

교량/토공 접속구간 보강레일의 최적설계

Optimal Design of Reinforced Rail over Connection Section of Bridge and Embankment

양신추*, 강윤석**, 김 은***
S. C. Yang, Y. S. Kang, E. Kim

ABSTRACT

This paper deal with optimal design of reinforced track as a track reinforcing method for transition area of track support stiffness in transition area between bridge and earthwork. When vehicle passes through transition area, dynamic properties between vehicle and track are studied by the analysis of vehicle-train interaction for the each case when reinforced tracks are used or not. Furthermore, optimum decision of type and length of track are made based on the performance adapting variable parameters : support stiffness of track for bridge and earthwork, heading direction of vehicle and type and length of track.

1. 서론

열차가 교량/토공구간을 진출입 할 때 궤도구조는 큰 충격하중을 받는다. 충격하중을 받은 궤도구조는 동적으로 거동하며 레일, 체결장치에도 피로손상이 증가한다. 궤도하부의 도상자갈도 점차 파괴가 진전되어 궤도유지보수 또한 증가한다. 그러므로 교량/토공 접속구간은 주행안전성, 구조안전성에 가장 영향을 주는 궤도 취약부라 할 수 있다.

본 논문은 교량/토공 접속부와 같이 궤도지지강성이 변화하는 구간에서 궤도를 보강하는 방법으로 사용되는 보강레일의 최적설계를 다루고 있다. 차량이 접속구간을 통과할 때 보강레일을 사용할 경우와 사용하지 않을 경우에 대하여 차량/궤도 상호작용해석을 수행함으로써 차량 및 궤도 동특성을 분석하였다. 또한 교량구간 및 토공구간의 궤도지지강성과 열차주행방향, 보강레일의 종류 및 길이를 변화시키면서 차량/궤도 상호해석을 수행함으로써 최적 보강레일 종류 및 길이를 결정하였다.

2. 접속부 보강레일의 설계개념 및 관련기준

2.1 보강레일의 설계기본 개념

일반적으로 지지강성계수가 급격히 변하는 구간에서는 윤중변동율이 상당히 크기 때문에 그림 1과 같이 중간적인 지지계수를 가진 완충구간을 두어 윤중변동율을 줄이는 방법을 생각 할 수 있다. 그러나 실제 운행선상에서 이러한 개념을 이용하여 궤도를 보강할 경우 노반 보강공사까지 수반하기 때문에 많은 예산과 열차차단시간이 필요하다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위한 또 하나의 방법은 궤도지지계수 차이를 그대로 두고 레일의 휨강성을 보강하는 방법 즉, 그림 2와 같

* 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 책임연구원 정희원

** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 선임연구원 정희원

*** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 주임연구원 정희원

이 보강레일을 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 보강레일의 사용에 따라 윤증변동을, 레일응력, 차체가속도의 저감효과를 시뮬레이션을 통하여 분석한 후, 보강레일의 최적 크기 및 길이를 계산하였다.

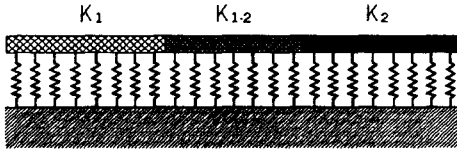


그림 1. 접속부와 완충구간

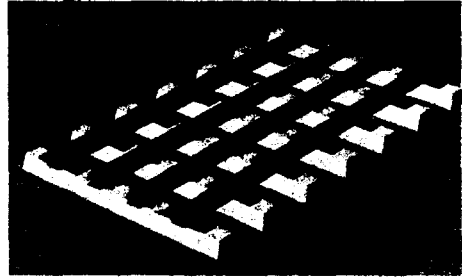


그림 2. 접속부 보강레일

2.2 설계 및 관리기준

교량과 토공구간의 접속구간에서 차량의 주행안전성을 보장하고 궤도의 급격한 파손을 막기 위해서는 궤도가 일정한 성능을 유지할 수 있도록 관리기준을 정하는 것이 필요하다. 국내에는 이와 관련한 기준이 제정되어 있지 않기 때문에 본 연구에서는 표 1의 일본 관리기준을 준용하였다.

