

# 틸팅차량 하중에 의한 레일 이음매 하부 노반침하에 대한 수치 해석적 분석

## Numerical Analysis of the Roadbed Settlement beneath Rail Joint Induced by Tilting-Train Loading

전 상 수\* / 엄 기 영\*\* / 김 재 민\*\*\* / 정 두 회\*\*\*\* / 한 성 대\*\*\*\*\*  
Jeon, Sang-Soo / Eum, Gi-Young / Kim, Jae-Min / Jung, Du-Hwoe / Han, Sung Dae

### Abstract

The tilting-train being operated in pre-existing rail road has a different running mechanism compared to currently operated trains. Therefore, it needs to investigate the evaluation of the track performance, the stability of the tilting-train in operating condition, and the stability of the roadbed. In this study, when the tilting train is operated in the rail joint with the allowable velocity limited by the track performance and the stability of the tilting-train, the settlement of the roadbed has been evaluated by using numerical analysis. The loading on the ground surface generated by the operating tilting-train generates the settlement of the roadbed. The settlement induced by the tilting-train loading has been compared to the allowable settlement and the factor of safety defined by the ratio of the allowable settlement to the settlement generated by the applied loading is evaluated.

**key words** : Tilting-Train, Rail Joint, Roadbed, Settlement, Numerical Analysis

### 요 지

기존선에 투입되는 틸팅차량은 기존 차량과는 다른 운행 메커니즘을 가지고 있으므로 안정성을 확보하기 위해서는 궤도부담력 및 주행안정성 검토와 노반의 안정성 검토가 필요하다. 본 연구에서는 레일 이음매 궤도에 대하여 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생하는 노반의 침하량을 수치해석을 통해 검토하였다. 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 노반의 침하량과 허용침하량을 비교하여 노반의 안정성을 검토하였으며, 허용침하량과 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 침하량의 비를 안전율이라 정의하여 안전율을 검토하였다.

**핵심용어** : 틸팅차량, 레일 이음매, 노반, 침하량, 수치해석

### 1. 서 론

2004년 4월 개통된 고속철도는 최고 300km/h의

빠른 속도를 통해 물류비 절감 및 수송 능력 증대로 국가경쟁력을 향상시켰지만, 고속철도를 위한 새로운 궤도 건설에 막대한 시간과 비용이 투자되어 왔으며

\* 정회원 · 인제대학교 공과대학 토목공학과 전임강사 (e-mail: ssj@inje.ac.kr)  
\*\* 한국철도기술연구원 인프라기술개발팀 책임연구원  
\*\*\* 인제대학교 대학원 토목공학과 석사과정  
\*\*\*\* 부경대학교 공과대학 건설공학부 부교수  
\*\*\*\*\* 정회원 · 경남대학교 공과대학 토목공학과 교수

대도시를 중심으로 한 운행으로 지역 간 철도 서비스 격차가 발생하였다.

이에 기존선을 그대로 사용하면서 속도를 향상시킬 수 있는 틸팅차량이 개발되었는데, 틸팅차량은 차체의 자세제어에 의해 승차감의 큰 저하 없이 곡선부를 일반차량보다 빠른 속도로 주행할 수 있는 장점이 있는 차량으로서, 곡선부에서의 운행시간 단축효과가 큰 특징이 있다(한국철도기술연구원, 2001a; 2004). 또한 기존선을 그대로 사용하면서 속도를 향상시킬 수 있으므로 경제적인 효과와 더불어 고속철도 비 수혜지역의 교통편 증진에 기여할 수 있다.

틸팅차량은 기존에 운행 중인 열차와는 운행 메커니즘이 다르기 때문에 안정성을 확보하기 위해서는 기존에 부설되어 있는 궤도의 성능 평가가 선행되어야 하며, 이를 위해 틸팅차량이 기존선을 운행할 경우 궤도부담력과 주행안정성 측면에서 얼마만큼의 속도 향상을 가져 올수 있는지, 또한 가장 속도에 영향을 미치는 요소가 무엇인지에 관한 검토가 이루어졌다(한국철도기술연구원, 2005; 2006a).

