

현장계측을 통한 기존선 철도 구조물 접속부의 거동분석

Dynamic Analysis of Structure's Approaches through Field Tests in the Conventional Railway

박준오*
Park, Joon-Oh

이상배**
Lee, Sang-Bae

홍원표***
Hong, Won-Pyo

ABSTRACT

Korean trains pass many mountain areas, so the volume of structures like bridge and tunnel has large part of railway lines. Train speed-up naturally needs a straight line in railway, then structures are increasing, and the length of structure has more than 70% in Kyongbu high-speed railway.

The stiffness of bridge and tunnel is higher than the soil in the roadbed in spite of dynamic difference in vibration and displacement. Differences in stiffness have more dynamic effects and increase the deformation and destruction in the track and roadbed. This influences passenger's comfort and the safety of operation, and it needs more track maintenance.

This study selected tunnel with ballast track, tunnel with concrete track, and structure's approaches with short maintenance cycle in the roadbed and had track acceleration tests and track liner inspections using track master in the field.

This study will measure periodically to structure's approaches which have very fast track irregularity and analyze dynamic differences and track irregularity near structure's approaches, so realize the cause of track irregularity of structure's approaches and use basic data for reasonably strengthening method of structure's approaches.

1. 서 론

우리나라 철도시설은 산악지역을 많이 통과하게 되어 상대적으로 교량 터널 등 구조물의 비중이 커지고, 고속화는 필연적으로 선로의 직선화가 요구됨으로써 구조물이 증가되고 있으며, 경부고속철의 경우 약 70%이상이 이러한 구조물이다.

교량과 터널은 진동 및 처짐에서 동적거동에 차이는 있으나 강성이 크고 이들과 연속되는 토노반은 강성이 상대적으로 낮아 윤중이 통과될 때 급격한 강성의 차이는 궤도와 토노반에 충격을 증가시켜 궤도틀림과 파괴를 유발하며 노반의 변상에도 영향을 미치게 된다. 이는 차량의 승차감 저하와 주행안전성에 영향을 주며, 궤도유지보수 노력을 증가시키고 있는 실정이다.

본 연구에서는 기존 철도에서 자갈도상 터널, 콘크리트도상 터널과 토노반에서 보수주기가 짧은 구조물 접속부 구간을 대표적으로 선정하여 궤도계측과 트랙마스터를 이용한 궤도검측을 병용하여 현장계측을 실시하였다.

본 연구는 궤도틀림이 신속하게 진행되는 구조물 접속부에 대하여 일련의 계측을 주기적으로 수행하고 접속부 전후의 동적거동 및 궤도틀림을 분석함으로써 접속부 궤도틀림의 원인을 파악하고 이에 대한 합리적인 접속부 보강 방안의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

* 한국철도시설산업(주), 선로시설연구소 연구개발팀장, 정회원

E-mail : railway@hanafos.com TEL : (042)257-9489 FAX : (042)257-9488

** 한국철도공사, 철도연구개발센터 기술연구팀 차장

*** 한국철도시설산업(주), 선로시설연구소

2. 구조물 접속부 현장계측

구조물 접속부의 궤도틀림 진전여부를 파악하기 위하여 한국철도공사의 협조하에 대표적으로 유지보수주기가 짧은 기존선의 33개소를 답사한 후 자갈도상터널 접속부인 경부선 무월산터널 접속부와 콘크리트도상터널인 호남선 임실터널에 대한 현장계측과 계측결과를 분석해 보고자 한다(표 1).

무월산터널(392k800)은 경부선 밀양-삼랑진구간(381km6~394km1)에 위치하며 배수에 의한 노반분리와 부분적으로 도상의 진동에 의한 분리가 복합적으로 작용하여 침하와 승차감에 악영향을 주는 개소로서 준공된지 약 3년이 지난 R=1,000m의 자갈도상 복선터널이다.

임실터널(53k847)은 전라선 임실-봉천구간(53km0~59km3)에 위치하며 터널 내부의 콘크리트슬래브궤도와 토공부의 자갈도상궤도가 인접하여 직결궤도의 균열이 발생하여 진동과 침하가 발생하고 있으며, 계측지점인 터널종점부의 선형은 직선으로 준공된지 2년이내의 복선 터널이다.

무월산터널과 임실터널 접속부에 대한 계측은 약 1~2개월동안 일정간격을 두고 개소별로 3~5회정도 계측을 실시하였다. 계측항목으로는 윤중, 횡압, 레일과 침목 변위, 자갈도상가속도, 콘크리트슬래브궤도가속도 등을 설정하였으며, 궤도틀림의 진전여부를 파악하기 위해서 터널종점부로부터 약 80~110m 구간을 선정하여 견인식 트랙마스터를 이용하여 궤도검측을 실시하였다(그림 1~3, 표 2).

표 1. 구조물 접속부 계측대상

노선명	구조물명	직곡선	연장(m)	준공년월일
경부선	무월산 (시점)	곡선 (R=1000)	920.0	2003-08-01
전라선	임실 (종점)	곡+직 (R=2,700)	4,655.0	2005-04-30

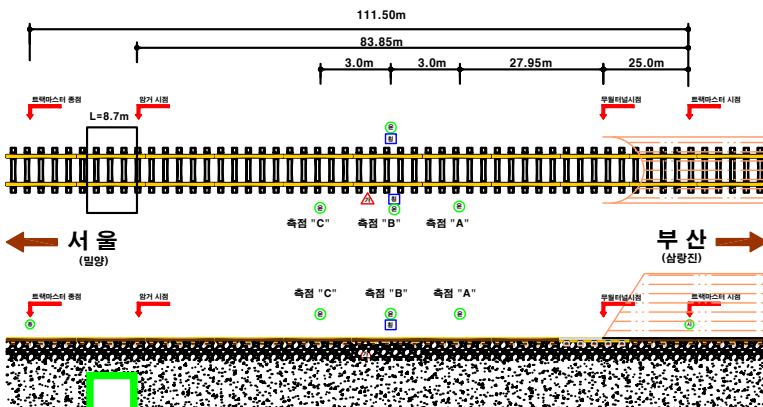


그림 1. 무월터널 측정위치

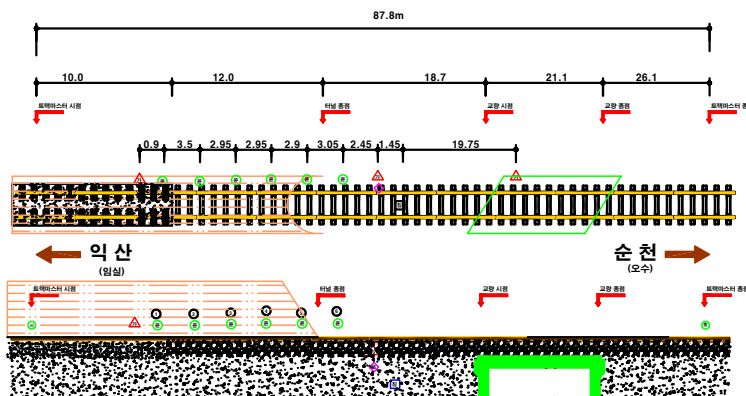


그림 2. 임실터널 측정위치

표 2. 구조물 접속부 계측항목

구분	계측항목	측정점	
		무월터널	임실터널
하중	윤중	4	6
	횡압	2	-
변위	레일수직	1	1
	침목수직	3	3
	침목 횡	3	3
가속도	도상 가속도	1	1
	구조물 가속도	-	2
궤도	궤도틀림	일 1회	일 1회



