

# 틸팅차량의 곡선부 운행시 수치해석을 이용한 노반거동 평가

## Evaluation of the Roadbed Behavior During Tilting-train Operation in Curved Track Using Numerical Analysis

전 상 수<sup>1</sup> Jeon, Sang-Soo

엄 기 영<sup>2</sup> Eum, Gi-Young

김 재 민<sup>3</sup> Kim, Jae-Min

### Abstract

The tilting-train is very attractive to the railroad users in the world because it runs with high speed in curved track using pre-existing infrastructure. The tilting-train has a unique allowable speed and mechanism especially in curved track. Therefore, it should be evaluated in terms of the stability of the train operation and roadbed. In this study, when the tilting-train is being operated with the allowable speed, the behavior of the roadbed is evaluated by examining the settlement and bearing capacity of the roadbed. Additionally, the stability of the roadbed is estimated in the condition of soft roadbed influenced by the weather effects and cyclic train loading. The numerical results show that the roadbed settlements satisfy the allowable settlement when Young's moduli of the upper roadbed and in-situ soil are more than 2,300 t/m<sup>2</sup> and 3,300 t/m<sup>2</sup>, respectively, in the continuous welded rail (CWR) and 3,800 t/m<sup>2</sup> and 4,600 t/m<sup>2</sup>, respectively, in the rail joint.

### 요 지

틸팅차량은 기존의 하부구조를 최대한 활용하여 효과적으로 고속서비스를 제공할 수 있다는 점에서 세계 여러 철도 운영자들의 높은 호응을 받고 있지만 기존에 운행 중인 차량과는 차량의 성능뿐 아니라 곡선부의 주행속도와 통과 매커니즘 등이 다르기 때문에 운행 및 노반의 안정성 평가가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행할 경우 수치해석을 통하여 침하량과 지지력 측면에서 노반의 거동을 분석하였고 기후변화 및 열차의 반복하중으로 인해 연약해진 노반의 안정성 검토를 수행하였다. 수치해석 결과, 상부노반 및 원지반의 탄성계수가 장대레일의 경우 2,300t/m<sup>2</sup> 및 3,300t/m<sup>2</sup> 이상, 레일이음매의 경우 3,800t/m<sup>2</sup> 및 4,600t/m<sup>2</sup> 이상일 때 노반의 침하량은 허용침하량 값을 만족한다.

**Keywords** : Bearing capacity, Numerical analysis, Roadbed, Settlement, Tilting-train

### 1. 서 론

철도는 수송체계에서 주요한 위치를 점하고 있음에

도 불구하고 20세기 중반이후부터 자동차와 항공 산업의 발달로 이 분야에 대한 투자가 집중되면서 철도시설은 상대적으로 낙후되어 왔다. 그러나 최근에는 대량

1 정희원, 인제대학교 토목공학과 전임강사 (Member, Senior Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Inje Univ., ssj@inje.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 한국철도기술연구원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Railroad Research Institute (KRII))

3 인제대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Inje Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

수송, 안전성, 에너지 효율성 및 환경오염방지 측면 등에서 탁월한 장점을 갖는 철도의 역할과 중요성에 대한 인식이 새롭게 부각되고 있다(Esveld, 2002). 이와 같은 상황에 부응하여 타 교통수단에 대한 경쟁력을 높이기 위해서는 철도의 고속화와 이에 따른 안정성이 확보되어야 한다.

기존선의 속도향상을 위해 개발된 틸팅차량은 곡선부 주행시 차체가 내측으로 기울어짐으로써 일반차량보다 곡선부를 빠른 속도로 주행할 수 있다. 기존의 하부구조를 최대한 활용하여 효과적으로 고속서비스를 제공할 수 있다는 점에서 세계 여러 철도 운영자들의 높은 호응을 받고 있다. 하지만 기존에 운행 중인 차량과는 차량의 성능뿐 아니라 곡선부의 주행속도와 통과 메커니즘 등이 다르기 때문에 안정성을 확보하기 위해서는 기존에 부설되어 있는 궤도의 성능 평가와 궤도하부 구조인 노반의 성능 평가가 이루어져야 한다. 현재 틸팅차량이 기존선에 운행될 경우 궤도부담력과 주행 안정성 검토를 통해 허용속도가 산정되었다(한국철도기술연구원, 2005; 2006a).

열차주행에 따라 발생하는 노반의 침하하는 궤도를림이나 열차의 탈선 등을 유발할 수 있으므로 틸팅차량주행에 의해 발생하는 궤도부담력에 따른 노반의 거동 및 특성을 분석할 필요가 있으며, 열차의 반복하중 및 기후변화로 인한 노반의 연약화로 지반의 강성이 감소할 경우의 노반 안정성 검토가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 수치해석을 통해 틸팅차량이 궤도부담력 및 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생하는 노반의 침하량 및 지지력을 검토하고 노반의 허용침하량 및 허용지지력과 비교하였다. 또한, 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수를 변화시켜 지반 강성 변화에 따른 노반의 침하특성을 검토하였다.

## 2. 철도노반의 특성

철도노반은 열차의 안전한 주행을 확보하기 위하여 궤도를 견고하게 지지하고 궤도에 대하여 적당한 탄성을 부여하면서 동시에 기초지반의 연약화를 방지하고 열차하중을 기초지반으로 분산·전달해야 한다(건설교통부, 2004). 열차 통과 시 열차 하중 및 진동은 레일로부터 침묵, 도상을 거쳐 최종적으로는 노반에 전달된다. 따라서 노반은 궤도의 기초라 할 수 있으나 일반 구조물

표 1. 흙노반 재료의 적합 조건(철도청, 2001)

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

의 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. 철도노반은 분니 발생이 적고 도상의 관입 등 노반 표면의 파괴 및 노반 자체의 변형이 작으며 기초지반에 전달되는 하중이 지지력 이하가 되도록 분산·전달할 수 있어야 한다. 노반은 양질의 자연토 등의 재료로서 다짐하여 충분한 지지력을 가진 균일한 층이어야 하며, 일반 국철의 경우 상부노반으로 흙노반을 사용하고 고속철도의 경우 흙노반과 강화노반을 사용한다.