하지만 지금까지의 연구에서는 틸팅차량의 궤도부담력과 주행안정성 측면에서의 검토만 이루어졌을 뿐 궤도 하부구조인 노반의 침하에 대한 검토가 이루어지지 않았다. 열차주행에 따라 발생하는 노반의 침하는 궤도틀림이나 열차의 탈선과 같은 대형 사고를 유발할 수 있는 중요한 문제이므로 틸팅차량 주행에 의해 발생하는 궤도부담력에 따른 지반의 거동 및 특성을 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 레일 이음매 궤도에 대하여 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생하는 침하량을 수치 해석을 통해 검토하고 허용침하량과 비교하여 안정성을 검토하였다.

## 2. 노반의 허용침하량

선로에 있어서의 침하 현상은 대부분이 레일에 작용하는 열차하중에 의한 것이다. 이 작용조건을 종래의 궤도이론에서는 차축에 의한 충격과 진동이라고 생각하였으나 근래에 와서는 차륜과 레일의 접촉면에 있어서의 요철에 의해 발생하는 진동이라고 추측되고 있다. 그러므로 선로나 차량의 특성치를 알게 되면 도상의 유동에 의한 침하와 도상자갈의 노반 내 침입에 의한 침하를 계산할 수 있다. 일본의 철도종합기술연구소(RTRI)의 연구결과에 의하면 침하발생의 주원인은 노상의 영향이며 양호한 노상(단일입경이 아닌 사질

토)의 경우 도상침하에 대한 노상침하의 비는 0.13~0.19이나 불량노반(이암, 풍화토 등 점성토)의 경우, 그 비는 1.3~3.1로 노상의 영향이 대단히 크다는 것을 알 수 있다. 또한 불량노반과 양호한 노반별로 구분하여 열차속도에 대한 선로의 침하량을 구해보면 불량노반의 침하는 양호한 노반의 경우에 비하여 4배 가까이 크고 노반이 불량할수록 속도에 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 침하량에 대한 관리를 위하여 설계 시 허용침하량을 산정하여 사용하는데 일반적으로 고속철도 노반의 허용침하 기준은 노반에서의 침하량으로서 통상 일본에서는 그 기준을 2.5mm로 정하고 있다. 허용침하량의 산정은 노상의 안정 및 탈선한계, 승차감 등이 고려된다.

탈선한계에 따른 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 도상발라스트의 압축량이 1mm 정도이므로 안전성 한도의 노반의 침하량은 레일의 허용침하량으로부터 그 값을 뺀 9mm이지만 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, 1997; 한국철도시설공단, 2004).

## 3. 틸팅차량의 궤도부담력 및 주행안정성 검토

### 3.1 틸팅차량 및 궤도 조건

틸팅차량의 축중은 15ton이며 설계속도와 최고운행속도는 각각 200km/h와 180km/h이다. 틸팅차량의 제원과 침목 및 도상 물성은 표 1과 표 2에 나타내었으며, 선형 제원과 캔트는 경부선 상하선에 부설된 캔트를 조사하여 곡선반경 400m, 600m, 800m, 1,000m, 1,200m에 대하여 각 곡선반경별 가장 많이 부설된 캔트를 선정하였고 레일의 제원은 KS50 레일의 제원을 사용하였으며, 레일 이음매에 대하여 검토를 수행하였다.