표 1. 접속부의 설계 및 관리기준

항목	차체가속도	윤증변동율	레일응력	부레일압력
기준값	1.3 m/sec ²	0.13	90Mpa	체결력의 70%

3. 보강레일 사용에 따른 궤도의 동적거동 시뮬레이션

3.1 해석 모형 및 물성치

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. GTDAP에서는 그림 3과 같이 차량은 1, 2차 현수장치로 지지된 반차체로 모델링한다. 또한 궤도는 탄성지지된 보로 모형화하고, 침목, 도상, 노반 등은 체결 위치에서 집중질량과 이를 지지하는 스프링 및 감쇠로 모형화한다. 차륜/레일간의 접촉미커니즘에 대해서는 헤르츠안(Hertzian)의 비선형 접촉스프링으로 모형화한다.

접속부에서 보강레일이 있는 경우에는 상기의 해석모형 기본체계는 유지하면서 그림 4와 같이 모형화할 수 있다.

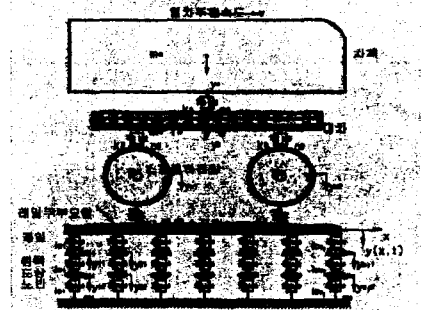


그림 3. 시뮬레이션을 위한 차량 및 궤도 모델

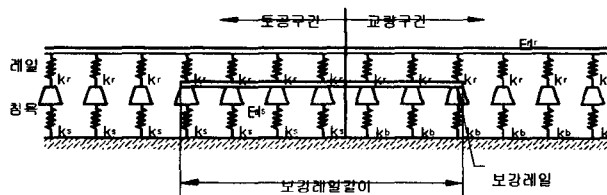


그림 4. 보강레일이 있는 경우 궤도해석모형

해석에 사용된 차량과 궤도의 제원 및 물성치는 표 2와 같다.

표 2. 차량 및 궤도의 제원 및 물성치

차량/궤도모델	물성치	차량/궤도모델	물성치
주행속도	270(km/h)	궤도패드강성	6.0×10^9 (kN/m)
차체반질량(km/h)	7862.0(km/h)	궤도패드 댐핑계수	98.0(kN · s/m)
2차 현가장치 스프링	251.2(kN/m)	침목간격	0.6(m)
2차 현가장치 댐핑	45.3(kN · s/m)	침목질량	130.0(kg)
대차질량	1531.0(kg)	침목지지 도상강성	1.78×10^8 (kN/m)
1차 현가장치 스프링계수	1180.2(kN · s/m)	침목지지 도상댐핑계수	980.0(kN · s/m)
1차 현가장치 댐핑계수	39.2(kN · s/m)	최상층 도상질량	52.5(kg)
축간거리	2.5(m)	최상층 도상지지강성	0.89×10^8 (kN/m)
스프링하질량	827.0(kg)	최상층 도상댐핑계수	980.0(kN · s/m)
차륜반경	860(mm)	보강레일 종류	KS60레일
레일	2.1×10^8 (kN/m ²)	보강레일 길이	10,15,20,25,30(m)
레일표면반경	600(mm)	보강레일의 탄성계수	2.1×10^8 (kN/m ²)
레일질량	60.8(kg/m)	보강레일 단면적	7750mm ²
레일강성도	6.34×10^7 (kN · m ²)	보강레일 질량	60.8(kg/m)

접속구간에서 보강레일 사용에 따른 차량 및 궤도 안정성 향상을 검토하기 위하여 교량 및 토공구간의 궤도지지계수를 변화하면서 궤도 동적해석을 수행하였다. 또한 교량/토공 접속부와 인접한 토공구간에서 침목이 자갈도상으로 분리되어 궤도 지지계수를 잃는 현상이 발생하는 경우 즉, 부상침목이 있는 경우 보강레일 부설효과를 검토하였다.

충북선 교량 접속부에서 토공구간 및 궤도구간의 궤도지지계수를 측정 한 결과 토공구간은 10MN/m이하, 교량구간은 10MN/m이상인 것을 알 수 있었다. 이러한 궤도지지계수는 타 접속구간과 비교할 때 지지계수가 매우 작은 경우에 해당된다. 그러므로 본 연구에서는 토공구간의 궤도지지계수가 10, 50, 100MN/m인 경우와, 교량구간의 궤도지지계수는 10MN/m(침목 패드를 사용한 경우), 100MN/m(목침목을 거더에 직접 거치하는 경우)인 경우를 가정하여 이들 궤도지지계수를 조합하여 해석을 수행하였다.

