

Precast Concrete Panel을 사용한 슬라브궤도 시험시공에 대한 평가

Evaluation for the Test Installation of Slab Track by Using Precast Concrete Panels

김순철* 공선용** 강정옥*** 이종민**** 한광섭*****
Kim, Soon-Cheol Kong, Sun-Yong Kang, Jeong-Ok Lee, Jong-Min Han, Kwang-Seob

ABSTRACT

This paper is presenting the performance evaluation on the installed concrete panels. As a result of the evaluation, the resistance to track displacement of temporary support structure was improved and it resulted in the improvement of work stability during installation. And, by the application of new technology and the saving of concrete consumption, both workability and cost were improved and, therefore, the shorter project period and cost saving can be expected. Furthermore, as a result of noise & vibration measurement at site, it has shown good effects of anti-noise and anti-vibration. In conclusion, this process was proved as very effective for track improvement.

1. 서론

우리나라 최초의 지하철인 서울지하철 1~4호선은 건설당시 국내 시공기술수준과 경제성 등을 이유로 일부 역구내를 제외한 전구간을 자갈도상 궤도구조로 건설하였으나, 그동안 장기사용에 따른 도상기능 저하로 궤도유지관리에 많은 문제점이 발생하고 있어 이에 대한 대책으로 1993년부터 도상자갈 교체작업을 시행하고 있으며, 보다 더 근본적인 해결방안으로서 1998년부터 자갈도상을 콘크리트 도상화하는 개량사업이 본격 시행되고 있다.

이렇듯 자갈도상을 콘크리트도상으로 교체하려는 이유는, 야간에 충분한 보수작업시간을 확보하기가 점차 어려워져 자갈도상 궤도구조로는 안정된 궤도상태를 유지하기가 곤란하기 때문으로, 실제로 서울지하철의 경우 현재 야간에 작업 가능한 실가동 시간이 3시간 정도에 불과하다. 때문에, 서울지하철공사에서는 시공중 궤간확보가 용이하고 콘크리트물량을 최소화할 수 있어 작업시간을 단축시키는데 유리하며 시공후에도 궤간조정이 비교적 용이하다는 이유로 장침목을 이용한 콘크

* (주)석탐엔지니어링 궤도부 상무, 공학석사, 정회원

** 서울지하철공사 철도토목처장, 정회원

*** (주)석탐엔지니어링 궤도부 과장, 정회원

**** (주)석탐엔지니어링 궤도부 대리, 정회원

***** (주)석탐엔지니어링 궤도부 주임, 공학석사, 정회원

리트도상 궤도구조를 선정하여 도상개량사업을 시행하고 있으나, 작업능률이 요구에 못미치는 관계로 사업기간 장기화와 많은 예산이 소요되므로 이를 개선할 목적으로 Precast Concrete Panel을 사용한 슬라브궤도를 시험시공하게 되었다.

본 연구에서는 Precast Concrete Panel의 슬라브 궤도에 대해 도상개량 방안으로서 타당성을 판단하기 위해 시공성과 경제성 및 안전성 등에 대해 비교평가 하고자 한다.

2. 기존 장침목을 사용한 콘크리트도상 개량공법에 대한 고찰

지하철공사에서 현재 시행하고 있는 콘크리트도상의 단면형상은 그림2와 같이 콘크리트로 제작된 장침목을 사용하되 레일과는 고무로 된 탄성크립으로 결속하고 침목하부와 콘크리트도상사이에 방진패드를 삽입하여 방진층을 구성하는 구조로 되어있으며, 시공방법으로는 기존의 자갈도상궤도를 철거한 다음 레일과 콘크리트침목을 체결하여 궤광을 구성하고 방진패드와 콘크리트침목을 얹고 딱딱한 방진상자에 담겨지도록 결속한 다음, 터널바닥면에서 방진상자 상단까지 콘크리트로 채우는 이른바 Top Down 공법으로 시행하고 있다. 또한 공사중에는 그림3과 같은 방법으로 궤광을 가받침하여 열차를 운행시키게 된다.

