

콘크리트궤도 침하복원공법의 성능 평가 방안



이 일 화 한국철도기술연구원
책임연구원
(ivlee@krti.re.kr)

1 개요

콘크리트궤도 침하 복원의 의미는 연약한 원지반의 지지력 부족 등으로 침하된 궤도를 원 위치시키는 것을 포함하여 궤도를 침하 전의 정상적인 응력전달 상태로 복구하는 것이다. 즉, 기하학적 인 변위의 보상뿐만 아니라 열차하중을 노반으로 전달하는 인터페이스 기능을 정상적인 상태로 복구하여 궤도지지강성을 유지하고 불균일한 응력이 생기지 않도록 하여야 한다.

콘크리트궤도는 주행안정성 확보에 유리하고 유지관리비를 대폭적으로 절감시킬 수 있다는 장점을 가지고 있지만 침하에 취약한 단점이 있다. 콘크리트궤도에서 소규모 침하나 틀림이 발생하였을 경우, 체결장치 등을 이용하여 조정이 가능하지만 하부구조에서 원인이 되는 과도한 침하나 변형이 발생할 경우, 유지보수는 대단히 어려워지게 된다. 하부구조의 강성차, 재료의 압축, 국부적인 침하, 배수불량, 노반 연약화 등에 의해 침하가 발생하였을 경우에는 문제 발생구간을 보강하여야만 하기 때문에 열차를 차단할 수 없는 운행선에서는 노반유지보수에 많은 어려움이 따른다. 따라서 취약구간에서 콘크리트궤도를 적정한 유지관리수준에서 관리하려면 효율적인 대책을 마련할 필요가 있다. 그래서 침하에 대해서는 별도의 복원공법이 개발되어 적용되고 있으나, 적용 실적이 많지 않고 공법의 선정 및 평가에 대하여 정보가 부족하여 혼돈이 유발되고 있는 실정이다. 이에 관련 정보를 제공하기 위하여 기존에 실시되었던 현장 성능평가사례를 제시하고 향후 적용기준(안)을 마련하고자 한다.

2 콘크리트궤도 침하관련 설계 및

유지보수기준

침하기준은 궤도구조, 시공조건, 환경조건, 기술수준, 경제성 등을 복합적으로 검토하여 결정하여야 한다. 노반의 침하는 장기적 거동을 보이기 때문에 정량적 분석 또는 예측이 어려워 과거에는 매우 엄격한 기준을 적용하였으나, 최근에는 기술개발 및 경험에 의해 다소 완화하는 경향이 있다.

2.1 노반의 허용잔류침하량 설계기준

콘크리트궤도 노반의 허용잔류침하량은 유지보수상의 목적으로 결정된다. 침하기준은 체결구의 상하조절 여유량으로 결정하며 콘크리트궤도 구조설계상의 허용변위량, 승차감 등을 참고한다. 체결구의 조절여유량은 30 mm를 표준으로 하고 있으나, 체결구의 종류에 따라 변경될 수 있다. [표 1]은 각 국에서 적용하는 허용잔류침하량 기준으로서 자국의 건설 환경 및 기술수준을 고려하여 적용하는데 일본은 잔류침하량을 완화하는 추세이고 중국은 엄격한 기준을 유지하고 있다. 중국 기준을 국내에 적용할 경우, 교량접속부는 많은 구간이 기준을 초과하게 된다. 현재 국내에서 적용하는 교량말뚝기초(교량)의 허용수직침하량은 25 mm로서 토공구간에서도 교량수준의 침하량 역제를 요구하고 있다.

[표 1] 각 국의 콘크리트궤도 허용잔류침하량 기준

한국 및 독일	일본	중국
- 궤도구축 후 허용잔류침하량 30mm ¹	- 최대잔류침하량 50mm(성능등급 I)	- 궤도구축 후 15mm
- 균등침하시 최대 60mm까지 허용 ²	- 한계침하속도 10mm/10년 ³	- 접속부는 5mm, 굴절각 1/1000 이내

2.2 노반의 침하보수에 대한 유지관리지침

유지관리는 선로유지관리지침(2015) 제122조에 따라 체결장치의 조절량과 침하 연장을 복합적으로 고려한다. 노반침하 연장이 20 m 이상인 경우의 침하량에 따른 보수방법은 다음과 같다.

