여러 가지가 있으며, 발생되는 진동은 그 원인에 따라 주파수 특성을 달리한다. 여러 특성 중 레일의 표면 상태에 따라 발생하는 진동은 주로 고주파의 것이며, 침목의 간격, 열차의 동적 특성 등에 의한 진동은 저주파 진동을 발생시킨다. 열차 운행 시 발생하는 진동을 파악하기 위해서는 진

동 주파수와 함께, 진폭의 크기도 중요하다. 진폭은 하중과 밀접한 관계를 갖으며, 하중은 열차의 무게인 정적 하중과 함께 열차의 운행속도와 연관된 동적 하중을 의미한다.

틸팅차량에 의한 진동이 가지고 있는 또 하나의 특징으로, 진동의 방향성분을 들 수 있다. 진동의 방향성분은 직선 구간에서는 수직성분이 월등히 우세하나, 곡선구간에서는 수평성분이 크게 증가한다. 틸팅차량의 경우, 일반열차에 비해 곡선구간에서의 높은 속도로 인해 수평성분이 크게 발생한다. 따라서 틸팅차량의 주행에 의한 인근 지역에서의 진동환경을 파악하기 위해서는 수직성분 뿐 아니라 수평성분의 정확한 파악도 필요하다. 이러한 진동의 방향성분은 근거리 또는 원거리 영역에 따라 달라져, 이의 파악을 위한 연구가 필요하다.

2. 열차진동 전파 해석방법

표 1은 참고문헌[1]에 제시된 수치해석 방법들의 비교로, 현재 미국, 일본을 포함한 모든 국가에서 사용되는 해석적 방법은 모두 이 범주에 포함된다.

각 방법들은 상이한 목적을 위해 개발된 것들로, 예를 들어 Hannover 대학의 경우, 레일의 axial dynamics, lateral dynamics의 해석을 위한 고주파 영역의 적용에 장점을 갖는다.

* 수원대학교
E-mail : huhyoung@mail.suwon.ac.kr
Tel : (031)220-2317, Fax : (031)220-2494

각 방법은 반무한영역인 지반 특성의 고려를 위한 차이가 가장 큰 차이로, TU Berlin과 BAM에서 상요하는 방법은 소위 Thin layer method로, 국내에서 원자력 발전소의 내진해석을 위해 적용된 해석프로그램인 SASSI가 동일한 수치해석적 이론에 의해 작성된 것이다.

이외에 Bochum대학교 Schmid교수 연구팀에 의해 사용되고 있는 방법은 경계요소법의 여러 가지 구성 방법 중, Full-space fundamental solution을 이용한 것으로, 이외에 Half-space fundamental solution을 이용한 경계요소법이 있다.

본 연구에서는 Thin layer method를 사용하여 작성된 SASSI를 주로 사용하였으며, 결과의 검증을 위해 Berlin대학교 연구자들의 협조를 받아 그들의 해석프로그램도 함께 이용하였다. 또한 모델링 단계를 쉽게 하기 위해 레도구조를 유한요소로 모델링하는 방법을 채택하였으며, 레도를 위해 마크로요소가 개발되었다.

3. 열차 주행 특성 파악

그림 1은 참고문헌 [2]에 나타난 ETC-T 기존선 고속틸팅열차 차량시스템의 기본편성도로, 기본적인 제원도 함께 나타나 있다. 그림 1을 보면 최대차축하중은 15톤으로, 제어차는 동일한 크기의 축중을 받는 4개의 축으로 구성되어 있다.

