

기존 및 개량 분기기 충격계수 산정에 따른 노반 지지력

Roadbed Bearing Capacity Associated with Estimated Impact Factor in Conventional and Improved Turnout System

전상수[†] · 엄기영* · 김재민**

Sang-Soo Jeon · Ki-Young Eum · Jae-Min Kim

Abstract Since the turnout system in railroad restricts the train speed, the KNR (Korean National Railroad) provides the specification for the speed (130km/h) of the train when the train passes the turnout system. Therefore, the turnout system in pre-existing railroad is necessary to be improved to speed-up for the train. In this study, the dynamic wheel-load field tests have been performed to evaluate the track performance and the roadbed bearing capacity has been examined using numerical analysis at the turnout crossing in the conventional and improved turnout system. The impact factor is estimated using the data sets achieved from the dynamic wheel-load field tests in the conventional and improved turnout system. The stress acting on the roadbed for the improved turnout system is substantially decreased compare to that for the conventional turnout system.

Keywords : Turnout system, Impact factor, Roadbed bearing capacity, Dynamic field test, Numerical analysis

요 지 분기기 시스템은 기존선의 속도향상을 저해하는 요소들 중에 하나이며, 우리나라에서는 안전을 위하여 분기기 직선측 통과속도를 130km/h로 제한하고 있어 기존선 속도향상을 위해서는 반드시 개선되어야 할 사항이다. 본 연구에서는 기존 및 개량 분기기 궤도 성능을 평가하기 위해 동적윤중 현장계측 데이터를 이용하여 충격계수가 산정되었으며, 수치해석을 이용하여 분기기 하부 노반의 지지력을 평가하였다. 그 결과 분기기 개선에 따른 노반응력 저감 효과를 확인할 수 있었으며, 기존 및 개량 분기기에서 발생한 노반응력은 허용지지력 이하로 나타났다.

주 요 어 : 분기기 시스템, 충격계수, 노반의 지지력, 동적 현장계측, 수치해석

1. 서 론

철도 운행에 있어 분기기는 열차를 주행선로에서 이웃한 선로로 이동시키는 매우 중요한 역할을 수행하는 장치로써, 신축이음부 및 레일이음부와 함께 궤도의 취약개소 중 하나이다. 분기기 구조적 특성상 주행열차의 윤연로를 확보하기 위해 존재하는 결선부로 인해 철도하중과 같이 반복되는 충격하중에 의해 궤도손상을 유발하는 개소로써[1], 우리나라 규정에서는 분기기 직선측 최대 통과속도를 130km/h로 제한하고 있다[2]. 분기기 통과속도 제한은 유지보수가 다른 시스

템에 비하여 용이하지 않고 침단 및 크로싱(crossing)부에 어쩔 수 없이 불연속부가 존재하게 되는 분기기의 특수성에 기인한다[3]. 따라서 최근 기존선 고속화에 있어서 분기기는 반드시 개선되어야 할 사항으로써, 현재 분기기의 새로운 형식 및 구조가 제시되어 개량 분기기에 대한 성능 평가가 이루어지고 있다[1]~[3]. 하지만 개량 분기기에 대한 성능 평가는 분기기 시스템의 구조적인 부분에 중점을 두어 진행되고 있으며, 분기기 개선으로 인한 속도향상 효과가 궤도 하부구조인 노반에 미치는 영향은 검토되지 않았다.

본 연구에서는 기존 및 개량 분기기 크로싱부 동적윤중 현장계측 데이터를 이용하여 기존 및 개량 분기기 크로싱부 충격계수를 산정하였으며, 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC^{2D}를 이용해 기존 및 개량 분기기 하부 노반의 응력을 검토하여 분기기 개선으로 인한 노반응력 저감 효과를 분석하였으며, 허용지지력과 비교하여 노반의 안정성을 검토하였다.

