

틸팅차량 주행에 따른 기존선 곡선 궤도의 거동 특성

Characteristics of Curved Track Behaviors according to Traveling Tilting Train

박용걸[†] · 최정열* · 성덕룡** · 천대성***

Yong-Gul Park · Jung-Youl Choi · Deok-Yong Sung · Dae-Sung Chun

Abstract A trial run of locally-developed tilting train has been in process on Chungbuk line since the test vehicle was first produced. For the system stabilization, interface verification among the systems including track, structure, catenary and signaling system, not to mention the rolling stock, is very crucial. In the area of wayside structure, the stability of track structure and train run shall be evaluated through the review of impact by increased speed by developed train on track structure. The study thus was intended to evaluate the impact on track while a tilting train is running the curve section, which is vulnerable to accelerated train speed. The analysis of tilting train test running the part of Chungbuk line and Honam line was conducted to identify the impact on existing track performance by tilting train. To identify the movement behavior of each part of track while tilting train, high speed train and traditional train (Mugunghwa and freight train) were running the existing line, wheel load, lateral wheel load, rail bending stress, vertical and lateral displacement of rail and vertical displacement of sleeper were compared and analyzed so as to evaluate the expected impact by tilting train for improving the train speed.

Keywords : Stability of track structure, Tilting train, Curve section, Track performance

요 지 국내에서 개발된 한국형 틸팅열차는 현재 시제차량 제작을 마치고, 충북선을 시작으로 시운전 시험이 단계적으로 진행되고 있다. 시운전 시험에서는 한국형 틸팅열차의 시스템 안정화를 위해 차량 외에 궤도, 구조물, 전차선, 신호 등 각 시스템 상호간의 인터페이스 검증이 필요하며, 선로구축물 분야에서는 개발차량의 증속이 궤도구조에 미치는 영향을 비롯한 궤도부담력 검토를 통해 궤도구조의 안정성과 주행안정성 평가가 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 틸팅차량이 기존선 선로중 취약개소인 곡선부를 증속할 때 궤도에 미치는 영향을 검토하고자, 현재 시운전 시험이 진행되고 있는 충북선 및 호남선 구간 중 일부 선로를 대상으로 틸팅차량 주행이 기존선 궤도성능에 미치는 영향을 분석하였다. 틸팅열차, 고속열차 및 일반열차(무궁화, 화물)가 기존선 주행시 궤도각부의 거동특성을 파악하기 위해 운중, 횡압, 레일 휨응력, 레일 수직·횡변위, 침목 수직변위 등을 측정하여 비교·분석함으로써 향후 기존선 속도향상을 위해 투입될 틸팅차량이 궤도에 미치는 영향을 평가하였다.

주요어 : 궤도구조 안정성, 틸팅열차, 곡선부, 궤도성능

1. 서론

국내에서 개발된 한국형 틸팅열차는 현재 시제차량 제작을 마치고, 충북선을 시작으로 시운전 시험이 단계적으로 진

행되고 있다. 시운전 시험에서는 한국형 틸팅열차의 시스템 안정화를 위해 차량 외에 궤도, 구조물, 전차선, 신호 등 각 시스템 상호간의 인터페이스 검증이 필요하며, 선로구축물 분야에서는 개발차량의 증속이 궤도구조에 미치는 영향을 비롯한 궤도 부담력 검토를 통해 궤도구조의 안정성과 주행안정성 평가가 수행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 틸팅차량이 기존선 선로중 취약개소인 곡선부를 증속할 때 궤도에 미치는 영향을 검토하고자, 현재 시운전 시험이 진행되고 있는 충북선 및 호남선구간 중 일부 선로를 대상으로 틸팅차

† 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 공학박사
E-mail : ygpark@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6575 FAX : (02)971-6575

* 정회원, (주)대한콘설리트 철도부 궤도팀 사원, 공학석사
** 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 박사과정
*** 학생회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과, 석사과정

량 주행이 기존선 궤도성능에 미치는 영향을 분석하였다.

틸팅열차, 고속열차 및 일반열차(무궁화, 화물)가 기존선 주행시 궤도 각부의 거동특성을 파악하기 위해 윤중, 횡압, 레일 휨응력, 레일 수직·횡변위, 침목 수직변위 등을 측정하여 비교·분석함으로써 향후 기존선 속도향상을 위해 투입될 틸팅차량이 궤도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 현장측정

2.1 측정구간의 차량 현황

측정구간을 통과하는 열차는 크게 틸팅열차(TTX), 무궁화호, 화물열차, 고속열차(KTX)로 구분되며, 틸팅차량과 유사 속도대역으로 주행하는 일반차량과의 궤도성능 비교·분석을 통해 향후 틸팅차량의 기존선 투입시 궤도에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. Fig. 1은 측정구간을 통과하는 각 차량의 제원을 나타낸 것이다.

2.2 측정구간 제한

기존선에서의 틸팅차량 및 일반차량에 의한 궤도부담력 검토를 위해 틸팅차량의 시험선 구간인 충북선(구간 A~C)과 호남선(구간 D)에서 정밀 궤도측정을 수행하였다. Table. 1은 측정구간의 궤도현황을 나타낸 것이며, 전경은 Fig. 2와 같다.