**표 1. 틸팅차량의 제원**

변수	사용된 값
축중 (ton)	15
속도 (km/h)	200 (설계속도)
	180 (최대운행속도)
차량 유효중심고 (m)	1.686
고정 축거 (m)	2.6
축수 (ea)	24
충격계수	0.5

**표 2. 침목 및 도상 물성**

변수	사용된 값
침목 길이 (m)	2.45
침목 폭 (m)	0.28
침목 간격 (m)	0.58
도상 깊이 (m)	0.30
레일패드 수직 스프링계수 (t/m)	4,750
도상 수직 스프링계수 (t/m)	20,000
노반의 지반반력계수 (t/m <sup>3</sup> )	7,200

### 3.2 궤도부담력 및 주행안정성 검토에 의한 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 열차의 주행속도에 따라 레일에 전달되는 윤중과 횡압은 그 크기에 따라 궤도의 변형을 유발하는 원인이 되고, 열차의 탈선과 같은 대형사고를 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 가장 많이 부설된 캔트를 선정하여 궤도부담력과 주행안정성에 대한 검토가 이루어졌다. 궤도부담력은 레일의 휨 응력, 레일압력, 급격한 횡변위, 체결구 안정성에 관한 검토가 이루어졌으며, 주행안정성은 탈선계수, 윤중감소량, 윤중횡압추정식, 추정 탈선계수비 산정식에 관한 검토가 이루어졌다(한국철도기술연구원, 2005; 2006a).

검토 결과, 레일 이음매에서의 허용속도는 레일압력

에 의해 결정되었으며 각 곡선반경 및 캔트에 대하여 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도는 표 3과 같다(한국철도기술연구원, 2006a).

**표 3. 틸팅차량의 궤도부담력과 주행안정성 검토에 따른 허용속도 (한국철도기술연구원, 2006a)**

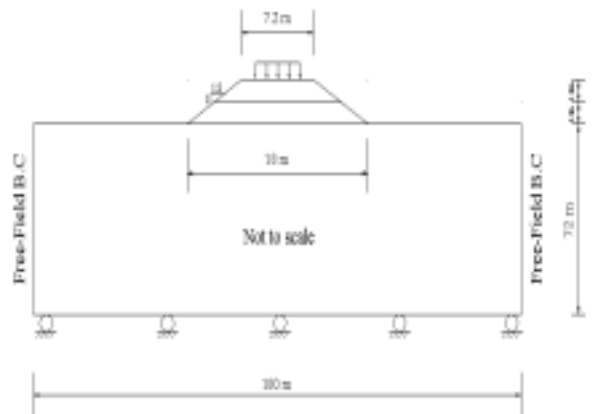
곡선반경, R (m)	캔트, C (mm)	허용속도, V (km/h)
400	140	118
	150	119
600	130	134
	150	135
800	120	145
	140	147
1,000	100	155
	130	156
1,200	100	161
	120	163

## 4. 수치해석

본 연구에서는 틸팅차량의 곡선부 주행에 대한 노반의 안정성 검토를 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 이용해 동적 해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 파괴규준은 탄소성 거동을 보이는 지반에 적합한 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다.

### 4.1 수치해석 조건

그림 1에서는 수치해석 모델의 모식도를 나타내었다. 상하부 노반이 각각 1.5m 높이로 성토된 경우에 대하여 모델링 하였으며 모델링의 범위는 일반적인 단선궤도 폭을 고려하여 폭 7.2m로 하였다(이수형, 2005).



**그림 1. 수치해석 모델 모식도**

노반의 경사는 철도설계기준(철도청, 2001)에 따라 1:1.8로 하였고 원지반의 크기는 반사파에 의한 영향을 고려하여 깊이 72m, 폭 180m로 하였다. 경계조건인 경우 바닥면에 대해서는 수직방향을 구속하였고 양쪽 수직면에 대해서는 파를 흡수하는 경계조건인 Free-Field Boundary Condition을 사용하였다.