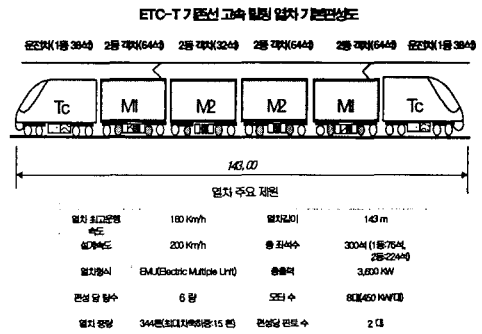


그림 1 기본편성도(6량)

틸팅차량이 기존 노선을 고속으로 주행 할 때 열차의 안전과 승객의 승차감 등은 차량과 레도 선형사이의 상호 작용에 큰 연관성이 있으므로, 기존선의 평면곡선과 종단 구배 현황 및 선로 제한 속도 등을 검토하였다.

노선의 기존 선형을 유지한 상태 즉, 캔트량을 현재 부설된 상태 그대로 두고 틸팅차량의 운행 속도를 최대한 올리기 위하여 캔트 부족량을 100mm로 적용하여 곡선별 제한속도를 계산하였다. 이 때 적용한 곡선별 제한속도 산출식은 아래와 같으며, 여기에서는 하구배의 경우는 고려하지 않았다.

표 1 철도진동 연구를 위한 수치해석 방법들의 비교

연구기관 ELEMENT	TU Berlin (Savidis)	BAM	Ruhr-Univ. Bochum	TU Berlin (Knothe)	Univ. Hannover
rail	elastic beam				
	finite length			infinite length	
rail pad	스프링-댐퍼	1-dim. bar	스프링-댐퍼		
	viscous Damping	hysteretic Damping	viscous Damping		
sleeper	elastic beam			Lumped mass	
contact	Non-relaxed			Relaxed	
ballast	continuum (solid FE)		continuum (BE)	elastic bar with mass	
	hysteretic Damping				
subsoil	Thin layer	Thin and thick layer	BE (Full-space solution)	precalculated flexibility	

$$V = \sqrt{\frac{(C + C')}{11.8} \times R} \quad (1)$$

여기서, C = 부설칸트; C' = 100mm; R = 곡선반경

3.1 운행최고 속도 검토

차량이 곡선을 주행할 때 허용 칸트 부족량에 따라 초과원심력이 발생하고, 이것에 의한 잉여의 횡방향 가속도가 승차감을 저해하는 요인이 되고 있다.

그림 2에서의 횡방향 가속도 a는 부설칸트량 C, 내외궤 레일의 중심간 거리 G에 의해 식(2)로 표현된다.

$$a = \frac{V^2}{R} - \frac{C}{G} g \quad (2)$$

여기서 V : $(\frac{V}{3.6})^2$, g : 9.8m/sec², R : 곡선반경

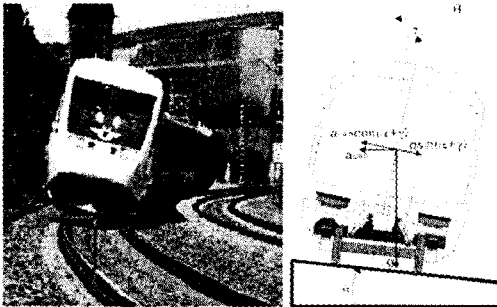


그림 2 곡선을 통과하는 차량의 힘 분포

상기 식에서 산출된 a를 C=150mm, 내외궤 레일의 중심간 거리 G=1500mm를 사용하여 허용칸트 부족량(100mm)에 대한 각 R의 횡방향 가속도를 값을 계산하면 아래 표 2와 같다.

표 2 곡선별 횡방향 가속도를

곡선반경 R	400	500	600	700	800	900	1000
곡선속도 (km/h)	90	100	110	115	125	130	135
횡방향 가속도를	0.066		0.067			0.066	

3.2 기술적 검토

(1) 선형검토 기본이론

철도 차량이 그림 3과 같은 곡선부를 통과할 때 발생하는 원심 가속도는 주행속도와 식(3)과 같은 관계

를 가진다.

$$F = \frac{v^2}{R} = \frac{V^2}{13R} \text{ (m/s}^2\text{)}, \quad v = \frac{V}{3.6} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (3)$$

