교량,토공 접속구간 궤도동적계측 및 해석에 관한 연구

Experimental and Analysis Study on Transition Area Between Bridge and Earthwork

강윤석 * 나성훈 ** 신정렬 *** 양신추 ****
Kang, Yun-Suk Na, Sung-Hoon Shin Jeong-Ryol Yang, Sin-Chu

ABSTRACT

The transition between bridge and earthwork often causes the problems of maintenance. The damages of the track on the transition area influence running safety of train and serviceability , increase the maintenance cost. Therefore it is very important to evaluate the dynamic responses of transition and take a efficient measure. In order to evaluate the dynamic behavior of track, the field estimations are performed at the transition area of a conventional line between bridge and earthwork. And the track system on the transition area numerically analyzed to evaluate the dynamic behavior of damaged track with void sleeper. The measured values and Analysis results such as wheel contact force, rail stress, displacement, acceleration and track irregularity in the transition area show the dynamic forces are severe. So it is recommended that the transition area should be improved the rigidity by reinforcing the rail.

1. 서 론

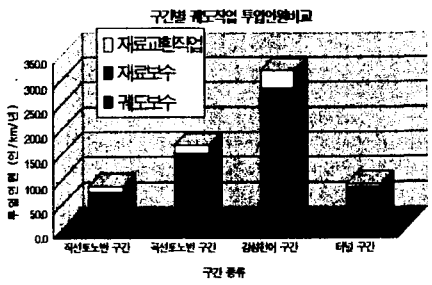

그림 1. 구간별 궤도작업 인원 투입 비교

열차가 교량구간에서 토공부로 진출입하는 경우에, 이 구간의 궤도구조에 유지보수문제가 많이 발생하게 된다. 그림 1의 기존선의 구간별 궤도작업 투입 인원량을 분석한 자료에 의하면 접속부(강성천이)구간은 다른 구간에 비해서 단위길이당 2배 이상의 보선인원이 필요하다. 접속구간의 궤도손상은 열차 주행 안정성, 승차감에 큰 영향을 주고 소음진동을 발생시키며 유지보수비를 급증시킨다. 그러므로 접속구간의 성능을 정확히 평가하여 효율적인 대책을 수립하는 것이 중요하다. 본 연구의 목적은 접속구간의 궤도상태를 평가하고 개발된 해석기법을 검증하는 것이다. 열차주행시 접속구간의 궤도성능분석을 토대로 하여 향후 효율적이고 경제적인 생력화 방안제시가 가능 할 것이다. 이를 위해서 국철구간의 교량토공구간 접속부에서 궤도틀

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원
**** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

림, 윤중, 가속도, 변위를 계측하였다. 그리고 계측결과와 일반구간을 비교하여 분석하였다. 또한 계측으로부터 얻은 궤도물성치를 사용하여 궤도동적해석을 수행하였고 계측결과와 해석결과를 비교분석하여 해석기법을 검증하였다. 그리고 접속부에서 궤도가 손상되었을 때 거동특성을 분석하였다.

2. 궤도상태분석

2.1 궤도틀림분석

교량/토공 접속구간의 궤도는 하부강성변화와 궤도구조의 수직 변위차에 의하여 틀림이 발생한다. 접속구간의 부등침하는 축중 수직방향의 면틀림 뿐만이 아니라 줄틀림, 궤간틀림, 수평틀림에도 영향을 준다. 이러한 궤도손상은 표 1과 같이 열차 주행 안정성, 승차감, 소음진동발생을 유발시키고 유지보수비를 급증시킨다. 그러므로 궤도틀림분석을 통해서 접속구간의 궤도성능을 정량

표 1. 궤도틀림발생으로 인한 영향분석

구 분	궤도에 미치는 영향	과다틀림발생시 발생현상
면틀림	차체의 수직가속도발생	열차승차감 저하
	윤중변동	레일파상마모
	레일압력 및 침목 진동가속도 변화	소음·진동증가, 궤도 열화파괴,부상침목발생
줄틀림	차체의 좌우진동가속도	열차승차감 저하
	차체의 상하진동가속도	
	횡압변화발생	궤도구조의 궤간횡이동 안전성저하
궤간 틀림	레일 내측횡압	레일두부면 내측마모촉진
	레일 두부변위 변화	변위발생 레일체결장치의 밀림현상