동해석의 경우 해석모델의 경계부분에서 파의 반사에 의한 영향이 신중히 고려되어야 하므로 경계조건 문제는 매우 중요하다. 이러한 파의 반사를 해결하기 위한 하나의 방법은 격자망의 크기를 매우 크게 하여 파의 반사로 인한 영향이 해석하고자 하는 부분에 영향을 미치지 않도록 하는 것으로, 이런 경우 격자망이 매우 커지고 격자수가 많아져 해석시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 FLAC에서는 파를 반사하지 않고 흡수하는 경계조건인 Quiet Boundary Condition과 Free-Field Boundary Condition이 있다. 두 경계조건인 차이는 전자는 동적하중이 격자망 내부에 작용하는 경우이고 후자는 동적하중이 격자망 경계에 작용하는 경우(Itasca Consulting Group, Inc., 2002)로 열차하중은 후자에 해당한다. 해석시간은 허용속도에 따라 하중이 재하 되는 주기는 0.057~0.079sec, 하중 재하 시간은 1.378~1.904sec의 범위에 있지만 열차가 지나간 후의 침하 특성을 알아보기 위해 수치해석 시간은 3sec 까지 수행하였다. 재료감쇠비는 2%를 사용하였고 해석에 사용된 지반물성은 선행 연구(이수영, 2005; 한국철도기술연구원, 2001b; 2006b)를 참조하여 결정하였으며 표 4에 나타내었다.

표 4. 지반물성(이수영, 2005; 한국철도 기술연구원, 2001b; 2006b)

구분	상부노반	하부노반	원지반
$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	1.8	1.8	1.8
E (t/m <sup>2</sup> )	8,000	5,000	10,000
$\nu$	0.2	0.3	0.3
c (t/m <sup>2</sup> )	0.3	1.0	0
$\phi$ (°)	32	30	38

#### 4.2 노반압력 모사

본 연구에서는 틸팅차량 하중을 노반압력으로 모사하여 노반면에 재하 하였다. 곡선부에서의 동적 윤중과 레일압력, 침목하면압력을 구하는 과정은 식(1)~(11)과 같으며, 노반압력은 도상내 압력의 분포도를 이용하였다.

#### 4.2.1 곡선부 동적 윤중

동적 윤중은 윤중 정상분과 변동분의 합으로 나타난다. 곡선 통과 시 내외궤의 윤중 정상분은 그림 2에 나타난 바와 같이 차체의 경사를 고려하여 차륜/레일 접촉점을 중심으로 한 모멘트의 합으로부터 구할 수 있다. 이 때 차체 경사에 의한 중심이동에 의해 중력성분의 모멘트 팔이 변화하게 되는데, 차체 경사량은 초과 원심력(켄트부족량,  $C_d$ )에 비례하기 때문에 차량 중심고  $H_G$ 가 유효중심고  $H_G^*$ 까지 상승한 경우와 등가로 간주된다. 따라서 곡선부에서 내외궤 윤중 정상분은 식(1) 및 식(2)로 나타낼 수 있다(左藤吉彦 등, 1987).

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

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

- 여기서,  $P_{sti}$  : 내궤측 윤중 정상분(ton)
- $P_{sto}$  : 외궤측 윤중 정상분(ton)
- $W_0$  : 축중(ton),  $V$  : 속도(km/h)
- $G$  : 궤간(m),  $R$  : 곡선반경(m)
- $C$  : 켄트(m)
- $g$  : 중력가속도(9.8m/s<sup>2</sup>)
- $H_G^*$  : 틸팅차량 유효중심고(m)

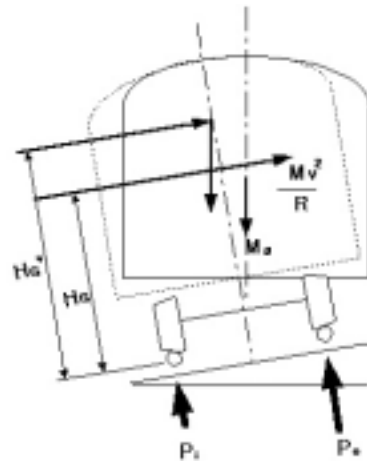


그림 2. 곡선부 윤중변화(左藤吉彦 등, 1987)

내외궤측 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, 속도충격을  $i$ 는  $1 + \alpha(V/100)$ 이며  $\alpha$ 는 충격계수로서 레일 이음매의 경우 0.5를 이용한다(엄주환, 2003). 따라서 곡선부의 내외궤측에 작용하는 윤중의 총합은 식(5) 및 식(6)과 같다.