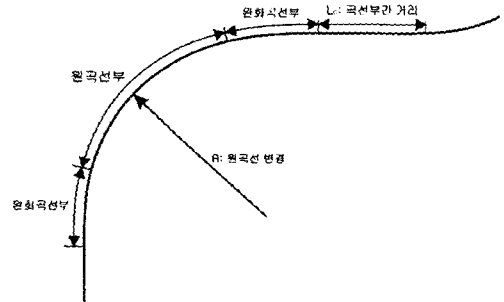


그림 3 곡선부 형상

최대 칸트량과 최대 허용 칸트 부족량을 이 식에 적용하여 식(4)와 같은 곡선 최고 속도식을 도출할 수 있다.

$$V_{\max} = 4.7\sqrt{R} \quad (4)$$

여기서 R은 곡선의 곡률(m)을 나타낸다.

칸트 변화량에 의해 승객들이 느끼는 정상 횡가속도를 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{lat} = a_{cen} \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \quad (5)$$

여기서, $a_{cen} = \frac{(V/3.6)^2}{G \cdot R}$, $\alpha = \tan^{-1}(\frac{C}{1500})$ 이다.

(2) 곡선부 최고 통과속도

식(4)에 의하여 곡선 최고 통과속도는 정해질 수 있으며 이것은 다시 차량의 안정성과 승객의 승차감을 고려하여 아래의 4가지 조건을 만족시켜야 한다.

- 최대 전체 롤 각속도
- 정상 횡가속도
- 불평형 가속도의 시간적 변화율
- 곡선간 거리

3.3 틸팅각에 따른 운행속도의 증가량 산정

여기서 검토하는 틸팅메카니즘은 국내에서 검토하고 있는 강제틸팅방식으로, 곡선부에서 틸팅메카니즘에 의해 열차는 곡선의 바깥쪽으로 기울게 된다.

이에 따라 원심력은 그림 4에서와 같이, 노면에 직각으로 추가적으로 작용하며, 승객에게는 추가의 수평 가속도가 발생하지 않는다.

그림 4는 틸팅메카니즘 작동시, 틸팅각 β 에 의해 좌석에 앉아 있는 승객 높이에서 발생하는 가속도의 변화로, G는 차량무게, F는 원심력이다.



그림 4 틸팅에 의한 가속도 분포

위의 그림 4를 기초로 하여, 부설칸트량 150mm와 칸트부족량 100mm를 기준으로 하여 틸팅메카니즘 작동시의 최대허용속도를 구하여 표 4에 나타내었다.

표 4를 보면 28~39%의 속도증가가 가능하나, 보통 20~30%의 속도증가를 실현하고 있으며, 틸팅메카니즘은 열차속도 70km/h에서 작동되어, 틸팅차량의 운행을 위해서는 기존선에서의 구간별 운행속도에 대한 검토에 의해 틸팅메카니즘 적용 노선의 선정이 가능하다.

4. 이동하중의 고려

4.1 운동의 궤도 종방향 분포

본 연구의 핵심은 틸팅차량 운행시 발생하는 진동의 예측을 위한 것으로, 동력차량의 뒤에 연결된 객차가 진동크기의 변화에 미치는 영향은 동력차에 비해 아주 작은 것으로 알려졌다. 따라서 본 연구에서는 동력차에 의한 영향만을 구하였다.

열차가 궤도를 따라 운행하는 경우, 이동하중은 축중으로 레일로 전달되며, 이 하중은 레일의 강성에 따라 궤도 축방향의 여러 개의 침목을 통해 횡으로 나뉘어져 도상으로 분포된다. 그림 5는 축 하나를 통해 레일에 분포되는 하중의 모식도로, 바퀴로부터 레일로 전달되는 하중이 레일을 통해 여러 침목에 분포되어 작용하는 것을 보인다.