해석을 수행한 경우별 궤도지지계수 및 부상침목 유무를 정리하면 표 3과 같다. 이들은 다시 열차의 주행방향이 토공구간에서 교량구간으로 주행하는 경우와 반대로 교량구간에서 토공구간으로 주행하는 경우로 구별하여 해석을 수행하였다.

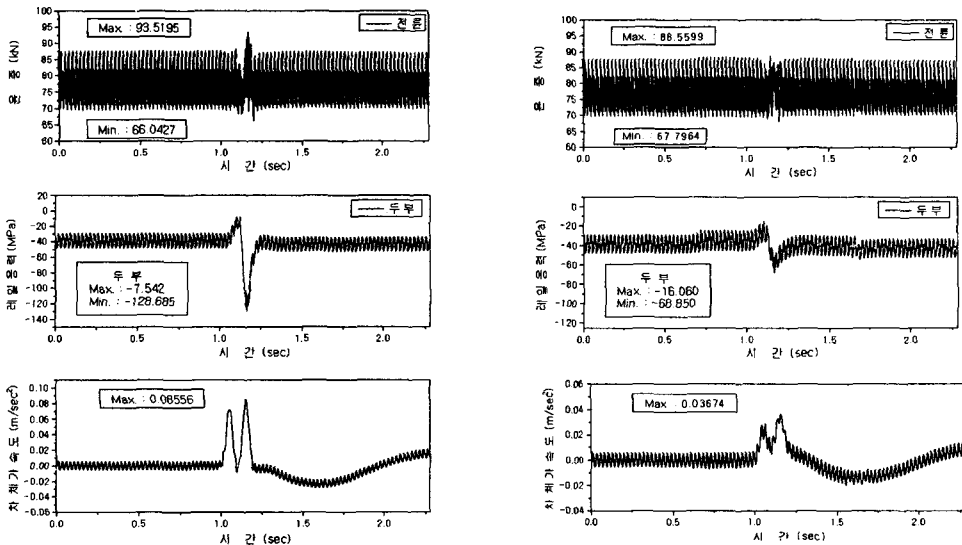
3.2 접속부 차량/궤도 상호작용 해석결과

토공구간 궤도지지계수를 k_s , 교량구간 궤도지지계수를 k_b 라 할 때 차량이 토공구간에서 교량구간으로 주행하는 경우 대한 윤증변동을, 레일응력 및 차체가속도는 다음과 같다.

표 3. 해석 경우별 토공 및 교량구간 궤도지지계수

부상 침목 유무	보강 레일 유무	궤도지지계수			
		토공구간		교량구간	
		스프링계수 (MN/m)	감쇠계수 (kN/(m/sec))	스프링계수 (MN/m)	감쇠계수 (kN/(m/sec))
일반 침목	없는 경우	10	980	10	980
		50	980	10	980
		100	980	10	980
		10	980	100	20
		50	980	100	20
		100	980	100	20
	있는 경우	10	980	10	980
		50	980	10	980
		100	980	10	980
		10	980	100	20
		50	980	100	20
		100	980	100	20
부상 침목	없는 경우	10	980	10	980
		50	980	10	980
		100	980	10	980
		10	980	100	20
		50	980	100	20
		100	980	100	20
	있는 경우	10	980	10	980
		50	980	10	980
		100	980	10	980
		10	980	100	20
		50	980	100	20
		100	980	100	20

