

콘크리트궤도의 노반침하 대책공법



이 일 화
한국철도기술연구원 고속철도연구본부
선임연구원
iwlee@krii.re.kr



강 윤 석
한국철도기술연구원 고속철도인프라
시스템연구단 T/F 선임연구원
yskang@krii.re.kr

1. 개요

콘크리트궤도는 유지보수의 용이성으로 인해 국내외에서 적용이 확대되고 있는 추세이다. 국외의 경우, 독일 고속철도, 네덜란드 고속철도(HSL ZUID), 일본 신간선, 프랑스, 스페인 등 유럽 각국의 일반철도와 도시철도에 널리 사용되고 있다. 국내의 경우, 경부고속철도 2단계 전 구간에 콘크리트궤도를 도입하였으며, 호남 고속철도에도 전 구간 콘크리트궤도를 채택하고 있다. 또한 일반철도 터널 구간과 도시철도 등에서는 이미 널리 콘크리트궤도가 사용되고 있다. 세계적으로 강성 노반구간에서 콘크리트궤도 부설은 일반화 되어가고 있는 추세이며, 철도기술 선진국을 중심으로 연성노반인 토공노반에도 콘크리트궤도를 부설하는 사례가 점차 증가하고 있는 실정이다.



〈그림 1〉 경부고속철도 2단계구간 콘크리트궤도

콘크리트궤도는 충분한 주행안정성을 확보할 수 있고 유지관리비를 대폭적으로 절감시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 유지보수상의 주요 문제점 중 하나는 하부구조 즉, 콘크리트층을 지지하고 있는 성토층과 원지반에서의 침하문제이다. 궤도에서 국부적인 궤도틀림이 발생하였을 경우, 체결장치 등을 이용하여 조정이 가능하지만 하부구조가 원인이 되는 과도한 침하나 변형이 발생

할 경우, 유지보수는 대단히 어려워지게 된다. 즉 하부구조의 강성차, 국부적인 침하나 배수불량에 의한 노반 연약화 등이 발생하였을 경우에는 하부구조를 보강해야만 하기 때문에 열차를 차단할 수 없는 영업선에서는 유지보수에 많은 어려움이 따른다. 따라서 토공구간에 콘크리트궤도를 건설할 경우에는 모든 가능한 변수를 고려하여 보다 안전측으로 설계하여야 하며 궤도구조와의 상호작용이 고려된 노반의 거동을 합리적으로 평가하고 예측하는 것이 필요하다. 더불어 침하발생에 대한 적절한 대책을 수립하여 열차의 주행안전성을 확보하는 것이 요구된다.

2. 콘크리트궤도 토공노반의 침하 특성

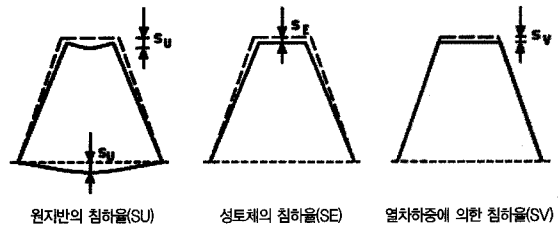
2.1 토공노반의 침하

콘크리트궤도는 주행안전 및 승차감 등 차량의 주행 특성과 유지보수상의 목적 때문에 열차 하중에 의해 생기는 변위와 침하의 제한치를 엄격하게 만족하는 구조로 설계하여야 한다. 이를 위해서는 쌓기, 깔기, 평지부 등 각각의 노반 형식에 적합하게 설계를 하는 것이 중요하다. 일반적으로 토공노반의 침하는 쌓기하중 등의 사하중에 의한 원지반의 침하, 쌓기 자체의 압축하중 및 열차 하중에 의한 쌓기부 침하로 크게 구별된다. 이중 쌓기하중 및 열차하중은 단기간내에 발생하여 잔류침하에는 거의 영향을 미치지 않지만, 원지반침하는 궤도구조에 지속적인 영향을 미치기 때문에 철저한 대책이 필요하다.