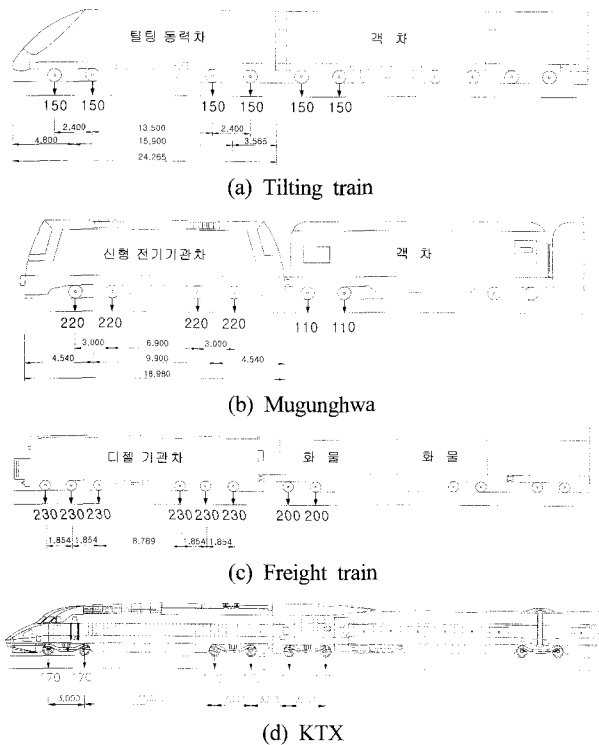


Fig. 1. Properties of measured vehicles (unit : kN, mm)

3. 측정시스템 구축

대상선로에서 측정된 윤중, 횡압, 응력 및 변위응답은 증폭기를 통해 증폭된 신호들을 MGC-PLUS(Data Acquisition System)에 저장한 후, 오리진™ 프로그램을 사용하여 분석하였다. 현장측정을 위한 센서는 곡선부 궤도의 내외측에 동일하게 설치하였으며 센서설치 위치는 Fig. 3과 같다.

현장측정시스템은 변형률 게이지 및 변위계를 조합하여 12

Table 1. Properties of test site

구분	충북선			호남선
	A	B	C	D
곡선반경(R)	400m	600m	600m	3,000m
레일	50kg N 정척레일	50kg N 장대레일	50kg N 정척레일	50kg N 장대레일
침목	목침목	PC침목	목침목	PC침목
체결구	스파이크	Pandrol e-clip	스파이크	Pandrol e-clip
캔트(c)	120mm	120mm	120mm	70mm

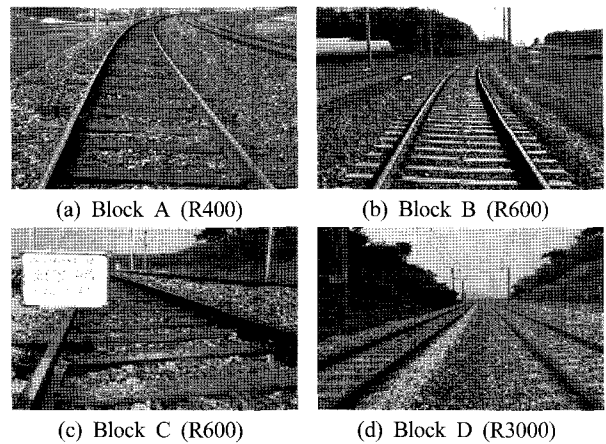


Fig. 2. View of test site

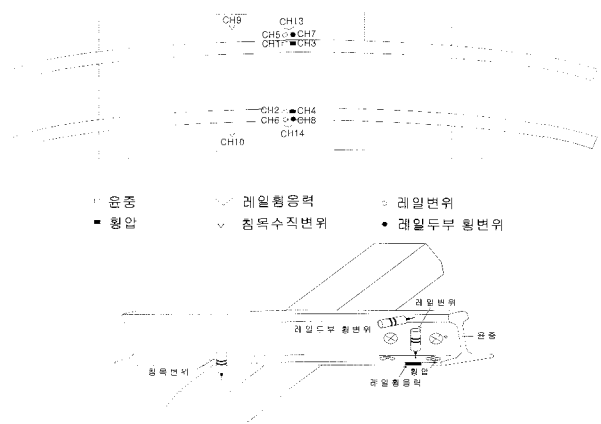


Fig. 3. View of sensor installation

개의 채널을 동시 측정할 수 있도록 시스템을 구성하였으며, 측정된 하중, 변위, 응력 신호들은 Dynamic Strain Amplifier를 통해 증폭된 후 측정신호 저장장치인 MGC-PLUS 내부로 저장된다.

4. 궤도성능평가 항목 및 측정방법

4.1 레일 힘응력

레일 힘응력의 측정은 침목간 중앙의 레일 내·외측 하부 플랜지에 종방향으로 1축 변형률 게이지를 부착하여 측정하였으며, 변형률 게이지 설치전경 및 위치도를 Fig. 4에 나타내었다.

4.2 변위

열차주행시 발생하는 레일과 침목의 동적변위를 측정함으로써 측정대상구간을 통과하는 동적하중의 영향을 평가할 수 있다. Fig. 5는 곡선구간에서의 레일변위계, 침목변위계 설치전경과 측정위치도를 나타낸 것이다.

4.3 윤중

윤중게이지 설치위치는 측정구간의 내·외측 레일에 Fig. 6과 같이 침목간 중심에서 각각 100mm 떨어진 위치에 레일북부의 중립축에 45°의 각도를 가지고 8방향으로 결선된 윤중게이지를 부착하여 측정한다. 계측시 열차는 고속으로 주행하므로 실제 발생한 윤중을 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생되지 않도록 충분한 수집율(Sampling Rate)을 설정하였다. 그리고 발생한 윤중 이외의 노이즈 성분들은 주파수 분석을 통해 디지털 필터로 로패스 필터링과 하이패스 필터링 처리를 함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다.