a. 무월터널 시점부



b. 임실터널 콘크리트 슬래브궤도



c. 무월터널 트랙마스터 궤도검측



d. 임실터널 트랙마스터 궤도검측



e. 레일 운중 센서



f. 레일 및 침목 변위계

그림 3. 계측대상 구조물의 현장계측

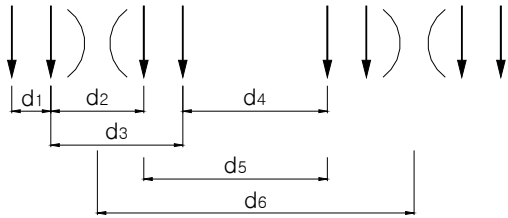
3. 궤도의 가진주파수와 고유진동수 검토

3.1 궤도의 가진주파수

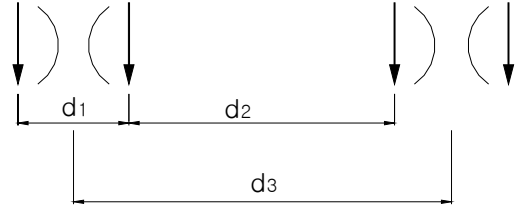
궤도의 진동원인은 크게 규칙적인 경우와 불규칙적인 경우로 나눌 수 있으며, 진동의 발생원인에 따라 진동 주파수가 달라진다. 규칙적인 경우에는 열차의 특성에 따라 일정한 축간을 갖는 다수의 집중하중이 반복적으로 재하됨에 따라 발생하는 대차(bogie)와 차륜이 레일의 한점을 통과할 때 반복적으로 발생하는 대차통과 주파수(bogie passing frequency)와 바퀴통과 주파수(wheel passing frequency), 그리고 차륜이 레일 지지점을 통과할 때 발생하는 침목통과 주파수(sleeper passing frequency) 등을 고려할 수 있으며, 불규칙적인 경우는 바퀴와 레일의 마모 및 레일 표면의 요철 등에 의해 발생하는 주파수 성분으로, 이러한 불규칙 성분은 파장에 따라 8~30cm의 것은 long-pitch, 3~8cm의 것은 short-pitch로 구분하고 있다(그림 4.c~d).

여기서 대차통과 주파수와 바퀴통과 주파수를 보다 상세히 살펴보면 열차의 객차 및 화차부를 대상으로 축 배치 형태에 따라 크게 B-B Type과 관절형 대차로 분류하여 각 열차의 대차 간격 및 차축 간격에 따른 가진주파수 범위를 계산할 수 있다. 기존선에 운행중인 대부분의 열차는 B-B Type으로 한 대차에 2개에 축을 갖는 열차 유형으로 반복하중이 발생하는 축간 성분은 총 6개로 구성된다(그림 4.a). 반면에 관절형 대차인 KTX는 총 3개의 축간성분을 갖으며(그림 4.b) 열차의 운행속도에 따라 그림 4의 c~d

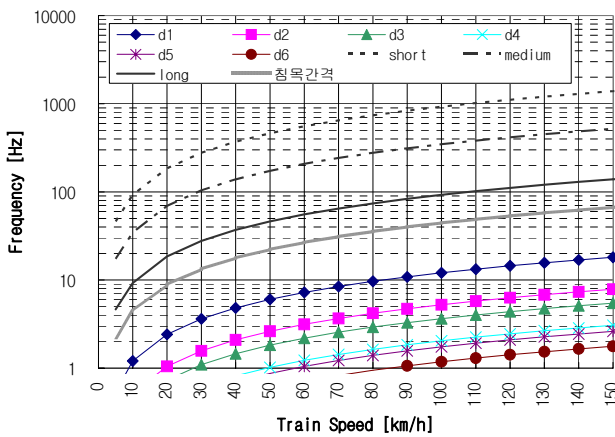
와 같이 가진주파수가 분포하게 됨을 볼 수 있다. 차륜에 의한 가진주파수와 long-pitch에 의한 가진주파수의 사이에 침목간격에 따른 주파수성분이 있으며 그림에 표시한 침목간격에 의한 주파수는 침목간격을 62.5cm로 계산한 값이다.



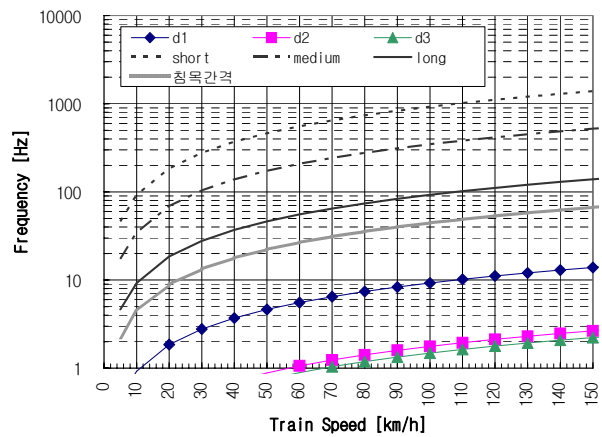
a. B-B Type 차량의 축 배치 형태



b. 관절형 대차의 축 배치 형태



c. B-B type 대차(PMC)



d. 관절형 대차(KTX)

그림 4. 열차의 축간성분과 가진주파수

기존선에서의 가진주파수는 열차별 주요 운행속도에 따라 표 3과 같은 주파수대역을 형성하게 되며, 열차주행시 축간에 의한 가진주파수는 약 1.0~14.5 Hz이하의 범위에 있으며, 침목통과 주파수는 약 35.6~57.8 Hz, 불규칙적인 주파수는 약 74.1~1,203.7 Hz의 넓은 범위에 분포하고 있다.