그림 2. 접속구간 틀림측정

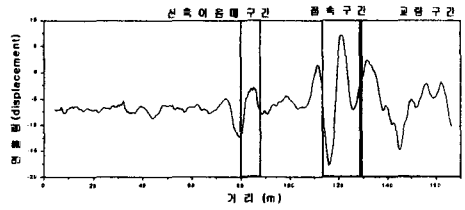

그림 3. 면(고저)틀림 측정결과

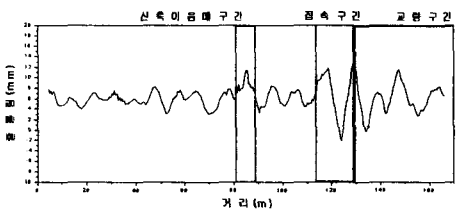

그림 4. 줄틀림 측정결과

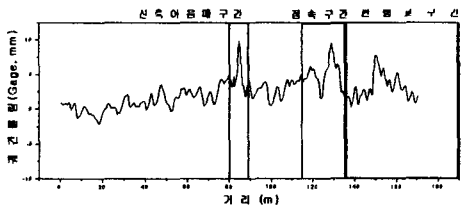

그림 5. 궤간틀림 측정결과

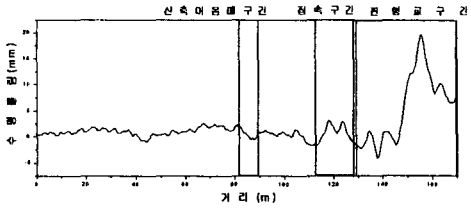

그림 6. 수평틀림 측정결과

적으로 평가할 수 있으며 앞으로 어떤 현상이 발생할 수 있는지 예측할 수 있다. 본 연구 수행을 위하여, ○○선의 판형교가 있는 접속구간을 선정하고 궤도틀림을 측정하였다. 총 구간길이는 171m로 이중 토공구간이 110m, 접속구간이 15m, 그리고 판형교 구간이 46m이었다. 측정기기는 트랙마스터(Track Master)를 사용하였으며 0.5m 간격으로 342포인트에 대하여 면(고저)틀림, 줄틀림, 궤간틀림, 수평틀림을 측정하였다.

4개틀림의 계측결과는 표2와 같다. 접속구간에서의 면(고저)틀림, 줄틀림, 궤간틀림이 접속구간에서 크게 발생됨을 알 수 있었다. 면틀림의 경우를 표준편차는 7.7134, 틀림범위는 25.10으로 나타나 접속구간에서의 면틀림 매우 큰 것으로 나타났다. 줄틀림, 궤간틀림도 타구간에 비해 큰 것으로 나타났다. 그리고 토공구간의 신축이음매 지점도 면틀림, 줄틀림이 크게 발생하였다.

표 2. 틀림계측결과

구 분		거 리	표준편차 (Standard deviation)	틀림범위 (Range)	구 분		표준편차 (Standard deviation)	틀림범위(Range)
면 틀림	토공 구간	0~113.5	1.918	13.675 (1.40~-12.275)	줄 틀림	토공 구간	1.450	8.325 (3.1~11.425)
	접속 구간	113.5~128.5	7.7134	25.10 (-17.85~7.250)		접속 구간	4.4219	14.50 (-2.05~12.45)
	교량 구간	128.5~166.5	4.2024	17.30 (-14.875~2.425)		교량 구간	2.6568	12.20 (-0.35~11.85)
궤간 틀림	토공 구간	0~113.5	1.8107	12.025 (-2.125~9.90)	수평 틀림	토공 구간	0.847	4.225 (-1.60~2.625)
	접속 구간	113.5~128.5	1.5745	7.275 (1.50~8.775)		접속 구간	1.4363	4.725 (-1.55~3.175)
	교량 구간	128.5~166.5	1.9688	7.975 (0.25~8.225)		교량 구간	6.5155	23.70 (-4.075~19.625)

궤도파괴이론에 의하면 면틀림과 줄틀림진전은 서로 비례관계에 있는데 측정결과도 이러한 연구결과를 보인다. 측정결과로부터 다음 현상이 일어남을 알 수 있었다.