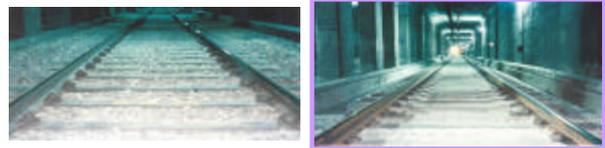


그림1. 도상개량전(좌)과 도상개량후(우)

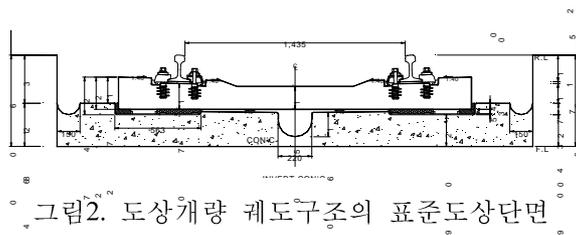


그림2. 도상개량 궤도구조의 표준도상단면

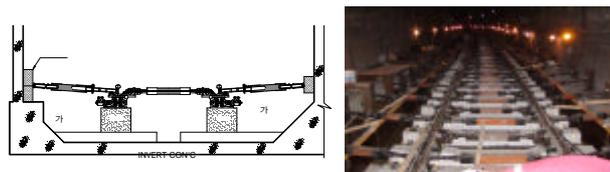


그림3. 궤도가받침 개요 및 가받침전경

3. Precast Concrete Panel을 사용한 콘크리트도상 궤도구조

3.1 외국의 Precast Concrete Panel을 사용한 콘크리트도상 궤도구조

Precast Panel을 사용한 콘크리트도상 궤도구조는 일본의 신간선에 부설되어있는 슬라브궤도에 유럽에서도 여러 가지 형태의 슬라브궤도를 오래전부터 시험부설하여 운영중에 있다. 이러한 Precast Panel을 사용한 콘크리트도상 궤도구조의 공통점은 레일과 레일을 지지하는 Precast Panel사이에는 넓고 부드러운 탄성패드층(방진층)을 구성하고 있다는 것이며, Precast Panel과 base concrete 노반층 사이를 콘크리트로 채워 일체화시키거나, 역청질의 시멘트 몰탈로 채우는 방법(Max Boegl) 또는 Precast Panel 하부에 매트를 부착시켜 base concrete와 분리시키는 방법(Porr) 등이 있다. 일본 슬라브궤도의 경우는 Max Boegl사의 슬라브궤도와 동일하다.



그림4. Dachau Karlsfeld의 슬라브궤도 (1977)



그림5. Porr



그림6. Max Boegl

3.2 금회에 시험시공한 Precast Concrete Panel 슬라브궤도구조 개요

외국의 Precast Panel을 사용한 콘크리트도상 궤도구조는 대부분 신설선 건설을 목적으로 계획된 것으로 영업선로에서는 시공성에 문제가 있다. 때문에 시공성을 고려하여 Panel의 크기와 형상

을 취급이 용이하고 안정감 있게 고안하였으며 그 궤도구조의 개요는 그림7과 같다.

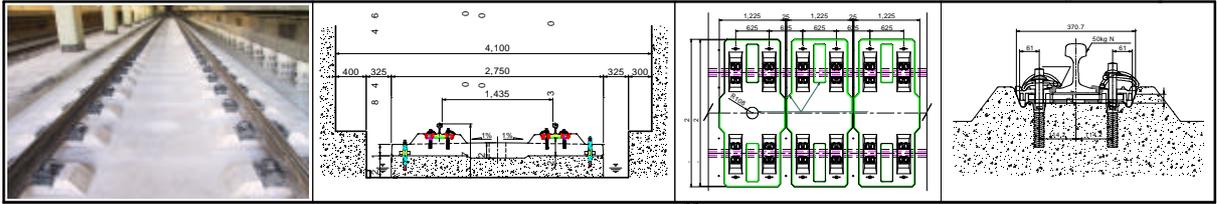


그림7. 시험시공한 Precast Concrete Panel 슬라브궤도

4. 시험시공한 슬라브궤도의 성능평가

4.1 가반침 궤도구조에 대한 안정성평가

가반침 궤도의 안정성을 확보하려면 받침용 버팀재가 궤도변위에 대해 저항력이 크고, 가능한 궤광중량이 무거워 차량주행시 동요가 작아야 한다. 가반침구조에서 버팀재 배치에 따른 하중부담 등을 식(1), (2), (3)에 따라 고찰한 바, Precast Panel 가반침 궤도구조가 레일지지점에 작용하는 하중부담이 작고, 레일체결장치에 의해 레일이 격자형으로 구속되므로 궤간유지가 용이하고 횡방향 휨저항이 크기 때문에 보다 더 안정적이며 궤도선형유지에 매우 효과적인 것으로 판단되었다.

