

열차 곡선부 노선 인근의 진동환경 예측 연구

Prediction of Ground Vibration nearby the Curved Railway Track

허 영¹⁾, 엄기영²⁾
 Huh, Young¹⁾, Um, Ki-Young²⁾

요약문

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 곡선 구간에서의 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 외 또 다른 방법인 틸팅차량의 도입은 고속철도에 비해 몇 가지 장점을 가지고 있다. 가장 큰 장점으로는 새로운 노선의 신설 없이 기존 노선의 개량만으로도 열차 운영을 고속화시킬 수 있다는 것이나, 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, 발생하는 진동은 그 원인에 따라 주파수 특성을 달리한다.

틸팅차량에 의한 진동이 가지고 있는 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

참고문헌[1]에는 열차 운행에 의한 지반진동 산정을 위한 여러 수치해석 방법들이 비교되어 있으며, 현재 미국, 일본을 포함한 모든 국가에서 사용되는 해석적 방법은 모두 이 범주에 포함된다.

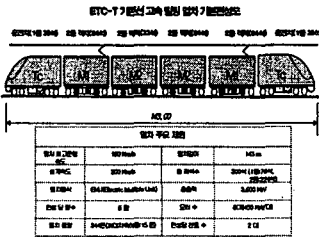


그림 1 기본편성도(6량)

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.

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

1) 수원대학교

2) 한국철도기술연구원

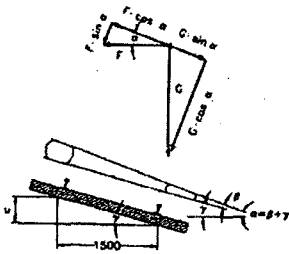
노선의 기존 선형을 유지한 상태 즉, 캔트량을 현재 부설된 상태 그대로 두고 틸팅차량의 운행 속도를 최대한 올리기 위하여 캔트 부족량을 100mm로 적용하여 곡선별 제한속도를 계산하였다. 이 때 적용한 곡선별 제한속도 산출식은 아래와 같으며, 여기에서는 하구배의 경우는 고려하지 않았다.

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

여기서, C = 부설캔트; C' = 100mm; R = 곡선반경

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 2에서와 같이, 노면에 직각으로 추가적으로 작용하며, 승객에게는 추가의 수평가속도가 발생하지 않는다.

그림 2는 틸팅메카니즘 작동시, 틸팅각 β 에 의해 좌석에 앉아 있는 승객 높이에서 발생하는 가속도의 변화로, G는 차량무게, F는 원심력이다.

그림 2 틸팅에 의한 가속도 분포

그림 2를 기초로 하여, 부설캔트량 150mm와 캔트부족량 100mm를 기준으로 하여 틸팅메카니즘 작동시의 최대허용속도를 구하였다.

4. 이동하중의 고려

실제로 열차 바퀴로부터 전달되는 하중은 바퀴와 레일의 접촉부에 작용하는 집중력으로 가정할 수 있다. Direc delta함수의 형태로 표현할 수 있는 이 운동은 그림 3과 같이 주파수 영역에서의 해석을 위해 일정한 크기의 폭을 갖고 Δt 의 일정 시간 동안 작용하는 사각형의 형태로 이상화하였다.

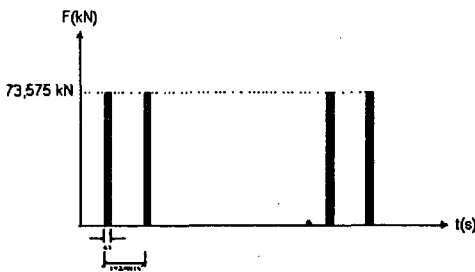


그림 3 열차 하중 분포

그림 4 열차 하중 분포 스펙트럼

시간의 함수로 표현된 그림 3의 하중의 스펙트럼의 형태는 열차의 운행속도에 따라 달라진다. 그림 4은 $V = 180 \text{ km/h}$ 에서의 하중 스펙트럼으로, 스펙트럼에 포함된 주파수 성분은 열차의 속도에 따라 달라진다.

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.

