

분기기 망간 크로싱부 노반거동

Roadbed Behavior in Managanese Crossing of Turnout System

전 상 수¹ Jeon, Sang-Soo

엄 기 영² Eum, Ki-Young

김 재 민³ Kim, Jae-Min

Abstract

The improved turnout system is developed to speed-up the pre-existing railroad. The research has been actively carried out for the improved turnout system and the impact factor is estimated using the data sets achieved from the dynamic wheel-load field tests in both the conventional and the improved turnout system. In this study, the track performance and roadbed behavior are examined for the conventional and improved turnout system using the estimated impact factor. Dynamic wheel load and rail pressure are evaluated to assess the track performance. Roadbed stress and settlements are estimated using numerical analysis. Additionally, the stability of roadbed is estimated in soft roadbed condition influenced by the weather effects and cyclic train loading. The results show that dynamic wheel load, rail pressure, roadbed stress, and roadbed settlements in the improved turnout system substantially decrease compared with those in the conventional turnout system.

요 지

현재 기존선의 고속화를 위하여 개발된 개량 분기기에 대한 성능 평가 연구가 활발히 진행되고 있으며, 동적운중 현장계측을 통하여 기존 및 개량 분기기 충격계수가 산정되었다. 본 연구에서는 산정된 충격계수를 이용해 기존 및 개량 분기기 궤도 성능과 노반의 거동을 평가하였다. 궤도 성능 평가를 위해 동적운중 및 레일압력을 검토하였고 노반거동 평가를 위해 수치해석을 이용하여 노반응력 및 침하를 검토하였으며, 기후변화 및 열차의 반복하중으로 인해 연약해진 노반의 안정성 검토를 수행하였다. 그 결과, 분기기 개선에 따른 동적운중 및 레일압력 그리고 노반의 침하 및 응력의 현저한 저감 효과를 확인할 수 있었다.

Keywords : Dynamic wheel load, Impact factor, Numerical analysis, Rail pressure, Roadbed settlement, Turnout system

1. 서 론

기존선의 속도향상을 저해하는 많은 요인들 중에 분기기 통과속도 규정은 그 중 가장 대표적인 사례로 손

꼽히고 있으며(정우진 등, 2005), 현재 기존선 분기기의 직선측 최고 통과속도는 일반 선로의 차량 최고주행속도인 140km/h에 비해 10km/h 낮은 130km/h로 제한되어 있다(한국철도기술연구원, 2004). 우리나라 철도는

1 정희원, 인제대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Inje Univ., ssj@inje.ac.kr, 교신저자)

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

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 8월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

기존선의 최고운행속도를 200km/h까지 향상시키는 장기계획을 수립하고, 곡선부가 많은 우리나라 지형에 적합한 최고운행속도 180km/h의 틸팅차량을 개발 중이다(한국철도기술연구원, 2006). 그러나 기존선로에 틸팅차량을 적용하기 위해서는 속도의 저감없이 틸팅차량을 통과시킬 수 있는 안정적인 분기기시스템의 확립이 선행되어야 한다(엄기영 등, 2006). 따라서 틸팅차량의 직선측 분기기에서의 속도향상을 위해 기존의 분기기를 개선하여 보다 성능이 향상된 개량 분기기에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 전상수 등(2007)은 동적운동 현장계측 데이터를 이용하여 기존 및 개량 분기기 크로싱부 충격계수를 산정하였다.

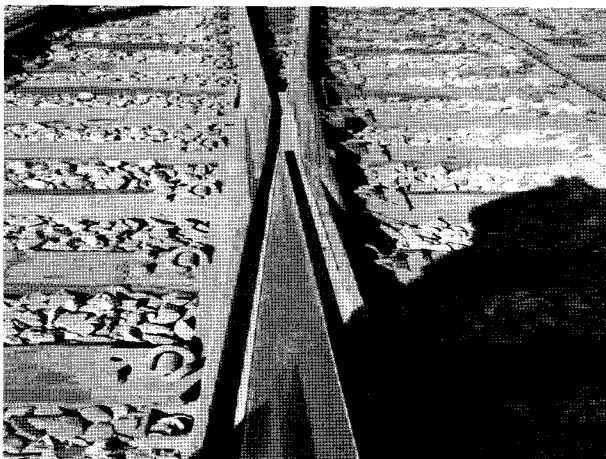
분기기의 개선으로 인한 속도향상은 궤도부담력의 증가를 의미하며, 궤도부담력이 증가하면 궤도 하부구조인 노반의 침하와 응력은 증가하고 이는 열차 주행시 주행안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 열차주행에 따라 발생하는 노반의 침하는 궤도틀림이나 열차의 탈선과 같은 대형 사고를 유발할 수 있으며, 노반의 지지력이 부족한 경우 노반 연약화 현상에 따른 노반분리가 발생하여 열차주행에 지장을 초래할 뿐만 아니라 열차의 안전운행에 위협을 가하게 되므로 열차주행에 대한 노반의 침하 및 지지력에 대한 검토가 필요하며, 또한 열차의 반복하중 및 기후변화로 인한 지반의 강성이 감소할 경우의 노반 안정성 검토가 필요하다.

따라서 본 연구는 기존 및 개량 분기기 크로싱부 충격계수를 이용하여 기존 및 개량 분기기 궤도 성능과 노반의 거동을 분석하였으며, 분기기 개선에 따른 궤도 부담력과 노반의 침하 및 응력 저감 효과를 평가하고

노반의 침하 및 응력과 허용침하량 및 허용지지력(허용압력)을 비교하여 노반의 안정성을 검토하였다. 또한, 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수를 변화시켜 지반 강성 변화에 따른 노반의 침하를 평가하였다.

2. 기존 및 개량 분기기 특성 비교

국내 기존선에 부설되어 있는 분기기의 대부분은 50kg 분기기로써 전체 분기기의 70%이상을 차지하고 있다. 그러나 최근 기존선의 고속화, 고밀화 추세에 따라 선로의 조건도 이에 적합하게 개선되어야 할 필요가 있다. 개량 분기기에서는 기존 분기기에서 사용되던 50kg 레일을 60kg 레일로 변경하였으며, 이러한 레일의 중량화는 궤도의 강성을 크게 함으로써 고속 열차 주행하중에 따른 궤도부담력을 줄이고 레일의 정·동적거동을 보다 안정적으로 유도할 수 있다. 그리고 분기기에서는 특성상 결선부가 존재하여 열차 통과시 충격을 유발하며 이는 분기부 궤도부담력을 가중시키고 열차의 주행 안정성 및 승차감을 저하시킬 뿐만 아니라 소음과 진동을 발생시므로, 개량 분기기에서는 노즈부 접촉각을 3배 이상 감소시킴으로써 차륜과 원레일 및 노즈레일의 접촉면을 적게 하여 이와 같은 단점을 보완하였다. 또한, 개량 분기기에서는 공장조립이 가능하며 현장 시공성을 확보할 수 있는 분절형 PC침목을 사용하였으며, 기존선 고속화에 따른 궤도의 충격 및 승차감 저하를 방지하고 유지보수비용 절감을 위해 크로싱부 연결방식을 레일이 음매판을 이용한 연결방식에서 테르밋 용접을 이용한 방식으로 변경하였다(한국철도기술연구원, 2006). 본 연



(a) 기존 분기기



(b) 개량 분기기

그림 1. 분기기 크로싱부

구에서의 기존 분기기는 50kg 탄성분기기(목침목형, 고정 망간크로싱, 연결방식: 이음매판)를 의미하고 개량 분기기는 60kg 탄성분기기(PC침목형, 고정 망간크로싱, 연결방식: 테르밋용접)를 의미하며, 그림 1은 기존 및 개량 분기기 크로싱부를 나타낸다.