○ $k_s=100\text{MN/m}$, $k_b=10\text{MN/m}$ 인 경우



(a) 부상침목 및 보강레일이 없는 경우

(b) 부상침목 및 보강레일이 있는 경우

그림 5. 해석결과($k_s=100\text{MN/m}$, $k_b=10\text{MN/m}$) 부상침목 비보강

4. 보강레일 해석결과분석

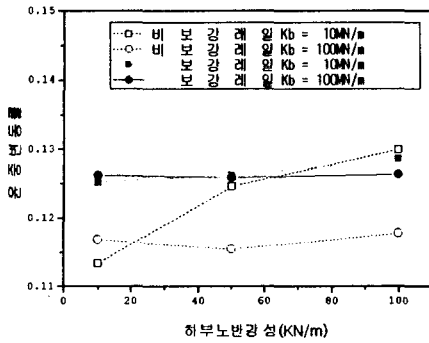
4.1 보강레일 부설효과 분석

보강레일 부설에 따른 윤증변동을 비교결과를 나타낸 그림 6으로부터 접속부에서 부상이 없을 경우 윤증변동율(그림 6(a))은 보강레일의 사용에 따라 최고 10% 가까이 줄어들음을 알 수 있다. 또한 윤증변동율은 교량구간 궤도지지계수가 크고 토공구간 궤도지지계수가 작게 되면 오히려 보강레일을 부설할 경우 윤증은 다소 증가한다. 접속부에서 부상침목이 발생하지 않으면 궤도지지강성에 관계없이 윤증변동율은 기준치인 0.13 이하가 되지만 부상침목이 발생하고(그림 6(b)) 보강레일을 부설하지 않을 경우는 윤증변동율은 기준치를 훨씬 상회함을 알 수 있다. 그러나 보강레일을 사용할 경우는 윤증변동율을 크게 저감 할 수 있고 특히, 궤도지지계수가 클 경우는 기준치 이하로 줄일 수 있다.

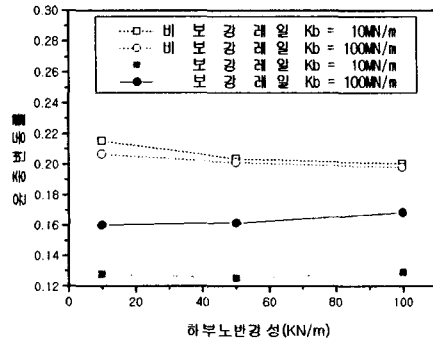
레일응력에 대한 해석결과를 나타낸 그림 7로부터 부상침목이 발생하지 않을 경우(그림 7(a))는 접속부의 레일응력은 기준치인 90Mpa이하가 되며, 보강레일을 부설하면 궤도지지계수의 크기에 따라 다소의 차이는 있지만 레일응력을 대체로 저감시킬 수 있음을 알 수 있다. 반면에 부상침목이 발생하면(그림 7(b)) 보강레일을 부설하지 않을 경우 레일응력은 크게 증가하여 기준치를 크게 초과한다. 그러나 부상침목이 발생하여도 보강레일을 부설하면 레일응력을 최소 37Mpa까지 저감시켜 기준치 이하로 줄일 수 있다.

차체가속도에 대한 해석결과를 나타낸 그림 8로부터 접속부에서 차체가속도는 부상침목의 발생 유무에 관계없이 허용기준인 1.3m/sec^2 보다 크게 못 미치는 것을 알 수 있다. 또한 이들 결과로부터 차체가속도 측면에서도 보강레일을 부설하면 크게 효과가 있을 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 궤도지지강성이 변하는 구간에서 보강레일을 사용하면 충격적인 윤증발생 억제와 이에 따른 레일응력의 저감을 가져올 수 있고 차량의 상하가속도도 줄일 수 있어 열차 주행안정성 및 승차감향상 측면에서도 큰 효과가 있을 것으로 생각된다.