- $\delta > L/1000$ 또는 δ_f : 노반침하 복원
- $\delta \leq L/1000$ 또는 δ_f : 체결장치를 이용한 궤도틀림 보수 (다만, 체결장치를 이용한 보수 한계는 궤도틀림보수의 제반 여건을 고려하여 한계값(δ_f)보다 낮게 조정 할 수 있다.)

여기서, δ : 노반침하량(mm), δ_f : 체결장치의 보수한계값(mm), L : 침하구간의 길이(mm)

3 침하대책방안

3.1 침하로 인한 궤도손상패턴

콘크리트궤도가 긴 연장으로 침하된 경우에는 열차주행안정성에 미치는 영향이 상대적으로 작고 궤도손상도 늦게 진행하지만, 구조물 접속부와 같이 침하 연장이 짧을 경우에는 열차주행안정성에 미치는 영향이 크고 궤도손상도 빠르게 진행하

1. 침하량 산정 시점을 2007년 호남고속철도 설계지침에서는 "궤도구축 후"로 정의하였으며 2012년 철도설계기준에는 "노반인수인계 후"로 수정, 독일은 궤도구축 후를 적용
 2. $r_s > 0.4 \times V_s^2$ 에 따라 보정 (r_s 는 보정반경(m), V_s 는 설계속도 (km/h))
 3. 한계침하속도는 과거 일본직결형 체결구의 최소유지보수기준이며 조절능력에 따라 완화

게 된다. 아래의 [표 2]는 침하연장이 짧은 경우의 대표적인 궤도손상패턴을 단계별로 나타낸 그림으로서 각 침하의 유형별로 적절한 유지보수대책을 적용하여야 한다.

3.2 침하 복원 및 보강공법

침하가 체결장치의 조정한계 이내일 경우에는

체결장치를 이용한 직접적인 궤도복원이 가능하다. 하지만 보수한계 이상의 침하가 발생하였을 경우에는 궤도/노반 인터페이스 또는 원지반 위치에서 적합한 복원 및 보강공법을 적용하여야 한다.

궤도/노반의 인터페이스부에서의 복원방법은 가압시멘트그라우팅공법(PRCG), 발포우레탄주입공법, 유압장비를 이용한 복원공법 등이 있는

[표 2] 침하연장이 짧은 경우의 궤도 손상 패턴 및 특징

기호	손상 패턴	특징
(a)		- TCL층과 HSB층의 변형은 없으나 하부노반층에서만 침하가 일어나 HSB층과 하부 노반층 사이에 공극이 생기는 단계
(b)		- TCL층, HSB층이 노반침하에 따라 연동하여 변위가 발생하는 단계
(c)		- TCL층, HSB층에서 침하가 발생하여 하부 노반층으로 가라앉으면서 HSB층에 균열이 생기는 단계
(d)		- TCL층, HSB층에서 침하가 발생하여 하부 노반층으로 가라앉으면서 TCL층과 HSB층이 분리되는 단계
(e)		- TCL층으로 균열이 전이되는 단계
(f)		- 궤도 파괴단계

데, 선정시에는 복원량, 정밀도, 재료강도, 발생응력, 경제성 등을 고려하여야 하며, 이 중 재료강도와 발생응력은 궤도의 내구성에 매우 큰 영향을 미치므로 신중하게 검토하여야 한다. 재료강도가 낮을 경우에는 동적상호작용에 의해 가속도 및 변위량이 크게 증가하게 되며, 과대응력이 발생하면 궤도의 내구성이 급격히 저하된다.

반복적인 침하를 예방하기 위하여 성토체 또는 원지반을 직접적으로 보강하는 방법도 있다. 보강은 시멘트그라우팅공법이 적용되는데, 제한적으로 적용한 사례만 있다. 보강방안의 선정시에도 성토체 및 원지반의 지반물성 및 지층구조에 따라 발생응력, 성토체의 안정성, 팽창, 균열, 주입압력, 주입량, 경제성, 시공성 등을 고려하여야 하며, 이 중 성토체의 안정성 유지가 가장 중요하다.