(그림 2) 토공노반의 침하가 발생한 콘크리트궤도

흙쌓기부에서 발생하는 침하는 그림 3과 같이 원지반의 침하 SU, 성토체의 압축으로 인한 침하 SE, 열차운행하중에 의한 침하 SV로 분류한다. 전체 침하에서 침하의 가장 큰 부분을 차지하는 것은 원지반 침하(SU)와 성토체 침하(SE)이다. 열차운행하중에 의한 침하(SV)는 비교적 작은 편이다. 독일의 경우 정상적으로 시공되고 다지기 작업이 완료된 콘크리트궤도의 경우 열차운행하중에 의한 침하(SV)는 경험적으로 약 5mm 정도로 보고 있다. 성토체 침하(SE)는 성토 재료와 다짐 작업에 따라 좌우된다. 일반적으로 성토체의 침하는 전체 침하량에 비하여 작기 때문에 무시되어 왔으나, 고속철도에서는 고려되어야 할 사항으로 판단된다. 원지반 침하(SU)는 원지반의 압축성에 좌우된다. 수분 함량이 높거나 유기질 성분이 있는 원지반에서 큰 침하가 발생한다. 원지반 침하는 즉시 침하, 압밀침하, 2차 압축침하로 나눈다.



(그림 3) 침하의 종류

토공노반 침하의 주요 원인은 지반조사 미흡, 원지반처리 불량, 성토다짐불량, 배수불량, 접속처리 미흡 등이며 대부분은 침하문제는 복합적인 원인으로 발생한다. 침하방지를 위해서는 철저한 사전조사를 필요로 하는데, 사전조사에는 지반조사, 침하예측, 대책공법의 적용 등이 검토되어야 한다. 일반적으로 지반조사는 일정거리 마다 수행되지만, 국부적인 지반결함이 예상되는 구간에서는 연속적인 조사를 수행할 필요가 있다. 침하량에 대한 산정은 지형 및 지질 조건, 환경적 요인, 열차주행 특성, 토공재료 등에 대한 정확한 자료 분석이 요구되기 때문에 장기간에 걸쳐 시공되는 철도건설에서는 대단히 어려운 작업이라 할 수 있다. 특히 침하특성에 대한 분석은 주로 현장계측

을 통하여 이루어지게 되는데, 시공중 발생하는 침하량을 예측하고 이를 바탕으로 잔류침하량을 예측한다.

2.2 콘크리트궤도의 허용잔류침하기준

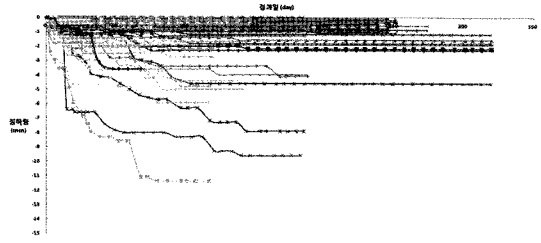
콘크리트궤도의 허용잔류침하기준은 유지보수상의 목적으로 결정된다. 고려되어야 할 것은 승차감, 주행 안전성 및 궤도 각 부분의 강도 등이 있고, 열차 주행시의 동적 거동에 의해 크게 영향을 받는다. 국외의 경우, 침하기준의 산정은 체결구의 상하조절 여유량과 슬래브궤도의 구조설계상의 허용변위량, 승차감 등으로 결정한다. 체결구의 조절여유량은 20~30mm를 표준으로 하고 있으며, 체결구의 종류에 따라 변경될 수 있다. 독일과 일본의 경우, 영구허용침하량을 15~30mm를 기본으로 정하고 있는데, 잔류침하의 측정시점은 궤도구축 후로서 대부분은 만족하는 것으로 파악되고 있다. 국내 적용시에도 이 범위를 벗어나지는 않는다. 표 1은 호남고속철도 설계지침에 적용된 허용잔류침하량에 대한 설명이다.

[표-1] 국내 허용잔류침하량 설계기준

호남고속철도 설계지침	
(1)	콘크리트궤도의 노반침하는 궤도 부설 원로 후를 기준으로 하고 지반고(Formation Level)로부터 열차하중에 따른 압축침하와 잔류침하의 합이 30mm를 넘지 않는 것으로 한다. 이 경우 열차하중에 따른 침하는 별도의 계산이 없는 경우에는 5mm를 적용해도 되며, 따라서 노반의 허용잔류침하량은 25mm를 넘지 않아야 한다.
(2)	분지모양으로 잔류침하형태가 나타날 경우 큰 변경(종곡선)으로 보정되는 것이 허용될 수 있으므로 경사부를 $r_b/0.4 \cdot V_b^2$ 에 따라 보정할 수 있을 때, 공단과 협의 하에 잔류침하량을 60mm까지 허용할 수 있다. 여기서 r_b 는 보정반경(m)을 의미하고 V_b 는 설계속도 km/h를 의미한다.