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 사용하고 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 설치해야 한다. 배수층의 두께는 150mm로 하고 입도 배합이 좋으며 경제적으로 입수가 용이하고 필터 효과가 있는 하천모래 등을 이용한다. 부직포 등의 지오택스타일로 이용하는 경우에는 내구성 등을 충분히 검토하여야 한다(철도청, 2001).

## 3. 노반의 허용 침하 및 지지력 기준

### 3.1 허용침하 기준

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 유동

에 의한 침하와 도상자갈의 노반 내 침입에 의한 침하를 계산할 수 있다. 일본의 철도총합기술연구소(RTRI)의 연구결과에 의하면 침하발생의 주원인은 노반의 영향이며 양호한 노반(단일입경이 아닌 사질토)의 경우 도상침하에 대한 노반침하의 비는 0.13~0.19이나 불량노반(이암, 풍화토 등 점성토)의 경우, 그 비는 1.3~3.1로 노반의 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 허용침하량의 산정은 노반의 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 도상 발라스트의 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 2.5mm

를 사용하고 있다(鐵道總合技術研究所, 1992; 한국철도시설공단, 2004).

### 3.2 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. 양호한 노반 상태에 대해서는 허용지지력 3.0kg/cm<sup>2</sup>를, 보통인 경우는 2.4kg/cm<sup>2</sup>를 적용하며 불량한 노반에 대해서는 구체적인 장소를 지정하여 관리하고 허용지지력 1.5kg/cm<sup>2</sup>를 적용한다(한국철도기술연구원, 2005). 본 연구에서는 보통의 노반 상태에 대한 허용지지력인 2.4kg/cm<sup>2</sup>를 적용하였다.

## 4. 틸팅차량의 궤도부담력 및 주행안정성 검토

### 4.1 틸팅차량 및 궤도조건

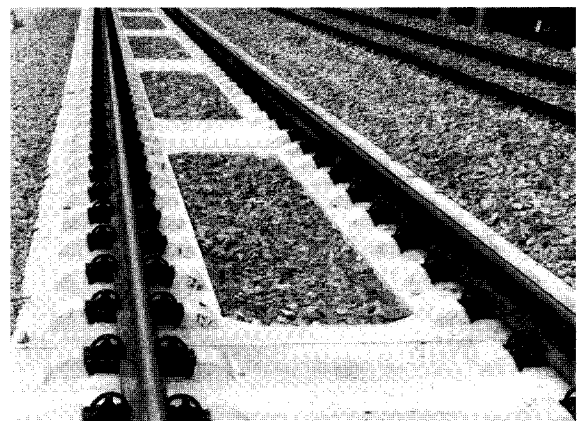
틸팅차량의 궤도부담력과 주행안정성 검토는 기존 경부선을 대상으로 각 곡선반경별 대표적인 캔트를 선정하여 장대레일과 레일이음매 궤도를 구분하여 수행하였다.

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

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



(a) 레일이음매 궤도



(b) 장대레일 궤도

그림 1. 레일이음매와 장대레일 궤도

철도에 있어서 레일의 이음매(그림 1(a))는 최대 취약 부위 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, 궤도파괴를 가속하고 있어 현대철도에서는 이음매를 용접하여 강성을 동일하게 만든 장대레일을 사용하고 있는 실정이다(김두환 등, 2001).

장대레일(그림 1(b))은 기존 레일을 연속적으로 용접하여 이음매를 제거한 200m 이상의 레일로 궤도보수주기 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 유발

표 3. 틸팅차량의 제원

변 수	사용된 값
축중(ton)	15
속도(km/h)	200(설계속도)
	180(최대운행속도)
차량유효중심고(m)	1.686
충격계수	0.3(장대레일)
	0.5(레일이음매)

표 4. 침목 및 도상 조건

변 수	사용된 값
침목 종류	PC 침목 7호
침목 길이(m)	2.45
침목하부 폭(m)	0.28
침목높이(m)	0.20
침목 간격(m)	0.58
도상 깊이(m)	0.30

표 5. 선형 조건

변 수	사용된 값
궤간(m)	1.435
캔트(mm)	100, 120, 130, 140, 150
곡선반경(m)	400, 600, 800, 1,000, 1,200

표 6. 스프링계수 및 지반반력계수

변 수	사용된 값
레일패드 수직 스프링계수(t/m)	4,750
도상 수직 스프링계수(t/m)	20,000
노반의 지반반력계수(t/m <sup>3</sup> )	7,200

되어 궤도 횡방향 및 수직방향으로의 좌굴이 발생되는 문제를 야기시킬 수 있다(한상윤 등, 2006).

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

틸팅차량의 축중은 15ton이고 설계속도 및 최대운행속도는 각각 200km/h 및 180km/h이며 레일의 제원은 KS50 레일을 사용하였고 틸팅차량의 제원과 침목 및 도상 조건은 표 3과 표 4에 나타내었으며 선형조건은 표 5, 스프링계수 및 지반반력계수는 표 6에 나타내었다.

#### 4.2 궤도부담력 및 주행안정성 검토에 의한 허용속도 산정

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 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 이루어졌다. 궤도부담력은 레일의 휨 응력, 레일압력, 급격한 횡변위, 체결구 안정성에 관한 검토가 이루어졌으며, 주행안정성은 탈선계수, 윤중감소량, 윤중 횡압추정식, 추정 탈선계수 비 산정식에 관한 검토가 이루어졌다. 검토 결과, 장대레일에서의 허용속도는 레일의 휨 응력에 의해, 레일이음매에서의 허용속도는 레일압력에 의해 결정되었다. 각 곡선반경 및 캔트에 대하여 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도는 표 7에 나타내었다. (한국철도기술연구원, 2006a). 그림 2에서 곡선반경이 증가할수록 허용속도가 증가하는 경향을 볼 수 있는데,

표 7. 틸팅차량의 궤도부담력과 주행안정성 검토에 따른 허용속도 (한국철도기술연구원, 2006a)