[그림 1] 궤도/노반 인터페이스 복원 (PRCG공법)



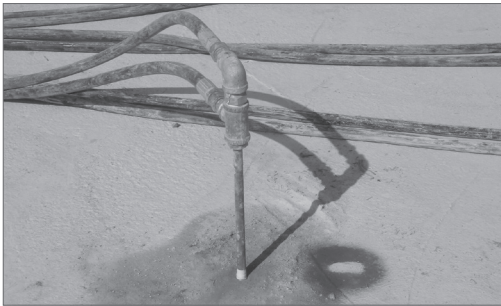
[그림 2] 성토체 그라우팅 보강

4 침하복원공법의 성능 평가 내용

복원공법은 운행중인 선로에서 적용되기 때문에 적용전에 충분한 성능검증이 요구된다. 복원공법은 현장조건에 따라 각 각 설계하여야 하지만, 기본적으로는 차량의 주행안정성과 궤도사용성은 기본적으로 확보되어야 한다. 이러한 기본성능이 확보되지 못하면 복원 후 과도한 응력에 의한 균열, 동적안정성 저해 등과 같은 2차 적인 문제를 유발할 수 있다. 검토 항목으로는 [표 3] 과 같이 재료의 강도, 복원량, 충전율, 슬래브 응력 등이 있으며, 내구성 및 환경성에 대한 성능도 검토되어야 한다. 성능검토는 현장조건과 유사한 시험 환경 하에서 복원공정, 재료 및 장비의 적용성, 복원량, 주입면적, 충전성, 발생응력 등을 확인할 필요가 있다.

[표 3] 복원공법의 기본 요구조건 및 평가방법

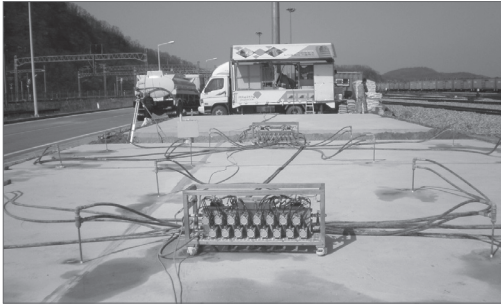
검토 항목	요구 조건	평가 방법
재료 강도	- 재료강도에 따른 차량/궤도/노반의 상호작용 영향 평가 - 열차하중에 대한 지지력 - 장기내구성	- 동적상호작용 해석 - 초기강도 및 장기강도시험
복원량	- 주행안정성 확보를 위한 종구배 설정량 - 시공정밀도 및 제어성능 확인	- 복원시험
충전율	- 슬래브하면의 재료충전성 평가 - 공동의 유무에 따른 주행안정성 확보	- 복원 후 슬래브저면 육안확인 - SASW시험 - Impact Echo시험
슬래브 응력	- 복원시 슬래브에 과도응력 발생 제한	- 슬래브의 변형률 측정



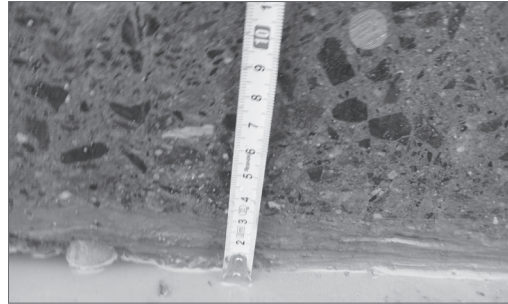
① 주입관(φ16) 설치



② 레벨계 설치



③ 순환반복 주입



④ 목표치 복원

[그림 3] PRCG공법의 현장 시공 순서

5 현장시험을 통한 성능평가 사례

다음 성능평가 사례는 가압형 시멘트모르타주입공법(PRCG)을 대상으로 하였다. 공법별 시공 및 복원 방법의 차이는 있지만, 요구조건은 동일하다.

5.1 공시체 제작

시험공시체의 제작은 콘크리트궤도의 현장조건과 유사한 재료 및 형상을 갖도록 하였다. 슬래브가 설치될 지반 위를 정리하고 혼합골재(φ40 mm)와 석분을 포설하여 다짐을 실시한 후 폭 8.8 m, 길이 10 m, 두께 0.3m의 직사각형 철근콘크리트(설계강도 24 MPa) 슬래브를 제작하였다.

5.2 현장복원 공정

복원 공정은 [그림 3]과 같다. 조성된 공시체를

지반까지 천공한 후, 주입관을 설치한다. 주입 준비 작업이 완료되면, 목표 복원량까지 복원이 되는 지를 확인하기 위한 레벨계를 설치한다. 주입 모르타는 차상에 설치된 믹서에서 준비하여 [그림 3] ③의 제어장치를 통하여 미세하게 순환반복 주입된다. 주입은 젤타임 2초대의 급결성 재료와 젤타임 30초대의 중결성 재료가 공정에 따라 별도로 주입된다. 주입의 형태는 [그림 3] ④와 같이 mm 단위로 슬래브의 저면과 노반층 사이에 반복 주입되어 형성압으로 슬래브를 상향으로 밀어 올린다.