레일에 부착한 변형률 게이지를 통하여 직접 측정한 값은

윤중에 비례하여 발생하는 변형률 데이터로써 데이터 수집장비(Data Acquisition System)를 통하여 얻은 변형률을 실제 작용하는 윤중의 절대량으로 환산하기 위하여 윤중 검정(Calibration)을 수행하고 이때 얻어진 정적 윤중 데이터를 이용하여 선형회귀분석(Linear Regression)을 통해 환산윤중을 도출함으로써 하중단위의 동적 윤중값을 구한다. Fig. 6과 같이 윤중게이지를 레일에 부착하고, 유압잭을 이용하여 Fig. 7와 같이 0kN에서 40~50kN까지 정적하중을 단계적으로 가압하여 이때 발생한 계측값을 기록한다. 이때 오차발생과 선형회귀식의 신뢰성을 고려하여 3회 이상 동일한 실험을 반복하였다.

Fig. 8은 재하시간 변화에 따른 내·외측 레일에 재하한 정적 작용하중(데이터 수집장치에 저장된 변형률 데이터)을 도시한 그림과 측정 변형률을 레일에 작용한 윤중으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과(예)를 나타낸다.

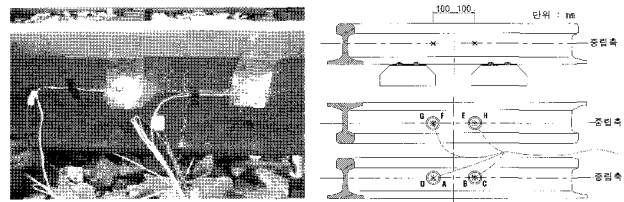


Fig. 6. Attachment of wheel load gages



Fig. 7. View of wheel load calibration

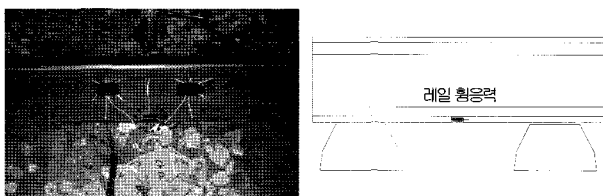


Fig. 4. Attachment of strain gages

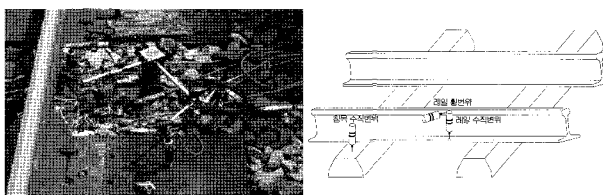
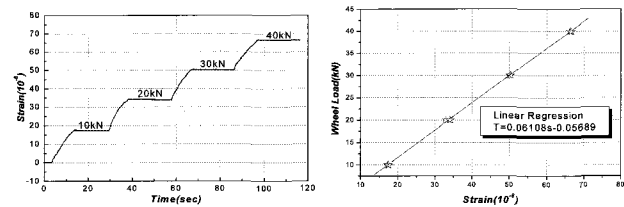
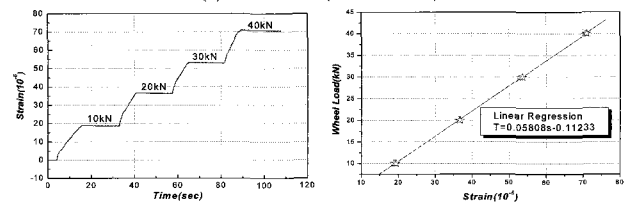


Fig. 5. View of LVDT installation



(a) Block B (outside rail)



(b) Block B (inside rail)

Fig. 8. Example of measured wheel load strain & linear regression result

4.4 횡압

횡압게이지 부착위치는 곡선구간을 주행하는 열차에 의해 레일 및 궤도에 발생하는 동적횡압을 파악하기 위해 곡선구간 내·외측 레일에 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 레일에 발생하는 횡압을 측정하기 위한 횡압게이지 설치전경 및 부착도는 Fig. 9와 같다.

횡압측정은 Fig. 9와 같이 침목간 중심에서 각 100mm 떨어진 위치의 레일 플랜지 내·외측에 변형률 게이지를 부착하고 결선면 레일 종방향 힘의 영향을 배제시켜 전단변형률로써 측정할 수 있다. 그 위치는 레일복부와 플랜지 사이의 우각부에는 변형률 게이지가 들어가지 않으므로 될 수 있는 한 복부에 가깝게 부착한다. 윤중 게이지는 레일 복부상의 중립축에 부착이 가능하기 때문에 완전한 전단변형 측정이 될 수 있지만, 횡압게이지는 중립축에 부착이 곤란하기 때문에 이와 같이 배치한다. 또한, 횡압의 경우도 동적윤중 산정과 동일