곡선반경 (m)	캔트 (mm)	허용속도 (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

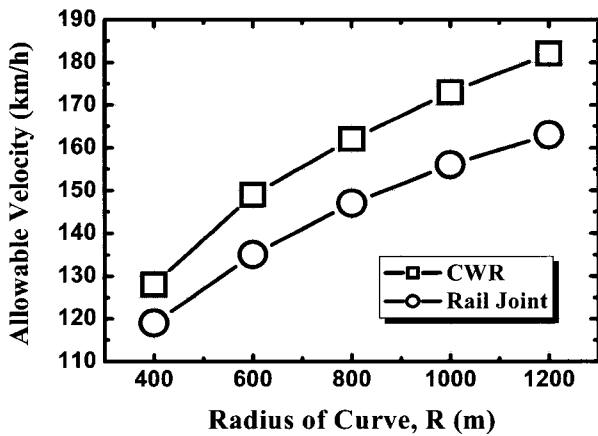


그림 2. 곡선반경에 따른 허용속도

그것은 곡선반경이 증가할수록 궤도가 부담하는 힘, 즉 궤도부담력이 감소하기 때문이다.

## 5. 수치해석

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

### 5.1 수치해석 조건

그림 3에서는 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. 노반의 경사는 1:1.8로

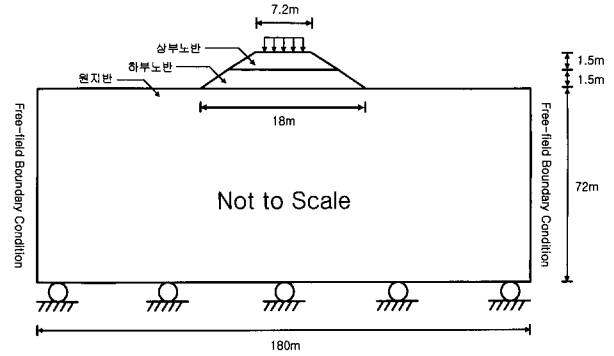


그림 3. 수치해석 모델 모식도

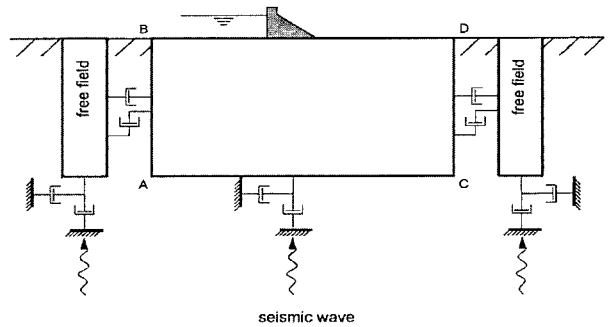


그림 4. Free-field 경계조건 개념도(Itasca, 2002)

하였고 원지반의 크기는 반사파에 의한 영향을 고려하여 깊이 72m, 폭 180m로 하였다. 경계조건의 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 Condition을 적용할 수 있다. 두 경계조건의 차이는 전자는 동적하중이 격자망 내부에 작용하는 경우이고 후자는 동적하중이 격자망 경계에 작용하는 경우(Itasca, 2002)로 열차하중은 후자에 해당한다. 그림 4는 Free-field 경계조건의 개념도를 나타내었다. 해석시간은 허용속도에 따라 하중재하 주기는 장대레일의 경우 0.051~0.074sec, 레일이음매의 경우 0.057~0.079sec이며 하중재하 시간은 장대레일의 경우

표 8. 지반물성(이수형 2006; 한국철도기술연구원, 2001; 2006b)

구분	상부노반	하부노반	원지반
단위중량(t/m <sup>3</sup> )	1.8	1.8	1.8
탄성계수(t/m <sup>2</sup> )	8,000	6,000	10,000
포아송비	0.3	0.3	0.3
점착력(t/m <sup>2</sup> )	1	1	1
내부마찰각(°)	30	30	30

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 8과 같다. 물성치의 산정은 현장계측을 통하여 이루어져야 하지만 철도노반의 특성상 그 범위가 매우 광범위하므로 특정 구간을 선정하여 물성치를 산정하기에는 무리가 있으며, 틸팅차량이 기존선에 투입될 예정이므로 지반의 물성은 선행연구(이수형, 2006; 한국철도기술연구원, 2001; 2006b)를 참조하여 일반적으로 사용되는 값으로 산정하였다.

## 5.2 틸팅차량 하중 모사

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

### 5.2.1 곡선부 동적운중

곡선부에서의 동적운중은 곡선부 운중 정상분과 운중 변동분의 합으로 나타난다. 곡선 통과시 내외궤의 운중 정상분은 차체의 경사를 고려하여 차륜/레일 접촉점을 중심으로 한 모멘트의 합으로부터 구할 수 있다. 이때 차체 경사에 의한 중심이동에 의한 중력성분의 모멘트 팔이 변화하게 되는데, 차체 경사량은 초과 원심력(캔트부족량, C<sub>d</sub>)에 비례하기 때문에 차량중심고 H<sub>G</sub>가 유효중심고 H<sub>G</sub><sup>\*</sup>까지 상승한 경우와 등가로 간주된다. 따라서 곡선부에서 내외궤 운중 정상분은 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있다(左藤吉彦 등, 1987).

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

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

여기서, P<sub>sti</sub> : 내궤측 운중 정상분(ton)

P<sub>sto</sub> : 외궤측 운중 정상분(ton)

W<sub>0</sub> : 정적 축중(ton), V : 속도(km/h)

G : 궤간(m), C : 캔트(m)

R : 캔트(m), g : 중력가속도(9.8m/s<sup>2</sup>)

H<sub>G</sub><sup>\*</sup> : 틸팅차량 유효중심고(m)

내외궤측 운중의 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, 속도충격율 i는 1+α(V/100)이며 α는 충격계수로서 장대레일의 경우 0.3, 레일이음매의 경우 0.5를 사용한다. 따라서 곡선부의 내외궤측에 작용하는 운중의 총합은 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

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

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

### 5.2.2 레일압력

최대 레일압력은 운중 P<sub>dy</sub>가 침목 직상에 작용하는 경우와 침목과 침목사이 중앙에 작용하는 경우에 대하여 고려한다.