표 4 틸팅에 의한 허용속도 [km/h]

R [m]	틸팅 無	틸팅각 [°]		
		6	7	9
300	78.1	100.5	103.8	107.1
400	90.2	116.1	119.9	123.6
500	100.0	129.2	133.4	137.6
600	110.0	141.8	146.5	151.1
700	115.0	150.3	155.4	160.4
800	130.2	166.2	171.6	176.8

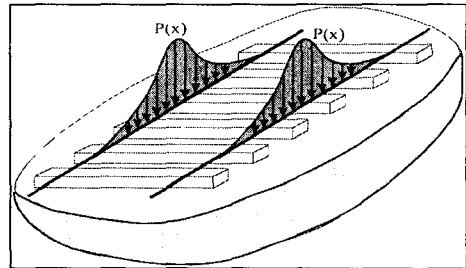


그림 5 열차축하중의 공간 분포

침목 간격에 따라 집중력으로 작용되는 하중은, 보다 해석을 용이하게 하기 위해 이 하중을 곡선으로 나타낸 결과가 바퀴 하나에 대해 그림 6으로, 이 하중을 주파수영역으로 표현한 하중을 해석에서 사용한다.

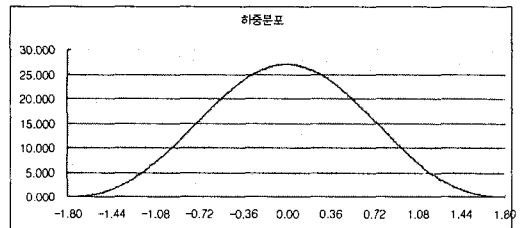


그림 6 차륜 하나에 의한 하중분포 곡선

4.2 SASSI 해석을 위한 하중곡선

실제로 열차 바퀴로부터 전달되는 하중은 바퀴와 레일의 접촉부에 작용하는 집중력으로 가정할 수 있다. Direc delta함수의 형태로 표현할 수 있는 이 운동은 그림 7과 같이 주파수 영역에서의 해석을 위해 일정한 크기의 폭을 갖고 Δt 의 일정 시간 동안 작용하는 사각형의 형태로 이상화하였다.

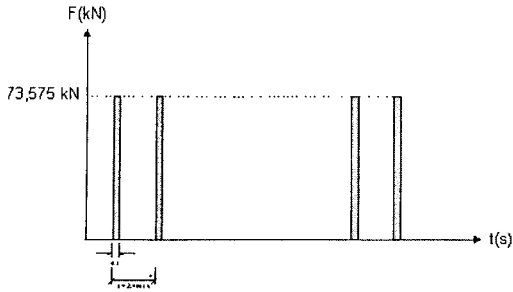


그림 16-26 열차 하중 분포

시간의 함수로 표현된 그림 16-26의 하중의 스펙트럼의 형태는 열차의 운행속도에 따라 달라진다.

그림 7은 $V = 180 \text{ km/h}$ 에서의 하중 스펙트럼으로, 스펙트럼에 포함된 주파수 성분은 열차의 속도에 따라 달라진다.

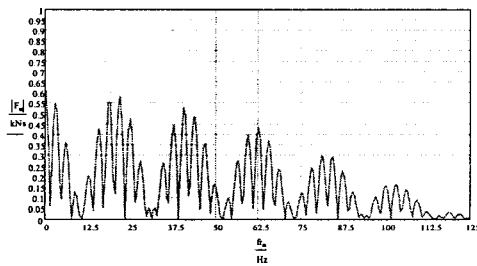


그림 7 열차 하중 분포 스펙트럼

5. 해석모델의 결정

동적 해석시 나타나는 하드웨어적 문제 발생을 피하기 위해, 동적 해석 모델은 가능한 한 작은 크기이어야 한다. 이를 위해 열차지반진동 해석의 경우, 모델 내에 몇 개의 침목을 포함하여야 하는지가 사전에 결정되어야 하며, 이의 검토가 먼저 수행되었다.