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

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

#### 4.2.2 레일압력

최대 레일압력은 윤중  $P_{dv}$ 가 침목 직상에 작용하는 경우와 침목과 침목사이 중앙에 작용하는 경우에 대하여 고려한다.

1) 윤중이 침목 직상에 작용할 때

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

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

2) 윤중이 침목 사이 중앙에 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,  $P_{Ri}$ ,  $P_{Ro}$  : 내외궤측 레일압력(ton)

$P_{dvi}$ ,  $P_{dvo}$  : 곡선부 동적 윤중(ton)

$a$  : 침목간격(m)

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

#### 4.2.3 침목하면압력

침목하면압력은 윤중이 침목 직상에 작용할 때와 침목 사이 중앙에 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( $t/m^2$ )이며  $P_{Rimax}$  및

$P_{Romax}$ 는 내외궤측에서 윤중이 침목 직상 및 침목 사이 중앙에 작용할 때의 레일압력(ton) 중 큰 값을 사용하고,  $B$ 와  $L$ 은 침목의 폭(m)과 길이(m)이다.

#### 4.2.4 노반압력

침목 하면에서 노반 표면으로 전해지는 압력은 도상두께가 크게 될수록 작게 된다. 노반압력은 도상내 압력의 분포도(그림 3)를 이용하였으며, 도상내 압력은 침목의 직하부에서 가장 크고 직하부에서 깊이가 깊어질수록, 거리가 멀어질수록 영향이 작아진다.

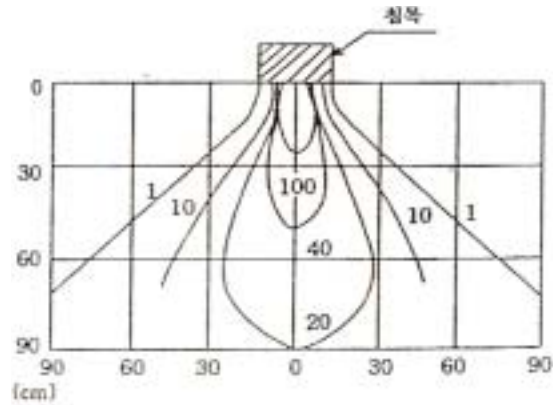


그림 3. 도상내 압력의 분포도(사서범, 2002)

노반압력 모사과정에 사용된 틸팅차량의 축중( $W_0$ ) 및 유효중심고( $H_G^*$ )는 각각 15ton 및 1.686m이며, 중력가속도( $g$ )는  $9.8m/s^2$ , 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.

#### 4.3 하중 재하

열차하중은 임의의 한 지점에서 시간에 따라 일정한 크기와 주기의 하중이 반복되는 정현파의 형태를 가진다(한국철도기술연구원, 2001b). 시간에 대한 정현파를 이용한 하중 재하는 그림 4와 같다.

그림 4에서  $A$ (Amplitude)는 열차 하중에 의해 발생하는 하중의 크기로 본 연구에서는 열차하중을 노반압력으로 모사하여 재하 하였으므로  $A$ 는 노반압력의 크기가 된다.  $T$ 는 주기이며  $t$ 는 시간으로 하중 재하 시간을 의미한다.

정현파를 이용한 하중 재하 형태를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Wave} = \frac{A}{2} \times (1 - \cos 2\pi ft) \quad (12)$$

여기서,  $f$  (frequency) =  $\frac{1}{T}$  이므로

$$\text{Wave} = \frac{A}{2} \times (1 - \cos \frac{2\pi t}{T}) \quad (13)$$

여기서, A : 진폭(Amplitude)

t : 시간(Time)

T : 주기(Period)

