콘크리트궤도 침하복원을 위한 궤도/노반 인터페이스부 그라우팅이 주행안정성에 미치는 영향

Effect of Settlement Restoration Grouting between concrete track/Roadbed on the train service stability

이일화* 이성진** 이태균*** 강태호****

Lee, Il-Wha Lee, Sung-Jin Lee, Tae-Guen Kang, Tae-Ho

Various design factors should be considered in order to apply the concrete slab track system on the soil/rock roadbed. One of the important factors is the settlement of roadbed. This settlement of concrete track should be supervised under the allowable settlement limit. If the settlement of roadbed under the concrete track exceed the allowable limit, the train serviceability will considerably come down and furthermore the fatal disaster may happen. Therefore, in this paper we introduced a digitalized grouting method as a settlement restoration method that can be suitably adopted to the concrete slab track. And we also evaluated the train service stability through the analysis of the track behavior according to the difference of the stiffness between the grouted part and the original roadbed.

1. 서 론

토공구간에서 콘크리트궤도를 적용하기 위해서는 다양한 설계인자를 추가로 고려하여야 한다. 그중에서 가장 중요한 사항은 노반의 침하를 기준값 이내로 유지함으로서 차량 및 궤도의 주행안정성을 확보하고 유지보수 노력을 감소시키는 것이다. 콘크리트궤도는 기존 자갈도상궤도와 달리 침하가 발생하였을 경우, 궤도의 사용성 저하가 크고 대처 방안이 매우 제한적이기 때문에 토공구간에 부설하기 위해서는 장기적으로 노반침하를 엄격히 제한하여야 한다. 따라서 연약지반 구간에서의 콘크리트궤도 건설 및 유지보수 시 침하를 원활한 궤도유지관리 수준으로 억제하려면 합리적인 대책이 마련되어야 하며 이를 위한 방안으로서 본 연구에서는 유지보수 관점에서 열차의 주행안정성을 저해하지 않는 침하복원공법을 개발하고자 하였다. 주요 내용은 복원공법에 대한 소개와 그라우팅의 주입 범위 및 강도에 대한 노반의 응답특성으로서 과도한 지지강성차가 발생하는가에 대한 검토이다.

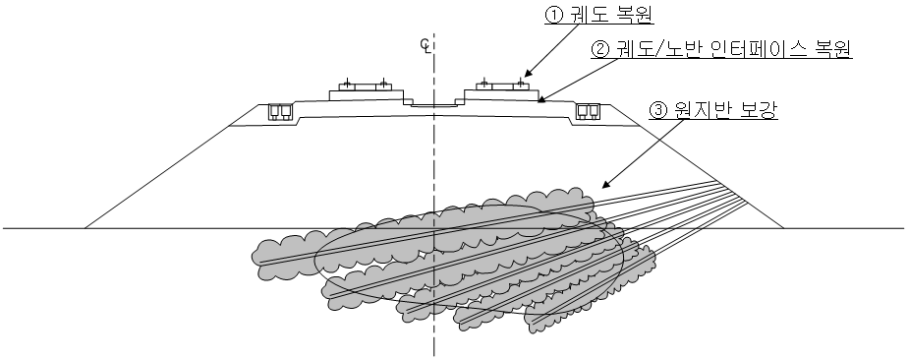
2. 콘크리트궤도 침하복원기법의 종류

토공구간에서 콘크리트궤도 건설의 전제조건은 침하가 발생되지 않아야 한다. 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 복원공법을 적용하여야 한다.

콘크리트궤도에서 침하가 발생될 경우, 복원공법의 선정은 선로의 침하발생 원인, 위치, 상태, 침하

* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 정회원
** 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 정회원
*** 한국철도시설공단 충청지역본부 장항선팀장 정회원
**** 한국철도기술연구원 철도구조연구실 박사후과정 정회원

량, 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 30mm이상의 침하가 발생하였거나, 발생 가능성이 있는 경우에는 다음에서 설명되는 인터페이스 또는 원지반 위치에서 적합한 복원 공법을 적용하여야 한다. 복원공법 개요는 그림 1 및 표 1과 같다.