2.3 경부고속철도 2단계 구간 침하계측 사례

경부고속철도 2단계구간에서는 콘크리트궤도의 적용에 따라 토공구간의 침하량이 개통 후 고속철도 안전에 중요한 요인으로 대두됨에 따라 부설시기의 적정성 판단 기준과 향후 건설될 콘크리트궤도구간에 대한 잔류침하기준을 만족하는가를 판단하기 위하여 현장침하계측을 시행하였다. 다음 그림 4는 원지반 및 지표침하계의 측정값으로 대부분의 측정개소에서 침하가 수렴하여 진행성 침



<그림 4> 경부고속철도 2단계 구간 침하계측 사례

하는 없는 것으로 나타났다. 일반적인 토공구조물의 침하량과 비교할 때 매우 작은 침하가 발생된 것으로 나타났는데, 이는 철저한 품질관리와 압성토로 이루어진 구간이 많기 때문에 흙성토에 비해서 침하 측면에서는 다소 유리한 것으로 판단된다.

2.4 토공노반의 침하 유형

콘크리트궤도 구간에서 노반 침하는 접속부나 연약지반구간등과 같이 일반적인 취약개소를 비롯하여 전혀 예상치 못한 곳에서도 발생하게 된다. 침하의 패턴 또한 위치에 따라서 다양하게 분포하는데, 주요 침하개소를 정리하면 아래와 같다.

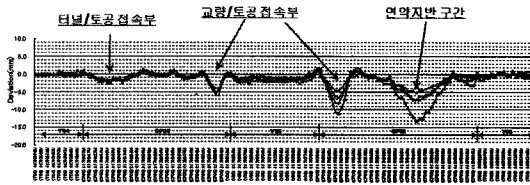
① 접속부 구간

접속부 구간은 교량/토공, 터널/토공, 박스/토공, 자갈도상궤도/콘크리트궤도 등이 있다. 이 중에서도 가장 취약한 접속부는 교량/토공구간으로서 노반의 지지강성 차이가 가장 크다. 교량/토공접속부에서는 부등침하방지를 위하여 approach block, drag plate 등을 설치하여 부등침하 발생을 최소화하고 있다.

② 연약지반 구간

침하에 가장 취약한 구간중 하나로서 원지반이 연약지반으로 구성된 구간이다. 연약지반 구간은 설계단계에서부터 정밀한 조사를 통하여 적절한 처리공법을 적용하여야 한다. 그럼에도 불구하고 조사단계에서의 소홀, 국부적 연약구간의 존재, 연약지반 시중점부 등에서 침하가 발생한다.

③ 국부적 취약 구간



〈그림 5〉 콘크리트궤도에서의 전형적인 침하 패턴

계획노선중 과거 소하천이었거나 짧은 계곡부 또는 복잡한 지형구간 등에서의 침하발생

④ 구배변경 구간

구배는 궤도의 기울기가 변하는 구간이며, 기울기변경에 따른 충격하중의 영향으로 침하가 발생한다.

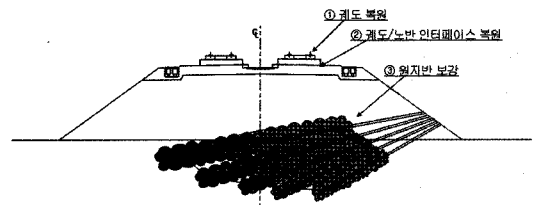
⑤ 배수불량 구간

배수불량은 주로 땅깁기구간에서 발생하게 되며, 원지반의 압밀 등에 의한 침하가 아니라 배수불량에 따른 이토화에 의해 지속적인 변형이 발생한다.