3. 동적윤증 현장계측을 통한 기존 및 개량 분기기 크로싱부 충격계수 산정

윤증이란 차륜이 레일과 접촉면을 통하여 궤도에 수직방향으로 전달되는 힘을 말하며 열차의 자중에 의한 정적 윤증과 열차의 주행 속도에 따라 발생하는 동적 효과인 충격력의 영향까지 포함된 동적 윤증으로 구분할 수 있다. 분기기 크로싱 구조성능 평가를 위한 동적윤증 현장 측정은 개량 분기기(#10)가 부설된 구미역과 기존 분기기 중 번수(#10)가 같고 같은 종류의 차량이 통과하는 왜관역을 선정하여 부설된 고정 망간크로싱을 대상으로 실시되었으며, 해당 분기기는 모두 #10 분기기로써 왜관역 상선 297km 지점과 구미역 상선 277km 지점에 각각 위치하며, 두 분기기는 모두 배향 분기기이다. 측정 방법은 동적계측장비(DRA101, MGC-PLUS)를 이용

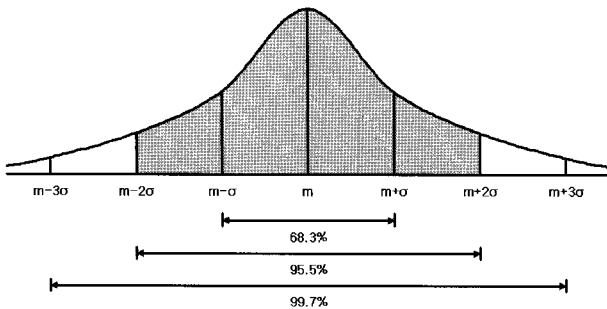
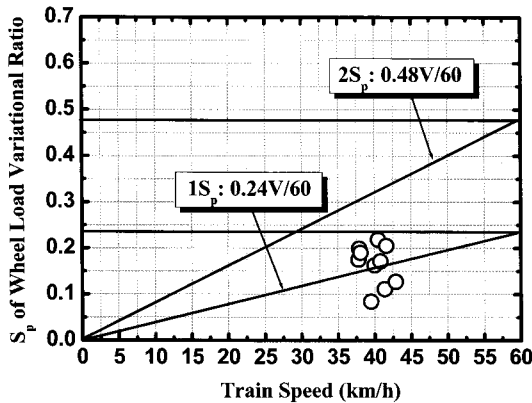
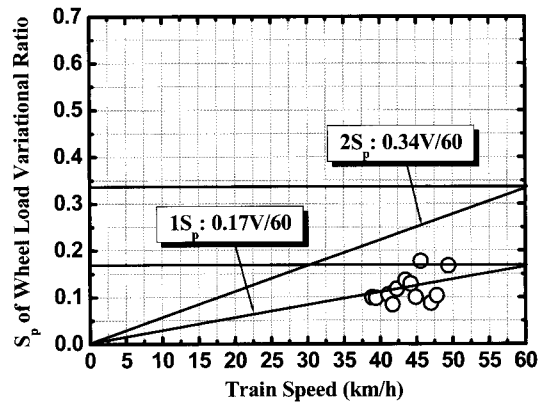


그림 2. 정규분포 곡선



(a) 기존 분기기



(b) 개량 분기기

그림 3. 2σ 적용한 윤증변동율의 표준편차(전상수 등, 2007)

하여 동적 발생응답을 50Hz 또는 100Hz의 샘플링 주기로 측정하고 변위, 응력, 가속도 센서들을 부착하여 Data Acquisition System, 신호 증폭기, 저장장치, Filtering System 등을 사용해 발생 신호들을 수집하였다(한국철도기술연구원, 2006).

현장측정 대상구간을 통과하는 열차는 크게 무궁화호, PMC 새마을호, 화물열차로 구분되며, 동적윤증 측정을 통한 충격력의 영향분석은 비교적 열차 편성이 일률적인 무궁화호에 대한 측정결과를 바탕으로 수행되었으며, 정확한 정적윤증의 확인이 가능한 무궁화호의 동력차 윤증만이 고려되었다(전상수 등, 2007).

일반적으로 충격계수는 윤증변동율에 대한 표준편차의 2배, 즉 2σ를 사용하여 산정한다(鐵道總合技術研究所, 1997). 윤증변동율은 $(P_{dyn}-P_{sta})/P_{sta}$ 로 나타내며, 이는 열차주행에 따른 윤증의 변동량을 정적윤증으로 나눈 값으로서 순수한 동적하중의 변동값을 나타낸다. 그림 2는 연속 확률변수 X가 정규분포 $N(m, \sigma^2)$ 을 따를 때, 표준편차 $\sigma \sim 3\sigma$ 일 때의 정규 분포도를 나타내고 있다. 이러한 정규분포는 평균(m)값에서 최대 확률값을 가지며 평균(m)에서 멀어짐에 따라 하강하여 $x=m\pm\sigma$ 에서 변곡하며, 평균에서 멀어짐에 따라 확률은 0의 값으로 접근한다. 분포곡선과 x축으로 둘러싸는 넓이가 전 도수를 나타내고 $m\pm\sigma$ 의 구간에서는 68.3%, $m\pm 2\sigma$ 의 구간에서는 95.5%, $m\pm 3\sigma$ 의 구간에서는 99.7%의 확률분포를 가지게 된다. 일본의 경우에는, 설계상의 윤증변동분은 그 검토 대상에 따라 σ 또는 3σ 에 대응한 값을 사용하고 있으며, 특히 충격계수 산정에 있어서의 윤증 변동은 표준편차의 2σ의 값으로 표현하고 있다.

그림 3은 기존 및 개량 분기기에서 윤증변동율의 표준편차 평균값과 여기에 안전율을 고려한 표준편차의

표 1. 기존 및 개량 분기기 크로싱부 속도충격율(i)(전상수 등, 2007)

구 분	기존 분기기	개량 분기기
속도충격율 (i)	$i = 1 + 0.008V$	$i = 1 + 0.0057V$

2배(2o)를 취하여 충격계수 값을 나타낸 것이며, 이를 식으로 표현하면 표 1과 같다.

4. 분기기 개선에 따른 동적운중 및 레일압력 저감 효과

동적운중 현장계측을 통하여 기존 및 개량 분기기 크로싱부 충격계수가 산정되었으며, 그 결과 기존 분기기에 비해 개량 분기기의 충격계수가 작은 것은 알 수 있다. 이는 기존 분기기에 비해 개량 분기기에서 열차주행에 의해 발생하는 충격력이 감소하는 것을 의미하며, 이를 정량적으로 분석하고자 기존 및 개량 분기기 크로싱부 충격계수를 이용하여 동적운중 및 레일압력을 검토하였다.

4.1 차량제원 및 궤도조건

분기기 개선에 따른 동적운중 및 레일압력의 저감 효과를 파악하고자 새마을호와 킬팅차량을 대상으로 기존 및 개량 분기기에서의 동적운중 및 레일압력을 검토

표 2. 새마을호 및 킬팅차량의 제원

변 수	사용된 값	
	새마을호	킬팅차량
축 중(tonf)	22	15
최대운행속도(km/h)	140	180
고정 축거(m)	2.5	2.6
편 성	8량	6량

표 3. 궤도조건

변 수	사용된 값	
	기존분기기	개량분기기
레일 종류	KS 50	KS 60
침목 종류	목침목	PC침목
침목 규격(mm)	150 × 240 × 3,100	
침목 간격(m)	0.6	
도상 깊이(m)	0.3	
레일패드 수직 스프링계수(tf/m)	4,750	
목침목 압축 스프링계수(tf/m)	10,000	
도상 수직 스프링계수(tf/m)	20,000	
노반의 지반반력계수(tf/m ³)	7,200	

하였다. 새마을호 및 킬팅차량의 제원과 궤도조건은 각각 표 2 및 표 3에 나타내었다.