표 3. 속도 대역별 가진주파수

[단위 : Hz]

차종	속도 [km/h]	d1	d2	d3	d4	d5	d6	침목간격*	Pitch		
									short	medium	long
KTX	110	10.2	1.9	1.6	-	-	-	48.9	1,018.5	381.9	101.9
	120	11.1	2.1	1.8	-	-	-	53.3	1,111.1	416.7	111.1
	130	12.0	2.3	1.9	-	-	-	57.8	1,203.7	451.4	120.4
PMC	100	12.1	5.2	3.7	2.0	1.7	1.2	44.4	925.9	347.2	92.6
	110	13.3	5.8	4.0	2.2	1.9	1.3	48.9	1,018.5	381.9	101.9
	120	14.5	6.3	4.4	2.5	2.1	1.4	53.3	1,111.1	416.7	111.1
무궁화	80	8.5	5.1	3.2	1.7	1.4	1.0	35.6	740.7	277.8	74.1
	90	9.6	5.7	3.6	1.9	1.6	1.1	40.0	833.3	312.5	83.3
	100	10.7	6.3	4.0	2.1	1.7	1.2	44.4	925.9	347.2	92.6

* 침목간격 62.5cm

3.2 고유진동수

열차운행에 의한 가진주파수와 구조물의 고유진동수가 일치하여 발생할 수 있는 공진(resonance)현상에 대한 기존의 연구결과에 의하면 판형교의 경우 각 열차의 축간거리 d₁에 대해 열차의 운행속도대역에

임계속도가 교차하는 것으로 계산되었으나 d_1 의 경우 가진주파수가 고유진동수와 일치하더라도 교량의 응답 교번크기가 작기 때문에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되었다^[1]. 또한 궤도 모델에 대한 고유치 해석결과 자갈도상궤도의 고유진동수는 약 51.4 Hz, 콘크리트 슬래브 궤도의 경우 약 44.3 Hz이다^[2].

4. 구조물 접속부 진동측정

4.1 측정방법

앞에서 언급한 대상개소에 대하여 궤도틀림의 진전상태를 파악하기 위하여 일주일 이상의 간격을 두고 측정하였으며, 측정위치는 그림 1~2.에서와 같이 무월산터널은 도상가속도만 측정하였고, 임실터널은 도상가속도, 콘크리트슬래브궤도와 인접한 콘크리트 T빔교량에 설치하여 주행하는 열차를 모두 측정하였다. 이때 도상가속도는 침목하면으로부터 약 10cm깊이에 매설하였다.

4.2 측정결과 및 분석

경부선 무월산터널의 경우 약 45일에 걸쳐 약 5일간 KTX 49회, PMC 14회, 무궁화호 36회, 화물열차 26회 측정하였다. 측정날짜별 비교를 위하여 차종별 주행속도는 KTX 127km/h, 새마을 PMC 102km/h, 무궁화호 100km/h에 가까운 데이터를 선별하여 1/3 Octave band 해석을 실시하였다.

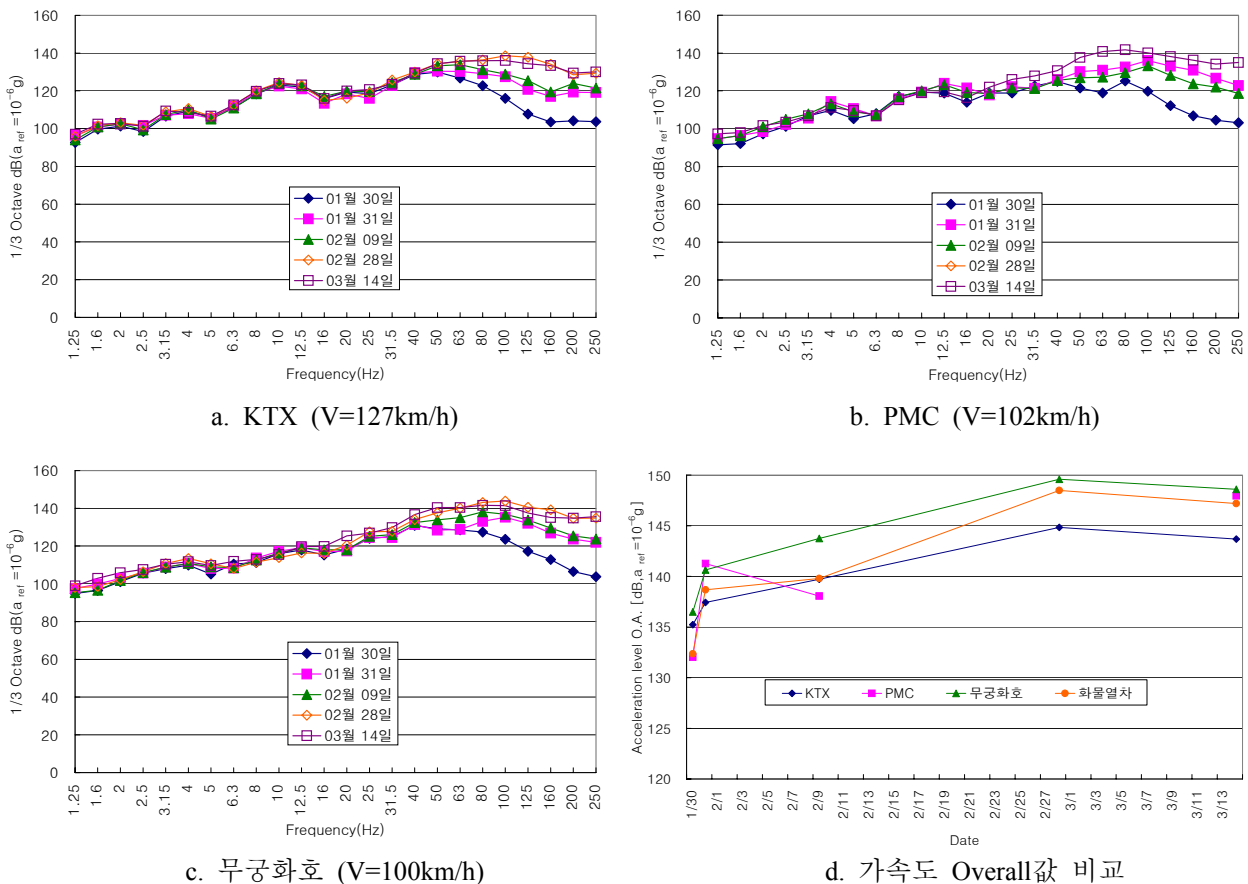


그림 5. 무월산터널 접속부의 차종별 도상가속도

KTX의 경우 63Hz이상, 새마을 PMC는 50Hz이상, 무궁화호와 화물열차의 경우 40Hz 이상의 주파수대역에서 측정일자의 경과에 따라 진동레벨이 증가하는 경향을 볼 수 있는데 이는 차종별 침목통과 주파수대역인 63Hz, 50Hz, 40Hz를 기준으로 그 이상의 주파수대역이 변화한 것이다. 특히 불규칙적 가진주파수대역인 long-pitch에 해당하는 약 80~100Hz에서 시간이 경과할수록 진동레벨이 가장 높은 약 140dB

이상까지 증가하고 있으며, 열차의 축간에 의한 주파수 대역인 1.25~12.5Hz에서는 뚜렷한 변화를 볼 수 없었다. 그림 5.d에서와 같이 차종별 Overall값은 시간이 지날수록 증가하며 무궁화호가 KTX에 비하여 약 5dB 정도 더 진동이 크게 나타났다.