1) 운중이 침목 직상에 작용할 때

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

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

2) 운중이 침목과 침목 사이 중앙에 작용할 때

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

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

여기서, P<sub>Ri</sub>, P<sub>Ro</sub> : 내외궤측 레일압력(ton)

P<sub>dyi</sub>, P<sub>dyo</sub> : 내외궤측 곡선부 동적운중(ton)

a : 침목간격(m)

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

### 5.2.3 침목하면압력

침목하면압력은 윤중이 침목 직상에 작용할 때와 침목 사이 중앙에 작용할 때의 레일압력 중 큰 값에 대하여 고려한다.

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

여기서  $P_t$ 는 침목하면압력( $t/m^2$ )이며  $P_{R_{\max}}$  및  $P_{R_{\max}}$ 는 내외궤측에서 윤중이 침목 직상 및 침목 사이 중앙에 작용할 때의 레일압력(ton) 중 큰 값을 사용하고, B와 L은 침목의 폭(m)과 길이(m)이다.

### 5.2.4 노반압력

침목하면에서 노반면으로 전해지는 압력은 도상두께가 클수록 작아진다. 노반압력은 도상내 압력의 분포도(그림 5)를 이용하였으며, 도상내 압력은 침목의 직하부에서 가장 크고 직하부에서 깊이가 깊어질수록, 거리가 멀어질수록 작아진다.

틸팅차량 하중 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. 곡선반경과 캔트는 각 구간마다 달라지는 변수이며 속도(V)는 각 곡선반경과 캔트에서 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도이다.

### 5.3 하중 재하

본 연구에서는 노반압력으로 모사된 틸팅차량 하중을 정현파를 이용해 노반면에 재하 하였다. 시간에 대한 정현파를 이용한 하중재하는 그림 6과 같다(한국철도기

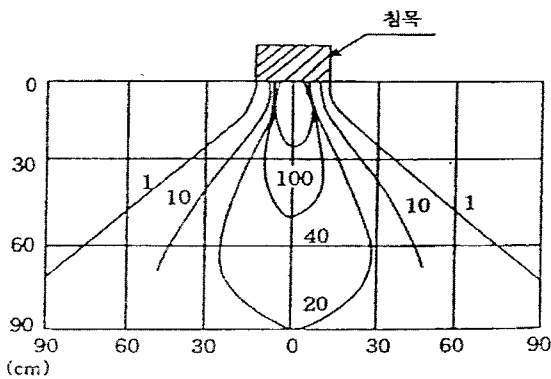


그림 5. 도상내 압력의 분포도(사서범, 2002)

술연구원, 2001).

그림 6에서 A(Amplitude)는 열차 하중에 의해 발생하는 하중의 크기로 본 연구에서는 틸팅차량 하중을 노반압력으로 모사하여 재하 하였으므로 A는 노반압력의 크기가 된다. T는 주기이며 t는 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)

f : 빈도(frequency)

t : 시간(Time)

T : 주기(Period)

## 6. 틸팅차량 주행에 따른 노반의 침하량 및 지지력

### 6.1 침하량

기존 경부선을 대상으로 곡선반경 400m, 600m, 800m, 1,000m, 1,200m에서 각 곡선반경별 가장 많이 부설된 캔트에 대하여 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의한 허용속도가 산정되었다. 장대레일에서의 허용속도는 레일의 휨 응력에 의해, 레일이음매에서의 허용속도는 레일압력에 의해 결정되었다. 따라서, 틸팅차량이 허용속도로 운행될 경우에 대하여 노반의 침하량을 수치해석을 통해 검토하였다.

그림 7은 침하량이 가장 크게 나타난 곡선반경 800m, 캔트 140mm에서 장대레일과 레일이음매 하부 노반의

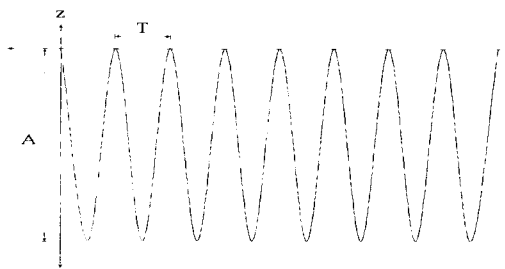
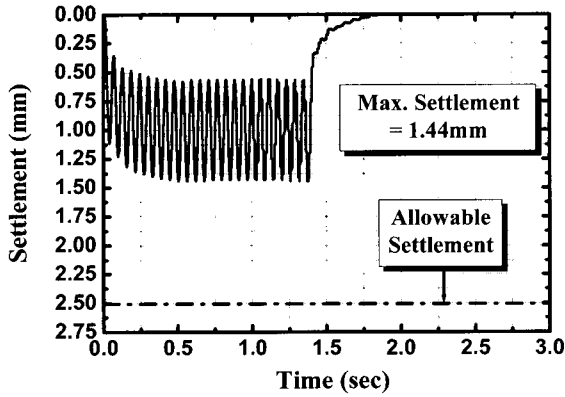


그림 6. 정현파 하중(한국철도기술연구원, 2001)

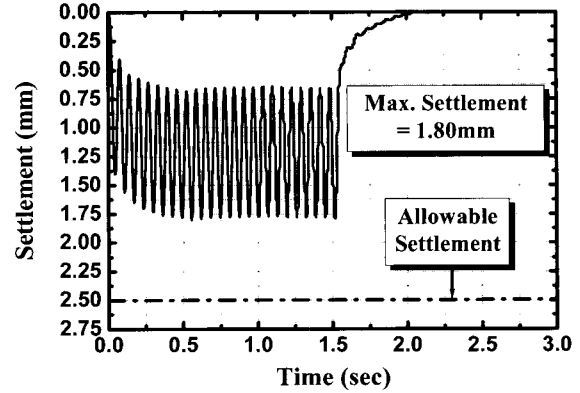
침하거동을 나타낸다. 그림 7(a)는 곡선반경 800m, 캔트 140mm에서 장대레일 하부 노반의 침하거동으로, 하중이 처음 재하 됨에 따라 약 1.13mm의 즉시 침하가 발생하였고 하중이 반복적으로 재하 됨에 따라 1.44mm의 최대 침하량이 발생하였다. 정현파 하중재하에 따라 침하가 발생하고 복원되는 과정이 반복됨을 볼 수 있으며,

하중이 제거된 후 발생했던 침하가 복원되는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 곡선반경 800m, 캔트 140mm에서 레일이음매 하부 노반의 침하거동으로 전체적인 침하의 특성은 그림 7(a)와 같으며 침하량의 크기에서만 차이가 있다.