4.2 동적운중 저감 효과

차륜으로부터 레일과의 접촉면을 통과하여 궤도에 전달되는 힘을 운중이라고 하며, 차량의 중력에 기초로 한 정적운중과 주행에 기초로 한 동적인 변동을 추가한 동적운중으로 구분할 수 있다. 동적운중은 운중의 정상분과 변동분의 합으로 나타낼 수 있으며, 직선부에서의 운중 정상분은 식 (1)과 같다(鐵道總合技術研究所, 1997).

$$P_{sta} = \frac{W_o}{2} \quad (1)$$

여기서, P_{sta} : 운중 정상분(tf)

W_o : 축중(tf)

운중 변동분은 속도충격율(i)에 의한 값을 사용하며, 식 (2)로부터 산정한다.

$$\Delta P_{sta} = 3[0.5 \times P_{sta} \times (i - 1)] \quad (2)$$

여기서, ΔP_{sta} : 운중 변동분(tf)

기존 분기기와 개량 분기기에서 속도충격율 i는 표 1에서 제시된 값을 사용하였다. 따라서, 운중의 총합은 다음의 식 (3)과 같다.

$$P_{dyn} = P_{sta} + \Delta P_{sta} \quad (3)$$

여기서, P_{dyn} : 동적운중(tf)

표 4 및 표 5와 그림 4는 열차속도에 따른 새마을호 및 킬팅차량의 동적운중을 나타내며, 새마을호와 킬팅

표 4. 새마을호 운행시 열차 속도별 동적운중

속 도 (km/h)	동적운중(tonf)		동적운중 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
0	11.00	11.00	0.0
20	13.64	12.88	5.6
40	16.28	14.76	9.3
60	18.92	16.64	12.1
80	21.56	18.52	14.1
100	24.20	20.41	15.7
120	26.84	22.29	17.0
140	29.48	24.17	18.0

표 5. 틸팅차량 운행시 열차 속도별 동적윤중

속도 (km/h)	동적윤중(tonf)		동적윤중 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
0	7.50	7.50	0.0
30	10.20	9.42	7.6
60	12.90	11.35	12.0
90	15.60	13.27	14.9
120	18.30	15.20	16.9
150	21.00	17.12	18.5
180	23.70	19.04	19.7

표 6. 새마을호 운행시 열차 속도별 레일압력

속도 (km/h)	레일압력(tonf)		레일압력 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
0	4.20	3.53	16.0
20	5.21	4.13	20.7
40	6.22	4.73	24.0
60	7.23	5.33	26.3
80	8.24	5.94	27.9
100	9.24	6.54	29.2
120	10.25	7.14	30.3
140	11.26	7.74	31.3

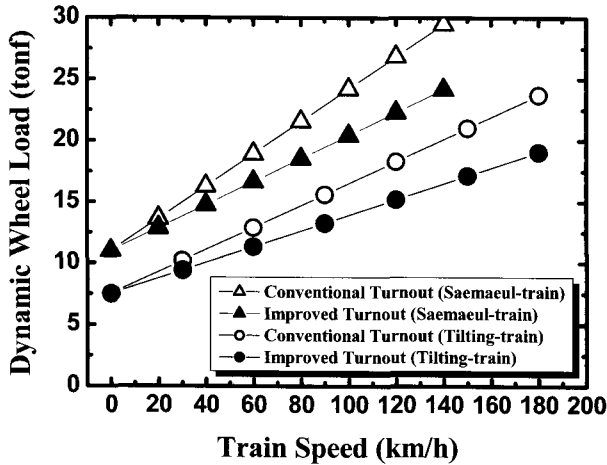


그림 4. 열차 속도별 동적윤중

차량 각각의 최대운행속도에서 동적윤중은 기존 분기기에서 29.48tf 및 23.70tf, 개량 분기기에서 24.17tf 및 19.04tf으로 기존 분기기에 비해 개량 분기기에서 약 18% 및 19%의 동적윤중 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 개량 분기기에 기존 분기기에 비해 최대 약 20% 정도의 동적윤중 저감 효과가 있을 것으로 기대된다.

4.3 레일압력 저감 효과

레일과 침목 간에 작용하는 힘을 레일압력이라고 하며, 최대 레일압력은 윤중 P_{dyn} 가 침목 직상에 작용하는 경우와 침목과 침목사이 중앙에 작용하는 경우에 대하여 고려한다(鐵道總合技術研究所, 1997).

- 윤중이 침목 직상에 작용할 때

$$P_R = P_{dyn} (1 - e^{-\beta \frac{a}{2}} \cos \beta \frac{a}{2}) \quad (4)$$

- 윤중이 침목과 침목사이 중앙에 작용할 때

표 7. 틸팅차량 운행시 열차 속도별 레일압력

속도 (km/h)	레일압력(tonf)		레일압력 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
0	2.87	2.40	16.4
30	3.90	3.02	22.6
60	4.93	3.64	26.2
90	5.96	4.25	28.7
120	6.99	4.87	30.3
150	8.02	5.49	31.5
180	9.05	6.10	32.6

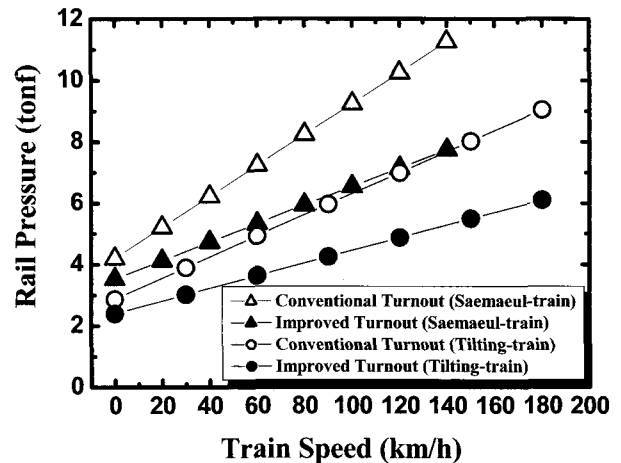


그림 5. 열차 속도별 레일압력

$$P_R = \frac{P_{dyn}}{2} (1 - e^{-\beta a} \cos \beta a) \quad (5)$$

여기서, P_R : 레일압력(tf)

P_{dyn} : 동적윤중(tf)

a : 침목간격(m)

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI_x}}$$

표 6 및 표 7과 그림 5는 열차속도에 따른 새마을호 및 틸팅차량의 레일압력을 나타내며, 새마을호와 틸팅차

량 각각의 최대운행속도에서 레일압력은 기존 분기기에
서 11.26tf 및 9.05tf, 개량 분기기에서 7.74tf 및 6.10tf으
로 기존 분기기에 비해 개량 분기기에서 약 31% 및 32%
의 레일압력 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서,
개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 최대 약 30% 정도
의 레일압력 저감 효과가 있을 것으로 기대된다.

5. 수치해석을 이용한 분기기 하부 노반거동 평가

기존 및 개량 분기기 하부 노반거동 평가는 상용 유
한차분해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용해 동적해석을
수행하였다. 분기기 개선에 따른 노반응력 및 침하 저감
효과를 검토하였으며, 허용지지력(허용압력) 및 허용침
하량과 비교하여 안정성을 평가하였다. 하중 재하는 열
차 하중을 노반압력으로 모사하여 정현파 이용해 재하
하였으며, 검토대상 열차는 새마을호와 텀팅차량을 대
상으로 하였다.