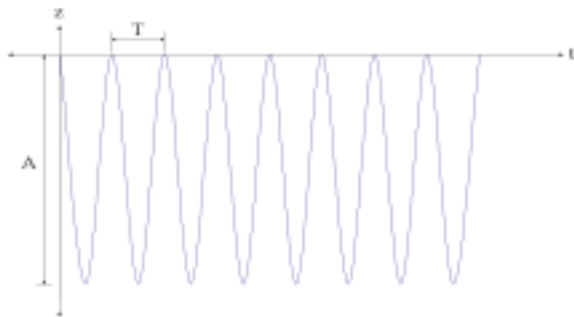
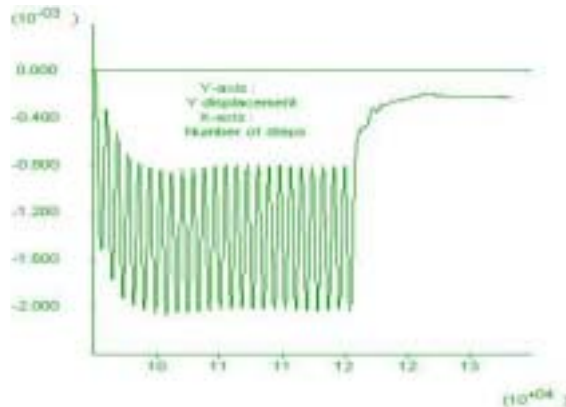


그림 4. 정현파 하중

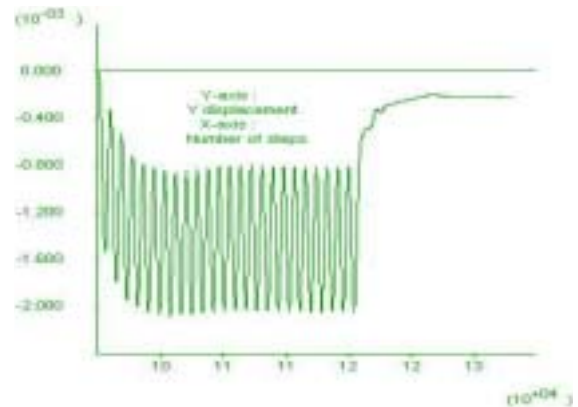
#### 4.4 레일 이음매 하부 노반 침하량 분석

기존 경부선을 대상으로 곡선반경(R) 400m, 600m, 800m, 1,000m, 1,200m에서 각 곡선반경별 가장 많이 부설된 칸트에 대하여 궤도부담력과 주행 안정성 검토에 의한 레일 이음매에서의 허용속도는 레일압력에 의해 결정되었으며, 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우에 대하여 레일 이음매 하부 노반의 안정성을 수치해석을 통해 검토하였다. 그림 5는 곡선반경 400m와 800m에서의 수치해석 결과이며 표 5와 그림 6은 각 구간별 침하량과 안전율을 나타내었다.

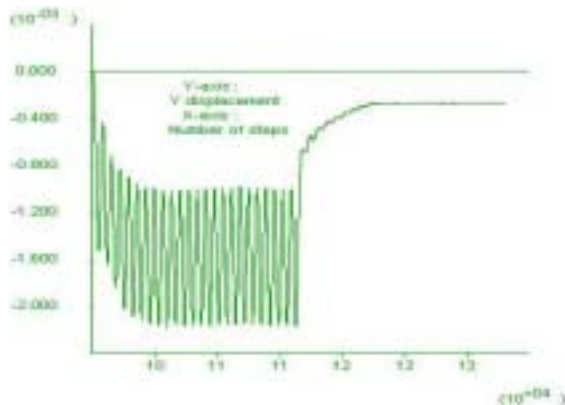
그림 5(a)에서, 하중이 처음 재하 됨에 따라 약 1.6mm의 즉시 침하가 발생하였고 하중이 반복적으로 재하 됨에 따라 약 2.1mm의 최대 침하량이 발생하였다. 정현파 하중 재하에 따라 침하가 발생하고 복원되는 과정이 반복됨을 볼 수 있으며, 하중이 제거된 후 발생했던 침하가 복원되는 것을 알 수 있다. 그림 5(b), 5(c), 5(d) 또한 전체적인 침하의 특성은 같으며 침하량의 크기에서만 차이가 있다.



