

철도의 곡선반경 및 캔트에 따른 노반의 침하 및 지지력 산정

Estimation of the Roadbed Settlement and Bearing Capacity According to Radius of Curve and Cant in Railroad

전 상 수* / 엄 기 영** / 김 재 민***

Jeon, Sang-Soo / Eum, Gi-young / Kim, Jae-Min

Abstract

The research on the track performance and stability of the tilting-train was performed and the settlement of the roadbed was estimated as the tilting train was being operated on the rail joint under the allowable velocity subjected to the track performance and the stability of the tilting-train. Since the impact on the continuous welded rail (CWR) induced by the tilting-train loading is different from the impact on the rail joint, it needs to investigate the settlement of the roadbed beneath the CWR. In this study, when the tilting-train is being operated on the CWR under the allowable velocity subjected to the track performance and the stability of the tilting-train, the settlement and bearing capacity of the roadbed beneath the CWR have been evaluated using numerical analysis and compared with those beneath the rail joint. The numerical results show that the settlements of the roadbed beneath CWR and rail joint are amount to 71.2% and 88.8% of the allowable settlement, respectively. And the stresses are amount to 10.4% and 12.1% of the allowable bearing capacity, respectively.

key words : Tilting-train, Roadbed, Settlement, Stress, Numerical Analysis

요 지

틸팅차량의 안정성 확보를 위해 궤도부담력과 주행안정성 검토가 이루어졌으며, 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행될 경우 레일이음매 하부 노반침하에 대한 연구가 수행되었다. 열차 주행시 레일이음매와 장대레일에 작용하는 충격량이 다르기 때문에 장대레일 하부 노반에 대한 안정성 검토가 추가적으로 필요하다. 본 연구에서는 장대레일에 대하여 노반의 침하량 및 지지력을 수치해석을 통해 검토하고 허용침하량 및 허용지지력과 비교하여 노반의 안정성을 검토하였으며 레일이음매와 장대레일 하부 노반의 침하량 및 지지력을 비교·분석하였다. 그 결과, 장대레일 및 레일이음매 하부 노반의 침하량은 허용침하량의 71.2% 및 88.8%, 응력은 허용지지력의 10.4% 및 12.1%로 나타났다.

핵심용어 : 틸팅차량, 장대레일, 레일이음매, 노반거동, 수치해석

* 정회원 · 인제대학교 공과대학 토목공학과 전임강사 (e-mail: ssj@inje.ac.kr)

** 한국철도기술연구원 인프라기술개발팀 책임연구원

*** 인제대학교 대학원 토목공학과 석사과정

1. 서 론

기존선 속도향상을 목적으로 개발된 틸팅차량은 기존에 운행 중인 열차와는 운행 메커니즘이 다르기 때문에 안정성을 확보하기 위해서는 기존에 부설되어 있는 궤도의 성능평가가 선행되어야 한다. 이를 위해 틸팅차량이 기존선을 운행할 경우 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 장대레일과 레일이음매에 대하여 각각 허용속도가 산정되었고(한국철도기술연구원, 2006) 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 레일이음매 하부 노반의 침하량에 대한 검토가 수행되었다(전상수 등, 2006). 하지만 지금까지의 연구에서는 레일이음매 하부 노반의 침하에 대한 검토만 이루어졌을 뿐 노반의 지지력에 대한 검토와 장대레일 하부 노반에 대한 검토는 이루어지지 않았다.

노반의 지지력이 부족한 경우 도상자갈 관입 등의 현상이 발생하게 되고 동절기 동결융해에 의한 노반 팽창현상 등의 노반 연약화 현상이 발생하게 되며, 노반의 연약화는 도상의 관입을 촉진시키는 등 악순환이 계속되어 도상자갈의 펄핑작용으로 노반분리가 발생하고 궤도과괴 등으로 이어져 열차주행에 지장을 초래할 뿐만 아니라 열차의 안전운행에 위협을 가하게 되므로(이진욱 등, 2003) 노반의 지지력에 대한 검토가 필요하다.

열차의 주행으로 인하여 궤도에 발생하는 힘은 열차의 무게와 속도에 따른 충격을 고려한 동적하중으로 나타낼 수 있는데, 충격계수가 레일이음매의 경우 0.5, 장대레일의 경우 0.3으로 레일이음매 궤도와 장대레일 궤도에서 발생하는 충격이 서로 다르기 때문에 궤도구조 및 하부 노반으로 미치는 영향 또한 다르므로 레일이음매 궤도와 장대레일 궤도를 구분하여 검토를 수행할 필요가 있다.