호남선 임실터널의 경우 터널내부의 콘크리트도상과, 접속부의 자갈도상 그리고 인접한 자갈도상 T빔 교량을 계측점으로 설정하여 약 40여일의 기간중 4일간 PMC 3회, 무궁화호 21회, 화물열차 20회 측정하였다. 측정날짜별 비교를 위하여 주행속도는 새마을 PMC 113km/h, 무궁화호 100km/h, 화물열차 70km/h에 가까운 데이터를 선별하여 1/3 Octave band 해석을 실시하였으며, 무궁화호에 대한 결과를 나타내었다(그림 6).

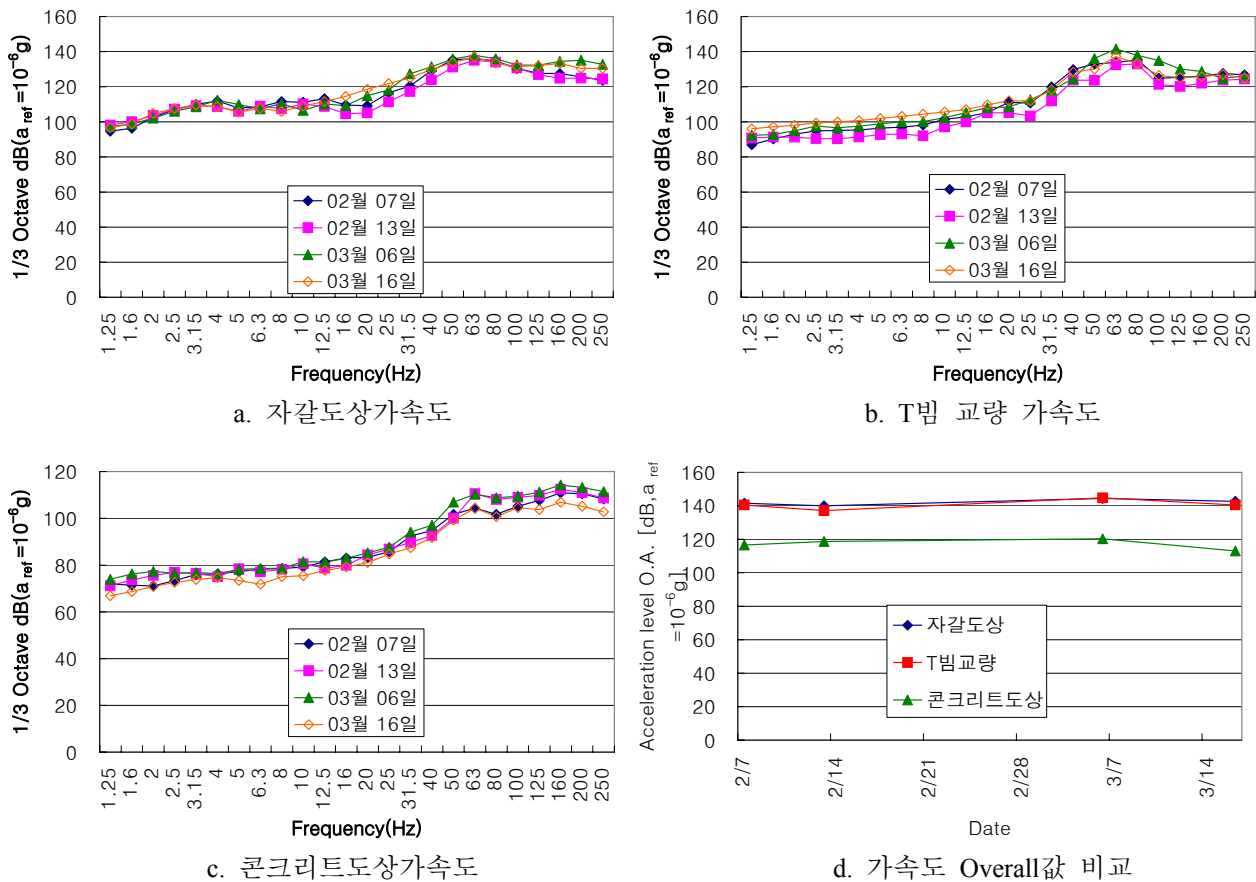


그림 6. 무월산터널 접속부의 측정위치별 가속도(무궁화호 주행시)

임실터널 접속부의 경우에는 측정일자에 따른 가속도의 변화경향이 보이지 않고 있으나, 전체적으로 볼 때 도상가속도와 T빔교량에서는 침목통과주파수와 long-pitch주파수사이인 40~100Hz에서 다른 주파수 대역에 비하여 크게 나타나고 있으며, 콘크리트도상의 가속도는 40Hz 이상의 주파수대역에서 크게 나타났다. 새마을 PMC와 화물열차에 대한 해석에서도 무궁화호와 유사한 경향을 보였다.

5. 궤도의 윤종과 처짐

5.1 궤도의 윤종

무월터널의 윤종측정결과는 주행속도가 약 127km/h인 KTX와 약 102km/h인 무궁화호에 대하여 계측일자별로 1회씩 나타냈다(그림 7.a-b). 여기서 외측A측점에서 윤종이 외측B,C측점보다 약 2~2.5톤정도 크게 나타나고 있으며, 내측윤종(내측B)의 경우 KTX 주행시의 내측윤종이 외측윤종보다 작지만, 무궁화호의 경우에는 외측보다 내측의 윤종이 더 크게 나타났다. 이러한 현상은 무월터널이 곡선부이고 열차의

주행속도가 다르기 때문에 속도가 빠른 KTX는 외측윤증이 크고, 반대로 낮은 속도의 무궁화호에서는 내측윤증이 크게 측정된 것으로 추정된다. 계측기간동안 측정된 윤증은 KTX의 경우 외측A에서 약 8.2~12.7ton, 외측B에서 6.4~11.6ton, 외측C에서 6.3~8.8ton, 내측B에서는 6.3~11.0ton이 측정되었고, 무궁화호의 경우 외측A에서 8.7~14.5ton, 외측B에서 7.5~12.1ton, 외측C에서 7.5~11.0, 내측B에서는 7.8~14.3ton이 측정되었다.