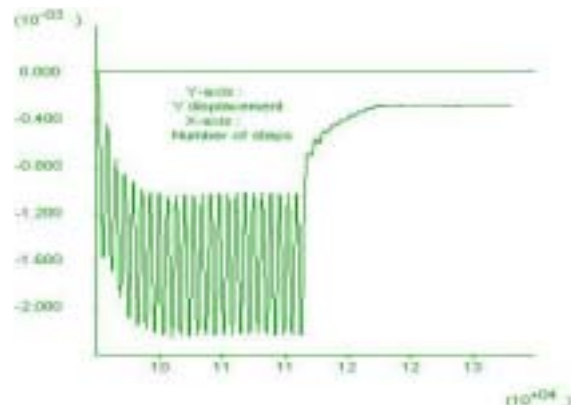
(a) 곡선반경 400m, 칸트 140mm



(b) 곡선반경 400m, 칸트 150mm

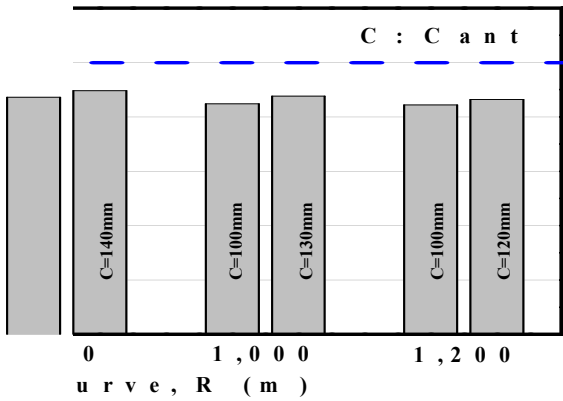


(c) 곡선반경 800m, 칸트 120mm



(d) 곡선반경 800m, 칸트 140mm

그림 5. 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 노반의 침하



(a) 침하량

(b) 안전율

그림 6. 곡선반경과 캔트에 따른 침하량과 안전율

표 5. 곡선반경과 캔트에 따른 침하량과 안전율

곡선반경 (m)	캔트 (mm)	허용속도 (km/h)	침하량 (mm)	안전율 (FS)
400	140	118	2.07	1.21
	150	119	2.09	1.20
600	130	134	2.17	1.15
	150	135	2.22	1.13
800	120	145	2.18	1.15
	140	147	2.24	1.12
1,000	100	155	2.12	1.18
	130	156	2.19	1.14
1,200	100	161	2.11	1.18
	120	163	2.16	1.16

※안전율 = 허용침하량 / 틸팅차량 하중에 의한 침하량

그림 5(a)에서의 최대 침하량은 2.07mm로 그림 5(b)의 최대 침하량인 2.09mm보다 0.02mm 작았으며, 그림 5(c)의 최대 침하량은 2.18mm로 그림 5(d)의 최대 침하량인 2.24mm보다 0.06mm 작게 나타났다.

위의 결과에서, 같은 곡선반경에서는 캔트가 클수록 침하가 더 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 이것은 캔트가 커질수록 허용속도가 증가하고, 허용속도가 커질수록 동적 윤중 및 레일압력 그리고 노반압력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

각 곡선반경별 대표적인 캔트에 대해 수치해석을 수행한 결과, 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생한 모든 침하량의 크기는 2.07~2.24mm의 범위에 있으며, 전 구간에서 허용침하량 2.5mm 이하이므로 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 노반의 침하량 측면에서 안

전한 것으로 나타났다. 허용침하량 2.5mm를 기준으로 틸팅차량 하중에 의해 발생하는 침하량의 비를 안전율(FS)이라 정의하면, 각 구간별 안전율은 1.12~1.21의 범위에 있으며 레일 이음매의 경우 허용속도보다 12% 이상 더 안전한 것으로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 경부선 상·하선을 대상으로 곡선반경 400m, 600m, 800m, 1,000m, 1,200m에서 각 곡선반경별 대표적인 캔트에 대하여 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생하는 침하량을 유한차분해석 프로그램인 FLAC<sup>2D</sup>를 통해 검토하였다.