<그림 1> 복원 및 보강공법의 시공위치

<표 1>시공위치에 따른 복원 및 보강공법의 개요

복원 및 보강위치	공 법	내 용
궤도 복원	체결장치를 이용한 복원	- 체결장치의 고저조절패드를 이용한 복원 - 일반적으로 20~30mm 복원
	튜브교체방식	- 일본슬래브궤도의 CAM주입용 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 주입공법	- 우레탄의 팽창력을 이용한 침하복원
	급결그라우팅 주입공법	- 시멘트모르터의 주입압을 이용한 침하복원
원지반 보강	원지반 그라우팅	- DGI(Double Grouting Injection) 공법 등 다양한 그라우팅공법을 활용한 지반보강 - 경제성이 불리하며, 위험부담이 큼

3. 침하복원기법의 선정

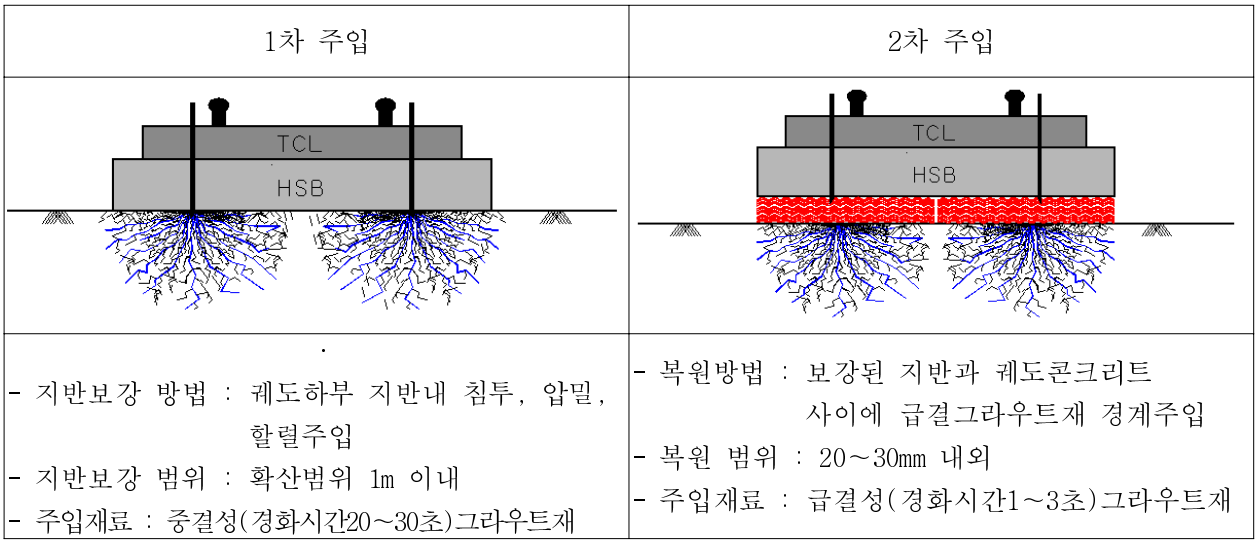
앞서 소개된 복원 및 보강공법들은 철도분야가 아닌 다른 구조물에 적합하게 개발 및 사용되는 공법들로서 콘크리트궤도의 특성을 반영하여 안전하고 정밀하게 또한 신속한 침하 복원을 위해 적합한 공법을 선정하고 이에 대한 적용 기술을 개발 발전시키는 것이 요구되고 있다. 과도한 침하가 발생하였을 때 현재까지의 적용 가능한 복원 및 보강공법 중 가장 합리적인 방안은 궤도/노반의 인터페이스에서 복원하는 것이 가장 효율적인 것으로 나타났다. 따라서 인터페이스 보강공법중 시공성과 재료성능이 우수하다고 판단되는 급결그라우팅 주입공법을 선정하였다. 복원 및 보강공법의 장단점을 표 2에 제시하였다.

<표 2> 복원 및 보강공법의 장단점

공 법	경제성	안전성	시공성	내구성	신뢰성	비고
유압잭을 이용한 복원 공법	○	△	×	○	△	- 궤도구조 차이로 인한 국내 적용 난해
우레탄 주입공법	○	△	△	△	△	- 비시멘트계 사용
급결그라우팅 주입공법	○	○	△	○	△	- 시멘트계 사용
원지반 그라우팅	×	×	△	○	×	