† 책임저자 : 정희원, 인제대학교 토목공학과, 조교수
E-mail : sssj@inje.ac.kr

TEL : (055)320-3651 FAX : (055)320-3432

* 철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, 책임연구원

** 인제대학교 토목공학과, 석사과정

2. 분기기 개선 사항

국내 기존선에 부설되어 있는 분기기의 대부분은 50kg 분기기로서 전체 분기기의 70%이상을 차지하고 있다. 그러나 최근 기존선의 고속화, 고밀화 추세에 따라 선로의 조건도에 이에 적합하게 개선되어야 할 필요가 있다. 개량 분기기에서는 기존 분기기에서 사용되던 50kg 레일을 60kg 레일로 변경하였으며, 노즈부 접촉각을 3배 이상 감소시킴으로써 차륜과 워레일 및 노즈레일의 접촉면을 적게 하였다. 또한, 기존 분기기에서는 목침목을 사용하였지만 개량 분기기에서는 공장조립이 가능하며 현장 시공성을 확보할 수 있는 분절형 PC침목을 사용하였으며, 기존선 고속화에 따른 궤도의 충격 및 승차감 저하를 방지하고 유지보수비용 절감을 위해 크로스부 연결방식을 레일이음매판을 이용한 연결방식에서 테르밋 용접을 이용한 방식으로 변경하였다[3].

본 연구에서의 기존 분기기는 50kg 탄성분기기(목침목형, 고정 망간크로싱, 연결방식: 이음매판)를 나타내며, 개량 분기기는 60kg 탄성분기기(PC침목형, 고정 망간크로싱, 연결방식: 테르밋용접)를 나타낸다.

3. 동적윤중 계측데이터를 이용한 충격계수 산정

3.1 동적윤중 현장계측 데이터 분석

분기기 크로스부 구조성능 평가를 위하여 개량 분기기(#10)가 부설된 구미역과 기존 분기기 중 변수(#10)가 같고 같은 종류의 차량이 통과하는 왜관역을 대상으로 레일 및 침목변위, 크로스부 발생윤력, 진동가속도, 동적윤중에 대한 현장계측이 수행되었으며[3], 그 중 본 연구에서는 동적윤중 현장계측 데이터를 이용하여 기존 및 개량 분기기 크로스부 충격계수를 산정하였다. 동적윤중의 측정은 크로스부 장대유무 영향을 확인할 수 있는 크로스부 후단의 레일이음부에서 측정되었다.

동적 현장계측의 경우 계측장비의 수집율(sampling rate)이 높을수록 정확한 데이터를 얻을 수 있다. 하지만, 구미역과 왜관역을 대상으로 실시된 동적윤중 현장계측에서 사용된 동적계측장비(DRA101, MGC- PLUS)의 경우 수집율이 최대 100Hz로 태백선 및 장항선을 대상으로 기존선 궤도의 충격계수 산정[4]에 사용되었던 동적계측장비(Vision)의 수집율(최대 100kHz)에 비해 최대 수집율이 1/1,000 정도였으며, 수집율이 낮은 경우에는 Fig. 1(b)와 같이 윤중 측정시점의 차륜의 위치가 윤중 계이지 직상이 아닌 경우가 발생하게 된다. 따라서, 동적윤중 현장계측 데이터를 회귀분석을 통하여 차륜이 윤중 계이지 직상인 경우의 값을 추정하였다. Fig. 2는 윤중 측정시점의 차륜의 위치에 따른 윤중 추정의 회귀분석 결과를 나타내며, 윤

중 측정시점의 차륜의 위치가 계이지 직상이 아닌 경우에는 Fig. 2(b)와 같이 계측데이터와 회귀분석 결과가 차이가 나는 것을 알 수 있다.

현장측정 대상구간을 통과하는 열차는 크게 무궁화호, PMC 새마을호, 화물열차로 구분되며, 동적윤중 측정을 통한 충격력의 영향분석은 비교적 열차 편성이 일률적인 무궁화호에 대한 측정결과를 바탕으로 수행하였다. 그리고 여객전용 열차인 무궁화호 객차의 정적윤중을 정확히 산정하기에는 현실