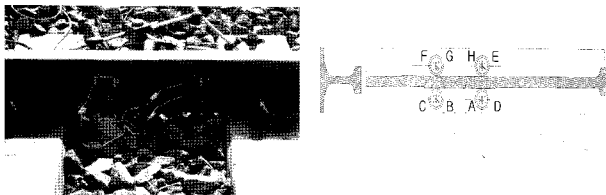


Fig. 9. Attachment of lateral wheel load gages



Fig. 10. View of lateral wheel load calibration

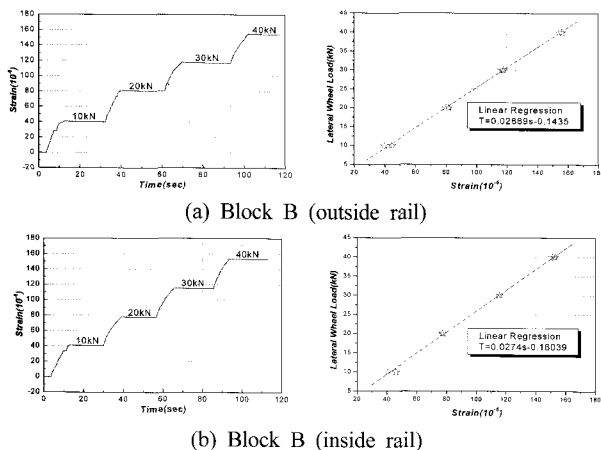


Fig. 11. Example of measured lateral wheel load strain & linear regression result

한 방법으로 횡압검정 및 선형회귀분석을 통해 산출된다. Fig. 10은 횡압 검정(Calibration)을 수행하는 전경을 나타낸다.

Fig. 11은 재하시간 변화에 따른 곡선구간 내·외측 레일의 정적 작용하중 및 측정 변형률을 레일에 작용한 횡압으로 환산하고자 수행한 선형회귀분석의 결과(예)를 나타낸다.

5. 측정결과 및 분석

5.1 윤중 측정결과

틸팅차량의 곡선부 주행시 동적윤중의 발생특성을 파악하고자 내·외측 레일에 윤중게이지를 부착하여 틸팅차량과 일반 열차와의 발생응답(열차별 동적윤중의 절대값)을 비교·분석하여 틸팅차량이 궤도에 미치는 영향을 평가하였다.

Fig. 12~13은 곡선구간 주행시 틸팅차량(TTX)과 일반열차와의 내·외측 윤중 크기를 비교하여 나타낸 것이다.

윤중 측정결과, 차량 종류별 동적윤중의 크기는 설계윤중의 차이에 따라 유사속도 대역에서 틸팅차량이 일반차량 보다 최소 35kN 정도 작게 나타났으며 속도 증가시에는 동적윤중증폭의 영향에 따라 최대 80kN 정도 틸팅차량이 작게 나타났다. 구간 A에서는 통과열차 모두 외측 레일의 윤중이 크게 나타났으며 이는 측정대상 선로중 비교적 곡선반경이 작

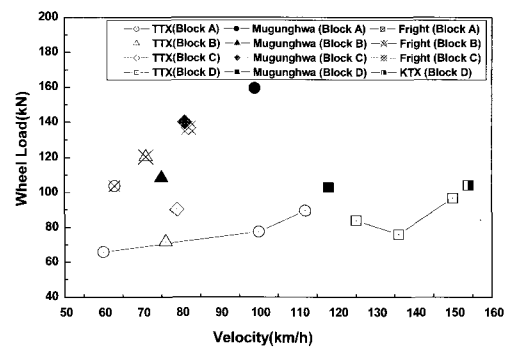


Fig. 12. Result of wheel load (outside)

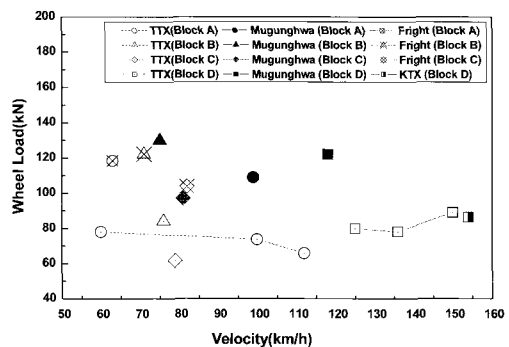


Fig. 13. Result of wheel load (inside)

아 곡선부 열차 주행시 추가원심력의 영향으로 차량중량의 편심효과가 가중되어 이것이 윤증의 증가로 나타난 것으로 판단된다. 또한 구간 D에서도 속도 증가에 따라 내측의 윤증이 감소하고 외측의 윤증이 증가하는 일반적인 경향을 보이고 있다. 반면, 구간 B의 경우 다른 구간에 비해 다소 저속주행을 하였던 개소로서 내측 윤증이 외측 윤증보다 약 12~15kN 정도 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 곡선부 주행차량이 균형속도 이하로 주행함에 따라 캔트초과 구간과 같은 윤증 발생특성이 나타난 것으로 분석되었다. 또한, 구간 D에서는 틸팅차량 최대 증속대역에서의 윤증이 고속열차(KTX)에 의한 윤증발생량 보다 작거나 유사한 수준으로 나타났다.

5.2 레일수직변위 측정결과

곡선부 열차주행시 발생하는 레일의 동적변위 응답을 파악하기 위해 곡선부 내·외측 레일의 동일한 위치에서 틸팅차량(TTX)과 일반차량에 의한 발생응답을 비교·분석하였다. 곡선구간 내·외측 레일의 수직변위를 측정하여 유사 속도대역에서의 열차종류별 레일수직변위량을 비교하여 그 결과를 Fig. 14~15에 나타내었다.