※ 2단계 경부고속철도 콘크리트궤도 대상

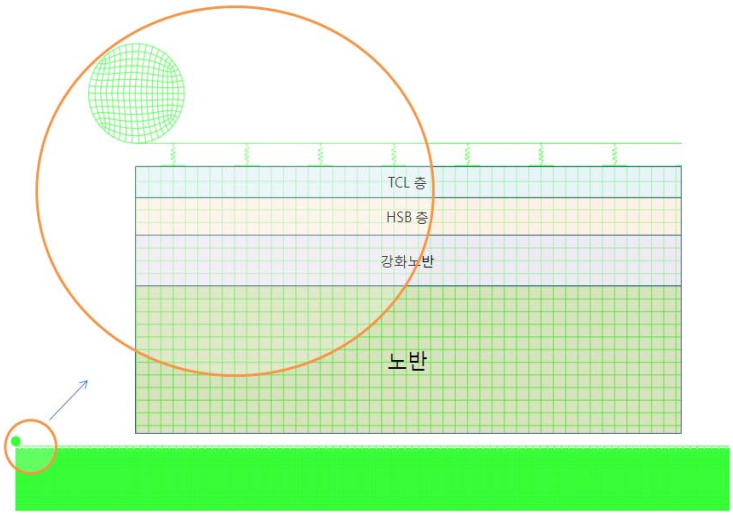
급결그라우팅 주입공법은 구조물 기초바닥에 주입공을 천공한 후, 구조물 기초 전체가 거의 동시에 균등한 힘을 받도록 주입공마다 주입량을 조절하면서 빠른 속도로 미세·순환·반복 주입하는 방식으로서, 고압의 주입기를 통해 1차로 침하된 지반에 시멘트외 5종의 무기계 재료를 혼합한 중결성 그라우트를 주입하여 지반을 보강한 후, 2차로 보강된 지반층과 구조물 기초 저면 사이에 급결성 그라우트를 주입하여 기울어진 구조물을 복원하는 기술이다. 급결 그라우팅 주입공법의 복원 원리를 그림 2에 제시하였다.



<그림 2> 급결그라우팅 주입공법의 복원 원리

4. 보강공법적용에 따른 주행 안정성 평가

인터페이스부 보강 시에는 궤도하면의 노반 강성이 변화하기 때문에 주입방식에 따라 열차주행에 영향을 미칠 가능성이 있다. 특히, 선 보강 후 복원 공정을 적용할 경우에는 상부노반층에 광범위하게 모르터가 주입될 가능성이 있으므로 이에 대한 검토가 요구된다. 주요 검토항목은 보강구간에서 이동하중에 대한 궤도의 변위 및 가속도 관점에서의 안정성이 확보되는가 이다. 해석은 범용 유한요소 해석프로그램 ABAQUS를 사용하였으며, 해석조건은 주입 재료의 범위(두께, 폭), 재료의 물성에 따른 주행안정성을 평가하였다.



<그림 3> 유한요소 해석 단면

4.1 해석 조건

해석 모델은 5m×60m로서 TCL, HSB, 강화노반, 노반으로 구성되며, 보강영역은 HSB층 바로 아래층에 위치한다(<그림 3>). 레일은 침목과 스프링으로 연결하였으며, 작용하중은 직경 78cm의 휠 모델에 열차하중 8.75t을 자중을 주고, 150km/h의 열차 속도를 주어 직접 이동을 시켰다. 해석은 직접적분법을 사용하여 응력과 변위 특성을 살펴보았다. 해석은 기본적으로 동적기법을 사용하였지만, 바퀴와 레일의 동적상호작용은 고려하지 않았다. 수치 모델의 영향인자로는 주입재의 폭, 두께와 모르터 물성인 압축강도를 사용하였다. 자세한 물성과 해석조건은 <표 3>과 <표 4>에 제시하였다.

<표 3> 수치해석에 사용된 포장궤도 물성

재료	물성		
	탄성계수	포아송비	두께
TCL	29.1GPa	0.21	0.24m
HSB	10.0GPa	0.21	0.3m
강화노반	80MPa	0.333	0.4m
노반	60MPa	0.333	-
주입재	7.0GPa	0.21	-
레일	210GPa	0.3	-