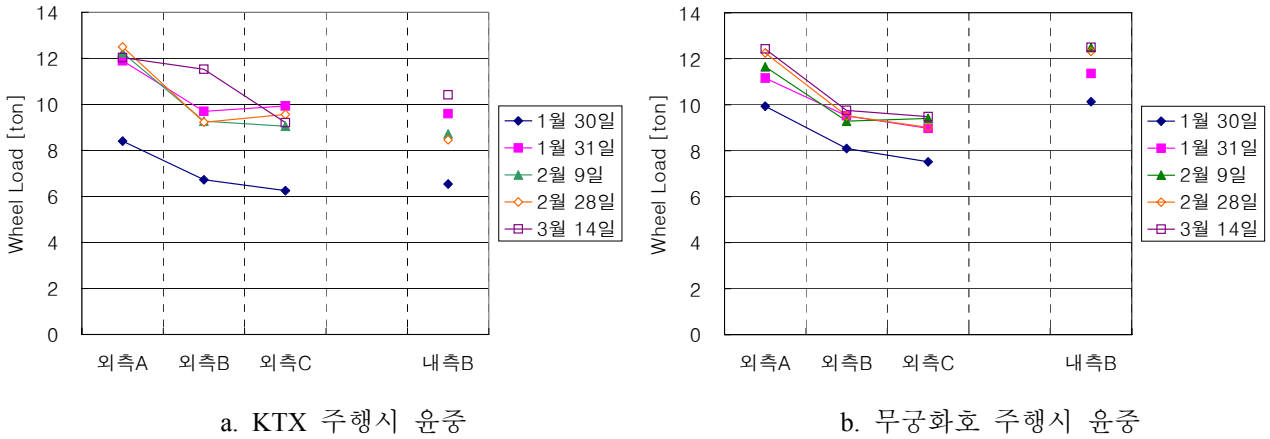


그림 7. 무월산터널 접속부의 측정위치별 윤증

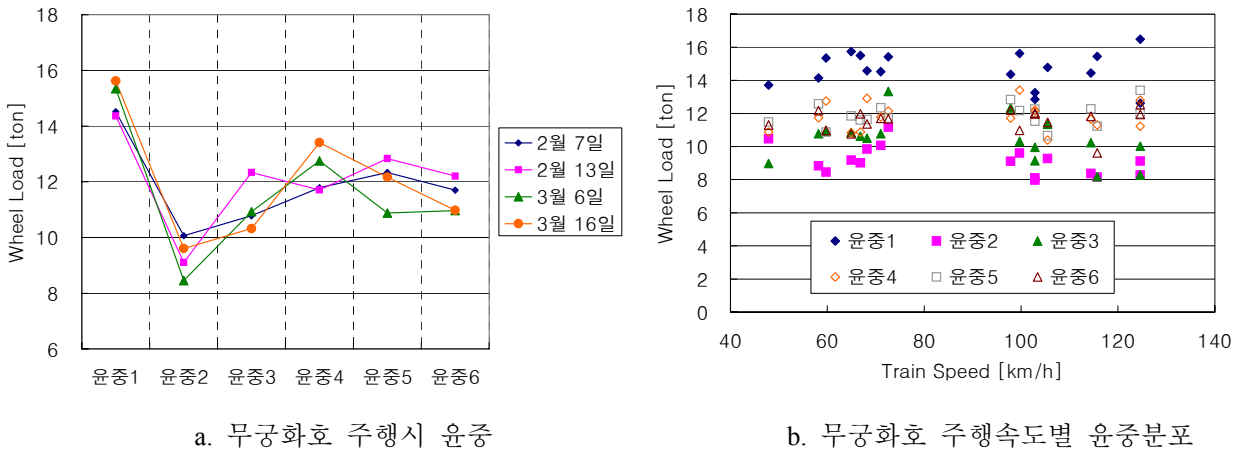


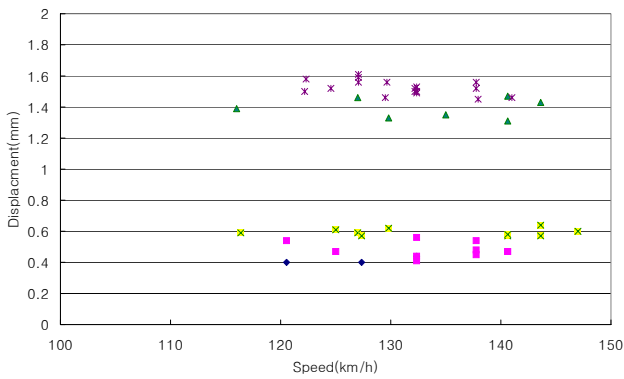
그림 8. 임실터널 접속부의 측정위치별 윤증

임실터널의 경우 주행속도가 약 100km/h인 무궁화호에 대한 계측일자별 윤증측정결과(그림 8.a)를 보면 콘크리트슬래브궤도인 윤증1에서만 다른 자갈도상구간의 윤증측점들에 비하여 가장 크게 계측되었으며, 콘크리트슬래브궤도와 인접한 윤증2측점에서 윤증이 가장 작고 터널을 통과하면서 윤증이 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 계측을 실시한 모든 무궁화호의 주행속도별 윤증분포(그림 8.b)에서도 윤증1측점의 윤증이 다른 윤증측점들보다 상회하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 임실터널 중점부의 하행선을 대상으로 계측을 실시하였기 때문에 열차의 주행방향이 터널부에서 토공부로 통과하면서 강성이 상대적으로 강한 콘크리트슬래브궤도에서 강성이 약한 토공부인 자갈도상으로 이동하면서 나타나는 현상으로 추정된다. 계측기간동안 측정된 윤증은 무궁화호의 경우 측점1에서 약 12.6~16.5ton, 측점2에서 8.0~11.2ton, 측점3에서 8.2~13.3ton, 측점4에서 10.1~13.4ton, 측점5에서 10.7~13.4ton, 측점6에서는 9.6~12.5ton이 측정되었다. 콘크리트슬래브궤도가 자갈도상궤도의 윤증보다 약 3ton정도 더 작용함을 볼 수 있었다.