표 9와 그림 8은 곡선반경과 캔트, 허용속도에 따른

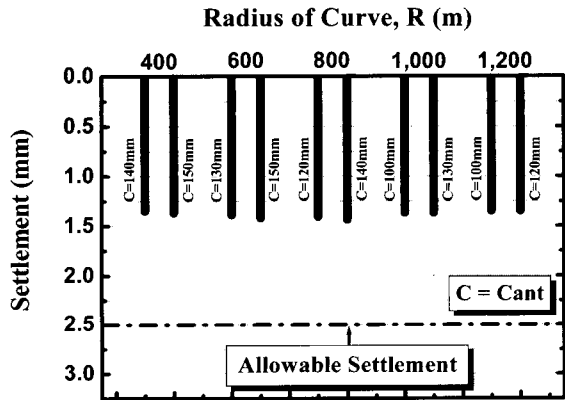


(a) 장대레일

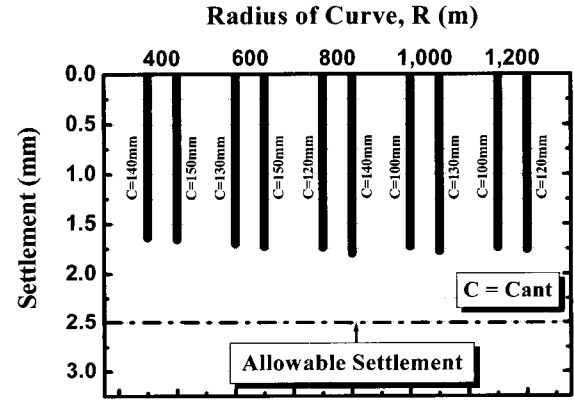


(b) 레일이음매

그림 7. 틸팅차량 하중에 의한 노반의 침하거동(곡선반경 800m, 캔트 140mm)(전상수 등, 2006; 2007)



(a) 장대레일



(b) 레일이음매

그림 8. 곡선반경과 캔트, 허용속도에 따른 노반의 침하량(전상수 등, 2007)

표 9. 곡선반경과 캔트, 허용속도에 따른 노반의 침하량

곡선반경 (m)	캔트 (mm)	허용속도(km/h)		침하량(mm)	
		장대레일	레일이음매	장대레일	레일이음매
400	140	127	118	1.35	1.64
	150	128	119	1.37	1.66
600	130	146	134	1.39	1.70
	150	149	135	1.42	1.73
800	120	159	145	1.41	1.74
	140	162	147	1.44	1.80
1,000	100	168	155	1.37	1.73
	130	173	156	1.37	1.78
1,200	100	177	161	1.35	1.74
	120	182	163	1.35	1.76



노반의 침하량을 나타낸다. 표 9와 그림 8에서 곡선반경과 캔트에 따른 침하량을 보면 같은 곡선반경에서는 캔트가 클수록 침하가 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 캔트가 커질수록 허용속도가 증가하고, 허용속도가 커질수록 동적윤중 및 레일압력 그리고 노반압력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

각 곡선반경별 대표적인 캔트에 대해 탈팅차량이 궤도부담력 및 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행할 경우 발생한 노반의 침하량은 장대레일의 경우 1.35~1.44mm로 허용침하량 2.5mm의 약 50~60%, 레일이음매의 경우 1.64~1.80mm로 허용침하량 2.5mm의 약 60~70%로 나타났다. 따라서 탈팅차량이 허용속도로 운행될 경우 노반의 침하량 측면에서 안전한 것으로 판단된다.

## 6.2 지지력

침하량 검토에서 침하량이 가장 크게 나타난 곡선반경 800m, 캔트 140mm에 대하여 장대레일과 레일이음매 하부 노반의 응력을 검토하였고 노반의 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kg/cm<sup>2</sup>과 비교하였다. 그림 9는 곡선반경 800m, 캔트 140mm에서 장대레일과 레일이음매 하부 노반의 응력을 나타낸다.

곡선반경 800m, 캔트 140mm에서 장대레일과 레일이음매 하부 노반의 응력을 검토한 결과 장대레일의 경우 0.24kg/cm<sup>2</sup>, 레일이음매의 경우 0.30kg/cm<sup>2</sup>로 노반의 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kg/cm<sup>2</sup>의 약 10% 및 12%로 나타났다. 따라서 탈팅차량이 허용속도로 운행될 경우 노반의 지지력 측면에서 안전한 것으로 판단된다.

## 7. 지반강성에 따른 노반의 침하특성

탈팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에서 산정된 허용속도로 운행될 경우 장대레일과 레일이음매 하부 노반의 침하량과 지지력을 검토한 결과 곡선반경 800m, 캔트 140mm에서 최대 침하량과 응력이 발생하였으며 허용침하량 및 허용지지력 이하로 나타나 노반이 안전함을 알 수 있다.

궤도를 지지하는 노반은 동절기 동결융해에 의한 노반의 팽창현상이나 열차의 반복하중 등에 의한 노반의 지지력 감소 및 연약화와 지반의 특성상 상·하부 노반 및 원지반의 강성이 모든 구간에서 균일하다고 보기 힘든 점을 고려하면 지반의 강성이 약할 경우에 대한 노반의 안정성을 고려할 필요가 있다. 따라서 최대 침하량이 발생한 곡선반경 800m, 캔트 140mm에 대하여 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수를 변화시켜 지반 강성 변화에 따른 노반의 침하특성을 검토하였다. 탄성계수의 변화 범위는 상부노반의 경우 3,000~8,000t/m<sup>2</sup>, 하부노반은 3,000~6,000t/m<sup>2</sup>, 원지반은 3,000~10,000t/m<sup>2</sup>로 1,000t/m<sup>2</sup> 단위로 감소시켜 탄성계수 변화에 따른 침하량의 변화를 검토하였다. 그림 10 및 그림 11은 각각 장대레일 및 레일이음매에서 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수 변화에 따른 노반의 침하량 변화를 나타내며, 탄성계수가 감소할수록 노반의 침하량이 증가하는 것을 알 수 있다. 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수 변화와 노반의 침하량 변화에 대한 관계식을 회귀분석을 이용해 도출하였고, 회귀분석 결과 R<sup>2</sup>=0.99로 매우 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