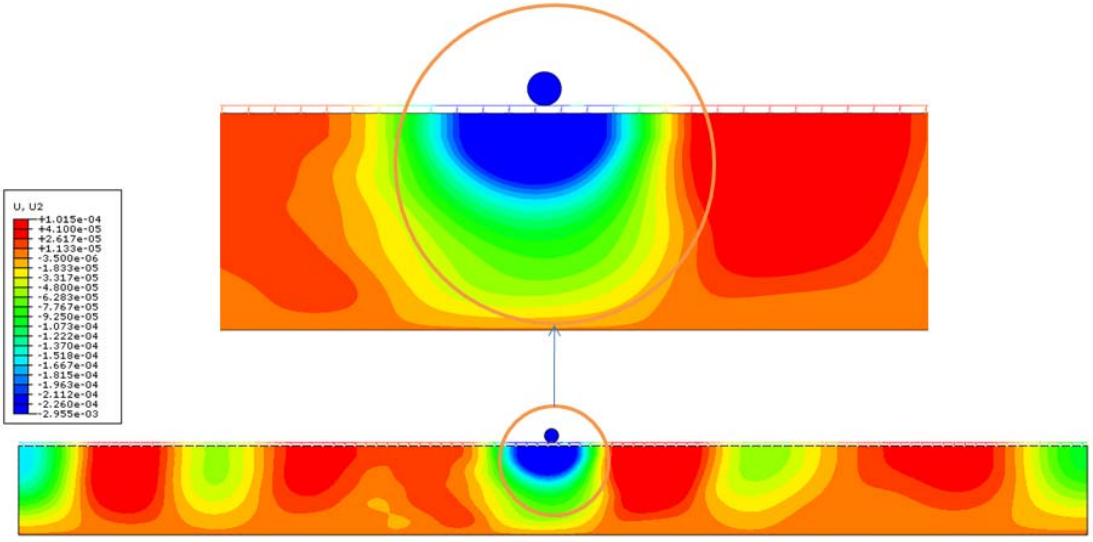
<표 4> 수치해석 조건

해석조건	주입 길이(m)	주입 두께(m)	주입 강도(GPa)
Case A	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	1.0	7.0
Case B	20	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0	7.0
Case C	20	1.0	0.35 0.7, 1.4, 4.2, 5.6, 7.0

4.2 해석 결과

4.2.1 무보강 모델

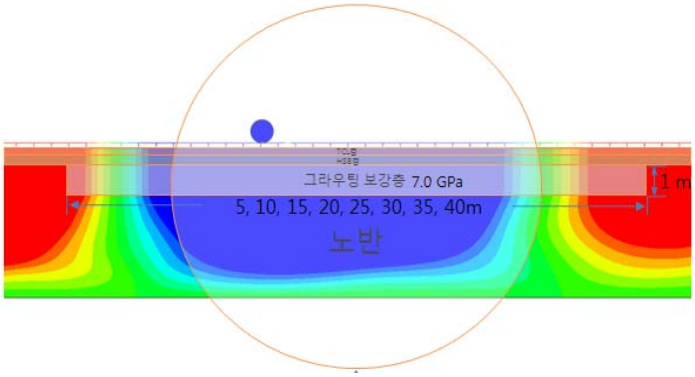
<그림 4>는 무보강 모델에서 이동하중이 모델 중심부에 도달하였을 시에 대한 응력과 변위 특성을 대표로 제시하였다. 보강이 없는 모델의 경우, 열차이동하중이 모델 전체를 통과하는 동안 침목 상부에서의 변위 약 0.404mm이다. 그림에서는 이동하중 작용시의 침목과 TCL층과 HSB층등에서 수직응력분포 특성을 볼 수 있다.



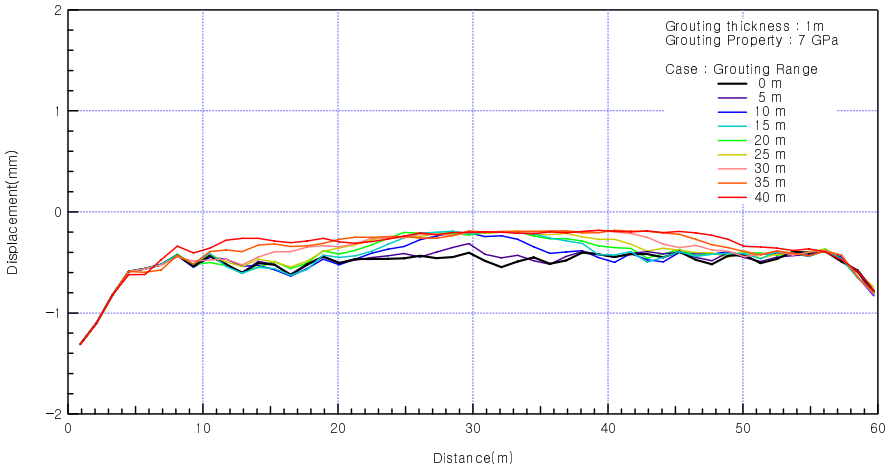
<그림 4> 이동하중 재하시 해석모델 중심에서의 수직변위(무보강 모델)