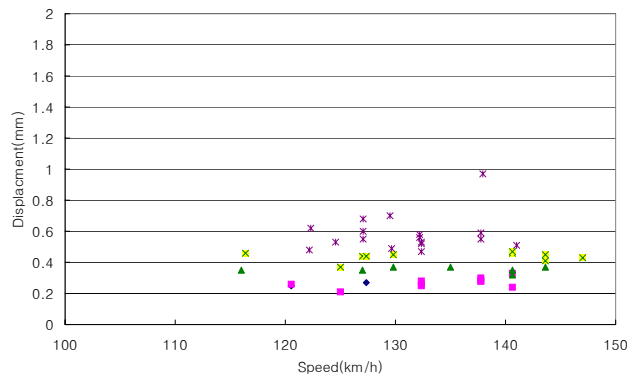
5.2 침목과 레일의 수직처짐

무월산터널 접속부에서 측정한 KTX 주행열차에 대한 침목과 레일의 수직처짐결과 측정점A에서만 약 1mm의 침목수직처짐의 변화경향이 관찰되었으며, 다른 측정점에서의 침목수직변위는 미소하게 증가하는 변화경향이 보였지만 증가량이 0.5mm 이내였다. 또한 레일의 수직처짐은 거의 변화가 없었으며(그림 9), 계측기간동안 침목의 수직처짐변위의 폭은 측정점A에서 0.40~1.61mm, 측정점B에서 0.25~0.7mm, 측정점C에서 0.49~0.61mm, 레일의 수직처짐변위폭은 0.19~0.27mm이다.

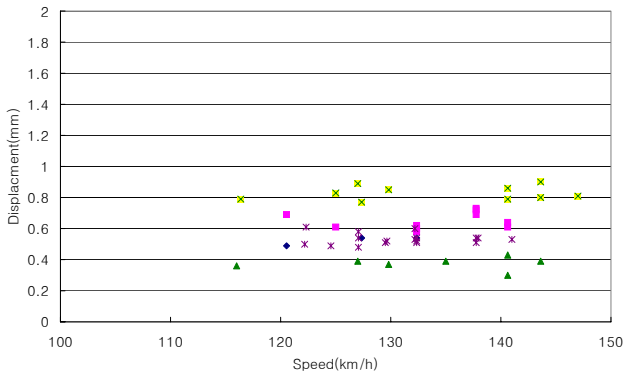
임실터널 접속부에서 측정한 침목과 레일의 처짐은 무궁화호와 화물열차 통과시 측정해본 결과 미소할만큼 뚜렷한 경향을 보이지 않고 있는데(그림 10) 침목의 수직변위는 최소 0.28mm에서 최대 0.94mm, 레일의 수직변위는 0.17~0.29mm로 측정되었다.



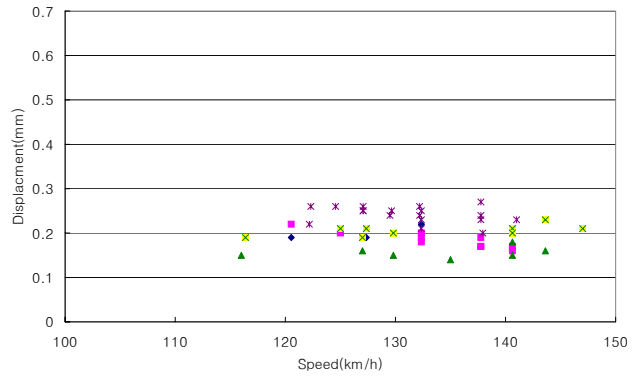
a. 침목수직처짐(측점A)



b. 침목수직처짐(측점B)

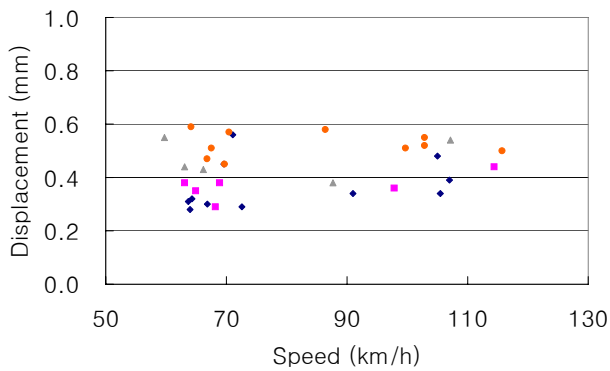


c. 침목수직처짐(측점C)

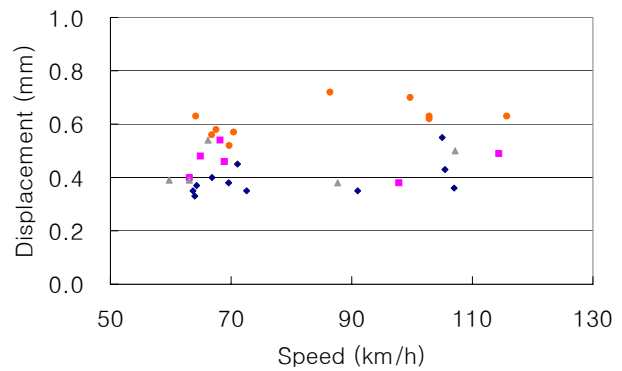


d. 레일수직처짐(측점B)

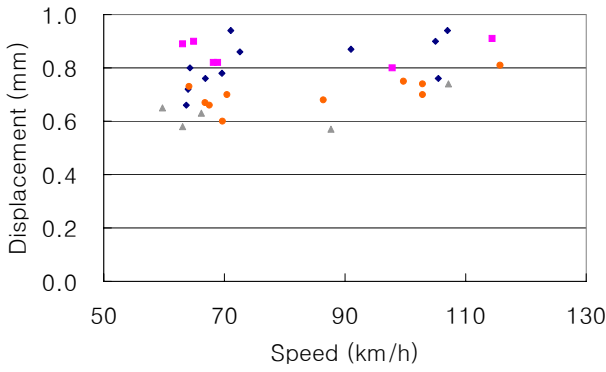
그림 9. 무월산터널 계측일별 KTX 주행시 침목과 레일 수직처짐



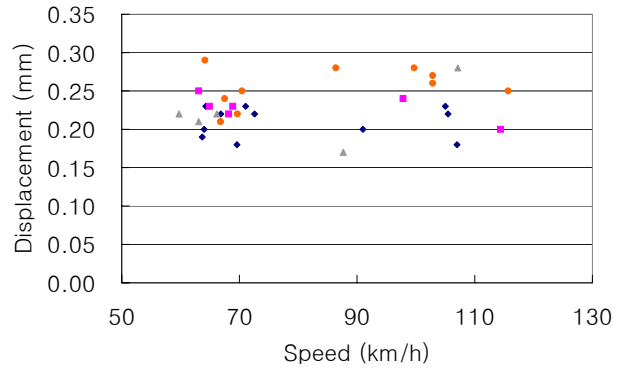
a. 침목수직처짐(측점A)



b. 침목수직처짐(측점B)



c. 침목수직처짐(측점C)