탄성계수 변화와 침하량 변화에 대한 관계식을 이용

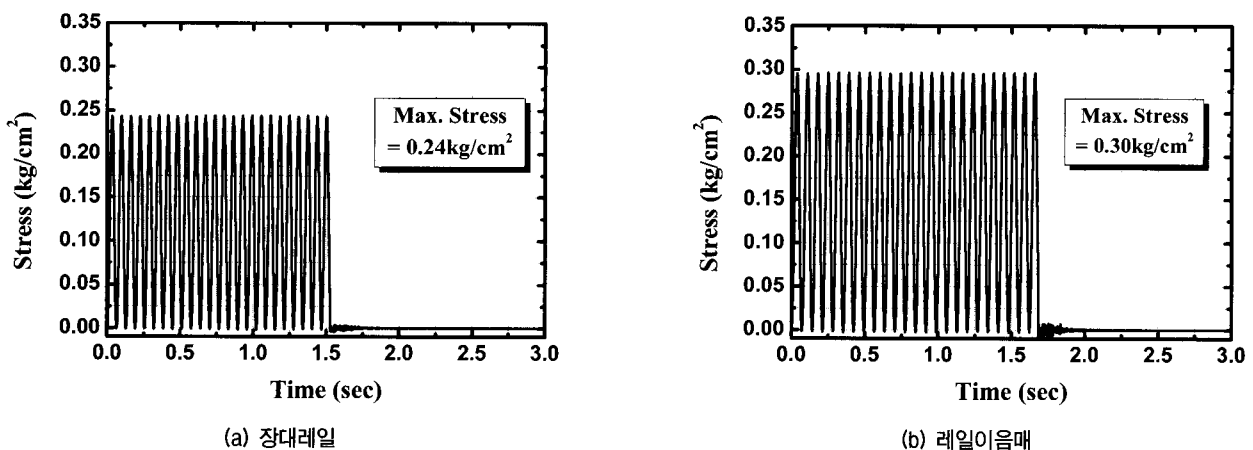


그림 9. 탈팅차량 하중에 의한 노반의 응력(곡선반경 800m, 캔트 140mm)(전상수 등, 2007)

하여 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수 감소율에 따른 노반의 침하량 증가율을 검토하였고 표 10과 표 11 그리고 그림 12에 나타내었다.

상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수 감소율에 따른 침하량의 증가율을 검토한 결과 상부노반, 원지반 그리고 하부노반 순으로 노반의 침하량에 미치는 영향은 컸으며 상부노반과 원지반의 경우는 비슷한 영향(표준편차: 0.1~0.5)을 미치는 것으로 나타났고 하부노반의 경우는 상부노반과 원지반의 약 10~20% 정도의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

철도설계기준(건설교통부, 2004)에서는 상부노반 및

하부노반 성토시 KS F 2312의 D 다짐에 의해 지반반력 계수  $K_{30}$ 이  $11\text{kg/cm}^2$  및  $7\text{kg/cm}^2$  이상이 되도록 규정하고 있으므로 상·하부 노반의 경우 일정값 이상의 지지력을 가진다고 가정하면 원지반의 강성이 약한 구간에서 허용치 이상의 침하가 문제가 될 수 있다. 따라서 원지반을 대상으로 그림 10 및 11의 회귀분석을 이용한 탄성계수 변화와 노반의 침하량 변화의 관계식을 적용하여 노반의 허용침하량 2.5mm 초과하는 경우의 장대레일 및 레일이음매 궤도 원지반의 탄성계수는 각각  $3,300$  및  $4,600\text{t/m}^2$ 이다. 그러므로 원지반의 탄성계수가 장대레일의 경우  $3,300\text{t/m}^2$  이하, 레일이음매의 경우