그림 1. 레일이음매

따라서 본 연구에서는 장대레일에 대하여 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생하는 노반의 침하량 및 응력을 수치해석을 통해 검토하고 레일이음매 궤도 하부 노반에서의 침하량 및 응력과 비교분석하였으며 허용침하량 및 허용지지력과 비교하여 안정성을 검토하였다.

2. 레일이음매와 장대레일의 특성

철도에 있어서 레일의 이음매(그림 1)는 최대 취약부위 중의 하나이며, 이음매판과 볼트로 견고하게 체결하고 있으나 강성이 균일할 수 없고 온도변화에 따라 이음매 유간이 생겨 이것을 차량이 주행하면서 충격과 동요를 발생시킨다. 이러한 이음매는 그 보수에 있어서 많은 비용이 필요할 뿐만 아니라 열차의 주행으로 인한 충격과 동요에 의하여 궤도재료 및 차량부품의 수명단축, 승차감 악화, 궤도과괴를 가속하고 있어 현대철도에서는 이음매를 용접하여 강성을 동일하게 만든 장대레일을 사용하고 있는 실정이다(김두환 등, 2001).

장대레일(그림 2)은 기존 레일을 연속적으로 용접하여 이음매를 제거한 200m 이상의 레일로 궤도보수 주기 연장, 소음 및 진동의 발생감소, 궤도재료의 손상 감소, 승차감 양호, 열차의 고속화 및 수송력 강화 등 많은 이점이 있지만 온도 상승에 따른 레일의 신장이 억제됨으로 인하여 장대레일의 단면에 높은 압축응력이 유발되어 궤도 횡방향 및 수직방향으로의 좌굴이 발생하는 문제를 야기시킬 수 있다(한상운 등, 2006).

열차 주행시 발생하는 궤도에 발생하는 충격은 장대레일과 레일이음매에서 서로 다르기 때문에 하부 노반에 미치는 영향도 다르므로 장대레일과 레일이음매를 구분하여 안정성을 검토할 필요가 있다. 레일이음매



그림 2. 장대레일

에 대하여 하부 노반침하 검토는 전상수 등(2006)에 의해 수행되었으며, 본 연구에서는 장대레일과 레일이 음매 궤도에 대하여 하부 노반의 침하량 및 지지력에 대한 검토를 수행하였다.

3. 철도노반의 특성

3.1 철도노반의 구비 조건

철도노반은 열차의 안전한 주행을 확보하기 위하여 궤도를 견고하게 지지하고 궤도에 대하여 적당한 탄성을 부여함과 동시에 기초지반의 연약화를 방지해야 하고 열차하중을 기초지반으로 분산전달 하여야 한다(건설교통부, 2004). 열차 통과 시 열차 하중 및 진동은 레일로부터 침목, 도상을 거쳐 최종적으로는 노반에 전달된다. 따라서 노반은 궤도의 기초라 할 수 있으나 일반 구조물의 기초는 정적 하중을 받는 것에 비해 철도 노반은 열차 통과에 의한 동적 하중을 받는다는 특징을 가지고 있다. 즉, 노반의 역할은 열차 통과에 의한 동적 하중 및 진동에 대해서 궤도를 안전하게 지지하는 것이라 할 수 있다.

철도노반의 구비조건은 다음과 같다(한국철도기술연구원, 2001).

- 분니 발생이 적고 도상의 관입 등 노반 표면의 파괴가 작아야 한다.
- 노반 자체의 변형이 작아야 한다.
- 기초지반에 전달되는 하중이 지지력 이하가 되도록 분산·전달할 수 있어야 한다.
- 노반의 지지력 계수가 일정값 이상이어야 한다.

땅깍기(절토), 평지 및 낮은 흙쌓기(저성토)시 원지반의 구비조건은 다음과 같다.

- 노반을 안전하게 지지하고 침하문제가 발생하지 않아야 하며, 시공기면 3m 이내에 연약층이 없어야 한다.
- 땅깍기, 평지에 있어서는 원지반면에서 K_{30} 이, 낮은 흙쌓기(저성토)인 경우는 노반 표면에서의 K_{30} 이 각각 11kgf/cm^3 이상이어야 한다.
- 한랭지에서는 지반이 동상을 입지 않도록 하여야 한다.