이로부터 침목의 개수를 결정하였으며, 또한 여러가지의 재료감쇠형태의 종류와 지반과 자갈 사이의 경계조건에 대한 결과를 고려하여, 본 연구의 수행을 위해 결정된 해석모델은 7개 이상의 침목을 포함하는 것으로 결정하였다.

이 결과를 고려하여, 해석모델은 그림 9와 같이 8개의 침목을 포함하는 것으로 하였다.

자갈층은 하나의 균질층으로 이상화되었으며, 레일과 침목 사이의 방진패드는 국내에서 사용 가능한 동

적 물성치를 얻을 수 없었으므로, 독일에서 사용되고 있는 종류인 Zw 687a를 사용하였다. 모델에 포함된 자갈층은 3차원요소로 이상화되었다.

해석에 사용된 물성치는 다음과 같다.

E-modulus: $0.3825 \times 10^9 \text{ Pa}$

포아송비: 0.25

밀도: 1700 kg/m^3

감쇠정수: 0.02(hysteretic)

레일은 국내의 60kg레일의 값을 사용하였고, 침목은 판요소로, 침목과 자갈층 사이의 방진패드는 보요소로 이상화 되었다.

해석에 사용된 방진패드의 물성치는 다음과 같다.

강성 $[\text{N/m}] = 6.0 \times 10^8$

Damping $[\text{Ns/m}] = 2.0 \times 10^4$

지반에 따른 진동전파 특성의 차이를 구하기 위해, 지반은 균질 지반과 층진 지반의 두 가지 모델로 만들어졌으며, 각각의 물성치는 전단파 속도에 의해 구분되었다

균질 지반: $c_s = 125 \text{ m/s}$, $c_p = 216.5 \text{ m/s}$

층진 지반:

지표층 $c_s = 125 \text{ m/s}$, $c_p = 216.5 \text{ m/s}$

하부층 $c_s = 200 \text{ m/s}$, $c_p = 346.4 \text{ m/s}$

그림 10은 본 연구에서 사용한 해석모델에서 레일의 연성도 곡선으로, 본 해석에서 구해진 연성도 곡선이 타당한 결과임을 알 수 있다.

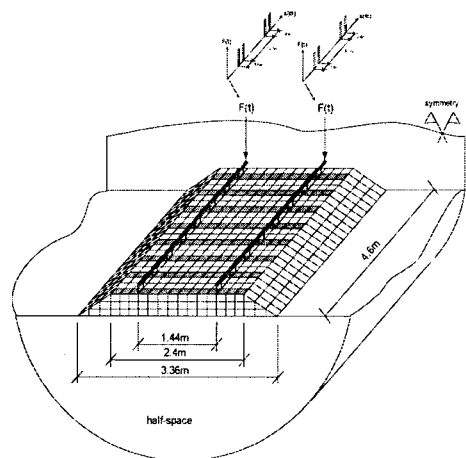


그림 9 해석모델

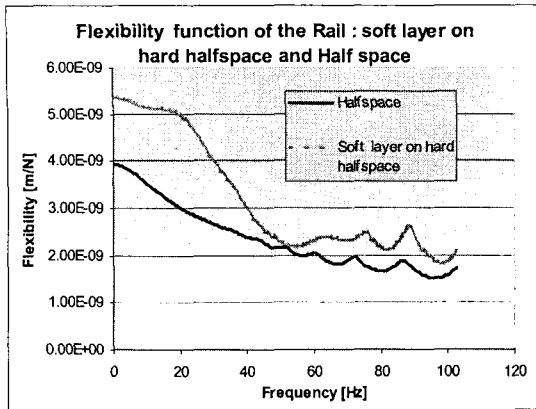


그림 10 연성도 곡선: 레일, 균질 지반

6. 해석결과 - 진동가속도

6.1 Halfspace 자유장 가속도

여기에서는 각 운행속도에서 발생하는 연직방향 가속도와 수평가속도를 비교하여 <그림 11>~<그림 13>에 나타내었다. 수직성분의 경우, 시속 150km/h에서는 125km/h에 비해 많이 증가하나 180km/h에서는 150km/h에 비해 증가량이 미미함을 알 수 있다. 그러나 수평성분은 속도의 증가에 따른 원심력의 증가로 인해 계속적으로 증가한다.