4.2.2 주입 길이별 변화특성(Case A)

Case A에서는 주입 길이를 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40m로 변화를 주고 응력과 변위 특성을 살펴보았다. 이 경우, 주입 두께는 1m이고, 주입재의 강도는 7GPa로 하였다(그림 5). 보강길이가 20m인 경우, 중앙부 침목 상부에서의 변위가 약 0.23mm로 감소하였다. 보강이 없는 경우 0.41 mm이다. <그림 6>에서는 보강 길이에 따른 변위의 변화를 길이별로 도시한 것으로, 보강 길이에 따라 변위의 폭도 변화 되는 것을 확인할 수 있었다. 보강 폭이 5~40m로 변함에 따라 변위도 0.32 ~ 0.19mm로 감소들고, 보강 길이가 증가함에 따라서 변위가 감소한 구간도 증가되는 것을 확인할 수 있다.



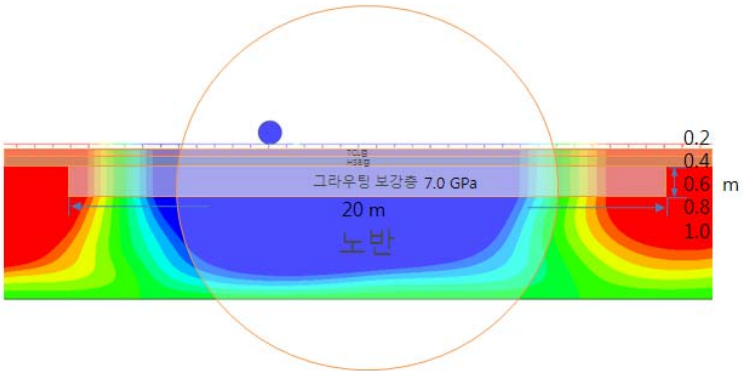
<그림 5> 이동하중 재하 시 해석모델 중심에서의 수직변위(Case A)



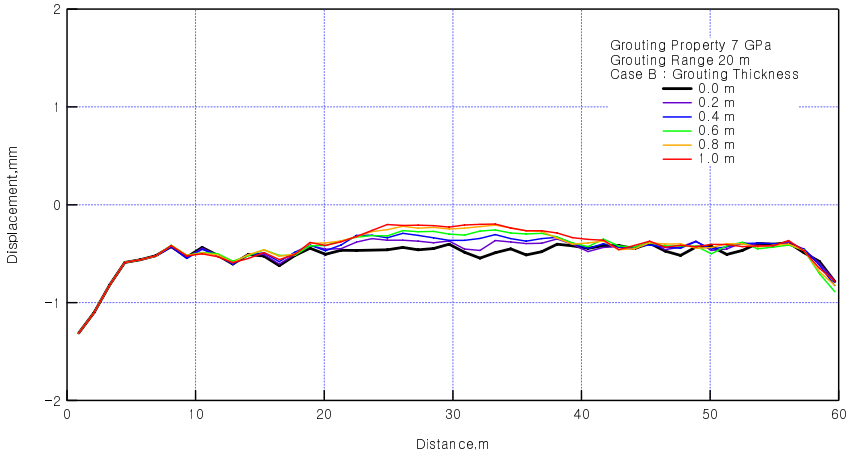
<그림 6> 주입 길이에 따른 변위 변화(Case A)

4.2.3 주입 두께별 변화특성(Case B)