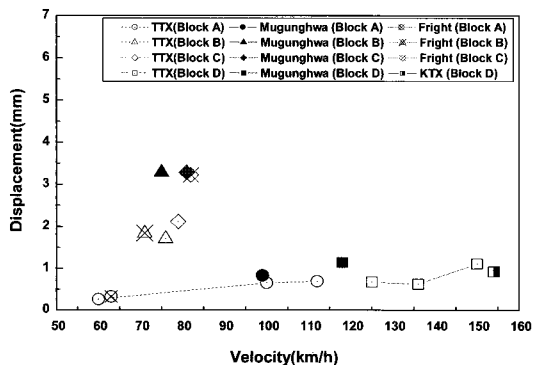


Fig. 14. Result of vertical rail displacement (outside)

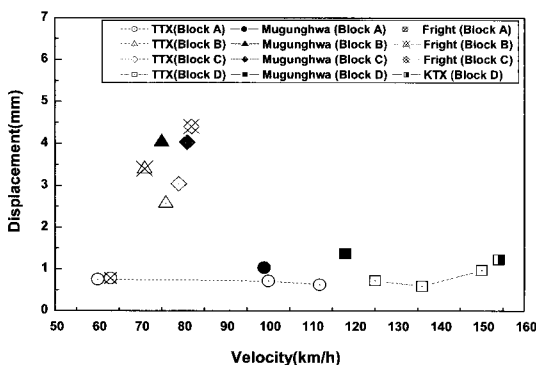


Fig. 15. Result of vertical rail displacement (inside)

구간 A와 C의 경우 레일 수직변위량은 유사 속도대역에서 차량종류와 무관하게 외측 레일의 변위량이 내측 레일의 변위량 보다 작은 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 윤증이 크게 작용하는 구간에서 레일수직변위도 크게 측정되어야 하는 일반적인 경향과 상이한 결과로써 이와 같은 측정결과는 도상자갈의 노후에 따른 세립화 진행 및 뜬침목 현상으로 인한 레일지점간 거리 증가에 의해 레일부담력이 가중되어 레일수직변위의 과다한 증가가 초래된 것으로 판단된다. 반면 구간 B의 경우, 속도변화에 따른 레일의 수직변위량은 윤증 변화의 경향과 동일하게 속도 증가에 따라 외측 레일의 변위량은 증가하고, 내측 레일의 변위량은 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 윤증이 크게 작용하는 구간에서 레일수직변위도 크게 측정되어 곡선구간 내·외측 레일의 윤증증감 현상과 일치하는 것으로 판단된다.

또한 구간 B, C에서의 레일수직변위 측정결과가 다른 구간에서의 측정결과를 크게 상회하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과는 본 구간의 궤도상태 불량에서 기인한 것으로 판단된다. 본 측정개소에 대한 육안조사 결과, 도상자갈의 노후화(세립화, 입도불량) 및 목침목, 체결구(스파이크)의 상태불량이 관찰되었으며, 특히 도상자갈의 노후에 따른 뜬침목 발생 및 스파이크에 의한 침목과 레일의 체결상태 불량, 목침목 강성저하에 의한 국부변형 등에 의해 레일지점간 거리의 증가로 레일에서의 과다한 힘이 발생한 것으로 판단된다. 스파이크를 사용하는 목침목 궤도구조에서는 일반적으로 장기 사용에 의해 목침목과 스파이크 연결부의 체결이완, 목침목 할열 및 파손 등이 발생하며, 특히 본 측정개소의 경우 침목 변위보다 레일변위가 더 크게 발생한 것으로 볼 때 목침목의 강성저하 및 베이스플레이트와 목침목 접촉면의 압좌로 인해 레일-스파이크-목침목 사이에 공간(틈)이 발생하여 목침목이 레일지점으로써의 기능을 제대로 수행하지 못한 경우인 것으로 판단된다.

구간 D에서는 틸팅차량의 경우 증속에 따른 윤증증가폭이 크지 않아 레일수직변위 또한 속도변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않았으나 일반차량 및 고속열차(KTX)의 경우에는 약 18% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

구간별 레일수직변위 측정결과, 틸팅차량의 경우 증속에 따른 윤증증가폭이 크지 않아 레일수직변위 또한 속도변화에 따라 큰 차이가 나타나지 않았으나 일반차량의 경우에는 약 20% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 틸팅차량의 경우 증속에 따라 내·외측 레일의 변위 응답차가 감소하는 것으로 나타났으며, 일반 차량의 경우에는 증속에 따라 내·외측 레일의 변위차가 윤증 발생량의 차이와 같이 일정부분 발생하는 것으로 나타났다. 또한 측정여건상 속도변화를 고려한 측

정이 되지 못하여 속도변화(증속)에 따른 레일수직변위의 영향에 대한 정량적인 파악은 어려우나 틸팅차량의 설계속도가 일반차량 보다 작은 점을 감안할 때 틸팅차량의 기존선 투입에 따른 궤도부담력은 일반차량에 비해 적을 것으로 판단된다.

5.3 침목수직변위 측정결과

곡선구간에서 발생하는 침목의 동적변위 응답을 파악하기 위해 침목 내·외측의 동일한 위치에서 틸팅차량(TTX)과 일반차량의 발생응답을 비교·분석하였다. Fig. 16~17은 곡선구간 침목 내·외측의 수직변위 측정결과를 나타낸 것이다.

구간 A, C의 경우 유사 속도대역에서 열차종류별 침목의 수직변위량이 레일수직변위 발생경향과 같이 차량종류와 무관하게 침목 외측의 변위량이 침목 내측의 변위량 보다 작은 것으로 나타났다. 반면, 구간 B의 경우 속도 증가에 따른 침목의 변위량은 레일수직변위 발생 경향과 유사하게 속도 증가에 따라 침목 외측 변위량은 증가하고, 침목 내측 변위량은 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 구간 C의 경우 궤도구성품의 상태불량과 도상자간의 노후화(세립화, 입도불량)로 인한 뜬침목의 영향으로 과도한 침목변위가 발생하였으며 이러한 경향은 차량종류와 무관하게 나타났다.