(1) 접속부에 반복된 열차하중으로 압밀침하가 발생

(2) 피로하중에 따라 도상자갈파괴 발생되면서 침하발생, 자갈입자의 탄성상실

(3) 침목하부의 도상자갈의 소성변형이 누적되면서 궤도면 불규칙도 증가

(4) (1)~(3)과정의 반복으로 궤도파괴 가속화 및 궤도틀림 급진행

접속구간의 궤도틀림은 접속부의 도상파괴를 급진전시킨다. 그 결과 접속부에서는 차체수직가속도 증가로 승차감저하, 윤중변동증가, 레일압력증가와 침목 하부압력 증가가 예상된다. 또한 부상침목발생으로 인하여 침목진동가속도, 도상수직가속도가 커지게 되므로 소음·진동측면에 불리해진다. 실제 육안관찰시 접속구간의 과다침하로 부상침목발생, 분니발생, 체결부 파손, 가드레일부 개못인발, 탈락현상이 발생되어 유지보수비 증가와 주행안전성 저하가 예상되었다.

2.2 궤도 동적성능평가

궤도틀림에 의해서 접속부에 생기는 거동을 분석하기 위하여 레일수직변위, 레일가속도, 침목가속도, 윤중변동을 측정하였다. 그림 7은 접속구간의 궤도성능평가를 위한 계측망이고 표 3은 계측센서이다. 열차통과는 10회이상 측정하였는데 그 중 열차특성을 대표하는 통과열차 4량을 선정하여 계측결과를 분석하였다. 통과열차의 차종과 통과속도는 표 4와 같다.

레일가속도를 측정한 결과는 그림 8과 같다. 교량구간에서 토공구간으로 열차주행시 접속부에서 최대 218.59g의 레일가속도가 발생하였다. 무궁화호 열차주행시에는 레일가속도의 변화가 215.29~

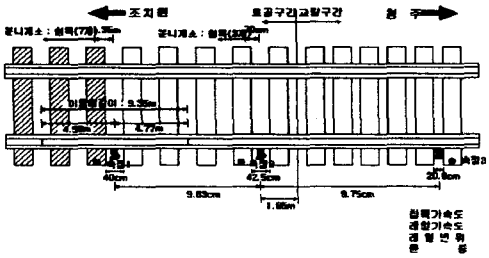

그림 7. 접속구간의 궤도성능평가를 위한 계측망

표 3. 계측항목 및 센서

계측항목	센 서(Model)	사 양
윤 중	5mm 2축 Strain Gage (Kyowa)	
레일 진동가속도	100g (PCB, 353B31)	ICP Type Sensitivity: 50mv/g
침목 진동가속도	50g (PCB, 353B33)	ICP Type Sensitivity: 100mv/g
레일변위	30mm Displacement Transducer (Kyowa)	Strain Gage Type Rated Output: 5000 μV/V