5.3 평가 결과

5.3.1 재료의 강도

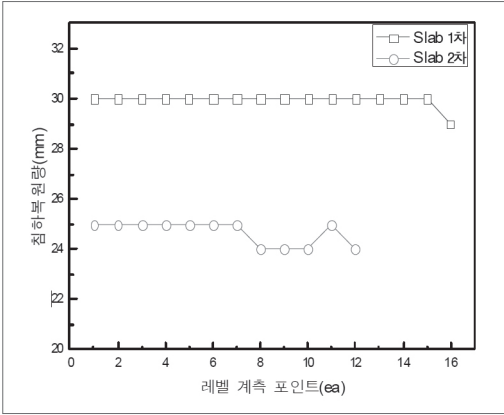
복원재료의 현장압축강도를 확인하기 위하여 현장에서 중결재를 대상으로 액상재와 분말재의 혼

합 후 온도별로 1시간 압축강도를 측정하였다. 실 온 상태의 액상재 온도 15 °C를 분말재와 혼합한 복원재료의 온도 20 °C를 기준으로 중결재의 압축 강도 시험을 한 결과, 10.52 kgf/cm²이고, 온도가 20 °C와 25 °C인 경우에는 19.76 kgf/cm²로서 실내시험과 유사한 결과를 나타내었다. 재료 강도는 혼합재료의 온도에 크게 영향을 받기 때문에 현장에서는 온도 유지를 위한 적절한 조치를 취하여야 한다.

복원재료 주입 직후에 열차가 운행하기 때문에 가압형 시멘트모르타르주입공법에서는 초기강도를 1시간 강도로 5kgf/cm² 이상을 확보하도록 권고하고 있다. 또한 28일 강도를 기준으로 할 경우, 충전재의 강도는 노반재료와 콘크리트의 중간범위에 포함되어야 한다. 만약 노반의 강도보다 낮을 경우에는 동적 상호작용에 의해 가속도 및 변위량이 크게 증가하게 된다.

5.3.2 복원량

현장복원시험의 주입시 복원량은 허용잔류침하량 기준인 30 mm를 목표로 하였다. 먼저, 급결재 주입과 중결재 주입을 반복으로 사용하여 슬래브를 복원하였다. 전 구간 슬래브를 ±1 mm 오차 범위내로 복원을 하였으나, 공시체의 모서리 부에서 구조적 특성 및 지반의 다짐 불량으로 인한 공극이 발생하여 [그림 4]와 같이 일부영역에서 1 mm의 복원부족이 발생하였다. 실제 콘크리트레도에서의 강화노반은 다짐이 매우 양호하기 때문에 이와 같은 문제점이 발생하지 않을 것으로 예상되지만, 밀실한 주입을 위해서는 가압을 할 필요가 있다.