5.1 Mohr-Coulomb 파괴규준

본 해석에서 사용된 파괴 규준은 Mohr-Coulomb 파괴
조건이며 이는 탄소성 거동을 보이는 지반에 적합하다.
Mohr-Coulomb plasticity law의 이론적 배경을 소개하면
다음과 같다. 소성흐름의 적용은 Mohr-Coulomb 파괴조
건과 plastic potential function에 일치하는 plain strain 상
태의 탄성-완전소성 물체라 가정하면 yield surface(f)는
다음과 같이 주어진다.

$$f = \sigma_1 - N_\phi \cdot \sigma_3 + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (6)$$

Plastic potential function(g)은 다음과 같다.

$$g = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (7)$$

여기서, $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$ (주응력)

$$N_\phi = \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)}$$

$$N_\psi = \frac{(1 + \sin \psi)}{(1 - \sin \psi)}$$

여기서, c : 점착력

ϕ : 내부마찰각

ψ : 팽창각

변형률 증분은 탄성, 소성의 두 성분으로 표시할 수
있다.

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{11} &= \Delta \epsilon_{11}^e + \Delta \epsilon_{11}^p \\ \Delta \epsilon_{22} &= \Delta \epsilon_{22}^e + \Delta \epsilon_{22}^p \\ \Delta \epsilon_{33} &= \Delta \epsilon_{33}^e + \Delta \epsilon_{33}^p \end{aligned} \quad (8)$$

항복후의 거동에 대한 non-associated flow rule을 적
용하면 소성 변형률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{11}^p &= \lambda_1 \cdot \frac{\partial g^1}{\partial \sigma_{11}} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial g^2}{\partial \sigma_{11}} \\ \Delta \epsilon_{22}^p &= \lambda_1 \cdot \frac{\partial g^1}{\partial \sigma_{22}} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial g^2}{\partial \sigma_{22}} \\ \Delta \epsilon_{33}^p &= \lambda_1 \cdot \frac{\partial g^1}{\partial \sigma_{33}} + \lambda_2 \cdot \frac{\partial g^2}{\partial \sigma_{33}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $\lambda_1 = \lambda_2$ 의 관계를 사용하면

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{11}^p &= -\lambda_1 N_\psi \\ \Delta \epsilon_{22}^p &= 2\lambda_1 \\ \Delta \epsilon_{33}^p &= -\lambda_1 N_\psi \end{aligned} \quad (10)$$

주응력 증분은

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{11} &= a_1 \lambda_1 N_\psi + a_2 (v \Delta t - 2\lambda_1 + \lambda_1 N_\psi) \\ \Delta \sigma_{22} &= a_1 (v \Delta t - 2\lambda_1) + 2a_2 \lambda_1 N_\psi \\ \Delta \sigma_{33} &= \Delta \sigma_{11} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $\lambda_1 = (v \Delta t) \lambda$

$$\lambda = \frac{a_1 - a_2 N_\phi}{(a_1 + a_2) N_\phi N_\psi - 2a_2 (N_\phi + N_\psi) + 2a_1}$$

$$a_1 = (K + \frac{4}{3}G)$$

$$a_2 = (K - \frac{2}{3}G)$$

여기서, K : 체적탄성계수(bulk modulus)

G : 전단탄성계수(shear modulus)

5.2 수치해석 모델링

5.2.1 수치해석 조건

수치해석에 사용된 단면은 상부노반이 1.5m, 하부노
반이 1.5m 성토된 경우에 대하여 모델링하였다. 모델링
의 범위는 상부노반의 폭은 7.2m로 하였으며 노반의 경
사는 1:1.8로 하였고 원지반의 크기는 파의 반사에 의한
영향을 고려하여 깊이 72m, 폭 180m로 하였다. 그림 6

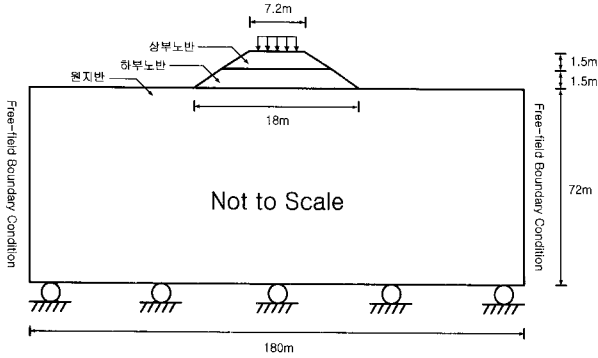


그림 6. 수치해석 모델 모식도

표 8. 지반물성

구 분	상부노반	하부노반	원지반
단위중량(tf/m ³)	1.8	1.8	1.8
탄성계수(tf/m ²)	8,000	6,000	8,000
포아송비	0.3	0.28	0.3
점착력(tf/m ²)	0.2	0.4	0.2
내부마찰각(°)	32	30	32

은 수치해석 모델 모식도를 나타낸다. 수치해석 시 경계 조건의 경우 바닥면에 대해서는 수직방향을 구속하였고 양쪽 수직면에 대해서는 파를 흡수하는 경계조건인 free-field boundary condition을 사용하였다. 재료감쇠비는 Richart 등(1970)에 의해 제시된 값 중 dry sand and saturated sand의 중간 값인 0.02를 사용하였으며, 해석에 사용된 지반물성은 표 8에 나타내었다. 해석에 사용된 지반물성의 경우 상·하부노반의 물성은 기존 연구(한국철도기술연구원, 2001; 이수형, 2005)를 참고하여 일반적으로 사용되는 값을 사용하였다.

5.2.2 열차하중 재하

본 연구에서는 새마을호와 텀팅차량의 하중을 노반 압력으로 모사하여 정현파로 재하 하였다. 노반압력 모사과정은 그림 7에 나타내었다.

동적운중과 레일압력을 구하는 과정은 식 (1)~식 (5)와 같으며, 이 과정에서 산정된 레일압력을 이용하여 침목하면압력 및 노반압력을 산정한다. 침목하면 압력을 구하는 과정은 식 (12)와 같고, 노반압력의 산정은 도상내 압력의 분포도(그림 8)를 이용하였다.

$$P_t = \frac{2 \times P_{Rmax}}{B \times L} \quad (12)$$

여기서, P_t : 침목하면압력(tf/m²)

P_{Rmax} : 레일압력(tf), L : 침목 직상 및 침

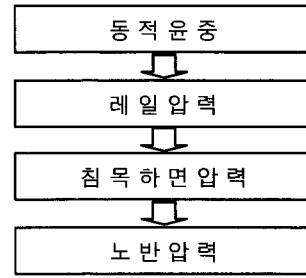


그림 7. 노반압력 모사과정

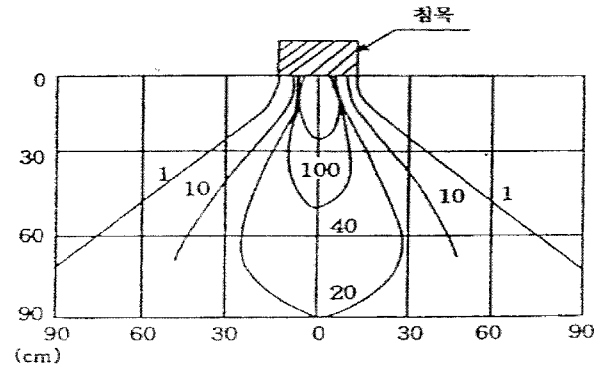


그림 8. 도상내 압력의 분포도(서사범, 2002)

목사이 중앙에 작용할 경우 중 큰 값

B : 침목의 폭(m)

L : 침목의 길이(m)

도상내 압력의 분포는 침목의 직하부에서 압력이 가장 크고 깊이가 깊어질수록, 그리고 침목의 중심에서 멀어질수록 압력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 노반압력으로 모사된 열차하중을 정현파를 이용해 노반면에 재하 하였다.