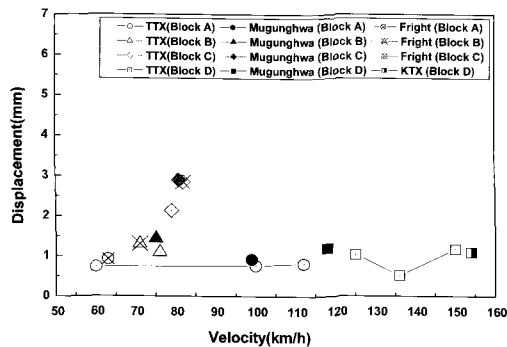


Fig. 16. Result of vertical sleeper displacement (outside)

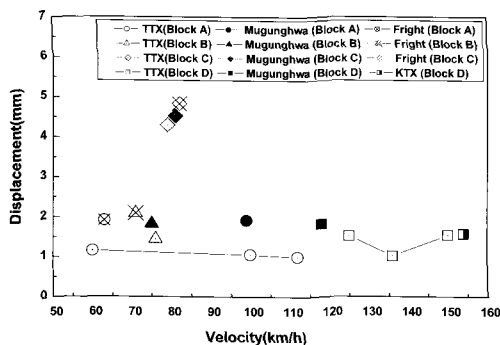


Fig. 17. Result of vertical sleeper displacement (inside)

구간 D의 경우 전반적인 침목수직변위 경향은 모두 내측이 크게 나타났으며 이는 비교적 큰 곡선반경임에도 불구하고 소정의 캔트가 설정되어 있어 내측 레일에 작용하는 하중부담이 다소 과다하게 편중된 것으로 판단되나, 대상 선로의 도상상태가 균일하지 못하여 일정한 경향을 파악하기에는 무리가 있었다. 또한 최대 증속대역에서의 응답치가 유사속도대역으로 주행하는 고속열차에 의한 응답보다 작거나 유사한 수준으로 나타났다.

5.4 횡압 측정결과

틸팅차량의 곡선부 주행시 동적횡압의 발생특성을 파악하고자 내·외측 레일에 횡압게이지를 부착하여 열차종류별 발생응답(열차별 동적횡압의 절대값)을 비교·분석하였다. Fig. 18~19는 유사 속도대역으로 통과하는 일반차량과 틸팅차량(TTX)의 횡압 크기를 비교하여 나타낸 것이다.

구간 A에서의 전반적인 횡압의 크기는 곡선반경(R400)의 영향을 받아 다른 측정개소 보다 크게 나타났으나 그 크기가 차량종류와 무관하게 일반적인 경우(동적운중의 약 60% 수준) 보다 다소 큰 것으로 나타나 선형 및 차량조건 외에도 궤도상태에 따른 영향이 반영된 결과인 것으로 판단된다. 구간 B의 경우, 저속주행시의 최대횡압은 내측 레일이 외측 레일

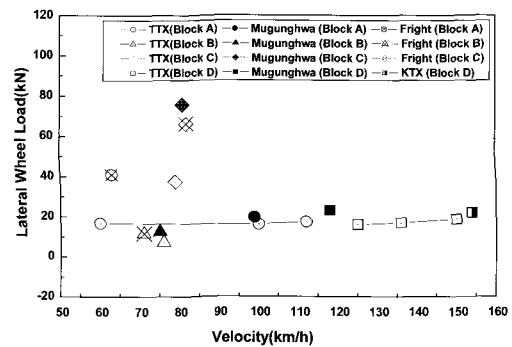


Fig. 18. Result of lateral wheel load (outside)

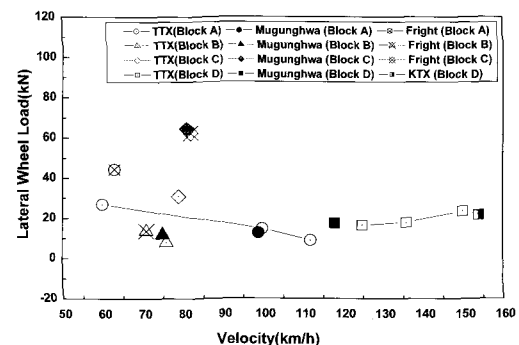


Fig. 19. Result of lateral wheel load (inside)

에 비해 약 10kN 정도 크게 발생하였으나 속도 증가에 따라 외측 레일의 횡압이 미소하지만 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 차량종류별 횡압의 크기는 구간 A, B, C 모두 유사속도 대역에서 틸팅차량이 일반차량에 비해 외측 레일에서 약 5~25kN 정도 작게 나타나 향후 틸팅차량의 곡선부 주행에 따른 횡방향 궤도부담력의 수준은 일반열차에 비해 양호할 것으로 판단된다.

구간 D에서의 내·외측 횡압발생수준은 유사한 것으로 나타났다으며 이러한 경향은 대상구간의 비교적 큰 곡선반경에 의해 열차의 일반적인 곡선부 주행특성이 뚜렷하게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

5.5 레일횡변위 측정결과

곡선구간에서 발생하는 횡방향 하중작용의 특성을 파악하기 위해 내·외측 레일의 동일한 위치에서 틸팅차량(TTX)과 일반차량의 발생응답을 비교·분석하였다. 틸팅차량의 곡선부 주행시 레일의 횡방향 거동 특성을 파악하고자 내·외측 레일에 횡방향 변위계를 설치하여 측정을 실시하였다. 열차종류 및 구간별 내·외측 레일의 횡변위를 비교하여 그 결과를 Fig. 20~21에 나타내었다.