3. 침하대책방안

토공구간에서 콘크리트궤도 건설의 전제조건은 잔류침하가 기준을 초과하여서는 안된다는 것이다. 그러나 다양한 환경, 즉 기후조건, 시공조건, 지형조건 등으로 인하여 불가피하게 침하가 발생될 가능성이 크다. 특히 허용잔류침하량이 30mm에 불과하기 때문에 시공을 아무리 신중하게 하더라도 국부적으로는 침하가 발생할 가능성이 있다. 따라서 콘크리트궤도 건설 시에는 침하의 크기, 경향, 시기 등에 따라 적절한 대책을 세워야 하며, 침하 발생 후에는 현장상황에 적합한 대책공법을 적용하여야 한다.

콘크리트궤도에서 침하가 발생될 경우, 복원공법의 선정은 선로의 침하발생 원인, 위치, 상태, 침하량, 경제성 등에 의해 결정되며, 철저한 사전준비가 요구된다. 침하 발생이 확인되었을 때, 체결장치의 조정한계 이내일 경우에는 체결장치를 이용한 직접적인 복원이 가능하며 궤도 구조, 열차 운행조건 등을 고려해 체결장치 복원에 따른 구조적 안정성을 검토할 필요가 있다. 하지만 30mm 이상



〈그림 6〉 복원 및 보강공법의 시공위치

〈표-2〉 시공위치에 따른 복원 및 보강공법의 개요

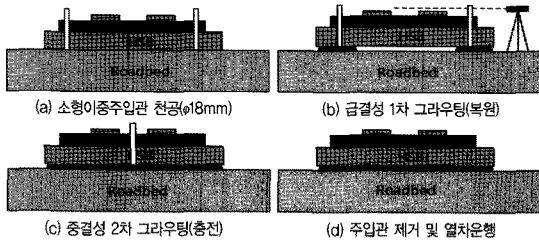
복원 및 보강위치	공법	내용
궤도 복원	체결장치를 이용한 복원	- 체결장치의 고저조절핀대를 이용한 복원 - 일반적으로 20~30mm 복원
	튜브교체방식	- 일반슬래브궤도의 CAM보강용 튜브 또는 레일패드용 튜브 교체를 통한 침하복원
궤도/노반 인터페이스 복원	유압잭을 이용한 복원 공법	- 유압잭을 이용하여 슬래브를 들어올린 후 공극을 채움 - 일체형 HSB구간에서는 적용하기 어려움
	우레탄 보강공법	- 우레탄의 팽창력을 이용한 침하복원
	급결그라우팅 보강공법	- 시멘트모르타의 주입압력을 이용한 침하복원
원지반 보강	원지반 그라우팅	- DGI(Double Grouting Injection) 공법 등 다양한 그라우팅공법을 활용한 지반보강 - 경제성이 불리하며, 위험부담이 큼

의 침하가 발생하였거나, 발생 가능성이 있는 경우에는 다음에서 설명되는 인터페이스 또는 원지반 위치에서 적합한 복원공법을 적용하여야 한다. 복원공법 개요는 그림 6 및 표 2와 같다.