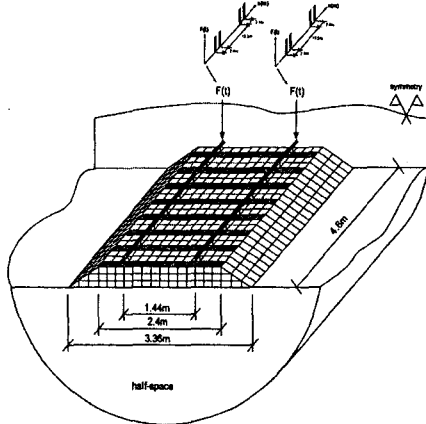


그림 8 해석모델

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 8과 같이 8개의 침목을 포함하는 것으로 하였다.

자갈층은 하나의 균질층으로 이상화되었으며, 레일과 침목 사이의 방진패드는 국내에서 사용 가능한 동적 물성치를 얻을 수 없었으므로, 독일에서 사용되고 있는 종류인 Zw 687a를 사용하였다. 모델에 포함된 자갈층은 3차원요소로 이상화되었다.

해석에 사용된 물성치는 다음과 같다.

E-modulus: 0.3825E09 Pa 포아송비: 0.25

밀도: 1700 kg/m³

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 [N/m] = 6.0E08

Damping [Ns/m] = 2.0E04

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

균질 지반: $c_s = 125$ m/s, $c_p = 216.5$ m/s

층진 지반: 지표층 $c_s = 125$ m/s, $c_p = 216.5$ m/s

하부층 $c_s = 200$ m/s, $c_p = 346.4$ m/s

6. 해석결과 - 진동가속도

6.1 Halfspace 자유장 가속도

*여기에서는 각 운행속도에서 발생하는 연직방향 가속도와 수평가속도를 비교하여 그림 9~그림 10에 나타내었다. 수직성분의 경우, 시속 150km/h에서는 125km/h에 비해 많이 증가하나 180km/h에서는 150km/h에 비해 증가량이 미미하다. 그러나 수평성분은 속도의 증가에 따른 원심력의 증가로 인해 계속적으로 증가한다.

진동이 크게 발생하는 시간대에서의 수평가속도의 연직가속도에 대한 비를 구하면 속도 150km/h에서는 125km/h에 비해 증가량이 미미하나, 180km/h에서는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 125km/h에서 150km/h로 연직방향 성분도 크게 증가하나, 150km/h에서 180km/h로 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 가

속도의 크기에 대한 비례값으로 나타나 있다.

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

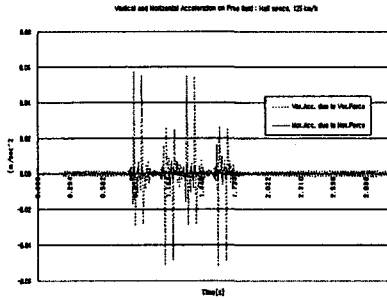


그림 91 가속도의 연직성분과 횡방향 수평성분 비교: hom. Halfspace, 자유장, V=125 km/h

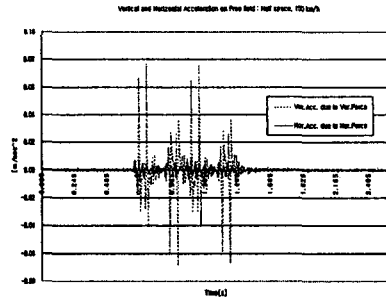


그림 102 가속도의 연직성분과 횡방향 수평성분 비교: hom. Halfspace, 자유장, V=150 km/h

6.2 층진 지반 자유장 가속도

여기에서는 층진 지반모델의 해석결과 중, 궤도로부터 10m 이격된 자유장에서의 가속도 수직성분을 그림 11~그림 13에 속도별로 나타내었다. 층진 지반의 경우도, 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 14~그림 16에 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.