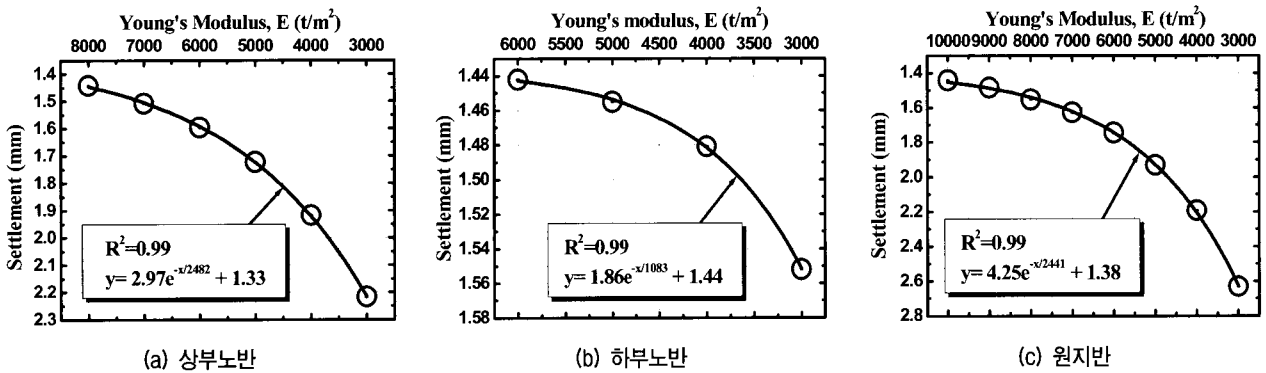


그림 10. 장대레일의 경우 노반의 탄성계수 변화에 따른 침하량

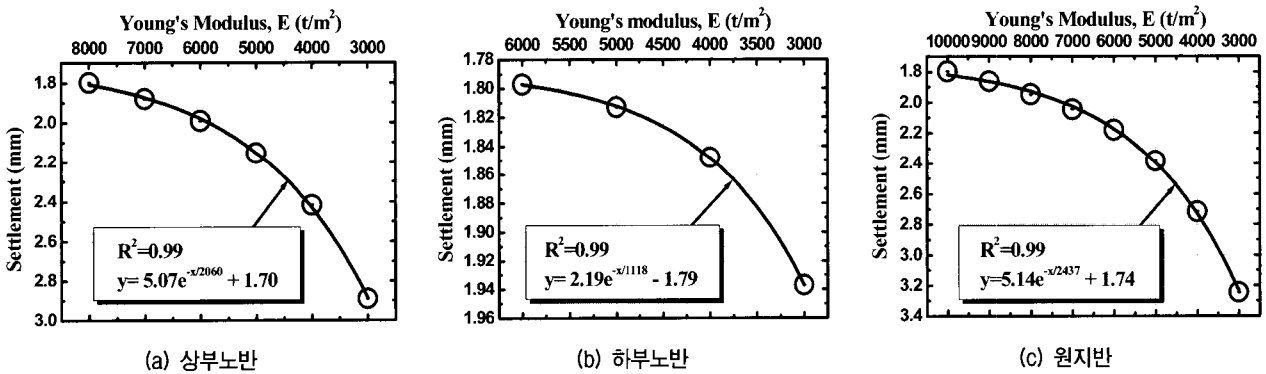


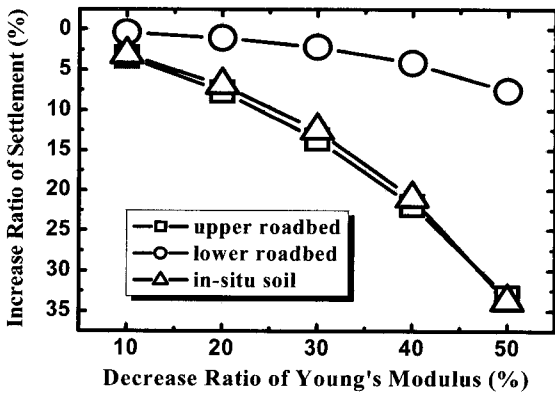
그림 11. 레일이음매의 경우 노반의 탄성계수 변화에 따른 침하량

표 10. 장대레일의 경우 노반의 탄성계수 감소율에 따른 노반의 침하량 증가율

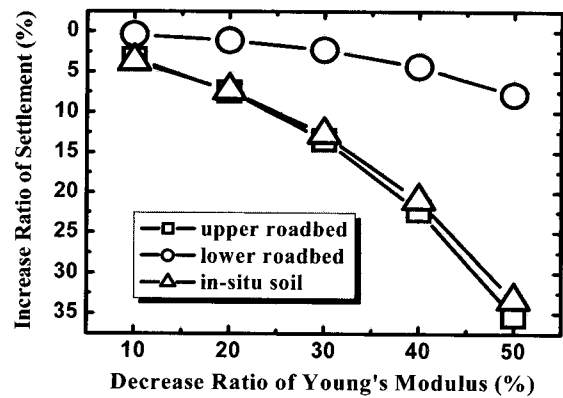
상부노반				하부노반				원지반				비 고
탄성계수		침하량		탄성계수		침하량		탄성계수		침하량		
감소율 (%)	변화된 값 (t/m <sup>2</sup> )	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	감소율 (%)	변화된 값 (t/m <sup>2</sup> )	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	감소율 (%)	변화된 값 (t/m <sup>2</sup> )	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	
-	8,000	-	1.44	-	6,000	-	1.44	-	10,000	-	1.44	기준값
10	7,200	3.4	1.49	10	5,400	0.4	1.45	10	9,000	3.2	1.49	
20	6,400	7.7	1.55	20	4,800	1.1	1.46	20	8,000	6.9	1.54	
30	5,600	13.7	1.64	30	4,200	2.2	1.47	30	7,000	12.5	1.62	
40	4,800	21.9	1.76	40	3,600	4.2	1.50	40	6,000	21.0	1.74	
50	4,000	33.2	1.92	50	3,000	7.6	1.55	50	5,000	33.8	1.93	

표 11. 레일이음매의 경우 노반의 탄성계수 감소율에 따른 노반의 침하량 증가율

상부노반				하부노반				원지반				비 고
탄성계수		침하량		탄성계수		침하량		탄성계수		침하량		
감소율 (%)	변화된 값 (t/m <sup>2</sup> )	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	감소율 (%)	변화된 값 (t/m <sup>2</sup> )	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	감소율 (%)	변화된 값 (t/m <sup>2</sup> )	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	
-	8,000	-	1.80	-	6,000	-	1.80	-	10,000	-	1.80	기준값
10	7,200	3.4	1.86	10	5,400	0.4	1.81	10	9,000	3.7	1.86	
20	6,400	7.5	1.93	20	4,800	1.1	1.82	20	8,000	7.3	1.93	
30	5,600	13.4	2.04	30	4,200	2.3	1.84	30	7,000	12.8	2.03	
40	4,800	22.3	2.20	40	3,600	4.3	1.87	40	6,000	21.0	2.17	
50	4,000	35.3	2.43	50	3,000	7.8	1.94	50	5,000	33.3	2.40	



(a) 장대레일



(b) 레일이음매

그림 12. 탄성계수 감소율에 따른 노반의 침하량 증가율

4,600t/m<sup>2</sup> 이하인 구간에서는 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도를 기준으로 노반의 안정성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

또한 상부노반의 경우 열차하중의 영향이 가장 크므로 열차의 반복하중 및 기후변화에 따른 노반의 연약화로 상부노반의 강성이 감소할 경우 허용치 이상의 침하가 발생할 수 있다. 따라서 상부노반을 대상으로 노반의 허용침하량 2.5mm를 초과하는 경우의 장대레일 및 레일이음매 궤도 상부노반의 탄성계수는 각각 2,300t/m<sup>2</sup> 및 3,800t/m<sup>2</sup>이다. 마찬가지로, 상부노반의 탄성계수가 장대레일의 경우 2,300t/m<sup>2</sup> 이하, 레일이음매의 경우 3,800t/m<sup>2</sup> 이하인 구간에서는 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도를 기준으로 노반의 안정성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 8. 결론