틸팅차량의 궤도부담력에 의해 발생한 침하량과 허용침하량 2.5mm를 비교하고, 허용침하량 2.5mm를 기준으로 틸팅차량 하중에 의해 발생한 침하량의 비를 안전율(FS)이라 정의하여 안전율을 검토하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 틸팅차량의 궤도부담력 및 주행안정성 검토에 의한 허용속도는 레일압력에 의해 산정되었고, 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우 발생한 모든 침하량의 크기는 2.07~2.24mm의 범위이며, 전 구간에서 허용침하량 2.5mm 이하에 있다.
2. 같은 곡선반경에서는 캔트가 클수록 침하가 더 크게 발생하였으며, 이것은 캔트가 커질수록 허용속도가 증가하고, 허용속도가 커질수록 동적 윤중 및 레일압력 그리고 노반압력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.
3. 허용침하량 2.5mm를 기준으로 틸팅차량 하중에

의해 발생한 침하량의 비를 안전율(FS)이라 정의하면, 각 구간별 안전율은 1.12~1.21의 범위에 있으며 레일 이음매의 경우 허용속도보다 12% 이상 더 안전한 것으로 나타났다.

이상의 결론으로부터 레일 이음매 궤도에 대하여 틸팅차량이 궤도부담력 및 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행될 경우 노반의 침하량 측면에서 안전한 것으로 판단된다.

본 연구는 이론적인 단계이므로 앞으로 제시된 수치 해석 결과를 정량적으로 활용하기 위해서는 현장계측 및 실험 재해시험 등의 연구를 통한 검증이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년도 인제대학교 학술연구조성비 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 사서범 (2002). 개정판 선로공학, 열과알
- 엄기영, 엄주환, 유영화, 최정호 (2004). 틸팅차량의 기존선 곡선부 주행안정성 평가, 한국철도학회 논문집, 한국철도학회, 제7권, 제4호, pp. 367~373
- 엄주환, 엄기영, 양신추, 신승권 (2005). 틸팅차량 주행에 따른 기존선 곡선부 궤도의 성능 평가, 한국철도학회 논문집, 한국철도학회, 제8권, 제6호, pp. 550~558
- 엄주환, 유영화, 엄기영 (2003). 기존선 궤도의 충격계수 산정에 관한 연구, 한국철도학회 논문집, 한국철도학회, 제6권, 제4호, pp. 239~245
- 이수형 (2005). 수치해석을 통한 콘크리트 궤도 침하 감소 목적의 말뚝기초 설치 효과 평가, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제21권, 제10호, pp. 73~83
- 철도청 (2001). 철도설계기준(노반편), 철도청
- 한국철도기술연구원 (2001a). 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발, 2단계 2차년도 보고서, 한국철도기술연구원
- 한국철도기술연구원 (2001b). 토구조물 최적설계 기술분야, 한국철도기술연구원
- 한국철도기술연구원 (2004). 틸팅시스템 실용기술개발, 3차년도보고서, 한국철도기술연구원
- 한국철도기술연구원 (2005). 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 4차년도 보고서, 한국철도기술연구원
- 한국철도기술연구원 (2006a). 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발, 5차년도 보고서, 한국철도기술연구원
- 한국철도기술연구원 (2006b). 분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안 연구, 5차년도 보고서, 한국철도기술연구원
- 한국철도시설공단 (2004). 철도설계편람(토공 II), 한국철도시설공단
- 左藤吉彦, 梅原 利之 (1987). 線路工學, 日本鐵道施設協會
- 鐵道總合技術研究所 (1997). 鐵道構造物等設計 標準・同解説 軌道構造「有道床軌道」(案), 鐵道總合技術研究所
- Itasca Consulting Group, Inc. (2002). *FLAC<sup>2D</sup> Manual: Optional Features*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA

◎ 논문접수일 : 2006년 10월 31일

◎ 심사의뢰일 : 2006년 10월 31일

◎ 심사완료일 : 2006년 11월 28일