진동이 크게 발생하는 시간대에서의 수평가속도의 연직가속도에 대한 비를 구하여 <표 5>에 나타내었다. 이 표를 보면 속도 150km/h에서는 125km/h에 비해 증가량이 미미하나, 180km/h에서는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 125km/h에서 150으로는 연직방향 성분도 크게 증가하나, 150km/h에서 180으로는 연직성분의 증가는 작은 반면, 수평성분은 크게 증가함에 기인하는 것으로 판단된다.

같은 표에는 참고로 기하학적 합(SRSS)에 의해 구해진 가속도의 값이 연직방향 하중에 의한 연직방향 가속도의 크기에 대한 비례값으로 나타나 있다.

180km/h의 경우, SRSS로 구해진 가속도는 직각방향 가속도의 112%로, 예를 들어 노선인근에서 정밀 기계에 대한 영향을 파악하기 위해서는, 연직방향 가속도 만이 아니라, 두 직각 방향의 가속도를 다 구해야 함을 알 수 있다.

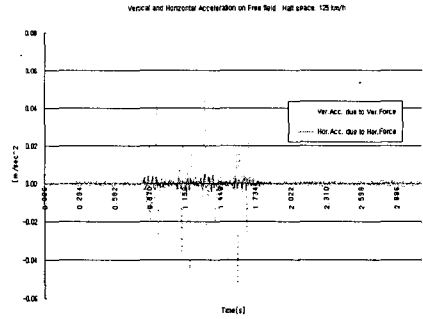


그림 11 가속도의 연직성분과 횡방향 수평성분 비교: hom. Halfspace, 자유장, V=125 km/h

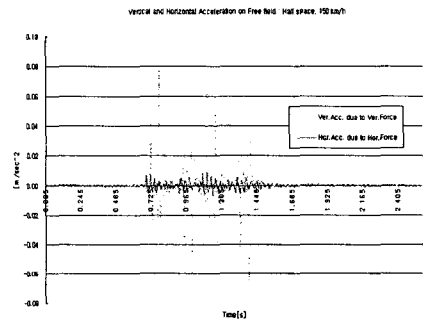


그림 12 가속도의 연직성분과 횡방향 수평성분 비교: hom. Halfspace, 자유장, V=150 km/h

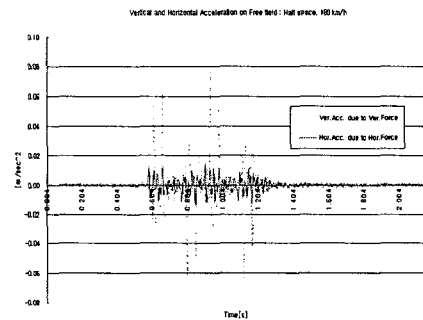


그림 13 가속도의 연직성분과 횡방향 수평성분 비교: hom. Halfspace, 자유장, V=180 km/h

표 5 연직방향 가속도의 발생원인비

속도 [km/h]	$\frac{Hor. Acc. \text{ due to } Ver. Force}{Ver. Acc. \text{ due to } Hor. Force}$	SRSS
125	20.9%	105.8%
150	21.2%	107.9%
180	35.2%	112.2%

6.2 충전 지반 자유장 가속도

여기에서는 충전 지반모델의 해석결과 중, 궤도로부터 10m 이격된 자유장에서의 가속도 수직성분을 <그림 14>~<그림 16>에 속도별로 나타내었다. 충전 지반의 경우, 균질 반무한지반의 경우에서와 같이, 150km/h에서는 125km/h의 경우에 비해 증가량이 뚜렷하나, 180km/h는 150km/h에 비해 증가량이 적다. 진동이 발생하는 시간은 열차의 속도에 따라 점점 빠른 시간대에서 진동이 시작됨을 알 수 있다.