표 4. 접속구간 통과차종과 속도

차 종	화물차(컨테이너)	화물차(시멘트)	무궁화열차	통일호열차
접속구간 통과속도	62.6km/h	61.0km/h	88.0km/h	75.0km/h

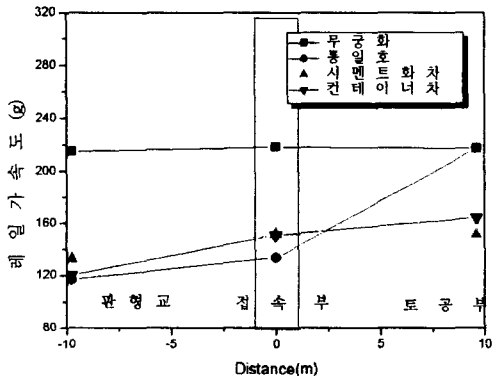

그림 8. 접속구간 거리별 레일가속도변화

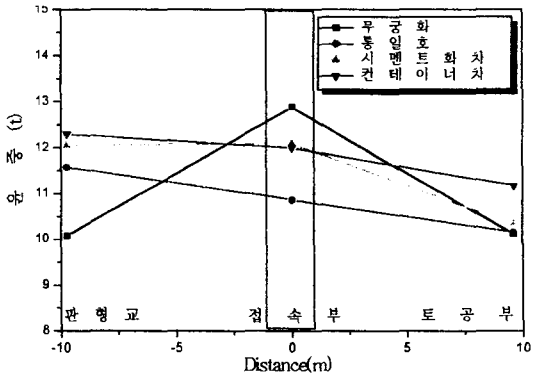

그림 9. 접속구간 거리별 윤중변화

표 5. 통과열차별 각 구간 계측항목 결과

구 분	각 구간	레일가속도	침목가속도	윤 중	레일수직변위
무궁화호	토공구간	217.49	10.86	10.11	측정한계초과 (30mm이상)
	접속구간	218.59	23.85	12.89	측정한계초과
	교량구간	215.29	49.22	10.08	4.77
통일호	토공구간	217.8	10.21	10.15	측정한계초과
	접속구간	133.87	11.86	10.86	측정한계초과
	교량구간	116.86	21.92	11.58	4.30
시멘트화차	토공구간	151.55	8.19	10.33	측정한계초과
	접속구간	151.55	11.48	12.10	측정한계초과
	교량구간	132.43	57.13	12.06	4.02
컨테이너	토공구간	164.47	31.21	11.17	측정한계초과
	접속구간	151.07	16.05	12.00	측정한계초과
	교량구간	120.49	47.58	12.30	4.09

218.59g로 거의 일정하였지만 통일호, 시멘트화차, 컨테이너차가 주행할 때는 30.58g의 레일가속도차이가 발생하였다. 그러므로 접속부에서는 레일가속도가 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 접속구간의 윤중은 무궁화 열차가 통과할 때 교량구간의 10.08t에서 12.89t으로 약 27.88% 증가했다. 특히 시속 75km이상으로 열차가 주행할 때에는 윤중 증가량이 크게 발생하여 접속구간의 윤중변동은 속도영향에 크게 좌우된다는 것을 알 수 있었다. 이는 기존선 고속화시 열차속도 증가에 의해서 윤중이 커지게 되고 이로 인한 부등침하의 가능성이 커지게 됨을 의미한다. 또한 레일압력, 침목 압력증가는 물론 레일 두부면 마모로 인한 연마작업의 필요성이 증가하는 등 궤도유지보수비용의 증가가 예상된다. 열차주행시 접속구간에서의 침목직하의 충격력으로 수직틀림이 발생되는 원인은 다음과 같다.

(1) 충격력으로 인하여 궤도노반에 소성변형발생, 접속구간내에 이음매궤도의 처짐
(2) 부상침목발생으로 침목 침하, 윤중부의 Uplift에 의한 부압력 발생으로 면틀림변형
(3) 면틀림, 궤간틀림 발생등에 의한 체결구 손상

계측결과를 분석한 결과 교량/토공 접속구간은 부등침하에 의해서 궤도의 동적성능이 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 그러므로 틀림발생을 최대로 억제하기 위해서는 궤도에 연속성을 제공하는 방안이 필요하다. 차량과 궤도의 동적응답을 최소화시켜 궤도의 정위치에서의 탈락을 최소화시키는 방법들이 필요함을 알 수 있다.

3. 접속구간 동적해석

차량이 교량/토공 접속구간을 통과할 때 궤도 거동을 잘 모의하기 위해서는 하부의 궤도지지계수변화 및 레일 휨강성변화를 고려할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 이러한 궤도의 국부개소의 동특성응답을 모의할 수 있도록 개발된 전용해석프로그램인 GTDAP를 사용하여 해석을 수행하였다. 접속구간에서 보강레일 사용에 따른 차량 및 궤도 안정성 향상을 검토하기 위하여 교량 및 토공구간의 궤도지지계수를 변화하면서 궤도 동적해석을 수행하였다.

충북선 ○○교량 접속부에서 토공구간 및 궤도구간의 궤도지지계수를 측정한 결과를 반영하여 토공구간의 궤도지지계수가 10, 50, 100MN/m인 경우와, 교량구간의 궤도지지계수는 10MN/m(침목패드를 사용한 경우), 100MN/m(목침목을 거더에 직접 거치하는 경우)인 경우를 가정하여 이들