흙노반은 그림 3에 나타난 것과 같은 양질의 자연토 등의 단일층으로 구성되는 것으로 하며, 흙노반을 흙쌓기 또는 땅깍기에 시공하는 경우에는 필요에 따라서 노반 아래에 배수층을 설치하는 것으로 한다.

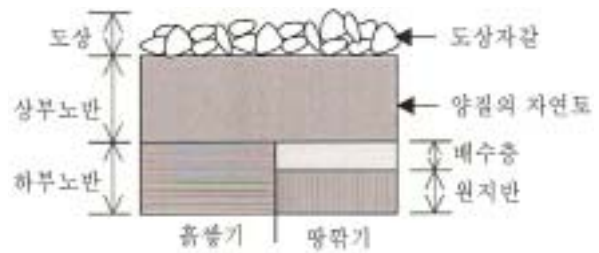


그림 3. 흙노반의 구조(한국철도시설공단, 2004)

흙노반은 지지력이 크고 압축성이 작으며 분니가 발생하기 어려운 재료로 양질의 자연토 등의 단일층으로 이루어진 구조를 말한다. 사용 재료는 땅깍기 발생토, 하천 깎 자갈 등의 자연토로서 표 1의 기준에 적합한 양질의 흙을 사용한다. 지역적인 사정에 따라 양질의 흙이 얻기 힘든 지역의 경우에는 쇄석류를 구입하여 시공하여도 된다. 평지나 땅깍기의 경우 원지반 위에 자갈이나 모래 등으로 세립분이 적은(10% 정도 이하) 재료로 흙노반 아래에 배수층을 설치하여야 한다. 배수층의 두께는 150mm로 하고 입도 배합이 좋고 경제적으로 입수가 용이하며 필터 효과가 있는 하천모래 등을 이용한다. 또한, 부직포 등의 지오텍스타일로 이용하는 경우에는 내구성 등을 충분히 검토하여야 한다. 단, 배수층은 노반두께로 포함하지 않는다.

표 1. 흙노반 재료의 적합 조건(철도청, 2001)

구분	기준치
최대입경	25mm 이하
No. 200번체 통과율	35% 이하
균등계수(Cu)	6 이하
소성지수(PI)	10 이하
액성한계(LL)	35% 이하

철도토목공사 표준시방서(철도청, 1980)와 철도설계기준(철도청, 2001)에서 흙노반은 지지력이 크고 압축성이 작으며 분니가 발생하지 않는 양질의 자연토 등의 단일층으로 구성하도록 하고 있으며 흙노반을 평지 및 땅깍기 구간에 설계할 때는 필요에 따라 노반아래 배수층을 설치하도록 하고 있다.

3.2 노반의 허용침하 및 지지력 기준

3.2.1 허용침하 기준

탈선한계에 따른 궤도의 총 허용변위량은 10mm 정도이지만 차량의 종류에 따라 다르며 궤도보수 등을 고려하면 일률적으로 정하는 것이 어렵다. 반복되는 열차

주행에 의한 큰 진동변위는 도상자갈을 느슨하게 하여 도상자갈의 보수주기를 단축시키게 되므로 보수가 요구되는 범위 내에서 변위를 정할 필요가 있으며, 이것은 선로조건이나 보수체제에 따라서 다르지만 약 2~5mm 정도라고 알려져 있다. 궤도 레일패드와 도상 발라스트의 압축량이 1mm 정도이므로 안전성 한도의 노반의 침하량은 레일의 허용침하량으로부터 그 값을 뺀 9mm이지만 궤도보수 및 승차감 등을 고려하면 노반의 허용침하량은 4mm 이내가 된다. 하지만 강화노반의 경우 포장표면의 차수성을 확보하기 위해서 균열이 생기지 않는 한도의 침하량으로 할 필요가 있어 일본에서는 2.5mm를 사용하고 있으며 흙노반의 경우 또한 강화노반의 경우를 참조하여 2.5mm를 사용하고 있다(鐵道總合技術研究所, 1992; 한국철도시설공단, 2004).

3.2.2 허용지지력 기준

노반의 허용압력은 Terzaghi 지지이론, 재래선의 평판재하시험결과, 여러 기관에 대한 지지력 값의 기준 등에서 대표적 노반을 3개로 분류하여 각 구분에 대한 허용지지력을 표 2에 나타내었다. 노반 상태가 양호한 경우는 3.0kgf/cm², 노반 상태가 보통인 경우는 2.4kgf/cm²의 허용지지력을 적용하며 노반 상태가 불량한 경우는 구체적인 장소를 지정하여 관리하고 허용지지력으로는 1.5kgf/cm²를 적용한다(한국철도기술연구원, 2005). 본 연구에서는 노반 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kgf/cm²를 적용하였다.