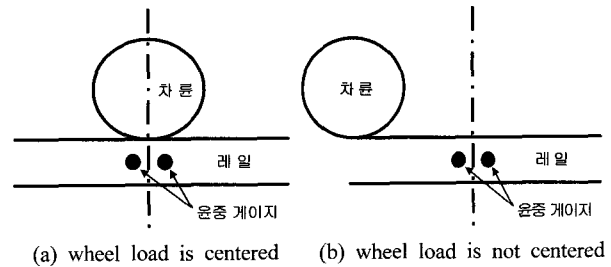
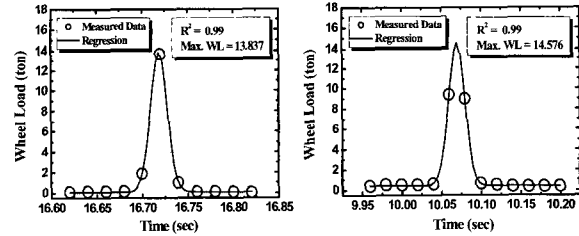


Fig. 1. Position of wheel load relative to gauge



(a) wheel load is centered (b) wheel load is not centered

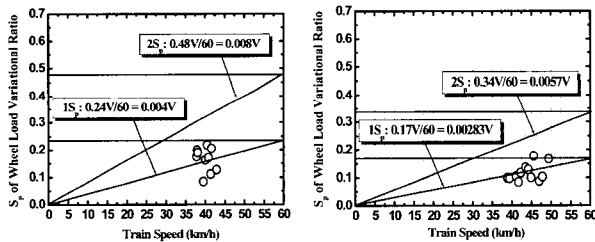
Fig. 2. Regression analysis of wheel load

Table 1. Variational ratio of wheel load associated with train speed in conventional turnout system

속도 (km/h)	정적윤중 평균 P _{sta} (ton)	동적윤중 평균 P _{dyn} (ton)	윤중변동율 평균 (P _{dyn} -P _{sta})/ P _{sta}	윤중 변동율 표준편차
37.8	11	15.97	0.452	0.175
37.9	11	15.30	0.391	0.199
38.1	11	11.68	0.062	0.190
39.5	11	13.62	0.238	0.084
40.0	11	14.36	0.305	0.162
40.5	11	12.74	0.158	0.218
40.8	11	12.19	0.109	0.171
41.4	11	13.69	0.245	0.111
41.6	11	13.20	0.200	0.205
42.9	11	14.76	0.342	0.127

Table 2. Variational ratio of wheel load associated with train speed in improved turnout system

속도 (km/h)	정적윤중 평균 P _{sta} (ton)	동적윤중 평균 P _{dyn} (ton)	윤중변동율 평균 (P _{dyn} -P _{sta})/P _{sta}	윤중 변동율 표준편차
38.9	11	14.59	0.326	0.099
39.4	11	14.34	0.303	0.098
41.1	11	13.59	0.235	0.105
41.7	11	14.61	0.328	0.084
42.3	11	13.33	0.212	0.117
43.5	11	13.44	0.221	0.136
44.2	11	13.44	0.222	0.128
44.9	11	13.63	0.239	0.100
45.6	11	13.10	0.191	0.177
47.0	11	12.65	0.150	0.087
47.8	11	12.50	0.137	0.103
49.4	11	13.06	0.188	0.167



(a) conventional turnout system (b) improved turnout system

Fig. 3. Standard deviation of variational ratio for wheel load

적으로 불가능한 실정이며 분석결과와 신뢰성을 확보하기에 어려움이 있으므로 정적윤중 및 동적윤중 측정 데이터는 동력차에 해당하는 부분만을 고려하여 분석하였다.

동력차 부분에서 발생한 주행속도에 따른 동적 윤중변동율의 평균값과 표준편차를 속도별로 구분하여 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 동일한 구간에서 동일열차에 대해서는 열차 주행속도의 편차가 크지 않으므로 일정 속도대에 집중분포하고 있음을 알 수 있다.

3.2 기존 및 개량 분기기 충격계수 산정

일반적으로 충격계수는 윤중변동율에 대한 표준편차의 2배, 즉 2σ를 사용하여 산정하며[5], 본 연구에서도 충격계수 산정시 윤중변동율의 표준편차에 2배한 값, 즉 2σ를 사용하였다. 윤중변동율은 (P_{dyn}-P_{sta})/P_{sta}로 나타내며, 이는 열차주행

에 따른 윤중의 변동량을 정적윤중으로 나눈 값으로서 순수한 동적하중의 변동값을 나타낸다.