5.3 노반의 허용지지력(허용압력) 및 허용침하 기준

5.3.1 허용지지력(허용압력) 기준

노반의 허용압력은 Terzaghi 지지이론, 재래선의 평판재하시험결과, 여러 기관에 대한 지지력 값의 기준 등에서 대표적 노반을 3개로 분류하여 각 구분에 대한 허용지지력을 표 9에 나타내었다. 노반 상태가 양호한 경우(강화노반)는 3.0kgf/cm², 노반 상태가 보통인 경우는

표 9. 노반 상태별 노반의 허용지지력(한국철도기술연구원, 2005)

노반상태	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

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.

5.3.2 허용침하 기준

탈선한계에 따른 궤도의 총 허용변위량은 10mm 정도이지만 차량의 종류에 따라 다르며 궤도보수 등을 고려하면 일률적으로 정하는 것이 어렵다. 반복되는 열차주행에 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. 지금까지 경험에 의하면 노반의 변형이 4mm 이내면 궤도 보수상 문제가 없으며, 2.5mm 이내면 승차감 및 궤도 보수상 문제가 없는 것으로 알려져 있다(鐵道總合技術研究所, 1992; 한국철도시설공단, 2004).

표 10. 노반의 허용침하량(鐵道總合技術研究所, 1992)

구 분	노반의 허용침하량 (mm)	비 고
경험적 허용침하량	4	궤도 보수상 문제없음
설계 허용침하량	2.5	승차감 및 궤도 보수상 문제없음

표 10은 노반의 허용침하량을 나타낸다.

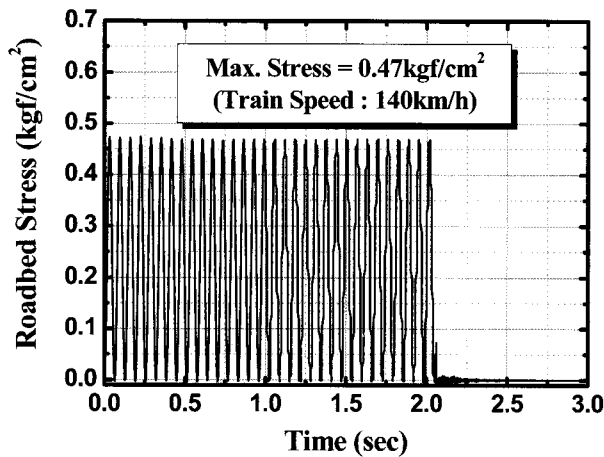
5.4 열차주행에 따른 분기기 하부 노반거동 평가

기존 및 개량 분기기에서 새마을호와 틸팅차량이 운행될 경우에 대한 노반의 응력 및 침하를 수치해석을 통하여 검토하였다. 새마을호의 경우 20~140km/h까지 20km/h씩 증가시켰으며, 틸팅차량의 경우 30~180km/h까지 30km/h씩 증가시켜 노반의 응력 및 침하를 검토하였다.

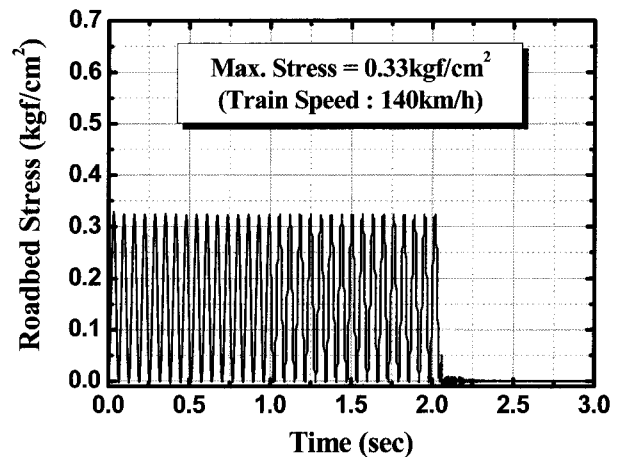
5.4.1 노반응력 평가

기존 및 개량 분기기에서 새마을호와 틸팅차량이 운행될 경우에 대한 노반응력을 검토하여 분기기 개선에 따른 노반의 응력저감 효과를 평가하였으며, 열차운행에 의한 노반응력과 허용지지력(허용압력)을 비교하여 안정성을 검토하였다. 그림 9와 그림 10은 기존 및 개량 분기기에서 새마을호와 틸팅차량이 각각의 최대운행속도로 운행될 때 발생한 노반의 응력을 나타내며, 정현파 하중 재하에 따라 노반의 응력이 증가하고 감소하는 과정이 반복됨을 알 수 있다.

새마을호와 틸팅차량 운행시 열차 속도별 노반의 응력은 표 11 및 표 12와 그림 11에 나타내었으며, 새마을호와 틸팅차량 각각의 최대운행속도에서 노반응력은 기존 분기기에서 0.47kgf/cm² 및 0.38kgf/cm², 개량 분기기에서 0.33kgf/cm² 및 0.26kgf/cm²로 기존 분기기에 비해 개량 분기기에서 약 30% 및 32%의 노반응력 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 새마을호의 최대

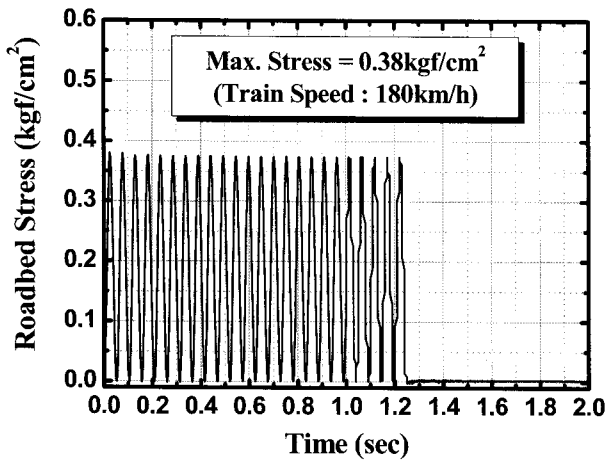


(a) 기존 분기기

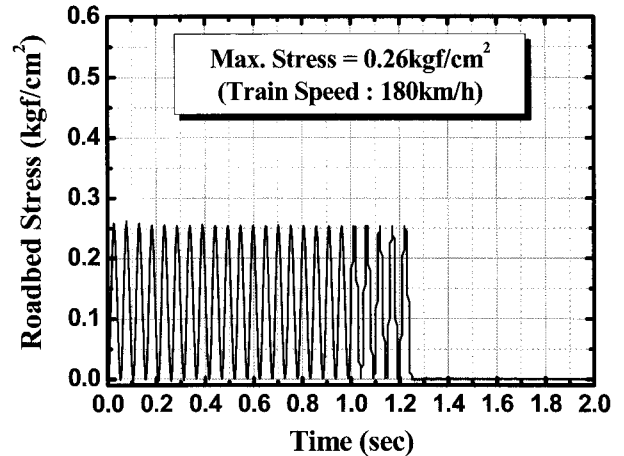


(b) 개량 분기기

그림 9. 새마을호 하중에 의한 노반응력(전상수 등, 2007)



(a) 기존 분기기



(b) 개량 분기기

그림 10. 틸팅차량 하중에 의한 노반응력(전상수 등, 2007)

표 11. 새마을호 운행시 열차 속도별 노반응력(전상수 등, 2007)

속도 (km/h)	노반응력(kgf/cm ²)		노반응력 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
20	0.22	0.17	22.7
40	0.26	0.20	23.1
60	0.30	0.23	23.3
80	0.34	0.25	26.5
100	0.39	0.28	28.2
120	0.43	0.30	30.2
140	0.47	0.33	29.8

표 12. 틸팅차량 운행시 열차 속도별 노반응력 (전상수 등, 2007)