표 2. 노반 상태별 노반의 허용지지력 (한국철도기술연구원, 2005)

노반 상태	허용지지력 (kgf/cm ²)	비고
양호	3.0	견고하게 다짐된 사질토 등
보통	2.4	견고하게 다짐된 점성토 등
불량	1.5	약간 연약한 흙

4. 곡선반경 및 캔트에 따른 허용속도

일반적으로 열차의 주행으로 인하여 궤도에 발생하는 힘은 열차속도의 함수로 표현되므로 열차의 주행속도가 증가하면 동적효과의 증가로 인하여 동적하중이 증가하며, 따라서 발생된 충격하중에 의해 궤도 구조가 부담하게 되는 하중도 비례해서 커지게 된다. 이와 같이 궤도가 받게 되는 부담력은 궤도구조의 성능과 안정성 평가를 위해서는 반드시 검토되어야 하는 부분이다(엄주환 등, 2005). 또한, 곡선부의 경우 열

차의 주행속도에 따라 레일에 전달되는 운중과 횡압은 그 크기에 따라 궤도의 변형을 유발하는 원인이 되고, 열차의 탈선과 같은 대형 사고를 유발할 수 있으므로 주행안정성을 정량적으로 평가 또는 검토하도록 하고 있다(엄기영 등, 2004).

현재 이를 위해 경부선 상·하선에 부설된 캔트를 조사하여 곡선반경 400m, 600m, 800m, 1,000m, 1,200m에 대해 각 곡선반경별 대표적인 캔트를 선정하여 궤도부담력과 주행안정성에 대한 검토가 이루어졌으며, 검토 항목은 표 3과 같다(한국철도기술연구원, 2005; 2006).

표 3. 궤도부담력 및 주행안정성 검토 항목 (한국철도기술연구원, 2005; 2006)

궤도부담력 검토	주행안정성 검토
레일의 휨 응력	탈선계수
레일압력	운중감소량
급격한 횡 변위	운중 횡압추정식
체결구 안정성	추정 탈선계수비 산정식

해석에 사용된 틸팅차량의 축중은 15tf이며 최고운행속도 및 설계최대속도는 각각 180km/h 및 200km/h이다. 틸팅차량의 유효중심고는 1.686m이며 고정 축거는 2.6m, 축수는 24ea이다. 침목의 경우 현재 경부선에 부설되어 있는 PC 침목의 제원을 사용하였으며, 침목의 길이, 폭, 간격은 각각 2.45m, 0.28m, 0.58m이다. 도상 깊이는 국유철도건설규칙(철도청, 2000)에 따라 2급선을 기준으로 0.3m를 사용하였고 레일패드 및 도상 수직 스프링계수는 각각 4,750tf/m 및 20,000tf/m, 노반의 지반반력계수는 7,200tf/m³을 사용하였으며, 레일의 제원은 KS50 레일을 사용하였다.

각 곡선반경 및 캔트에서 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도는 표 4에 나타내었고(한국철도기술연구원, 2006) 이에 따른 노반의 침하량 및 지지력을 수치해석을 통해 검토하였다.

5. 수치해석

5.1 수치해석 조건

본 연구에서는 틸팅차량의 곡선부 주행에 대한 노반의 안정성 검토를 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용하였으며, 해석에 사용된 파괴규준은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 수치해석 모델은 상하부 노반이 각각 1.5m, 상부노반 폭이 7.2m,

표 4. 틸팅차량의 궤도부담력과 주행안정성 검토에 따른 허용속도(한국철도기술연구원, 2006)

곡선반경, R (m)	캔트, C (mm)	허용속도, V (km/h)	
		장대레일	레일이음매
400	140	127	118
	150	128	119
600	130	146	134
	150	149	135
800	120	159	145
	140	162	147
1,000	100	168	155
	130	173	156
1,200	100	177	161
	120	182	163

노반의 경사는 1:1.8로 하였고 원지반의 크기는 길이 72m, 폭 180m로 하였다. 경계조건의 경우 바닥면에 대해서는 수직방향을 구속하였고 양쪽 수직면에 대해서는 파를 흡수하는 경계조건인 Free-Field Boundary Condition을 사용하였다. 그림 4는 수치해석 모델의 모식도를 나타내었다.