Fig. 3은 기존 및 개량 분기기에서 윤중변동율의 표준편차 평균값과 여기에 안전율을 고려한 표준편차의 2배(2σ)를 취하여 충격계수 값을 나타낸 것이며, 이를 식으로 표현하면 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

■ 기존 분기기: $i = 1 + 0.008V$ (1)

■ 개량 분기기: $i = 1 + 0.0057V$ (2)

여기서, i : 속도충격율

V : 속도 (km/h)

4. 수치해석 모델링

4.1 궤도 및 차량 조건

새마을호와 텀팅차량의 축중은 각각 22ton 및 15ton이며, 최대운행속도는 각각 140km/h 및 180km/h이다. 레일의 종류는 기존 분기기의 경우 KS50 레일, 개량 분기기의 경우 KS60 레일을 사용하였으며, 침목의 종류는 기존 분기기의 경우 목침목으로 목침목 규격 중 150mm×240mm×3,100mm를 사용하였다. 개량 분기기의 경우 PC 침목이며, 침목저면의 면적은 노반압력에 큰 영향을 미치는 요소로 본 연구는 기존 및 개량 분기기 형식변화에 따른 각각의 충격계수를 산정하고, 노반에 미치는 영향을 분석하는 것이 목적이므로 침목 크기에 의한 영향을 배제하고자 목침목과 동일한 규격에 대하여 고려하였다. 침목 간격은 0.6m, 도상 깊이는 0.3m에 대하여 고려하였으며, 레일패드 수직 스프링계수는 4,750t/m, 목침목 압축 스프링계수는 10,000t/m, 도상 수직 스프링계수는 20,000t/m, 노반의 초기 지반반력계수는 7,200t/m³을 사용하였다.

4.2 수치해석 조건

수치해석에 사용된 단면은 상부노반이 1.5m, 하부노반이 1.5m 성토된 경우에 대하여 모델링하였다. 모델링의 범위는 상부노반의 폭이 7.2m, 노반의 경사는 1:1.8로 하였고 원지반의 크기는 파의 반사에 의한 영향을 고려하여 깊이 72m, 폭 180m로 하였다. Fig. 4는 수치해석 모델 모식도를 나타낸다.

수치해석 시 경계조건의 경우 바닥면에 대해서는 수직방향을 구속하였고 양쪽 수직면에 대해서는 파를 흡수하는 경계 조건인 free-field boundary condition [6]을 사용하였다. 재료 감쇠비는 일반적으로 사용되는 2%를 사용하였으며, 해석에 사용된 지반물성은 Table 3에 나타내었다.

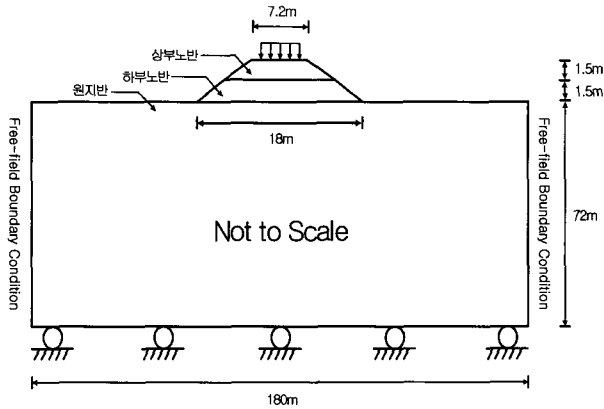


Fig. 4. Configuration of numerical model

Table 3. Soil parameters used in numerical analysis

구 분	상부노반	하부노반	원지반
단위중량 (t/m^3)	1.8	1.8	1.8
탄성계수 (t/m^2)	8,000	6,000	8,000
포아송비	0.3	0.28	0.3
점착력 (t/m^2)	0.2	0.4	0.2
내부마찰각 ($^{\circ}$)	32	30	32

4.3 열차하중 모사

본 연구에서는 새마을호와 틸팅차량의 하중을 노반압력으로 모사하여 노반면에 재하 하였다. 동적윤중과 레일압력, 침목하면압력을 구하는 과정은 식 (3)~(8)과 같으며 노반압력은 도상내 압력의 분포도를 이용하였다[5].