속도 (km/h)	노반응력(kgf/cm ²)		노반응력 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
30	0.16	0.13	18.8
60	0.20	0.16	20.0
90	0.25	0.18	28.0
120	0.29	0.21	27.6
150	0.33	0.23	30.3
180	0.38	0.26	31.6

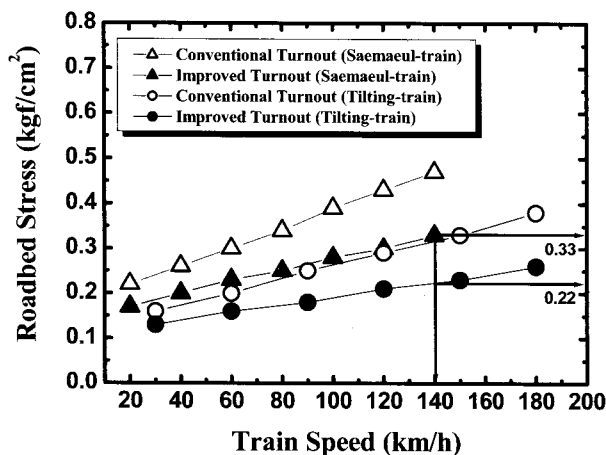


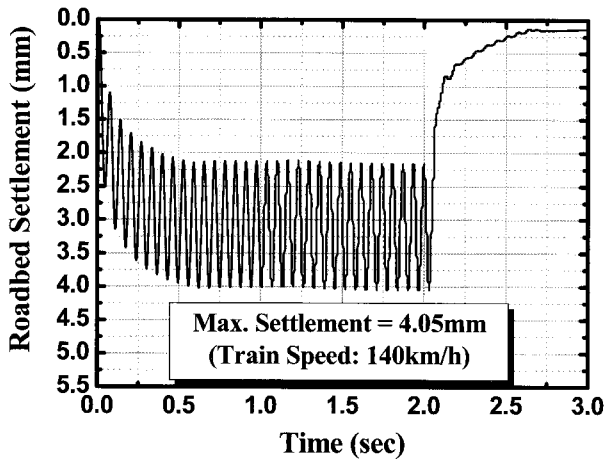
그림 11. 열차 속도별 노반응력(전상수 등, 2007)

운행속도 140km/h를 기준으로 개량 분기기에서 새마을호와 틸팅차량에 의한 노반응력은 각각 약 0.33kgf/cm² 및 약 0.22kgf/cm²로 나타났다. 따라서, 틸팅차량이 투입될 경우 새마을호에 비해 약 30%의 노반응력 저감 효과가 기대된다. 또한, 개량 분기기에서 틸팅차량 최대운행속도 180km/h에서의 노반응력은 0.26kgf/cm²로 보통 상태 노반의 허용지지력(허용압력) 2.4kgf/cm² 이하이므로 틸팅차량이 최대운행속도로 운행될 경우 노반의 지지력 측면에서 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

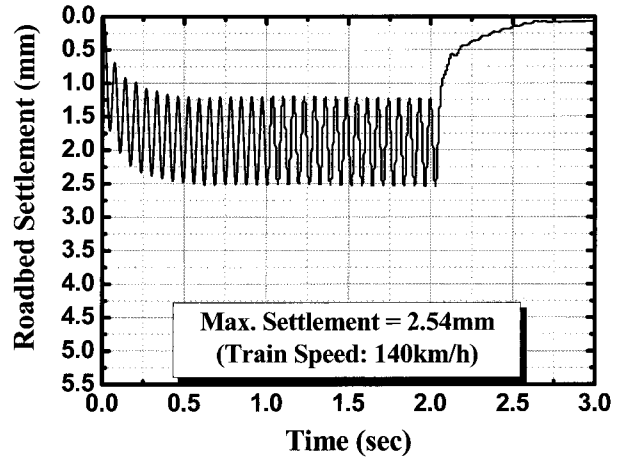
5.4.2 노반침하 평가

기존 및 개량 분기기에서 새마을호와 틸팅차량이 운행될 경우에 대한 노반침하를 검토하여, 분기기 개선에 따른 노반의 침하저감 효과를 평가하였으며, 열차운행에 의한 침하량과 허용침하량을 비교하여 안정성을 검토하였다. 그림 12와 그림 13은 기존 및 개량 분기기에서 새마을호와 틸팅차량이 각각의 최대운행속도로 운행될 때 발생한 노반의 침하량을 나타낸다. 그림 12(a)에서, 하중이 처음 재하 됨에 따라 약 2.5mm의 즉시 침하가 발생하였고 하중이 반복적으로 재하 됨에 따라 4.05mm의 최대침하량이 발생하였다. 정현파 하중 재하에 따라 침하가 발생하고 복원되는 과정이 반복됨을 볼 수 있으며, 하중이 제거된 후 발생했던 침하가 복원되는 것을 알 수 있다. 그림 12(b)와 그림 13은 전체적인 침하의 특성은 그림 12(a)와 같으며 침하량의 크기에서 차이가 있다.

새마을호와 틸팅차량 운행시 열차 속도별 노반의 침하량은 표 13 및 표 14와 그림 14에 나타내었으며, 새마

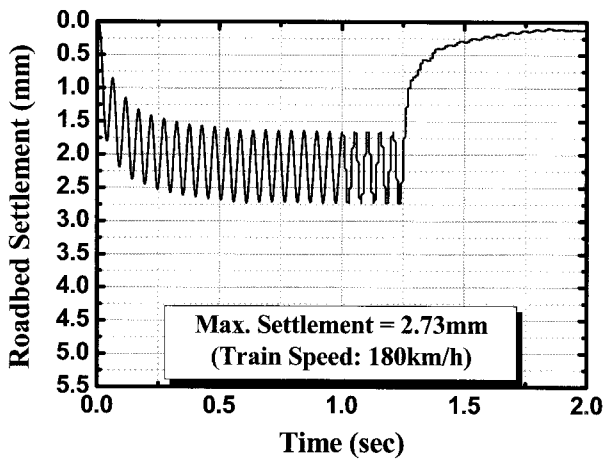


(a) 기존 분기기

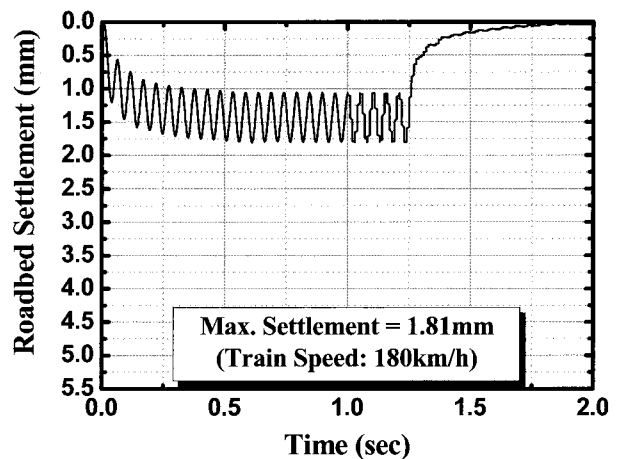


(b) 개량 분기기

그림 12. 새마을호 하중에 의한 노반침하



(a) 기존 분기기



(b) 개량 분기기

그림 13. 틸팅차량 하중에 의한 노반침하

표 13. 새마을호 운행시 열차 속도별 노반의 침하량

속도 (km/h)	노반의 침하량(mm)		노반침하 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
20	2.25	1.77	21.3
40	2.44	1.85	24.2
60	2.69	1.98	26.4
80	3.02	2.17	28.1
100	3.20	2.25	29.7
120	3.47	2.35	32.3
140	4.05	2.54	37.3