구간 A, C의 경우 레일 횡방향 변위량은 횡압의 변화 경향

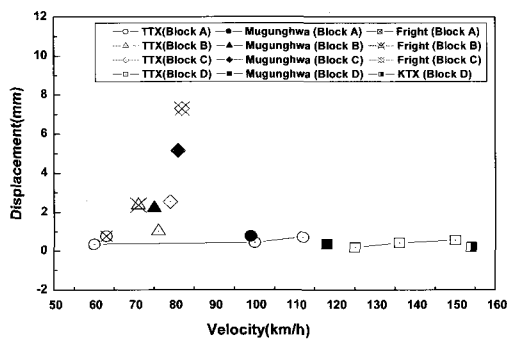


Fig. 20. Result of lateral rail displacement (outside)

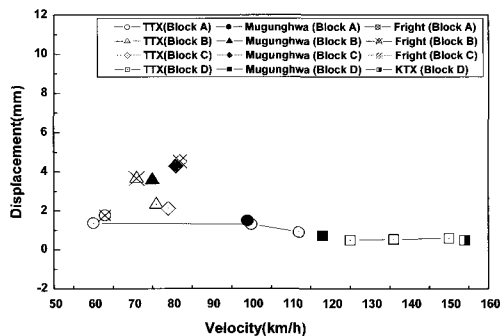


Fig. 21. Result of lateral rail displacement (inside)

과 유사하게 외측 레일보다 내측 레일의 변위량이 크게 나타났으나 내·외측 레일에 작용하는 횡압의 크기 차이에 비해 큰 차이를 보이고 있다.

또한, 다른 측정개소 보다 횡압 대비 과다한 수준의 레일 횡변위가 발생하였으며 이러한 측정결과는 대상구간의 궤도 상태가 불량한 것에서 기인한 것으로 판단된다. 구간 A, C의 경우 육안조사결과 도상자갈의 노후화에 의해 도상저항력이 상당부분 소실되었을 것으로 예상되었으며, 소정의 체결력으로 스파이크에 의해 레일과 침목의 위치가 고정되어 있어야 함에도 불구하고 목침목의 노후로 인해 베이스플레이트의 견고한 고정과 스파이크의 완전한 지지가 이루어지지 못하여 종방향 레일지지 간격 증가를 초래함에 따라 레일의 횡방향 변형 및 이동이 발생된 것으로 판단된다. 그러나 유사 속도대역으로 주행하는 경우의 레일 횡변위는 틸팅차량의 경우 일반차량에 비해 작게 나타나 틸팅차량의 기존선 투입시 궤도에 미치는 횡방향 부담력은 일반차량에 비해 적을 것으로 판단된다.

구간 B의 경우 레일의 횡방향 변위량은 횡압의 변화 경향과 동일하게 속도가 증가함에 따라 외측 레일의 변위량은 증가하고, 내측 레일의 변위량은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 틸팅차량에 의한 레일횡변위는 속도 증가에 관계없이 일반차량에 비해 작게 나타났다.

구간 D의 경우에도 속도 증가에 따라 내측 레일의 변위량이 다소 증가하였으나 틸팅차량에 의한 레일의 횡방향 변위량은 속도 증가에 관계없이 기존차량과 유사하거나 다소 작게 나타났다.

5.6 레일 휨응력 측정결과

레일 휨응력의 측정은 침목간 중앙의 레일 하부플랜지 측면에 변형률 게이지를 부착하여 열차주행시 레일저부에서 발생하는 동적 휨변형률을 측정하여 응력으로 환산하였다. 이때, 레일강의 탄성계수는 일반적인 50kgN 레일강의 탄성계수 ($E=2.1 \times 10^5 \text{MPa}$)를 적용하였다.

Fig. 22~23은 유사 속도대역으로 곡선구간을 주행하는 차량에 의해 발생하는 내·외측 레일의 휨응력 측정결과를 열차종류 및 구간별로 나타낸 것이다.

구간 A의 경우, 유사 속도대역에서 차량종류와 무관하게 외측 레일의 휨응력이 내측 레일보다 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 이러한 측정결과는 윤증 발생경향과는 일치하나 레일수직변위 발생경향과는 상이한 결과를 나타내었다. 또한, 틸팅차량 주행에 따른 레일의 휨응력이 일반열차에 비해 작은 것으로 나타났으나 전반적으로 발생 레일 휨응력의 수준이 높은 것은 앞서 기술한 바와 같이 대상개소의 궤도상태 불

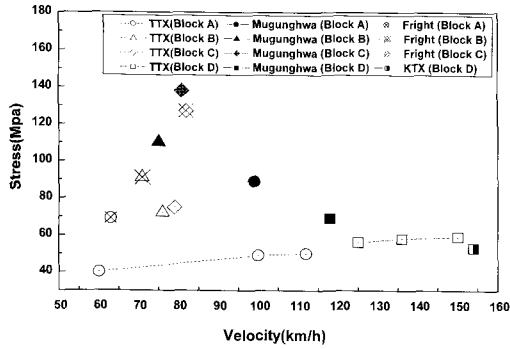


Fig. 22. Result of rail bending stress (outside)

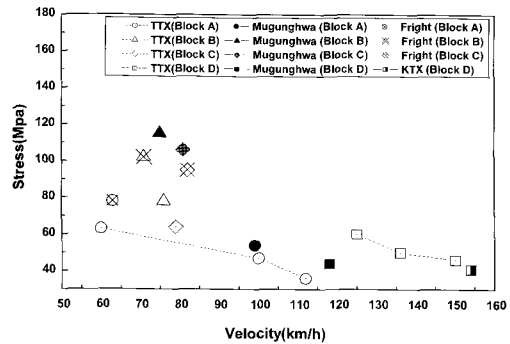


Fig. 23. Result of rail bending stress (inside)

량으로 인해 측정개소 중 가장 큰 레일 휨응력이 발생된 것으로 판단된다.