1) 동적윤중

동적윤중은 윤중 정상분과 변동분의 합으로 나타난다.

- 윤중정상분 (P_{sta})

$$P_{sta} = \frac{W_0}{2} \quad (3)$$

여기서, W_0 : 축중 (ton)

- 윤중변동분 (ΔP_{sta})

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

- 동적윤중 (P_{dyn})

$$P_{dyn} = P_{sta} + \Delta P_{sta} \quad (5)$$

2) 레일압력 (P_R)

최대 레일압력은 윤중 P_{dyn} 이 침목 직상에 작용하는 경우와 침목사이 중앙에 작용하는 경우에 대하여 고려한다.

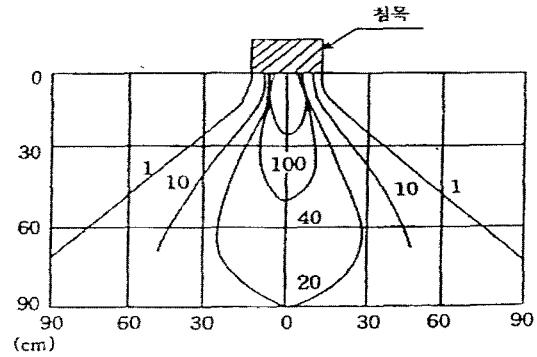


Fig. 5. Pressure distribution of ballast associated with soil depth [7]

- 윤중이 침목 직상에 작용

$$P_R = P_{dyn} (1 - e^{-\beta \frac{a}{2}} \cos \beta \frac{a}{2}) \quad (6)$$

- 윤중이 침목 사이 중앙에 작용

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

여기서, a : 침목간격 (m)

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

3) 침목하면압력 (P_t)

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

$$P_t = \frac{2 \times P_{Rmax}}{B \times L} \quad (8)$$

여기서, B : 침목의 폭 (m)

L : 침목의 길이 (m)

4) 노반압력

침목 하면에서 노반 표면으로 전해지는 압력은 도상내 계각 클수록 작아진다. 노반압력은 도상내 압력의 분포도(Fig. 5)를 이용하였으며, 도상내 압력은 침목의 직하부에서 가장 크고 직하부에서 깊이가 깊어질수록, 거리가 멀어질수록 영향이 작아진다.

4.4 하중 재하

본 연구에서는 노반압력으로 모사된 틸팅차량 하중을 정현파를 이용해 노반면에 재하 하였다. 시간에 대한 정현파를 이

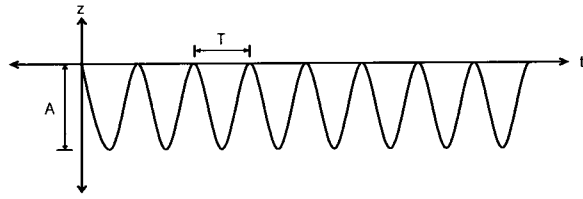
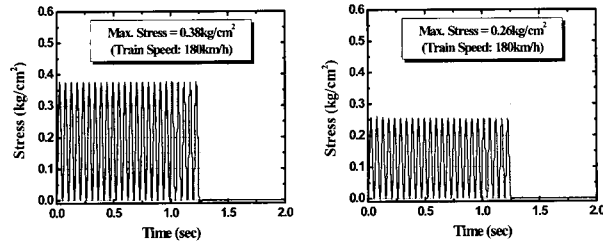
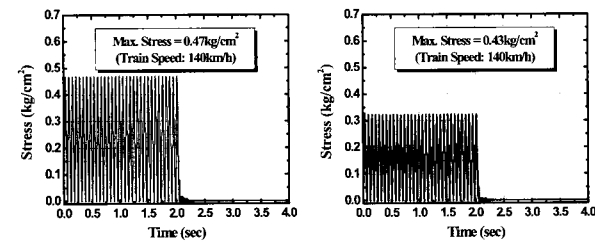


Fig. 6. Wheel loading in form of periodic sinusoidal wave



(a) conventional turnout system (b) improved turnout system

Fig. 7. Roadbed stress induced by tilting-train loading



(a) conventional turnout system (b) improved turnout system

Fig. 8. Roadbed stress induced by saemaoul-train loading

용한 하중재하는 Fig. 6과 같으며[8], 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Wave} = \frac{A}{2} \times \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{T} \right) \quad (9)$$