표 5. 접속부의 설계 및 관리기준

항목	차체상하 진동가속도	윤중변동율	레일응력	부레일압력
기준값	1.3 m/sec ^{2}	0.13	90Mpa	체결력의 70%

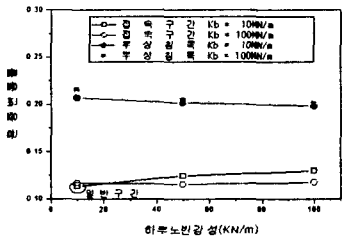

그림 10. 일반구간과 접속구간의 윤중변동률 비교

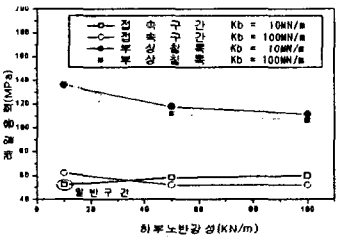

그림 11. 일반구간과 접속구간의 레일응력 비교

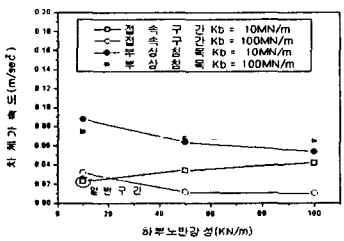

그림 12. 일반구간과 접속구간의 차체수직가속도 비교

궤도지지계수를 조합하여 해석을 수행하였다. 또한 교량/토공 접속부와 인접한 토공구간에서 침목이 자갈도상으로 분리되어 궤도지지계수를 잃는 현상 즉, 부상침목이 있는 경우가 자주 발생한다. 이 부분의 궤도거동을 검토하였다. 그리고 비교기준으로는 일본 접속부의 설계 및 관리기준(표 6)을 참조했다. 해석결과는 윤중은 계측한 결과와 잘 일치하였다. 일반토공구간과 접속구간의 윤중변동율의 비교결과를 나타낸 것이 그림 10이다. 일반토공구간의 궤도지지강성에 관계없이 윤중변동율은 기준치인 0.13 이하이지만 부상침목이 발생한 윤중변동율은 기준치를 훨씬 상회한다. 레일응력에 대한 해석결과를 나타낸 그림 11로부터 부상침목이 발생하지 않을 경우에 접속부에서의 레일응력은 기준치인 90Mpa이하임을 알 수 있다. 반면에 부상침목이 발생하면 레일응력은 크게 증가하여 기준치를 크게 초과한다. 그리고 차체가속도에 대한 해석결과를 나타낸 그림 12로부터 접속부에서 발생하는 차체가속도도 증가하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 궤도지지강성이 변하는 구간을 개선하면 충격적인 윤중 발생 억제와 이에 따른 레일응력의 저감을 가져올 수 있고 차량의 상하가속도도 줄일 수 있어 열차 주행안정성 및 승차감향상 측면에서도 큰 효과가 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

접속구간의 궤도상태를 평가하기 위해서 국철구간의 교량토공구간 접속부를 선정하고 궤도틀림, 윤중, 가속도, 변위를 계측하였다. 트랙마스터로 측정한 접속구간의 면(고저)틀림, 줄틀림, 궤간틀림이 일반 토공구간보다 매우 큰 것으로 나타났다. 동적계측을 수행한 결과, 접속구간에서의 윤중변동률과 레일가속도가 크게 나타났다. 그리고 시속 75km이상으로 열차가 주행할 때에는 윤중 증가량이 크게 발생하여 접속구간의 윤중변동은 속도영향에 크게 좌우된다는 것을 알 수 있었다. 또한 계측으로부터 얻은 궤도 물성치를 사용하여 궤도 동적해석을 하였고 계측결과와 비교하여 해석기법을 검증하였다. 일반토공구간과 접속구간의 윤중변동율, 레일응력, 차체 상하수직가속도를 비교한 결과 접속구간에서의 해석치가 큰 것으로 나타났다. 이상의 결과로부터 궤도지지강성이 변하는 구간을 개선하면 충격적인 윤중 발생 억제와 이에 따른 레일응력의 저감을 가져올 수 있고 차량의 상하가속도도 줄일 수 있어 열차 주행안정성 및 승차감향상 측면에서도 큰 효과가 있음을 알 수 있었다. 앞으로 열차주행시 접속구간의 궤도성능분석을 토대로 하여 향후 효율적이고 경제적인 생력화 방안제시가 가능 할 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

(1) Coenraad Esveld, "Moredern Railway Track", MRT-Productions, 2001

(2) 三 蒲 重, "軌道構造の動特性モデルの構築", RTRI Report Vol 9. No. 12, 1995.12

(3) 石田誠, 三浦重, 河野昭子(1997), "車輛走行による軌道沈下個所の動的應答特性", 일본기계학회, 제6회교통・물류부문대회강연논문집, No.97-13, pp133-136

(4) 양신추,강윤석(2000) "운행선 궤도구조에 관한 생력화 방안연구", 한국철도기술연구원

(5) 한국철도기술연구원(2000) "시운전시 궤도・노반시설물의 성능검증", 한국고속철도건설공단

(6) 나성훈, 서사범, 손기준, 김정환(2001) "교량 토공 접속부에서 궤도강성변화에 대한 실험적 연구" 철도학회 춘계학술대회 논문집