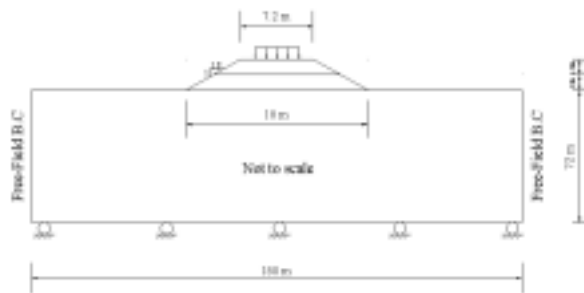


그림 4. 수치해석 모델 모식도

해석시간은 허용속도에 따라 하중 재하 주기는 장대레일의 경우 0.051~0.074sec, 레일이음매의 경우 0.057~0.079sec이며 하중 재하 시간은 장대레일의 경우 1.234~1.769sec, 레일이음매의 경우 1.378~1.904sec의 범위에 있지만 열차가 지나간 후의 침하 특성을 알아보기 위해 수치해석 시간은 3sec까지 수행하였다. 재료감쇠비는 2%를 사용하였고 해석에 사용된 지반물성은 표 5와 같다.

5.2 틸팅차량 하중 모사

본 연구에서는 틸팅차량 하중을 노반압력으로 모사하였다. 장대레일과 레일이음매에서의 틸팅차량 하중을 열차의 속도에 의한 충격을 고려한 곡선부에서의

동적윤중, 레일압력, 침목하면압력, 노반압력 순으로 계산하였으며, 수치해석시 하중재하의 경우 노반압력으로 모사된 틸팅차량 하중을 정현파를 이용하여 노반면에 재하하였다(전상수, 2006).

표 5. 지반물성(한국철도기술연구원, 2001)

구분	상부노반	하부노반	원지반
γ (t/m ³)	1.8	1.8	1.8
E (MPa)	80	50	100
ν	0.2	0.3	0.3
c (kPa)	3	10	0
ϕ (°)	32	30	38

곡선부에서의 동적윤중과 레일압력, 침목하면압력을 구하는 과정은 식 (1)~(11)과 같고 노반압력은 도상내 압력의 분포도를 이용하였다.

1) 곡선부 동적윤중

곡선부 동적윤중은 곡선부 윤중정상분과 윤중변동분의 합으로 나타난다.

• 윤중정상분

$$P_{sti} = \frac{W_0}{2} \left[\left(1 + \frac{(V/3.6)^2 C}{gR} \right) - \frac{H_G^*}{G/2} \left(\frac{(V/3.6)^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \right] \quad (1)$$

$$P_{sto} = \frac{W_0}{2} \left[\left(1 + \frac{(V/3.6)^2 C}{gR} \right) + \frac{H_G^*}{G/2} \left(\frac{(V/3.6)^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \right] \quad (2)$$

여기서, P_{sti} : 내측 윤중정상분(tf)

P_{sto} : 외측 윤중정상분(tf)

W_0 : 축중(tf), V : 속도(km/h)

G : 궤간(m), R : 곡선반경(m)

C : 캔트(m)

g : 중력가속(9.8m/s²)

H_G^* : 틸팅차량 유효중심고(m)

• 윤중변동분

내외측 윤중의 변동분은 속도충격율에 의한 값을 이용하며 다음의 식 (3)과 식 (4)로부터 산정한다(鐵道總合技術研究所, 1997).

$$\Delta P_{sti} = 3[0.5 \times P_{sti} \times (i-1)] \quad (3)$$

$$\Delta P_{sto} = 3[0.5 \times P_{sto} \times (i-1)] \quad (4)$$

여기서, ΔP_{sti} : 내측 윤중정상분(tf)

ΔP_{sto} : 외케측 윤증정상분 (tf)
i : 속도충격을

속도충격을 i 는 $1+\alpha(V/100)$ 이며 α 는 충격계수로써 장대레일의 경우는 0.3, 레일이음매의 경우는 0.5를 이용한다. 따라서 곡선부의 내외케측에 작용하는 윤증의 총합은 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$P_{dvi} = P_{sti} + \Delta P_{sti} \quad (5)$$

$$P_{dvo} = P_{sto} + \Delta P_{sto} \quad (6)$$

2) 레일압력

최대 레일압력은 윤증 P_{dv} 가 침목 직상에 작용하는 경우와 침목과 침목사이 증양에 작용하는 경우에 대하여 고려한다.