음호와 틸팅차량 각각의 최대운행속도에서 노반의 침하량은 기존 분기기에서 4.05mm 및 2.73mm, 개량 분기기에서 2.54mm 및 1.81mm로 기존 분기기에 비해 개량 분기기에서 약 37% 및 34%의 노반침하 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 그리고 새마을호의 최대운행속도 140km/h를 기준으로 개량 분기기에서 새마을호와 틸팅

표 14. 틸팅차량 운행시 열차 속도별 노반의 침하량

속도 (km/h)	노반의 침하량(mm)		노반침하 감소효과(%)
	기존분기기	개량분기기	
30	1.56	1.20	23.1
60	1.84	1.36	26.1
90	2.14	1.52	29.0
120	2.30	1.60	30.4
150	2.59	1.75	32.4
180	2.73	1.81	33.7

차량에 의한 노반의 침하량은 각각 약 2.54mm 및 약 1.70mm로 나타났다. 따라서, 틸팅차량이 투입될 경우 새마을호에 비해 약 33%의 노반응력 저감 효과가 기대된다. 또한, 틸팅차량의 최대운행속도 180km/h에서의 노반 침하량은 1.81mm로 노반의 설계 허용침하량인 2.5mm 이하이므로 개량 분기기에서 틸팅차량이 최대운행속도로 운행될 경우 승차감 및 궤도 보수상 문제가

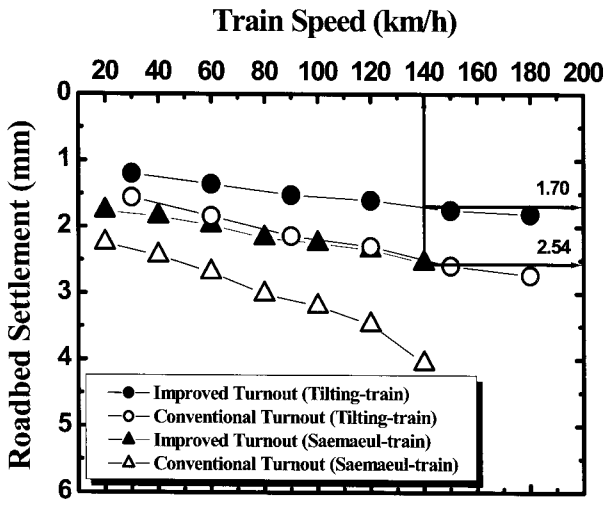


그림 14. 열차 속도별 노반의 침하량

없으며, 노반의 침하량 측면에서 안전성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

5.5 틸팅차량의 개량분기기 주행시 지반강성에 따른 분기기 하부 노반침하 평가

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 고려한 지반의 강성이 약할 경우에 대한 노반의 안정성 검토가 필요하다. 틸팅차량이 최대운행속도로 운행될 경우 발생한 개량 분기기 하부 노반의 응력 및 침하량은 0.26kgf/cm^2 및 1.81mm 로 각각 허용지지력 2.4kgf/cm^2 및 허용침하량 2.5mm 의 약 11% 및 75%로 나타났으며, 일반적으로 연약한 지반에서도 열차하중에 대한 궤도 자체의 지지력이 문제가 되는 경우는 거의 없고 주로 허용치 이상의 과도한 침하가 문제가 되고

있다(이수형, 2005). 따라서, 틸팅차량이 개량 분기기에 서 최대운행속도로 운행될 경우 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수를 변화시켜 지반 강성 변화에 따른 노반의 침하특성을 검토하였으며, 탄성계수의 변화 범위는 상부노반의 경우 $3,000 \sim 8,000\text{tf/m}^2$, 하부노반은 $3,000 \sim 6,000\text{tf/m}^2$, 원지반은 $3,000 \sim 8,000\text{tf/m}^2$ 이다.

상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수 변화에 따른 노반의 침하량 변화는 그림 15에 나타내었으며, 탄성계수 변화와 노반의 침하량 변화에 대한 관계식을 회귀분석을 이용해 도출하였고 회귀분석 결과 $R^2=0.99$ 로 매우 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났으며, 지반의 강성이 강한 경우보다 지반의 강성이 약한 경우에 탄성계수 변화에 따른 노반의 침하량이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

표 15 및 그림 16은 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수 감소율에 따른 노반의 침하량 증가율을 나타내며, 탄성계수가 감소할수록 노반의 침하량이 증가하는 것을 알 수 있다.

지반의 강성이 노반의 침하량에 미치는 영향은 원지반, 상부노반, 하부노반 순으로 크게 나타났으며, 궤도를 지지하는 원지반의 강성이 약할 경우 열차 주행에 따른 승차감 및 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 보인다. 또한, 철도설계기준(건설교통부, 2004)에서는 상부노반 및 하부노반 성토시 KS F 2312의 D 다짐에 의해 지반반력계수 K_{30} 이 11kgf/cm^3 및 7kgf/cm^3 이상이 되도록 규정하고 있으므로 상·하부 노반의 경우 일정값 이상의 지지력을 가진다고 가정하면 원지반의 강성이 약한 구간에서 허용치 이상의 침하가 문제가 될 수 있으므로 그림 15에서 도출된 회귀분석을 이용한 관계식을 적용하여 틸팅차량이 개량 분기기에서 최대운행속도로 운행될 경우 노반의 설계 허용침하량 2.5mm 와 경험적 허

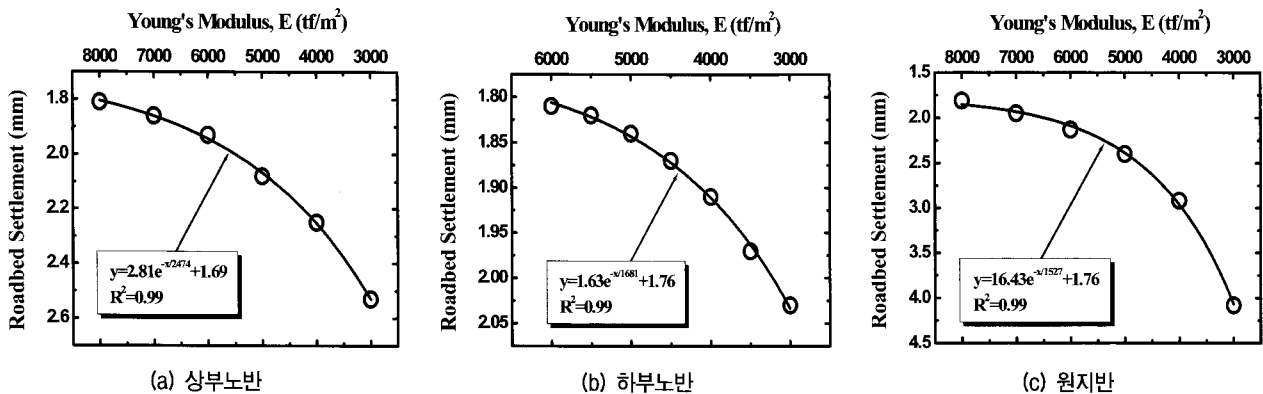


그림 15. 탄성계수 변화에 따른 노반의 침하량

표 15. 지반 탄성계수 감소율에 따른 노반의 침하량 증가율

상부노반				하부노반				원지반				비 고
탄성계수		침하량		탄성계수		침하량		탄성계수		침하량		
감소율 (%)	변화된 값 (tf/m ²)	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	감소율 (%)	변화된 값 (tf/m ²)	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	감소율 (%)	변화된 값 (tf/m ²)	증가율 (%)	변화된 값 (mm)	
-	8,000	-	1.81	-	6,000	-	1.81	-	8,000	-	1.81	기준값
10	7,200	2.2	1.85	10	5,400	1.1	1.83	10	7,200	5.5	1.91	
20	6,400	5.5	1.91	20	4,800	2.2	1.85	20	6,400	11.0	2.01	
30	5,600	9.9	1.99	30	4,200	4.4	1.89	30	5,600	21.0	2.19	
40	4,800	16.0	2.10	40	3,600	7.7	1.95	40	4,800	36.5	2.47	
50	4,000	24.3	2.25	50	3,000	12.2	2.03	50	4,000	63.5	2.96	