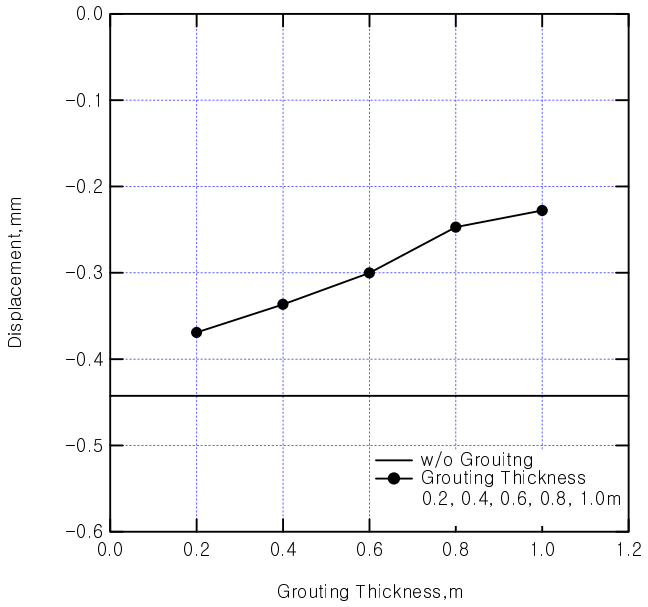
Case B에서는 주입 두께를 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0m로 변화를 주고 응력과 변위 특성을 살펴보았다. 이 경우, 주입 길이는 20m이고, 보강재 강도는 7.0GPa이다. 주입 두께가 0.6m인 경우, 중앙부 HSB층 하부에서의 변위가 약 0.3mm로 변화하는 것을 <그림 8>에서 확인 할 수 있다. 보강이 없는 경우는 0.41 mm이다. <그림 8>에서는 보강 두께에 따른 변위의 변화를 도시한 것으로, 보강 두께가 0.2 ~ 1.0m로 변함에 따라 변위도 0.37 ~ 0.23mm로 감소하는 것을 확인할 수 있다. <그림 9>는 해석모델의 중심위치(29.7m)에서 주입 두께별 변위변화를 나타낸 그림으로 비례관계에 있는 것으로 나타났다.



<그림 7> 이동하중 재하 시 해석모델 중심에서의 수직변위(Case B)



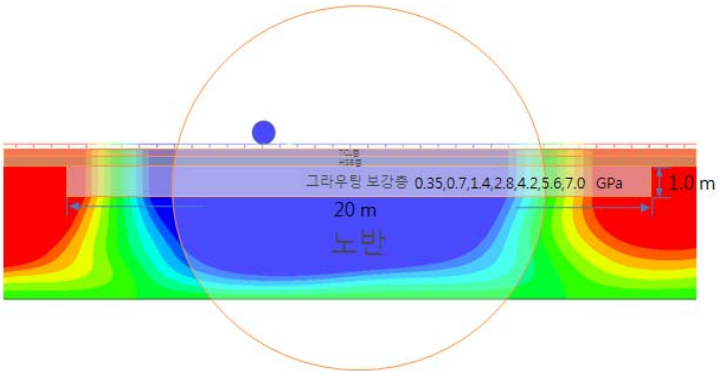
<그림 8> 주입 두께에 따른 변위 변화(Case B)



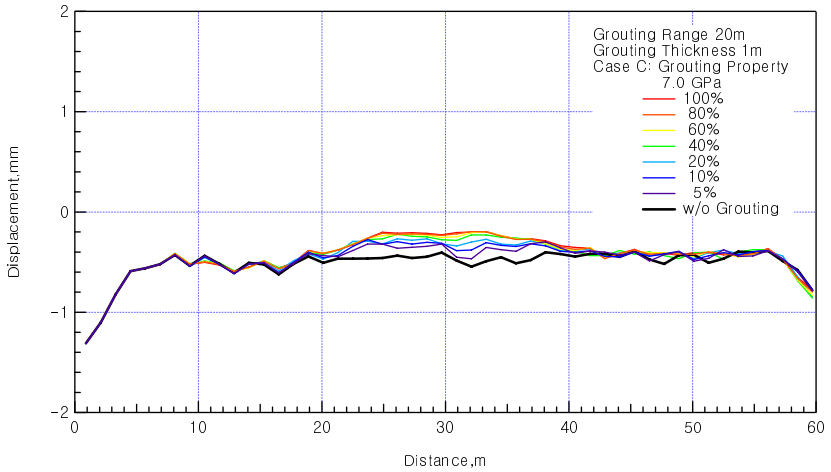
<그림 9> 주입 두께에 따른 변위 변화(29.7m 지점)

4.2.4 주입재 강도별 변화특성(Case C)