- 윤증이 침목 직상에 작용할 때

$$P_{Ri} = P_{dvi} (1 - e^{-\beta_i \frac{a}{2}} \cos \beta_i \frac{a}{2}) \quad (7)$$

$$P_{Ro} = P_{dvo} (1 - e^{-\beta_o \frac{a}{2}} \cos \beta_o \frac{a}{2}) \quad (8)$$

- 윤증이 침목 사이 증양에 작용할 때

$$P_{Ri} = \frac{P_{dvi}}{2} (1 - e^{-\beta_i a} \cos \beta_i a) \quad (9)$$

$$P_{Ro} = \frac{P_{dvo}}{2} (1 - e^{-\beta_o a} \cos \beta_o a) \quad (10)$$

여기서, P_{Ri}, P_{Ro} : 내외케측 레일압력 (tf)
 P_{dvi}, P_{dvo} : 곡선부 동적윤증 (tf)
a : 침목간격 (m)

$$\beta_i = \sqrt{4cf \frac{k_i}{4EI_x}}, \quad \beta_o = \sqrt{4cf \frac{k_o}{4EI_x}}$$

3) 침목하면압력

침목하면압력은 윤증이 침목 직상에 작용할 때와 침목 사이 증양에 작용할 때의 레일압력 중 큰 값에 대하여 고려한다.

$$P_t = \frac{P_{Rimax} + P_{Romax}}{B \cdot L} \quad (11)$$

여기서, P_t 는 침목하면압력 (tf/m²)이며 P_{Rimax} 및 P_{Romax} 는 내외케측에서 윤증이 침목 직상 및 침목 사

이 증양에 작용할 때의 레일압력 (tf) 중 큰 값을 사용하고, B와 L은 침목의 폭 (m)과 길이 (m)이다.

4) 노반압력

침목 하면에서 노반 표면으로 전해지는 압력은 도상두께가 크게 될수록 작게 된다. 노반압력은 도상내 압력의 분포도(그림 5)를 이용하였으며, 도상내 압력은 침목의 직하부에서 가장 크고 직하부에서 깊이가 깊어질수록, 거리가 멀어질수록 영향이 작아진다.

틸팅차량 하중 모사 과정에 사용된 틸팅차량의 축중(W_0) 및 유효중심고(HG*)는 각각 15tf 및 1.686m이며, 중력가속도(g)는 9.8m/s², 궤간(G)은 1.435m, 침목 간격(a)은 0.58m, 침목 폭(B)은 0.28m, 침목 길이(L)는 2.45m이다. 곡선반경(R)과 캔트(C)는 각 구간마다 달라지는 변수이며 속도(V)는 각 곡선반경과 캔트에서 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도이다.

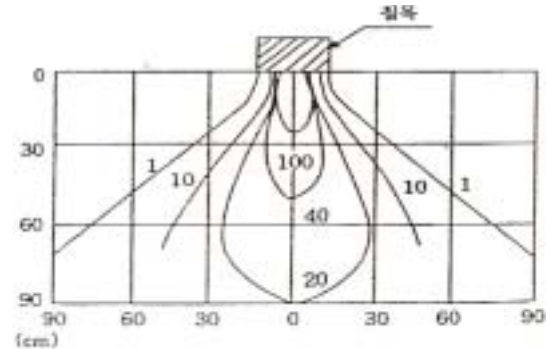


그림 5. 도상내 압력의 분포도(사서범, 2002)

5.3 장대레일 및 레일이음매 하부 노반 안정성 비교·분석

5.3.1 침하량

기존 경부선을 대상으로 곡선반경(R) 400m, 600m, 800m, 1,000m, 1,200m에서 각 곡선반경별 대표적인 캔트(C)에 대하여 노반의 침하량을 검토하였다. 그림 6은 곡선반경 600m, 캔트 150mm에서 장대레일 및 레일이음매 하부 노반의 침하량을 나타내었고 그림 7과 그림 8 그리고 표 6은 곡선반경과 캔트에 따른 침하량과 안전율(Factor of Safety, FS)을 나타내었다.