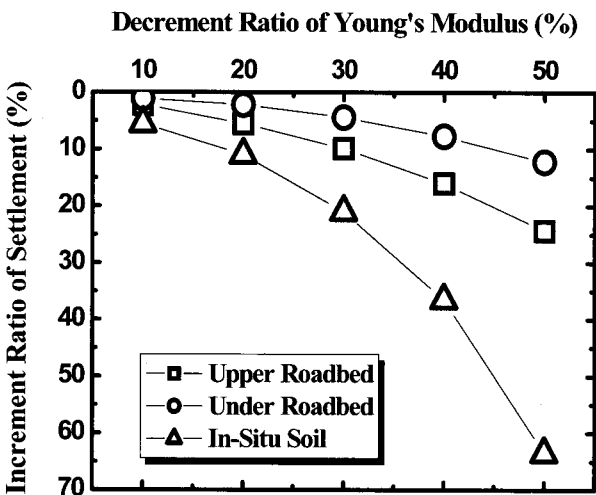


그림 16. 탄성계수 감소율에 따른 노반의 침하량 증가율

용침하량 4mm를 초과하는 원지반의 탄성계수를 검토하였으며, 그 결과 각각 4,700tf/m² 및 3,000tf/m²으로 나타났다. 따라서 틸팅차량이 개량 분기기에서 최대운행속도로 운행될 경우 원지반의 탄성계수가 3,000tf/m² 이상이면 궤도 보수상 문제가 없을 것으로 보이며, 4,700tf/m² 이상이면 승차감 및 궤도 보수상 문제가 없을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 기존 및 개량 분기기 궤도 성능과 노반의 거동을 분석하였으며, 분기기 개선에 따른 궤도부담력과 노반응력 및 침하저감 효과를 평가하였다. 또한, 노반의 침하 및 응력과 허용침하량 및 허용지지력(허용압력)을 비교하여 노반의 안정성을 검토하였으며, 상·하부 노반 및 원지반 탄성계수 변화에 따른 노반의 침하를 평가하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 새마을호와 틸팅차량 각각의 최대운행속도에서 동

적운중은 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 약 18% 및 19%의 동적운중 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 최대 약 20% 정도의 동적운중 저감 효과가 있을 것으로 기대된다.

(2) 새마을호와 틸팅차량 각각의 최대운행속도에서 레일압력은 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 약 31% 및 32%의 레일압력 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 최대 약 30% 정도의 레일압력 저감 효과가 있을 것으로 기대된다.

(3) 새마을호와 틸팅차량 각각의 최대운행속도에서 노반응력은 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 약 30% 및 32%의 노반응력 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 최대 약 30% 정도의 노반응력 저감 효과가 있을 것으로 기대된다.

(4) 새마을호와 틸팅차량 각각의 최대운행속도에서 노반침하는 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 약 37% 및 34%의 노반침하 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 개량 분기기에서 기존 분기기에 비해 최대 약 35% 정도의 노반침하 저감 효과가 있을 것으로 기대된다.

(5) 기존 분기기에 비해 개량 분기기에서 동적운중 및 레일압력 그리고 노반응력 및 침하 저감 효과를 확인할 수 있었으며, 이는 레일의 중량화와 크로싱 연결방식의 변화 등으로 인한 충격력의 감소 효과로 판단된다.

(6) 틸팅차량이 투입될 경우 새마을호에 비해 최대 약 30% 정도의 노반응력 및 침하 저감 효과가 기대되며 이는 틸팅차량의 축중이 새마을호의 축중보다

가벼운 점에 기인한 것으로 판단된다.

- (7) 개량 분기기에서 틸팅차량이 최대운행속도로 운행될 경우 발생하는 노반응력 및 침하량은 각각 노반의 허용지지력(허용압력) 및 허용침하량 이하이므로 노반의 지지력 및 침하 측면에서 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- (8) 상·하부 노반 및 원지반의 탄성계수 변화에 따른 노반의 침하량 변화를 검토한 결과 지반 강성이 노반의 침하량에 미치는 영향은 원지반, 상부노반, 하부노반 순으로 크게 나타났다.
- (9) 상·하부 노반의 경우 성토시 철도설계기준에 따라 일정값 이상의 지지력을 가지도록 시공이 되었다면 원지반의 강성이 약한 곳에서 허용치 이상의 침하가 발생할 수 있다. 틸팅차량이 개량 분기기에서 최대운행속도로 운행될 경우 원지반의 탄성계수가 $3,000\text{tf/m}^2$ 이상이면 궤도 보수상 문제가 없을 것으로 보이며, $4,700\text{tf/m}^2$ 이상이면 승차감 및 궤도 보수상 문제가 없을 것으로 판단된다.

본 연구는 분기기 망간크로싱 하부 노반의 거동을 수치해석을 통해 평가한 것으로 수치해석시 사용된 물성은 선행연구를 참조하여 일반적으로 사용되는 값으로 산정하였다. 하지만 노반압력 산정시 사용된 노반의 압력 분포도는 침목의 재질, 도상 발라스트 및 노반의 물성에 따라 압력분포가 달라질 수 있으며, 수치해석시 사용된 물성은 현장계측을 통한 정확한 값이 아니므로 결과물의 신뢰성 확보를 위하여 추후 현장계측 및 실물 재하시험 등을 통한 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 인제대학교 학술연구구성비 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2004), *철도설계기준(노반편)*, 건설교통부.
2. 서사범 (2002), *개정판 선로공학*, 열과알.
3. 엄기영, 엄주환, 이진형 (2006), “개량분기기 인근의 소음진동 시뮬레이션”, *한국시뮬레이션학회논문집*, 제15권, 제4호, pp.119-128.
4. 이수형 (2005), “수치해석을 통한 콘크리트 궤도 침하 감소 목적의 말뚝기초 설치 효과 평가”, *한국지반공학학회논문집*, 제21권, 제10호, pp.73-83.
5. 전상수, 엄기영, 김재민 (2007), “기존 및 개량 분기기 총격계수 산정에 따른 노반 지지력”, *한국철도학회논문집*, 제10권, 제5호, pp. 582-588.
6. 정우진, 구동희, 양신주 (2005), “분기기 통과속도 제한규정에 대한 타당성 검토연구”, *한국철도학회논문집*, 제8권, 제1호, pp.93-100.
7. 한국철도기술연구원 (2001), *토구조물 최적설계-철도강화노반재료 및 지지력 강화방안에 관한 연구*, 한국철도기술연구원.
8. 한국철도기술연구원 (2004), *분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안 연구*, 3차년도 연구보고서, 한국철도기술연구원.
9. 한국철도기술연구원 (2005), *기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발*, 4차년도 연구보고서, 한국철도기술연구원.
10. 한국철도기술연구원 (2006), *분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안 연구*, 5차년도 연구보고서, 한국철도기술연구원.
11. 한국철도시설공단 (2004), *철도설계편람(토공II)*, 한국철도시설공단.
12. 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, 日本.
13. 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, 日本.
14. Itasca Consulting Group, Inc. (2002), *FLAC^{2D} Manual: Theory and Background*, Itasca Consulting Group, Inc., Minnesota, USA.
15. Richart, F. E., Woods, R. D. and Hall, J. K. (1970), *Vibration of Soils and Foundations*, PrenticeHall, Englewood Cliffs. N. Y.

(접수일자 2007. 11. 12, 심사완료일 2008. 1. 30)