여기서, A : 진폭 (Amplitude)

t : 시간 (Time)

T : 주기 (Period)

5. 열차주행에 따른 분기기 하부 노반응력 평가

5.1 노반의 허용지지력

노반의 허용압력은 Terzaghi 지지력이론, 재래선의 평판재하 시험결과, 여러 기관에 대한 지지력 값의 기준 등에서 대표적 노반을 3개로 분류하여 각 구분에 대한 허용지지력을 Table 4에 나타내었다. 노반 상태가 양호한 경우(강화노반)는 3.0kg/cm², 노반 상태가 보통인 경우는 2.4kg/cm²의 허용지지력을 적용하며 노반 상태가 불량한 경우는 구체적인 장소를 지정하여 관리하고 1.5kg/cm²의 허용지지력을 적용한다[9]. 본 연구에

Table 4. Allowable bearing capacity in condition of roadbed

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

Table 5. Roadbed stress associated with tilting-train speed

속도 (km/h)	노반응력 (kg/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

Table 6. Roadbed stress associated with saemaoul-train speed

속도 (km/h)	노반응력 (kg/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

서는 노반 상태가 보통인 경우의 허용지지력인 2.4kg/cm²를 적용하였다.

5.2 분기기 하부 노반응력 평가

기존 및 개량 분기기에 대하여 앞으로 투입될 틸팅차량과 기존 운행차량인 새마을호가 운행될 경우 발생하는 노반의 응력을 수치해석을 통하여 검토하였다.

틸팅차량의 경우 30~180km/h까지 30km/h씩 증가시켰으며, 새마을호의 경우 20~140km/h까지 20km/h씩 증가시켜 노반의 응력을 검토하였다. Fig. 7 및 Fig. 8은 기존 및 개량 분기기에서 틸팅차량 및 새마을호가 각각의 최대운행속도로 운행될 때 발생하는 노반의 응력을 나타낸다. 정현파 하중 재하에 따라 노반의 응력이 증가하고 감소하는 과정이 반복되며, 노반의 최대응력은 기존 및 개량 분기기에서 틸팅차량 운행시 각각 0.38kg/cm² 및 0.26kg/cm², 새마을호 운행시 각각 0.47kg/cm² 및 0.33kg/cm²로 나타났다. Table 5 및 Table 6과

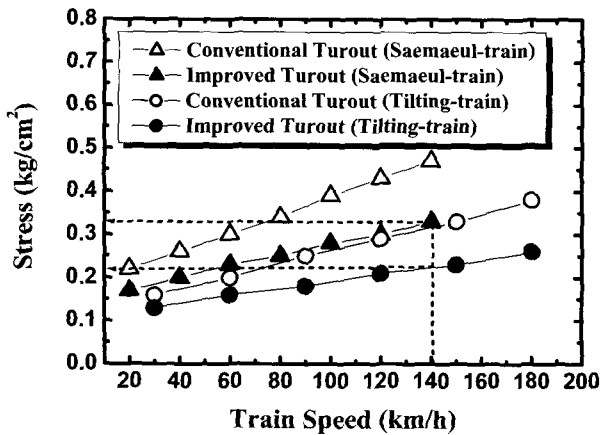


Fig. 9. Roadbed stress associated with train speed

Fig. 9는 새마을호와 틸팅차량 운행시 열차 속도별 노반응력을 나타낸다.

Table 5 및 Table 6과 Fig. 9에서 틸팅차량과 새마을호 각각의 최대운행속도에서의 노반응력을 보면, 틸팅차량과 새마을호 각각 개량 분기기에서 최대응력이 0.26kg/cm² 및 0.33kg/cm²로 기존 분기기에서의 최대응력 0.38kg/cm² 및 0.47kg/cm²에 비해 31.6% 및 29.8%의 노반응력 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 기존 분기기의 크로싱에서 사용되는 KS50 레일을 개량 분기기에서는 KS60 레일로 교체함으로써 레일 중량화 및 단면적 증가로 인한 궤도부담력의 감소 효과와 기존 분기기에서의 크로싱 연결방식인 레일이음매판을 이용한 형식에서 개량 분기기에서는 테르밋 용접을 이용한 연결방식의 변화에 의한 연결부 충격의 감소 효과로 판단된다.