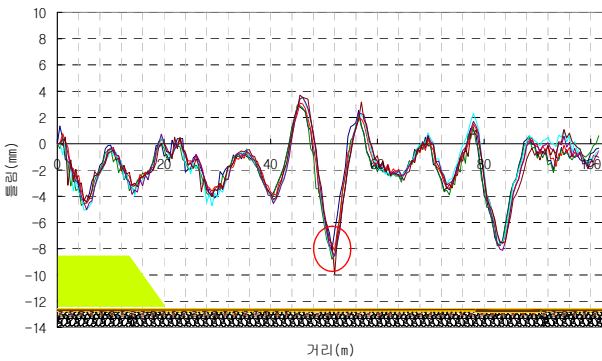


d. 레일수직처짐(측점B)

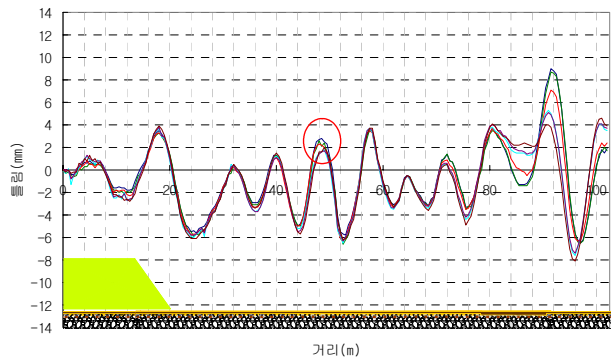
그림 10. 임실터널 계측일별 무궁화호 및 화물열차 주행시 침목과 레일 수직처짐

6. 궤도검측

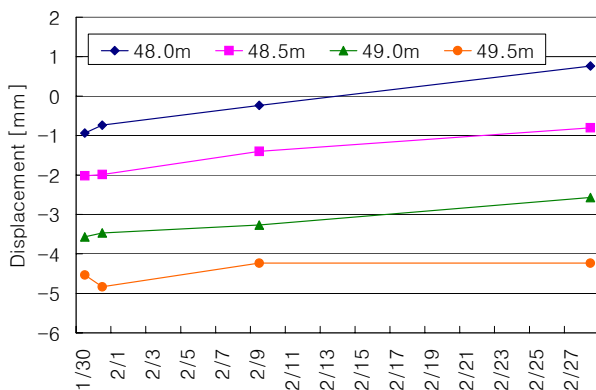
기존선의 궤도검측은 현재 EM-120을 이용하여 연 4회 측정하기 때문에 검측기간이 너무 길어서 궤도 정정작업이 수시로 시행되는 점과 이동중 검측이기 때문에 동일한 지점을 판별하기가 어려운 단점이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 구조물 접속부 궤도틀림의 진전상황을 판별하기 위하여 견인식 Track Master를 사용하여 일정기간동안의 방향과 고저에 대한 궤도검측을 실시하였다. 물론 측정기간동안은 어떠한 보수작업도 실시하지 않았다. 참고적으로 궤도검측에서 초기값은 트랙마스터를 이용한 최초궤도검측시 시작점의 10m현을 측정된 값을 기준점 '0'으로 설정하였기 때문에 상대적인 값이다.



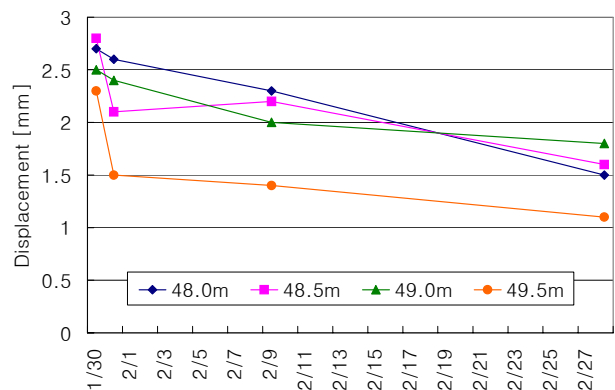
a. 궤도검측 : 방향



d. 궤도검측 : 고저



c. 방향틀림



d. 고저틀림

그림 11. Track Master를 이용한 무월산터널 접속부 궤도틀림분석

무월산터널 접속부에 대한 궤도검측결과를 방향과 고저에 대하여 도시하였고(그림 11.a~b), 이 중에서 빨간색 원으로 표기한 부분의 궤도틀림의 진전추이를 살펴보면, 방향틀림은 약 0.3~1.7mm, 고저틀림은 약 0.3~1.2mm 발생하였다(그림 11.c~d).