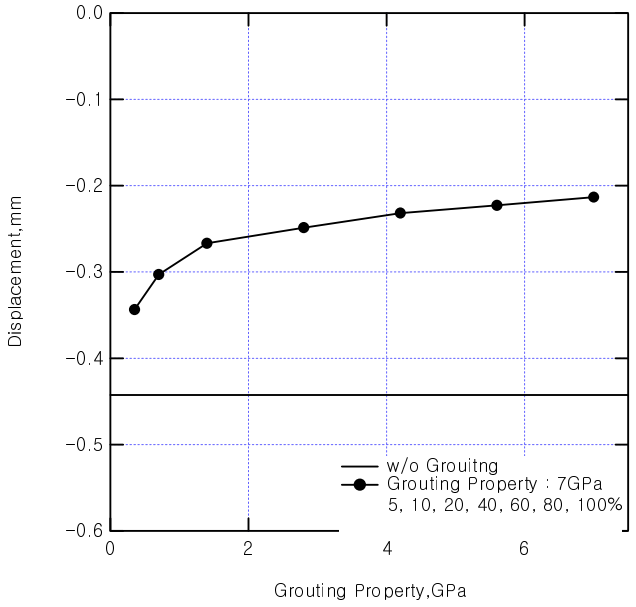
Case C에서는 주입재 강도가 기본적으로 7.0GPa로 가정하고 이에 대하여 5, 10, 20, 40, 60, 80, 100%의 강도를 가질 때의 응력과 변위 특성을 살펴보았다. 이 경우, 주입 폭은 20m이고, 주입 두께는 1m이다. 보강재 강도의 20%인 경우, 중앙부 HSB층 하부에서의 변위가 약 0.23mm로 변화하였다. 보강이 없는 경우는 29.7m 지점의 변위가 0.41mm이다. <그림 11>에서는 보강재의 강도에 따른 변위 변화를 도시한 것으로, 보강재의 강도가 5 ~ 100%로 변함에 따라 변위도 0.35 ~ 0.22mm로 감소하는 것을 확인할 수 있다. <그림 12>는 해석모델의 중심(29.7m)에서 재료의 강도별 변위변화를 나타낸 그림으로서 원재료강도의 20% 이상일 경우에는 변위변화가 크지 않은 것으로 나타났다.



<그림 10> 이동하중 재하시 해석모델 중심에서의 수직변위(Case C)



<그림 11> 보강재 강도에 따른 변위 변화(Case C)



<그림 12> 보강재 강도에 따른 변위 변화(29.7m 지점)

5. 결 론

콘크리트궤도 침하복원을 위한 주입공법 적용에 따른 궤도 안정성을 평가하기 위하여, 주입 두께와 폭, 재료의 강도 변화에 대하여 이동하중에 따른 변형특성을 파악하였으며, 해석 결과는 다음과 같다.

1) 주입 길이를 5~40m 별로 변화하였을 때 해석모델의 중앙에서 수직변위는 0.41mm에서 0.32 ~ 0.19mm로 감소하였다. 주입두께를 0.2~1m로 변화하였을 때는 수직변위는 0.37 ~ 0.23mm로 감소하였으며 주입두께와 변위는 비례관계이었다. 또한 주입재의 강도를 7.0GPa을 기준으로 5~100%로 변화하였을 때 수직 변위는 0.34 ~ 0.22mm로 감소하였다. 강도의 경우 20% 이상이면 변위의 변화 폭이 크지 않다.

2) 각 해석결과, 주입에 따른 강도증가로 인하여 열차이동하중 재하 시 변위가 감소하였다. 변위가 감소하였다는 것은 노반의 지지강성이 변화한다는 것으로 열차주행에 영향을 미칠 가능성이 있다. 감소의 범위는 약 0.37~0.19mm이며 무보강시와 비교하여 최대 50% 이하로 감소하였다. 본 해석에서는 주입 범위에 순수 모르터가 주입된 것으로 가정하였기 때문에 실제 주입 시 발생되는 할렬이

나 혼합을 고려할 경우, 주입에 따른 지지강성의 변화는 크기 않을 것으로 판단되지만, 적용 시에는 주입의 범위와 강도의 영향을 사전 검토하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(AH08004A)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Hagio & Yasuhiro(2007), "TC型省力化軌道の現想と第3期工事における", 日本鐵道施設協會誌, pp131-134.
2. 省力化軌道の管理(2006), JR東日本 設備部