본 연구에서는 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행될 경우 장대레일과 레일이음매 하부 노반의 침하량과 지지력을 검토하

고 침하가 가장 큰 구간을 대상으로 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수를 변화시켜 그에 따른 침하량의 변화를 검토하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 곡선반경 400m, 600m, 800m, 1000m, 1200m에서 각 곡선반경별 대표적인 캔트에 대하여 틸팅차량이 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도로 운행될 경우 발생한 최대 침하량은 곡선반경 800m, 캔트 140mm 구간에서 나타났으며 장대레일의 경우 1.44mm, 레일이음매의 경우 1.80mm로 나타났으며 허용침하량 2.5mm의 약 60% 및 70%로 나타났다.
- (2) 최대 침하량이 발생한 곡선반경 800m, 캔트 140mm에서 장대레일과 레일이음매 하부노반의 응력을 검토한 결과 장대레일의 경우 0.24kg/cm<sup>2</sup>, 레일이음매의 경우 0.30kg/cm<sup>2</sup>로 노반의 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kg/cm<sup>2</sup>의 약 10% 및 12%로 나타났다.
- (3) 최대 침하량이 발생한 곡선반경 800m, 캔트 140mm

구간에 대하여 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수를 변화시킨 결과 지반 강성이 노반의 침하량에 미치는 영향은 상부노반, 원지반 그리고 하부노반 순으로 크게 나타났다.

- (4) 지반 강성이 노반의 침하량에 미치는 영향은 상부노반과 원지반의 경우는 비슷한 영향(표준편차: 0.1~0.5)을 미치는 것으로 나타났고 하부노반의 경우는 상부노반과 원지반의 약 10~20% 정도의 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (5) 상·하부 노반의 경우 일정값 이상의 지지력을 가진다고 가정하면 원지반의 강성이 약한 구간에서 허용치 이상의 침하가 문제가 될 수 있으며, 원지반의 탄성계수가 장대레일의 경우  $3,300t/m^2$  이하, 레일 이음매의 경우  $4,600t/m^2$  이하인 구간에서는 노반의 허용침하량 2.5mm 초과하게 되므로 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도를 기준으로 노반의 안정성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.
- (6) 상부노반의 경우 열차하중의 영향이 가장 크게 미치는 부위로 열차의 반복하중에 의한 노반의 연약화로 상부노반의 강성이 감소할 경우 허용치 이상의 침하가 문제가 될 수 있으며, 상부노반의 탄성계수가 장대레일의 경우  $2,300t/m^2$  이하, 레일 이음매의 경우  $3,800t/m^2$  이하인 구간에서는 궤도부담력과 주행안정성 검토에 의해 산정된 허용속도를 기준으로 노반의 안정성 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 틸팅차량의 기존선 적용성 여부를 검토한 것으로 현장계측에 앞서 수치해석을 통해 안정성을 검토하였다. 수치해석의 경우 입력 물성치는 결과물의 산출에 영향을 미칠 수 있는 중요한 부분으로 본 연구에서는 선행연구를 참조하여 일반적으로 사용되는 값으로 산정하였으며, 결과물의 신뢰성 확보를 위하여 지반 강성을 감소시켜 지반이 연약한 경우에 대한 검토를 수행하였다. 하지만 본 연구에 사용된 물성은 현장계측을 통한 정확한 값이 아니므로 결과물의 신뢰성 확보를 위하여 추후 현장계측 및 실험 재해시험 등을 통한 검증이 필요하다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. 건설교통부 (2004), 철도설계기준(노반편), 건설교통부.
2. 김두환, 고상훈 (2001), “분기부 장대레일화시의 축력거동특성 해석”, *한국구조물진단학회 논문집*, 제5권, 제2호, pp.163-174.
3. 사서범 (2002), *개정판 선로공학*, 열과일.
4. 엄기영, 엄주환, 유영화, 최정호 (2004), “틸팅차량의 기존선 곡선부 주행안정성 평가”, *한국철도학회 논문집*, 제7권, 제4호, pp. 367-373.
5. 엄주환, 엄기영, 양신추, 신승권 (2005), “틸팅차량 주행에 따른 기존선 곡선부 궤도의 성능 평가”, *한국철도학회 논문집*, 제8권, 제6호, pp.550-558.
6. 전상수, 엄기영, 김재민 (2006), “틸팅차량 하중에 의한 레일 이음매 하부 노반침하에 대한 수치해석적 분석”, *한국방재학회 논문집*, 제6권, 제4호, pp.17-24.
7. 전상수, 엄기영, 김재민 (2007), “철도의 곡선반경 및 캔트에 따른 노반의 침하 및 지지력 산정”, *한국방재학회 논문집*, 제7권, 제1호, pp.29-38.
8. 철도청 (2001), *철도설계기준(노반편)*, 철도청.
9. 한국철도기술연구원 (2001), *토구조물 최적설계 기술분야*, 한국철도기술연구원.
10. 한국철도기술연구원 (2005), *기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발*, 4차년도 보고서, 건설교통부.
11. 한국철도기술연구원 (2006a), *기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발*, 5차년도 보고서, 건설교통부.
12. 한국철도기술연구원 (2006b), *분기성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안 연구*, 5차년도 보고서, 건설교통부.
13. 한국철도시설공단 (2004), *철도설계편람(토공 II)*, 한국철도시설공단.
14. 한상윤, 박남희, 임남형, 강영중 (2006), “궤도 안정성에 대한 장대레일과 체결구의 민감도”, *대한토목학회 논문집*, 제26권, 제4호, pp.719-726.
15. 左藤吉彦, 梅原 利之 (1987), *線路工學*, 日本鐵道施設協會.
16. 鐵道總合技術研究所 (1992), *鐵道構造物等設計標準·同解説 土構造物*, 鐵道總合技術研究所.
17. 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.
18. Esveld (2002), *Modern Railway Track*, Second Edition, Netherland.
19. Itasca Consulting Group, Inc. (2002), *FLAC<sup>2D</sup> Manual: Optional Features*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.

(접수일자 2007. 3. 5, 심사완료일 2007. 6. 14)