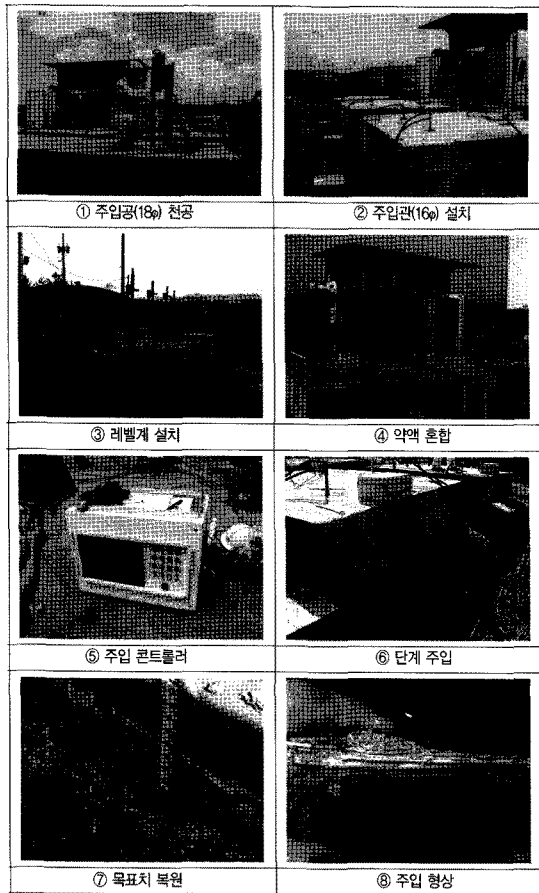
4. PRCG공법

콘크리트궤도의 침하복원을 목적으로 PRCG (Pressurized Rapid-hardening Cement Grouting) 공법이 개발되었다. PRCG공법은 열차의 운행에 지장을 주지 않으면서 정밀복원이 가능하도록 철도용으로 개발되었다. 급결성 시멘트모르타의 주입압력을 이용하여 미세·순환·반복 주입하는 방식이다. 시멘트의 5종의 무기계 재료를 혼합한 급결성 그라우트재료를 사용한다. 시공 방법은 다음과 같다.

① 주입관을 설치한다. 주입관은 충전재의 겔타임을 조



〈그림 7〉 복원 방안



〈그림 8〉 현장 시공 순서

정할 수 있게 이중관으로 철근위치를 피하여 설치한다. 설치위치는 주입압력을 균등하게 받을 수 있도록 TCL층과 HSB층을 관통하여 주입관의 끝이 강화 노반층 상면에 위치하도록 한다.

- ② 정확한 복원량을 결정하고 주입관을 통하여 급결성 (겔타임 2~3초대) 충전재를 주입한다. 복원은 충전재의 주입압력을 이용하며, 별도의 검측장비를 이용

하여 복원량을 조절한다. 이때 과도한 복원이 되지 않도록 주의한다.

- ③ 급결성 충전재를 주입하여 침하량이 복원되면, 2차 충전재를 주입하여 급결 충전재에 의하여 발생한 주입관 주변의 공극을 채운다. 2차 충전은 저압의 중결성 유동재료를 사용한다.
- ④ 주입관을 제거하고 천공부를 메운다.

주입재료의 특성은 철도의 특성상 보강공사 직후 열차가 즉시 통행할 수 있을 정도의 초기강도와 주입성을 갖춘 재료가 요구된다. 재료의 설계강도는 5kgf/cm² 이상으로 각 재료의 배합비 및 성능은 다음 표 3, 4와 같다.

〈표-3〉 중결재 표준배합비 및 실험 결과

구분	액상재료			분말재료				
	물(ℓ)	규산(ℓ)	MS-β	물(ℓ)	MC(kg)	MS-F(kg)	MS-B(kg)	MS-A(kg)
현장배합량	140	60	-	160	120	20	-	-
실험배합량	0.35	0.15	-	0.4	0.3	0.05	-	-
겔 타임	15초						수온 23°C	
중결재	압축강도 결과 값(1시간 경과 후)							
	실험압축강도(kg)	155.6	157.0	141.0	155.0	151.0	158.7	
	현장압축강도(kg/cm ²)	평균값 5.12						

〈표-4〉 급결재 표준배합비 및 실험 결과

구분	액상재료			분말재료				
	물(ℓ)	규산(ℓ)	MS-β	물(ℓ)	MC(kg)	MS-F(kg)	MS-B(kg)	MS-A(kg)
현장배합량	129	57	14	160	120	20	-	3
실험배합량	0.3225	0.1425	0.035	0.4	0.3	0.05	-	0.0075
겔 타임	2.5초						수온 20°C	
중결재	압축강도 결과 값(1시간 경과 후)							
	실험압축강도(kg)	6.02	9.26	7.18	5.36	6.08	10.1	
	현장압축강도(kg/cm ²)	평균값 7.33						

5. 결론

콘크리트궤도 토공노반의 건설에 있어 침하방지는 가장 중요한 키워드이다. 잔류침하에 대한 자료 검토 결과, 충분한 원지관리와 성토관리가 이루어진다면 잔류침하는 제어할 수 있는 것으로 나타났으나 취약개소인 접속부, 연약지반 등에서는 과도한 침하가 발생할 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 향후에는 보다 철저한 대책을 수립하여 열차의 주행안전성을 확보하는 것이 필요하다고 하겠다.