그리고 Fig. 9에서 새마을호의 최대운행속도 140km/h를 기준으로 개량 분기기에서의 틸팅차량과 새마을호에 의한 노반응력은 각각 약 0.22kg/cm² 및 약 0.33kg/cm²로 나타났다. 따라서, 틸팅차량이 투입될 경우 새마을호에 비해 약 30%의 노반응력 저감 효과가 기대되며 이는 틸팅차량의 축중이 새마을호의 축중보다 가벼운 점에 기인한 것으로 판단된다.

또한, 틸팅차량의 최대운행속도 180km/h에서 노반의 최대응력은 기존 분기기에서 0.38kg/cm², 개량 분기기에서 0.26kg/cm²로 보통 상태의 노반의 허용지지력 2.4kg/cm² 이하이므로 기존 및 개량 분기기에서 틸팅차량이 최대운행속도로 운행될 경우 노반의 지지력 측면에서 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 기존(50kg 탄성분기기, 목침목형, 고정 망간크로싱, 연결방식: 이음매판) 및 개량(60kg 탄성분기기, PC침목

형, 고정 망간크로싱, 연결방식: 테르밋용접) 분기기 충격계수 산정에 따른 노반의 지지력을 평가하는 것으로, 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존 및 개량 분기기 크로싱부의 충격계수는 각각 $i = 1 + 0.008$ 및 $i = 1 + 0.0057$ 로 산정되었다.
- (2) 분기기 개선에 따른 노반의 응력저감 효과는 최대 약 30% 정도이며, 이는 레일의 중량화와 크로싱 연결방식의 변화 등으로 인한 충격력의 감소 효과로 판단된다.
- (3) 틸팅차량이 투입될 경우 새마을호에 비해 약 30%의 노반응력 저감 효과가 기대되며, 이는 틸팅차량의 축중이 새마을호의 축중보다 가벼운 점에 기인한 것으로 판단된다.
- (4) 틸팅차량의 최대운행속도 180km/h에서 노반의 최대응력은 기존 분기기에서 0.38kg/cm², 개량 분기기에서 0.26kg/cm²로 노반의 허용지지력인 2.4kg/cm²이하인 것으로 나타나 기존 및 개량 분기기에서 틸팅차량이 최대운행속도로 운행될 경우 노반의 지지력 측면에서 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 충격계수 산정시 사용된 동적운중 현장계측 데이터의 경우 열차속도가 30~50km/h의 범위로 편중되어 있으므로 향후 지속적인 연구를 통하여 다양한 속도 대역의 데이터를 이용한 신뢰성 높은 충격계수 산정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2006년도 철도기술연구개발사업(과제번호: T202A1010001-06A010101011)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 엄기영, 엄주환, 이창훈(2006), "현장측정을 통한 기존 분기기용 목침목과 개량 분기기 분절침목의 동적저동 비교 평가", 한국철도학회 논문집, 제9권, 제6호, 한국철도학회, pp.746-752.
2. 한국철도기술연구원(2004), "분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안연구 3차년도 연구보고서", 한국철도기술연구원.
3. 한국철도기술연구원(2006), "분기기 성능개선을 통한 기존선 속도향상 방안연구 5차년도 연구보고서", 한국철도기술연구원.
4. 엄주환, 유영화, 엄기영(2003), "기존선 궤도의 충격계수 산정에 관한 연구", 한국철도학회 논문집, 제6권, 제4호, 한국철도학회, pp.239-245.
5. 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.
6. Itasca Consulting Group, Inc. (2002), “FLAC^{2D} Manual: Optional Features”, Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA.
 7. 사서범(2002), “선로공학”, 열과알.
 8. 한국철도기술연구원(2001), “토구조물 최적설계-철도강화노반재
 9. 한국철도기술연구원(2004), “기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발 3차년도 연구보고서”, 한국철도기술연구원.
- (2007년 8월 21일 논문접수, 2007년 10월 15일 심사완료)