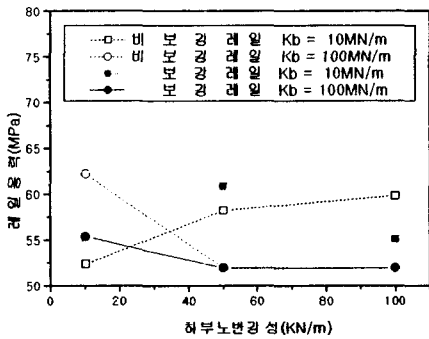


(a) 일반침목

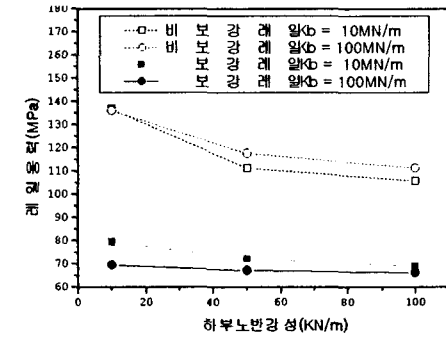


(b) 부상침목

그림 6. 보강래일 부설에 따른 윤증변동율 비교결과

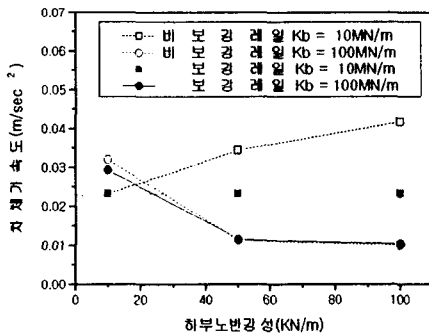


(a) 보통침목인 경우

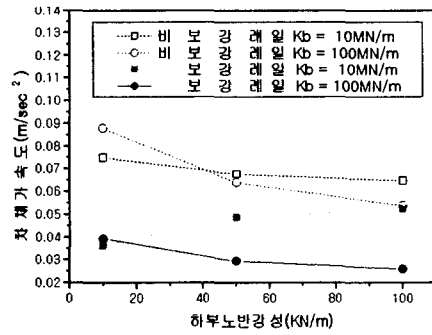


(b) 부상침목인 경우

그림 7. 보강래일 부설에 따른 레일응력 비교결과



(a) 일반침목

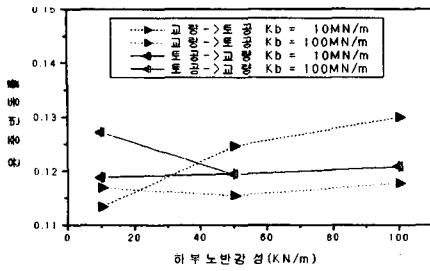


(b) 부상침목

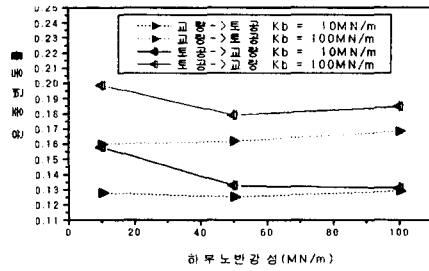
그림 8. 보강래일 부설에 따른 차체상하가속도 비교결과

4.2 주행방향에 따른 윤증변동율 분석

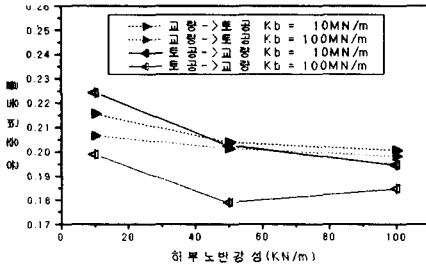
토공 및 교량구간의 궤도지지강성, 보강래일 부설 유무 등을 달리하면서 열차 주행방향별 윤증변동율을 그림 9에 나타내었다. 이들 결과로부터 윤증변동율은 토공 및 교량구간의 궤도지지계수 차이가 클수록 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 양쪽 궤도지지계수가 적을 경우는 토공구간에서 교량구간으로 주행할 때 윤증변동율이 크고, 양쪽 궤도지지계수가 클 경우는 교량구간에서 토공구간으로 진입할 때 윤증변동율이 크다. 양쪽 궤도지지계수가 어느 정도 클 때 보강래일을 접속부에 부설하면 윤증변동율은 열차주행방향에 크게 의존하지 않음을 알 수 있다.