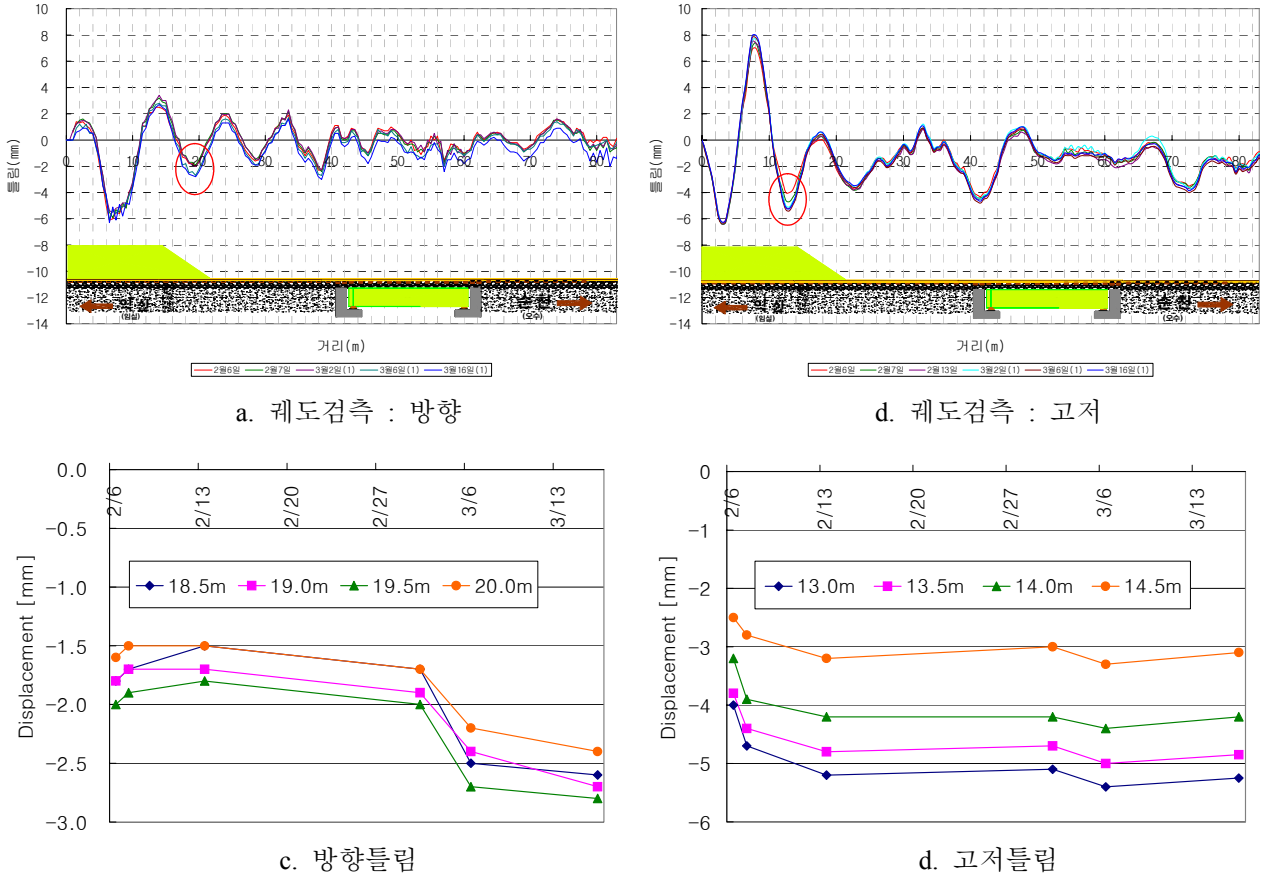


그림 12. Track Master를 이용한 임실터널 접속부 궤도틀림분석

임실터널내부로부터 약 10m까지는 콘크리트 슬래브 궤도, 다른 부분은 자갈도상궤도로 구성되어있는 접속부로서 궤도검측결과 방향과 고저의 차가 슬래브궤도와 자갈도상궤도가 맞닿은 약 10m 전후를 기준으로 궤도틀림이 크게 발생되어 있음을 볼 수 있으며(그림 12.a~b), 궤도틀림의 진전추이를 살펴보면 방향틀림은 약 0.8~1.3mm, 고저틀림은 약 0.6~1.3mm 발생하였다(그림 12.c~d).

7. 결 론

본 연구에서는 기존선 구조물 접속부에서 유지보수주기가 짧은 33개소를 선정하여 답사한 후 자갈도상궤도인 무월산터널과 콘크리트슬래브궤도인 임실터널을 대상으로 궤도틀림의 진전상황을 파악하기 위하여 일정주기에 따라서 현장계측을 실시하였으며, 계측결과분석에 따른 결론은 다음과 같다.

1. 도상가속에 대한 1/3 Octave Band 해석결과 무월산터널은 KTX의 경우 63Hz이상, 새마을 PMC는 50Hz이상, 무궁화호와 화물열차의 경우 40Hz 이상의 주파수대역에서 측정일자의 경과에 따라 진동레벨이 증가하는 경향을 볼 수 있는데 이는 차종별 침목통과 주파수대역인 63Hz, 50Hz, 40Hz를 기준으로 그 이상의 주파수대역이 변화한 것으로 볼 때 열차주행시 가진되는 침목통과주파수가 무월산터널 접속부에 대한 궤도파괴의 한 요인으로 판단되며, 임실터널의 자갈도상의 경우 침목통과주파수와 long-pitch에 해당하는 약 80~100Hz, 콘크리트도상의 경우 약 40Hz이상의 주파수대역에서 완만하게 증

가하는 경향이 나타났다. 임실터널의 경우 경부선에 비해 열차의 운행회수가 작기 때문에 무월산터널 처럼 계측기간동안 큰 변화를 보이지 않은 것으로 추정된다.

2. 열차의 축간에 의한 주파수 대역인 1.25~12.5Hz에서는 뚜렷한 변화를 볼 수 없었다. 따라서 궤도틀림에 대한 영향은 적은 것으로 추정된다.
3. 윤중변화량에 대한 분석결과 무월산터널에서 KTX의 경우에는 외측윤중이 내측윤중보다 크게 작용하였고, 무궁화호의 경우에는 외측과 내측윤중이 비슷한 경향을 보였다. 이는 열차의 운행속도와 궤도의 캔트량에 따라 차체의 동적하중이 내·외측레일에 다르게 작용하는 점으로 판단되며, 임실터널에서는 콘크리트도상의 윤중이 가장 크게 작용하였다.
4. 침목과 레일의 수직처짐은 시간경과에 따른 변화량과 주행속도에 따른 처짐량이 미소한 것으로 나타났다.
5. 궤도틀림은 두 터널 모두에서 관측되었으며, 방향틀림과 고저틀림이 각각 1.7mm, 1.3mm 이내로 나타났다.

본 연구결과에 의하면, 구조물 접속부에 대한 일정기간의 계측결과 변화경향이 크게 나타났던 진동가속도와 궤도검측에 의한 궤도틀림, 변화경향이 상대적으로 작았던 동적 윤중과 수직변위. 이들 간의 상호관계여부를 조사해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 오지택 외(2004), “기존선 속도 향상에 대비한 관형교의 동적안정성 향상기술개발”, 3차년도 보고서, 철도청.
2. 김만철 외(2006), “고속철도 터널에서의 궤도 형식에 따른 궤도와 차체의 진동 특성”, 대한토목학회 논문집, 제26권 1D호, pp.125-132
3. 이일화 외(2003), “고속철도 교량/토공 접속부에서의 궤도 및 차량 거동 특성”, 추계학술대회 논문집, 한국철도학회.
4. 한국건설기술연구원 외(2004), “고속철도 선로구축물 시스템 안정화 기술개발”, 2차년도 보고서, 건설교통부.
5. 오지택 외(2003), “무도상 관형교의 횡방향 동적거동특성 분석을 위한 실험적 연구”, 추계학술대회 논문집, 한국철도학회.
6. 나성훈 외(2001), “교량 토공 접속부에서 궤도강성변화에 대한 실험적 연구”, 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회.