[그림 4] 침하 복원량

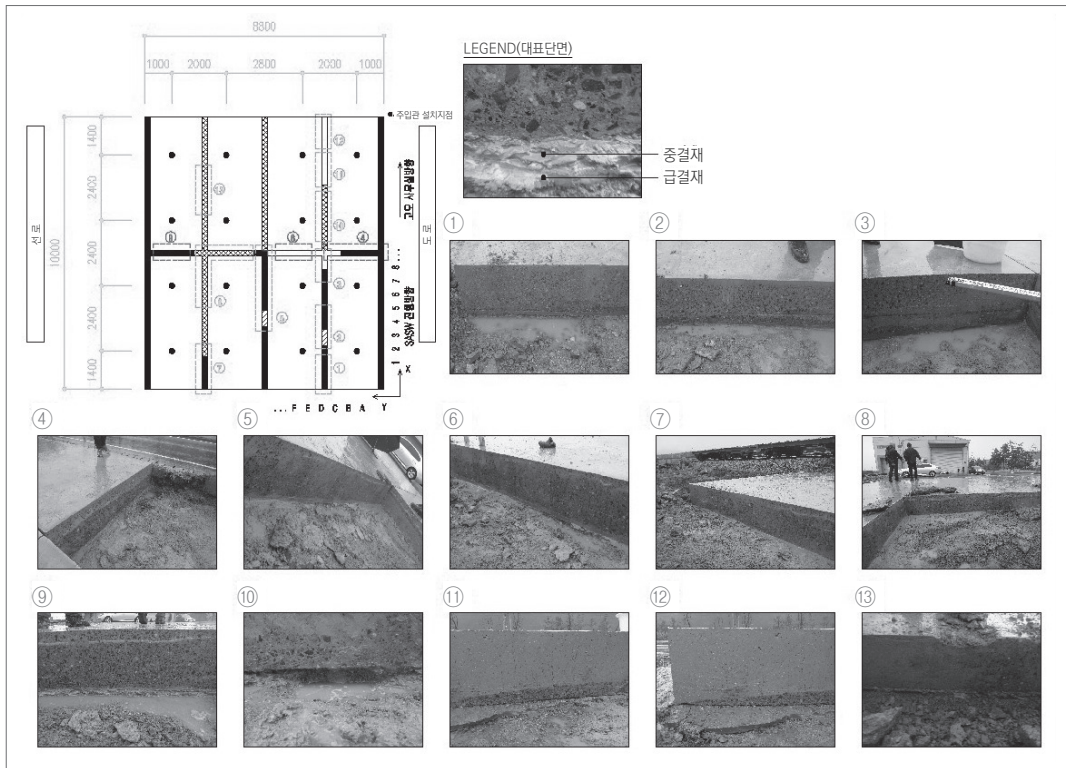
5.3.3 충전율

충전율을 검토하기 위하여 [그림 5]와 같이 슬래브를 일정구간씩 절단하여 육안검사를 수행하였다. 구간별 검사 결과, 슬래브 전 구간에서 목표 충전율을 만족하였고, 육안확인 결과, 1개 주입공을 제외하면 슬래브 하부 전면에 순차적으로 균등하게 주입되어 하부에서의 충전율을 만족하였다.

충전은 슬래브와 노반의 사이에 주입되며, 주입 상태는 대표 단면과 같이 주입횟수에 따른 급결성 재료와 중결성 재료의 층상구조를 확인할 수 있다.

5.3.4 충전상태 평가

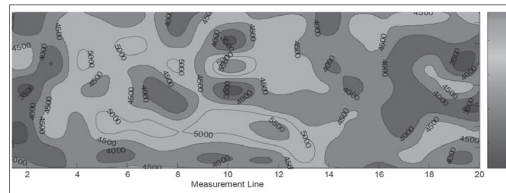
충전성 평가를 위한 임팩트एको 시험 결과, 측정별로 편차가 발생하였지만 전체적인 주입은 충분히 이루어진 것으로 나타났다. 주입 전/후의 공진주파수로 2차원 평면컨투어를 작성하여 보면 [그림 6]과 같다. 그림에서 공시체의 공진주파수가 전체적으로 감소하는 것으로 나타났는데, 이는 충전을 통하여 슬래브의 전체 두께가 증가함을 의미한다. 중앙부에서 일부영역의 충전이 미흡한 것으로 나타났으나 육안조사에서는 충전이 정상적으로 되었기 때문에 이러한 시험결과는 공시체 제



[그림 5] 콘크리트 슬래브 하부의 충전상태

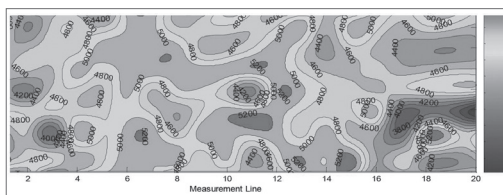
작 시 발생한 균열에 의한 결과로 판단된다.

아래 [그림 6]은 본선구간에서 복원작업 후 충전확인을 위한 천공자료로서 시료 채취를 통해서도 충전상태 평가가 가능하지만, 임팩트에코시험에 대한 확인용으로 사용하였다. 천공은 궤도중심부와 좌우 측면부 3개 위치에서 수행하였으며, 천공간격은 복원의 연장을 고려하여 결정한다. 충전층이 얇은 경우 또는 에어포켓이 형성되는 부분은 주입이 잘되지 않으므로 가압을 하는 것이 필요하다.