또한 궤도로부터 10m 이격된 자유장에서의 가속도 횡방향 수평성분을 <그림 17>~<그림 18>에 속도별로 나타내었다. 수평성분의 경우, 수직성분과 달리, 150km/h에서는 125km/h의 경우와 비교해 증가량이 적으나, 180km/h는 150km/h에 비해 증가량이 뚜렷하다. 진동이 발생하는 시간은 열차의 속도에 따라 점점 빠른 시간대에서 진동이 시작된다.

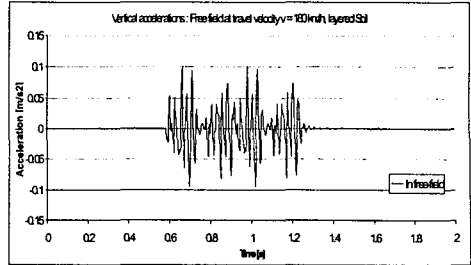


그림 16 가속도 연직성분:
layered soil, 자유장, V=180 km

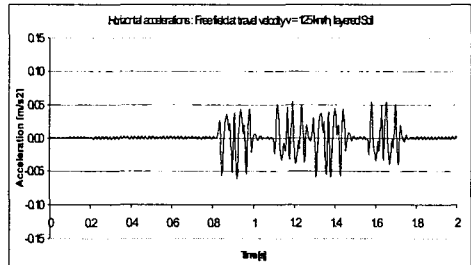


그림 17 가속도 횡방향 수평성분:
layered soil, 자유장, V=125 km

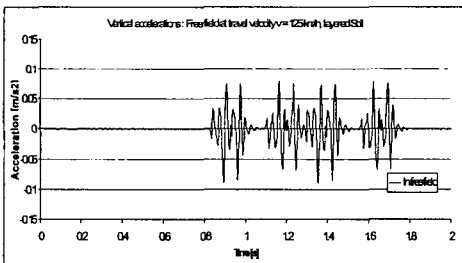


그림 14 가속도 연직성분:
layered soil, 자유장, V=125 km

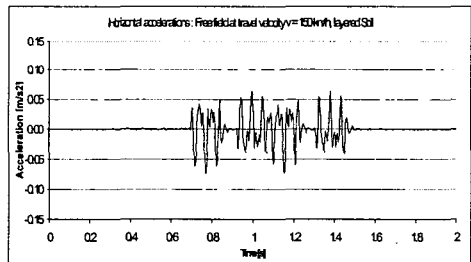


그림 18 가속도 횡방향 수평성분:
layered soil, 자유장, V=150 km

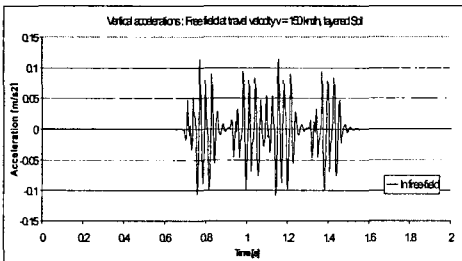


그림 15 가속도 연직성분:
layered soil, 자유장, V=150 km

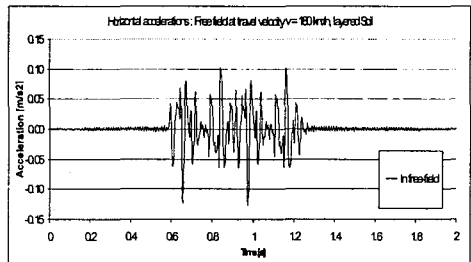


그림 19 가속도 횡방향 수평성분:
layered soil, 자유장, V=180 km

6.3 진동가속도 레벨

이 절에서는 원곡선의 반경 R에 따른 진동크기를 에너지 집중현상을 고려하여 구한 진동가속도레벨을 나타내었다. 표 6과 7에는 균질지반에서 각각 레일과 자유장에서의 값이 O.A.로 표시된 값이 나타나 있다. 이 표를 보면 자유장의 경우, R=300에서 시속180km로 주행하는 경우의 가속도레벨이 59.3dB로 법규에 의한 규제치를 초과하지 않는 것으로 나타났으나, 인근에 정밀기계들이 존재하는 경우에는 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되는 크기이다.