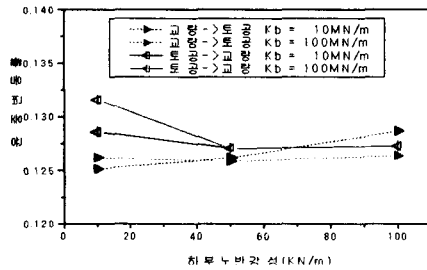
(a) 일반침목 비보강



(b) 일반침목 보강



(c) 부상침목 비보강

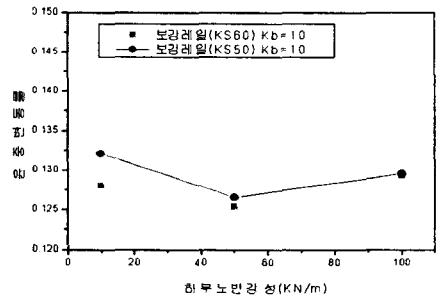


(d) 부상침목 보강

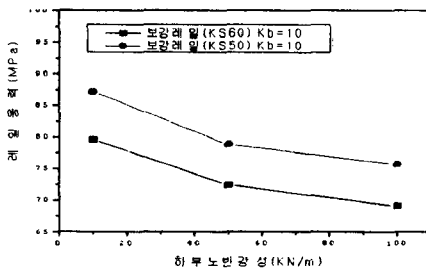
그림 9. 보강레일 부설에 따른 차체상하가속도 비교결과

4.3 보강레일 종류에 따른 분석

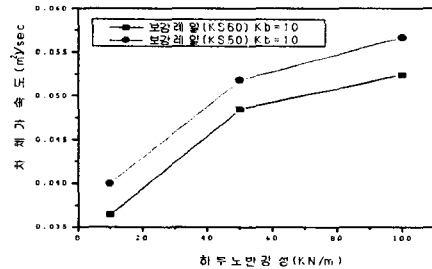
그림 10은 접속부에서 부상침목이 발생할 경우 보강레일을 KS50 및 KS60 kg 레일로 보강할 경우에 윤증변동율, 레일응력, 차체상하가속도를 나타낸 것이다. 그림 10(a)의 결과로부터 윤증변동율은 접속부 양쪽 궤도지지계수가 적을 경우 보강레일을 KS50레일로 부설하는 것보다는 KS60 레일로 부설하는 것이 윤증변화율이 적게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 레일응력(그림 10(b))은 KS60레일의 경우가 KS50레일의 경우 보다 7 Mpa 정도 저감되는 것을 알 수 있으며, 차체가속도(그림 10(c))는 $0.03\text{m}/\text{sec}^2$ 정도 감소되는 것을 알 수 있다. 그러나 이러한 정도의 저감 효과는 기준 값들에 비하여 그다지 크지 않기 때문에 경제성을 고려하여 KS50레일로 보강레일을 사용하는 것이 추천된다.



(a) 윤증변동율비교(부상침목)



(b) 레일응력비교(부상침목)

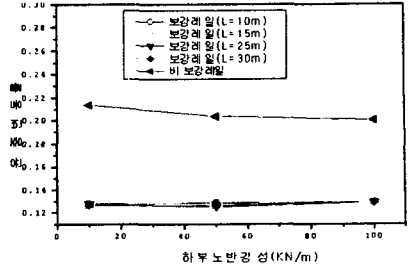


(c) 차체가속도비교(부상침목)

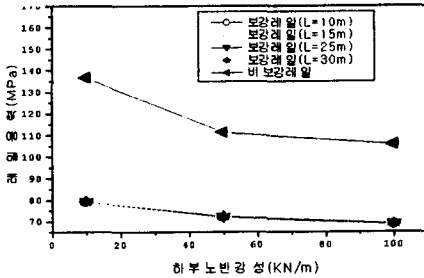
그림 10. 보강레일 종류에 궤도거동 비교결과

4.4 보강레일 길이에 따른 분석

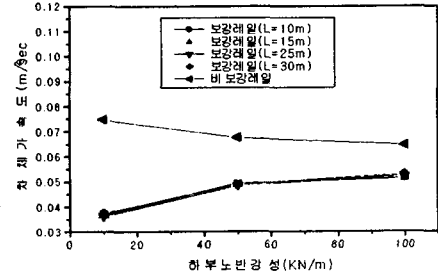
그림 11은 접속부에서 부상침목이 발생할 경우 보강레일 길이를 10, 15, 25, 30m로 할 경우 윤중변동율, 레일응력 및 차체가속도를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 보강레일 길이는 윤중변동율, 레일응력 및 차체가속도에 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 경제성을 고려하여 가급적 보강레일 길이를 작게 하는 것이 추천된다. 그러나 접속부에서는 본 궤도와 같이 부상침목이 발생하는 것 외에 흔히 교대배면으로부터 일정거리(10m이상)까지 침하가 발생하여 궤도가 손상되므로 급격한 레일의 휨을 방지하기 위하여 보강레일을 일정거리 이상으로 하는 것이 추천된다.