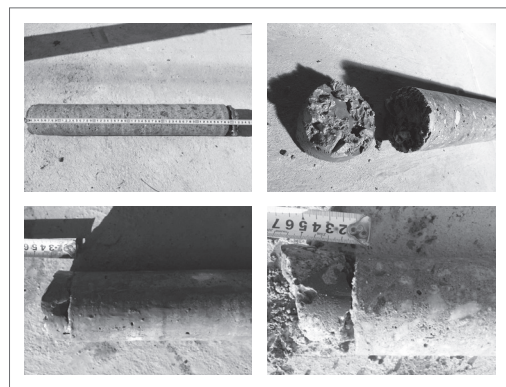


(b) 복원후

[그림 6] 복원 전후의 탁월주파수 변화



(a) 복원 전



[그림 7] 확인 천공 시료

5.3.5 슬래브 응력

복원시 궤도슬래브는 주입과 동시에 각 위치에서 측정된 변형율은 인장응력과 압축응력이 동시에 발생하여 시간이 경과하면서 낮아지는 경우도 있으며, 증가하는 경우도 있다. 발생응력의 변형율의 범위는 $\pm 20\mu\epsilon$ 로서 발생 휨강도는 0.6 MPa 수준으로 나타났다. 콘크리트궤도 설계시의 온도변화와 동적충격계수(변화 및 동적계수)를 고려한 도상콘크리트층의 횡방향 허용휨응력은 1.99 MPa이고 종방향 허용휨응력은 1.17 MPa이다. 콘크리트 기층은 도상콘크리트층의 30% 수준이지만, 콘크리트 기층의 균열을 허용할 경우, 복원시의 도상콘크리트층 허용휨응력도 1.17 MPa 이내로 제한하는 것이 필요하다.

정에 따라 유지보수가 이루어지고 있지만 복원공법의 적용 및 평가에 대한 검토 방법을 제시할 필요가 있었다. 이에 현재까지의 연구결과 등을 고려하여 복원공법의 적용기준(안)을 아래 <표 4>와 같이 제시하였다. 제시안은 궤도설계기준과 현재까지의 경험을 바탕으로 한 것으로서 복원 시에도 건설 시와 동등 이상의 기준을 적용하는 것이 차량의 주행안정성 및 궤도사용성 확보에 필요할 것으로 판단된다.

6 결론

침하복원은 노반 및 궤도를 침하 이전의 원상태로 복구하여 열차의 운행안정성을 확보하고 선로의 수명을 연장하는 것이 목적이다. 현재 관련규

[표 4] 궤도/노반 인터페이스부에 적용하는 복원공법의 적용기준(안)

평가 항목	적용 기준
종곡선 설치기준	- 선로의 기울기 : 1% 이하 확보
궤도지지 계수	- 궤도지지계수 : 90MN/m ² 이상 또는 재료탄성계수 : 80MN/m ² 이상
공극	- 콘크리트궤도 수직진동가속도 : 1g 이하
슬래브 발생 응력	- 콘크리트 휨응력 기준 : 1.17MPa 이하
충진성	- 면적이 50cm ² 을 초과하는 공극 : 15% 미만
주입재료	- 재료의 1시간 강도 : 0.5MPa/1h 이상

참고문헌

1. 고속선 선로구축물 성능향상 및 유지보수기술 개발보고서(2012), 한국철도기술연구원.
2. 고속철도 콘크리트궤도 유지보수기준 정립방안 연구보고서(2012), 한국철도시설공단.
3. 호남고속철도 토공노반의 신뢰성 확보를 위한 침하안정평가보고서(2015), 한국철도시설공단.
4. 이일화, 장승엽, 엄주환, 최원일, 박병주(2012), "콘크리트궤도 노반침하에 대한 유지보수 방안", 한국철도학회 2012년 추계학술발표회 논문집.
5. 고효석, 신학용, 신근식, 윤원민, 이일화(2013), "콘크리트궤도 침하복원공법(PRCG)의 시공사례 연구", 한국철도학회 춘계학술발표대회는 논문집.
6. 이일화, 윤원민, 박병주, 우용근, 신학용(2012), "현장시험을 통한 콘크리트궤도 침하복원공법(PRCG)의 성능평가", 한국철도학회 춘계학술발표대회논문집.
7. 이일화, 이성진, 이태균, 강태호(2008) "콘크리트궤도 침하복원을 위한 궤도/노반 인터페이스부 그라우팅이 주행안정성에 미치는 영향", 한국철도학회, 추계학술발표대회논문집.