그림 6(a)에서, 하중이 처음 재하 됨에 따라 약 1.2mm의 즉시 침하가 발생하였고 하중이 반복적으로 재하 됨에 따라 1.78mm의 최대 침하량이 발생하였다. 정현과 하중 재하에 따라 침하가 발생하고 복원되는 과정이 반복됨을 볼 수 있으며, 하중이 제거된 후 발생했던 침하가 복원되는 것을 알 수 있다. 그림 6(b)

(a) 장대레일 (b) 레일이음매
그림 6. 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 노반의 침하량

(a) 장대레일 (b) 레일이음매
그림 7. 곡선반경과 캔트에 따른 침하량

(a) 장대레일 (b) 레일이음매
그림 8. 곡선반경과 캔트에 따른 안전율

또한 전체적인 침하의 특성은 같으며 침하량의 크기에서만 차이가 있다.

틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생한 모든 침하량의

크기는 레일의 휨 응력에 의해 허용속도가 결정되는 장대레일 하부 노반에서 1.64~1.78mm, 레일압력에 의해 허용속도가 결정되는 레일이음매 하부 노반에서 2.07~2.24mm로 나타났고 레일이음매 하부 노반에

표 6. 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 노반의 침하량

곡선반경 (m)	캔트 (mm)	허용속도 (km/h)		침하량 (mm)		안전율	
		장대레일	레일이음매	장대레일	레일이음매	장대레일	레일이음매
400	140	127	118	1.73	2.07	1.45	1.21
	150	128	119	1.75	2.09	1.43	1.20
600	130	146	134	1.75	2.17	1.43	1.15
	150	149	135	1.78	2.22	1.40	1.13
800	120	159	145	1.74	2.18	1.44	1.15
	140	162	147	1.76	2.24	1.42	1.12
1,000	100	168	155	1.64	2.12	1.52	1.18
	130	173	156	1.68	2.19	1.49	1.14
1,200	100	177	161	1.65	2.11	1.52	1.18
	120	182	163	1.69	2.16	1.48	1.16

※ 안전율 = 허용침하량 (2.5mm) / 틸팅차량 하중에 의한 침하량 (mm)

(a) 장대레일

(a) 레일이음매

그림 9. 틸팅차량 하중에 의한 노반의 응력

비해 장대레일 하부 노반에서의 침하량이 76.7~83.7%로 약 80% 정도인 것으로 나타났다. 그리고 모든 구간에서 틸팅차량 하중에 의해 발생한 침하량이 허용침하량 2.5mm 이하이므로 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 노반의 침하량 측면에서 안전한 것으로 나타났다(그림 7; 표 6).

허용침하량 2.5mm를 기준으로 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 침하량의 비를 안전율(FS)이라 정의하면, 안전율은 장대레일의 경우 1.40~1.52로 허용침하량보다 40% 이상, 레일이음매의 경우 1.12~1.21로 허용침하량보다 12% 이상 안전한 것으로 나타났으며(그림 8; 표 6), 레일이음매의 경우보다 장대레일의 경우 안전율이 23~35% 높으므로 약 30% 더 안전한 것으로 나타났다.

5.3.2 지지력

지지력 검토는 장대레일에서 침하량이 가장 큰 곡

선반경 600m, 캔트 150mm 구간을 대상으로 장대레일과 레일이음매 하부 노반의 응력을 검토하였으며 노반의 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kgf/cm²와 비교하였다. 그림 9는 곡선반경 600m, 캔트 150mm 구간에서 장대레일 및 레일이음매 하부 노반의 응력을 나타내었다.

곡선반경 600m, 캔트 150mm 구간에서 장대레일 및 레일이음매 하부 노반의 응력은 각각 0.25kgf/cm² 및 0.29kgf/cm²로 노반의 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kgf/cm²의 10.4% 및 12.1%로 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 노반의 지지력 측면에서 안전한 것으로 나타났다.

곡선반경 600m, 캔트 150mm 구간에서 장대레일 및 레일이음매 하부 노반의 침하량이 1.78mm 및 2.22mm로 허용침하량 2.5mm의 71.2% 및 88.8%인데 비해 응력은 0.25kgf/cm² 및 0.29kgf/cm²로 허용

지지력의 10.4% 및 12.1%로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 곡선반경 400m, 600m, 800m, 1,000m, 1,200m에서 각 곡선반경별 대표적 캔트에 대하여 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생하는 침하량 및 지지력을 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 통해 검토하였고 허용침하량 및 허용지지력과 비교하여 안정성을 검토하였으며 허용침하량 2.5mm를 기준으로 틸팅차량 하중에 의해 발생한 침하량의 비를 안전율(FS)이라 정의하여 안전율을 검토하였다.