구간 B의 경우에도 속도 증가에 따라 외측 레일의 휨응력이 증가하는 것으로 나타났으며, 100km/h의 속도대역으로 주행하는 틸팅차량에 의한 외측 레일의 발생 최대 휨응력은 50MPa로써 무궁화호의 89MPa 보다 약 45% 정도 작게 나타났다. 반면, 구간 C의 경우 유사 속도대역에서 레일 휨응력이 차량 종류와 무관하게 외측 레일이 내측 레일 보다 작게 발생하는 것으로 나타났으며, 열차종류별 내·외측 레일의 발생 휨응력 수준의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 구간 C의 경우에도 틸팅차량 주행에 따른 레일의 휨응력은 일반 열차에 비해 작으나 구간 A와 같이 대상개소의 궤도상태 불량으로 인해 다소 과다한 레일 휨응력이 발생한 것으로 판단된다.

구간 D의 경우, 구간 B와 같이 속도 증가에 따라 외측 레일의 휨응력이 내측 레일보다 크게 나타났으며, 틸팅차량에 의한 레일의 발생 최대 휨응력은 일반열차에 의한 응답과 유사하거나 다소 작게 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 틸팅차량이 기존선 선로중 취약개소인 곡선

구간을 주행할 때 궤도에 미치는 영향을 검토하고자, 현장측정 결과를 바탕으로 틸팅차량 및 일반차량에 대한 궤도성능을 비교분석함으로써, 향후 기존선 속도향상을 위해 투입될 틸팅차량에 대한 궤도부담력을 검토하였다.

- (1) 동적윤증, 수직변위(레일, 침목) 및 레일 휨응력 측정결과, 곡선부를 주행하는 차량에 의해 내·외측 궤도에 작용하는 동적발생응답의 특성은 틸팅차량의 경우 내·외측 레일의 발생 변위응답 차이 및 크기가 일반차량의 경우보다 작게 나타났으며, 증속에 따른 윤증증가폭이 크지 않아 속도변화에 따른 레일수직변위 차이는 크지 않았으나 일반차량의 경우에는 약 20% 정도 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 레일의 휨응력 측정결과, 속도 증가에 따라 외측 레일의 휨응력은 증가하고, 내측 레일의 휨응력은 감소하는 것으로 나타났으며, 100km/h의 속도대역으로 주행하는 틸팅차량에 의한 외측 레일의 발생 최대 휨응력은 무궁화호보다 약 45% 정도 작게 나타났다.
- (3) 반면 구간 C와 같은 재래선에서의 레일수직변위 측정결과가 구간 B(선로개량 시행개소)에서의 측정결과를 크게 상회하는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과는 대상구간의 궤도상태 불량에서 기인한 것으로 판단된다.
- (4) 저속주행시 최대횡압은 일반적으로 내측 레일이 외측 레일 보다 다소 크게 발생하였다. 또한 레일의 횡방향 변위량은 횡압의 변화 경향과 동일하게 속도가 증가함에 따라 외측 레일의 변위량은 증가하고, 내측 레일의 변위량은 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 차량 종류별 횡압 및 레일 횡변위의 크기는 유사속도 대역에서 틸팅차량이 일반차량 보다 작게 나타났다.
- (5) 구간 A 및 구간 C와 같이 선로개량을 시행하지 않은 개소에서 선로개량을 시행한 구간 보다 횡압 대비 과다한 수준의 레일 횡변위가 발생한 것은 대상구간의 궤도 상태가 불량한 것에서 기인한 것으로 판단된다.
- (6) 기존선 중 선로개량이 시행되지 않은 구간의 경우, 도상자 같은 장기 사용에 의한 노후화가 진행 중에 있어 그 기능이 상당부분 소실되었고, 소정의 체결력으로 스파이크에 의해 레일과 침목의 위치가 고정되어 있어야 함에도 불구하고 목침목의 노후(할열, 파손 등)로 인해 베이스 플레이트의 견고한 고정과 스파이크의 완전한 지지가 이루어지지 못하여 종방향 레일지지 간격 증가를 초래함에 따라 연직방향 궤도부담력을 가중시키고, 과다한 횡방향 변형을 유발한 것으로 판단되어 기존선 고속화를 위한 틸팅차량 투입에 앞서 적절한 수준의 선로개량을 시행함이 바람직할 것으로 판단된다.

7. 향후 연구과제

보다 많은 측정개소에서 충분한 데이터를 획득하여 기존선의 궤도 상태를 정량적으로 파악하고 틸팅차량 주행에 따른 궤도의 거동한계기준을 수립하기 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 건설교통부의 건설교통기술연구개발 사업의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, 2000, 기존선의 고속화를 위한 시스템에 관한 연구.
2. 신광복 외, 2003, 틸팅 시스템 실용기술 개발.
3. 한국철도기술연구원, 2003, 기존선 속도향상을 위한 선로시스템 개선기술 개발.
4. 강기동, 박종방, 나성훈, 김정환, 2000, 고속철도 궤도계측에 관한 연구, 대한도목학회 학술발표회 논문집, pp.435-438.
5. 이종득, 2001, 철도공학, 노해출판사.

(2007년 10월 10일 논문접수, 2007년 11월 23일 심사완료)