그림 20과 21에는 각각 레일과 자유장에서 반자유지반과 층진 지반에서의 값이 1/3-옥타브밴드로 표현되어 있다. 자유장의 경우, 비교적 주요한 대역인 31.6 대역에서 반무한영역의 지반에 비해 큰 진동을 보임을 알 수 있다.

표 6 R에 따른 진동가속도레벨 O.A. :
균질 지반, Rail

R [m]	800.0	600.0	400.0	300.0
125 km/h	56.1	58.6	62.1	64.6
150 km/h	57.3	59.8	63.3	69.0
180 km/h	58.5	61.0	64.6	73.4

표 7 R에 따른 진동가속도레벨 O.A. :
균질 지반, Free Field

R [m]	800.0	600.0	400.0	300.0
125 km/h	44.5	46.9	50.5	53.0
150 km/h	45.5	47.9	51.5	57.1
180 km/h	44.5	46.9	50.5	59.3

7. 결론 및 추후 연구과제

연구에서 얻어진 결론은 아래와 같다:

○ 축중 15톤의 틸팅차량 운행시 발생하는 진동에 의해서는 생활진동규제법에 의한 규제치를 초과하는 환경적 문제가 발생할 확률은 크지 않다. 단, 이는 적절한 관리가 이루어진 경우에 해당하는 것이다.

○ 속도가 180 km/h에서는 수평방향의 가속도가 수직방향의 가속도에 약 28%로 진동에 예민한 수진점이 노선 인근에 있는 경우, 수평방향의 진동가속도에 의한 검토가 필요하다.

○ 레도면에 작용하는 하중이 증가하는 것에 대한 적절한 대책이 필요하다.

○ 레도에 추가로 가해지는 수평진동에 의해 자갈도상의 처짐이 추가로 발생할 가능성에 대한 조사가 반드시 필요하다. 특히 연약지반 상의 노반에 대한 안전성 및 유지관리를 위한 대책이 수립되어야 하며, 이의 검토가 필요하다.

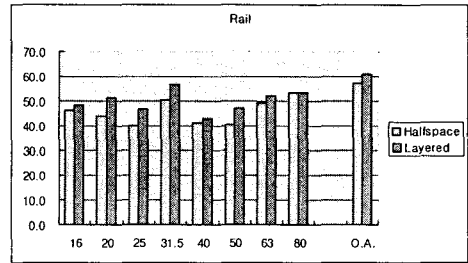


그림 20

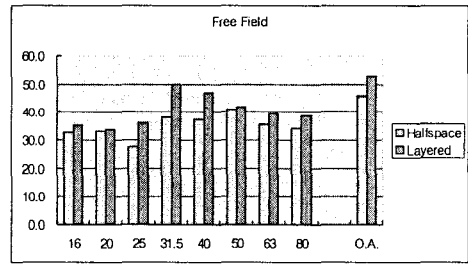


그림 21

이로 인해 다음과 같은 추후연구가 필요하다.

- 진동, 특히 수평진동과 수직진동이 동시에 작용하는 경우의 이 노반의 처짐에 미치는 영향
- 연약지반에서 지반의 침하에 관한 연구
- 수평진동에 대한 인근 수진점에서의 영향
- 노반의 수평강성 산정 연구
- 노반 보강방법 연구

참 고 문 헌

(1) G. Schmid et al., 2003, A Comparative Study of Results from Numerical Track-Subsoil Calculations in System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade, Springer.

(2) ETC-T 기존선 고속틸팅열차 차량시스템 기술 사양서, 2002, 한국철도기술연구원.