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 발생한 모든 침하량의 크기는 장대레일의 경우 1.65~1.78mm, 레일이음매의 경우 2.07~2.24mm의 범위에 있으며, 전 구간에서 허용침하량 2.5mm 이하이므로 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 노반의 침하량 측면에서 안전한 것으로 나타났으며 레일이음매 하부 노반에 비해 장대레일 하부 노반에서의 침하량이 76.7~83.7%로 약 80% 정도인 것으로 나타났다.
- (2) 허용침하량 2.5mm를 기준으로 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 침하량의 비를 안전율(FS)이라 정의하면, 각 구간별 안전율은 장대레일의 경우 1.40~1.52로 허용침하량보다 40% 이상, 레일이음매의 경우 1.12~1.21로 허용침하량보다 12% 이상 안전한 것으로 나타났다.
- (3) 장대레일에서 침하량이 가장 큰 곡선반경 600m, 캔트 150mm 구간을 대상으로 장대레일과 레일이음매 하부 노반의 응력을 검토한 결과, 각각 0.25kgf/cm² 및 0.29kgf/cm²로 노반의 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kgf/cm²의 10.4% 및 12.1%로 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 노반의 지지력 측면에서 안전한 것으로 나타났다.
- (4) 곡선반경 600m, 캔트 150mm 구간에서 장대레일 및 레일이음매 하부노반의 침하량이 1.78mm 및 2.22mm로 허용침하량 2.5mm의 71.2% 및 88.8%인데 비해 응력은 0.25kgf/cm² 및 0.29kgf/cm²로 허용지지력의 10.4% 및 12.1%로 나타났다.

이상의 결론으로부터 틸팅차량이 궤도부담력 및 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행될 경우 노반의 침하량 및 지지력 측면에서 안전한 것으로 판단된다.

본 연구는 수치해석 결과이므로 현장계측 및 실험 재하시험 등을 통한 추후 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2004). 철도설계기준(노반편), 건설교통부
- 김두환, 고상훈 (2001). 분기부 장대레일화시의 축력 거동특성 해석, 한국구조물진단학회 논문집, 한국구조물진단학회, 제5권, 제2호, pp. 163~174
- 사서범 (2002). 선로공학, 일과일
- 엄기영, 엄주환, 유영화, 최정호 (2004). 틸팅차량의 기존선 곡선부 주행안정성 평가, 한국철도학회 논문집, 한국철도학회, 제7권, 제4호, pp. 367~373
- 엄주환, 엄기영, 양신주, 신승권 (2005). 틸팅차량 주행에 따른 기존선 곡선부 궤도의 성능 평가, 한국철도학회 논문집, 한국철도학회, 제8권, 제6호, pp. 550~558
- 이진욱, 이성혁, 김대상, 권병성 (2003). 철도노반의 연약화에 따른 거동특성 연구, 한국철도학회 추계학술대회논문집(II), 한국철도학회, pp. 182~187
- 전상수, 엄기영, 김재민 (2006). 틸팅차량 하중에 의한 레일이음매 하부 노반침하의 수치 해석적 분석의 안정성 검토, 한국방재학회 논문집, 한국방재학회, 제6권, 제4호, pp. 17~24
- 철도청 (1980). 철도토목공사 표준시방서, 철도청령 제4918호, 철도청
- 철도청 (2000). 국유철도건설규칙, 철도청
- 철도청 (2001). 철도설계기준(노반편), 철도청
- 한국철도기술연구원 (2001). 토구조물 최적설계 기술 분야, 한국철도기술연구원
- 한국철도기술연구원 (2005). 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 4차년도 보고서, 한국철도기술연구원
- 한국철도기술연구원 (2006). 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 5차년도 보고서, 한국철도기술연구원
- 한국철도시설공단 (2004). 철도설계편람(토공II), 한국철도시설공단

한상윤, 박남희, 임남형, 강영중 (2006). 궤도 안정성에 대한 장대레일과 체결구의 민감도, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제26권, 제4호, pp. 719~726

鐵道總合技術研究所 (1992). 鐵道構造物等設計 標準

• 同解設 土構造物, 鐵道總合技術研究所

鐵道總合技術研究所 (1997). 鐵道構造物等設計 標準

• 同解設 軌道構造「有道床軌道」(案), 鐵道總合技術研究所

◎ 논문접수일 : 2006년 12월 28일

◎ 심사의뢰일 : 2007년 01월 16일

◎ 심사완료일 : 2007년 03월 13일