(a) 윤중변동률 비교



(b) 레일응력 비교



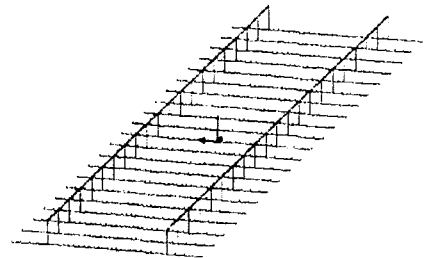
(c) 차체수직가속도 비교

그림 11. 보강레일 종류에 따른 궤도거동 비교결과

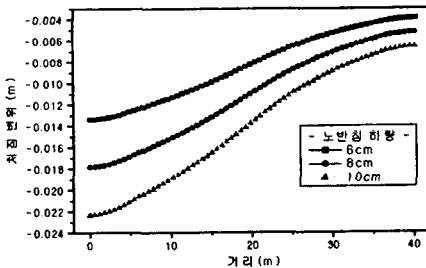
4.5 노반 침하발생시 보강레일 효과분석

교량 배면도의 일정구간이 침하된 경우에 보강레일 부설에 따른 효과를 분석하기 위하여 그림 12의 (a)와 같이 접속구간 40m 궤도를 유한요소로 모형화하여 해석을 수행하였다. 교량 및 토공구간의 궤도지지계수는 각각 100 MN/m^2 , 100 MN/m^2 으로 가정하였다.

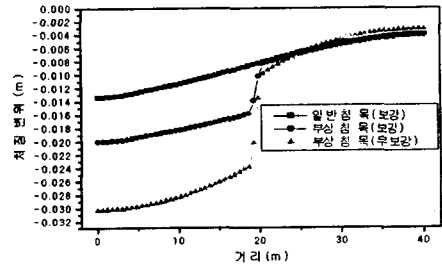
그림 12의 (b)는 교대 배면도가 각각 6, 8, 10cm 침하된 경우 레일처짐을 해석한 결과이다. 이에 의하면, 침하량이 커질수록 접속구간 거리에 따른 레일처짐의 경사도는 매우 커진다. 그러므로 침하량이 커질수록 윤중이 증가하고 이로 인한 궤도파괴 및 차량 주행안전성 저하가 발생하므로 궤도침하를 대비한 보강이 필요함을 알 수 있다.



(a) 레일 처짐을 위한 구조해석 모델



(b) 노반침하에 따른 레일처짐량비교



(c) 보강레일 사용에 따른 개선효과

그림 12. 노반침하에 따른 보강레일 부설효과

그림 12(c)는 교대 배면부근 노반이 6cm 침하하고 부상침목이 발생하였을 때, 보강레일을 부설한 경우와 그렇지 않은 경우 레일침하를 나타낸 결과이다. 부상침목이 있는 경우 보강레일을 사용하면 레일 침하량을 1/2정도로 줄이고, 또한 침하 경사도도 크게 낮출 수 있음을 알 수 있다. 따라서 레일 침하를 충분한 거리를 통하여 완화할 수 있도록 보강레일을 사용하는 것이 필요하다.

보강레일길이는 교대배면으로부터 일정거리(10m 이상)까지 침하가 발생하지 않도록 토공구간 12.5m, 교량구간 12.5m 도합 25m로 정하는 것이 추천된다.

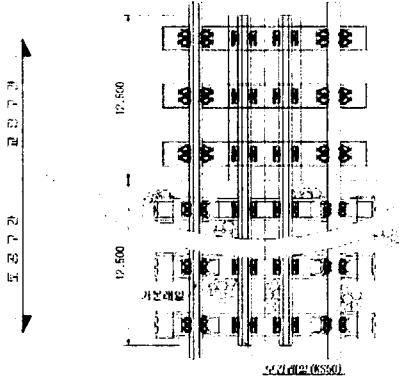


그림 13. 보강레일의 상세설계

5. 보강레일 설계

토공/교량 접속구간에서 궤도손상 진전을 완화하고, 또한 열차의 주행안전성 및 승차감을 확보하기 위하여 보강레일 부설할 경우 이상의 연구 결과를 바탕으로 보강레일의 설계도면을 작성하면 그림 13과 같다.

6. 결론

접속구간에서 열차주행시 관리기준이 국내에는 제정되어 있지 않기 때문에 일본의 관리기준을 준용하였다. 그리고 차량이 교량/토공 접속구간을 통과할 때 궤도 거동을 잘 모의하기 위해서는 궤도의 국부개소의 동특성응답을 모의할 수 있도록 해석기법을 개발하였다. 개발된 해석기법을 고려하여 현장에서 발생가능한 다양한 강성조건을 고려, 이를 시뮬레이션 하여 최적설계치를 산정하였다. 그리고 실제 추가레일의 상세도면을 작성하였다.

7. 참고문헌

- (1) Coenraad Esveld, "Modern Railway Track", MRT-Productions, 2001
- (2) 三浦重, "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