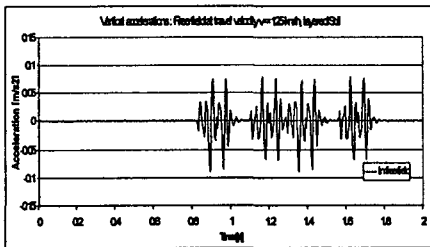


그림 11 가속도 연직성분: layered soil, 자유장, V=125 km

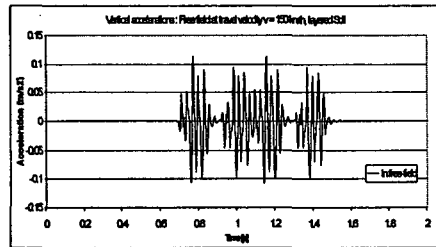


그림 12 가속도 연직성분: layered soil, 자유장, V=150 km

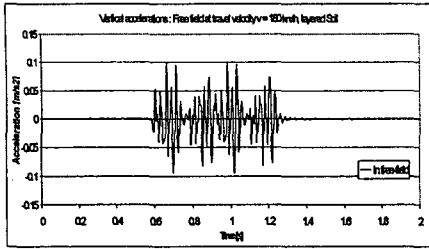


그림 13 가속도 연직성분:
layered soil, 자유장, V=180 km

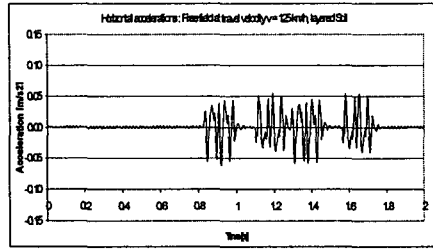


그림 14 가속도 횡방향 수평성분:
layered soil, 자유장, V=125 km

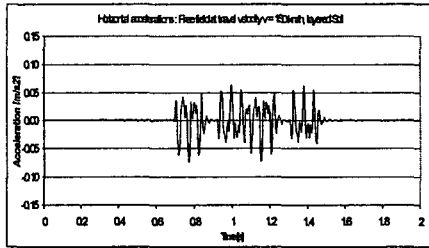


그림 15 가속도 횡방향 수평성분:
layered soil, 자유장, V=150 km

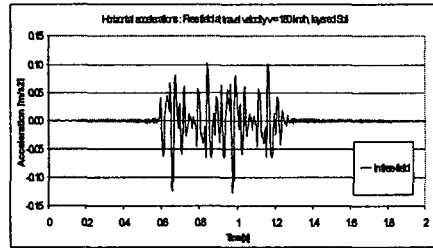


그림 16 가속도 횡방향 수평성분:
layered soil, 자유장, V=180 km

6.3 진동가속도 레벨

이 절에서는 원곡선의 반경 R에 따른 진동크기를 에너지 집중현상을 고려하여 구한 진동가속도레벨을 나타내었다. 표 1과 2에는 균질지반에서 각각 레일과 자유장에서 값이 O.A.로 표시된 값이 나타나 있다. 이 표를 보면 자유장의 경우, R=300에서 시속180km로 주행하는 경우의 가속도레벨이 59.3dB로 범규에 의한 규제치를 초과하지 않는 것으로 나타났으나, 인근에 정밀기계들이 존재하는 경우에는 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단되는 크기이다.

그림 17과 18에는 각각 레일과 자유장에서 반자유지반과 층진 지반에서의 값이 1/3-옥타밴드로 표현되어 있다. 자유장의 경우, 비교적 주요한 대역인 31.6 대역에서 반무한영역의 지반에 비해 큰 진동을 보임을 알 수 있다.

표 1 R에 따른 진동가속도레벨 O.A. :
균질 지반, Rail

	300	400	500	600
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 2 R에 따른 진동가속도레벨 O.A. :
균질 지반, Free Field

	300	400	500	600
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 수평방향이 가속도가 수직방향의 가속도에 약 28%로 진동에 예민한 수진점이 노선 인근에 있는 경우, 수평방향의 진동가속도에 의한 검토가 필요하다.

○ 궤도면에 작용하는 하중이 증가하는 것에 대한 적절한 대책이 필요하다.

○ 궤도에 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.

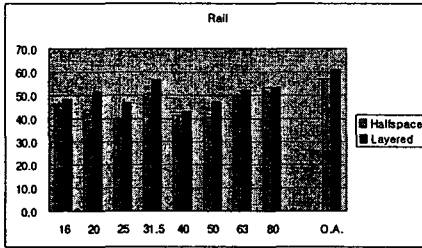


그림 17

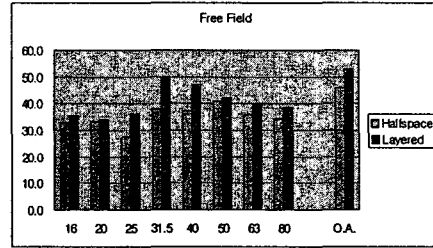


그림 18

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 기술사양서, 2002, 한국철도기술연구원.