• 하중 분배계수 : $D_F = \frac{d}{\sqrt{8}} \left\{ \frac{k_{dyn}}{d \cdot EI} \right\}^{1/4}$ (1) • 레일의 동적 침하량 : $y_{dyn} = Q \times \frac{D_F}{k_{dyn}}$ (2)

• 레일지지점에 작용하는 차량하중 : $F = k_{dyn} \times y_{dyn}$ (3)

여기서, - 최대 윤중 : $Q = 80kN$ - 레일 : $50kg$ N, $E = 210kN/mm^2$, $I = 19,680,000mm^4$
 - 동적스프링 배율 : 1.2 적용 - 작키 상면 고무판 스프링 계수 : $200kN/mm$

a. 장침목 가반침 궤도		b. Precast Panel 가반침 궤도구조	
<ul style="list-style-type: none"> • 레일 지지점(작키) 간격 : 1,250mm/1레일당 • $D_F = 1.150$, $y_{dyn} = 0.38mm$, $F = 91kN$ • 궤광중량 : $654kg/1.25m (= 523.3kg/m)$ • 지지점 부담력 : $654kg/2개소 = 327kg/개소$ 		<ul style="list-style-type: none"> • 레일 지지점(작키, 체결구) 간격 : 312.5mm/1레일당 • $D_F = 0.410$, $y_{dyn} = 0.14mm$, $F = 33kN$ • 궤광중량 : $1,325kg/1.25m (= 1,060kg/m)$ • 지지점 부담력 : $1,325kg/6개소 = 220kg/개소$ 	

그림8. 가반침 궤도구조별 하중부담

4.2 시공성 평가

Precast Panel 슬라브궤도의 시공순서는 그림9와 같으며, 시험시공결과 채움콘크리트 타설 시공 속도가 40m/4일(10m/1일)에 달하므로 시공속도가 향상되어 사업기간 단축이 기대되었다.



그림9. Precast Panel을 사용한 콘크리트도상화 시공순서

도표 1. 궤도 1km당 공사물량 및 공사기간 비교(서울지하철공사 자료제공)

구분	장침목 구조	Precast Panel 구조	증 감
궤도 1km당 콘크리트 소요량	617m ³	465m ³	△152m ³
궤도 1km당 소요일 수 (1일 1시간 10m ³ 타설시)	62일	47일	△15일

도표 2. Precast Panel을 사용한 콘크리트도상개량 시험시공실적 (시공기간 : '03.11.12~12.24)

항목	수량	시공일수	작업인원	비고
계	40m	15일	155명	
도상자갈철거 및 가받침	40m	6일	81명	
Precast Panel 설치	Panel 32판	5일	52명	
채움콘크리트 타설	40m	4일	22명	10m/일

4.3 경제성 평가

경제성 평가는 건설비와 유지보수비를 함께 고려하여야 하나, 편의상 건설비에 대해서만 평가하도록 하였으며, 비용 산출내역은 서울지하철공사에서 공식 보고된 자료에 기초하였다. 자료에 의하면 장침목구조에 비해 Precast Panel구조가 궤도연장 1km당 약 234백만원 절감이 기대되었다.

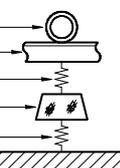
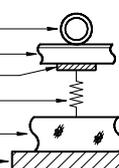
도표 3. 궤도 1km 시공시 경제성 비교

구조별	장침목 구조(A)	Precast Panel 구조 (B)	증 감 (B-A)	비고	
계	2,000,000,000원	1,765,110,000원	△234,890,000원	11.7% 절감	
시공비	인력자갈철거	236,280,000원	236,280,000원	0원	0.0%
	침목교환비	207,400,000원	219,200,000원	11,800,000원	5.6% ↑
	Con'c 타설비	354,775,000원	267,375,000원	△87,400,000원	24.6% ↓
	체결장치	370,260,000원	177,600,000원	△192,660,000원	49.0% ↓
	레일교환 등	531,285,000원	531,285,000원	0원	0.0%
	소 계	1,700,000,000원	1,431,740,000원	△268,260,000원	15.7% ↓
재료비	침 목	142,630,000원	176,000,000원	33,370,000원	23.3% ↑
	레 일 등	157,370,000원	157,370,000원	0원	0.0%
	소 계	300,000,000원	333,370,000원	33,370,000원	11.1% ↑

4.4 차량주행중 레일의 동적거동

차량주행중 레일지점에 작용하는 운중은 하중분배율에 따라 달라지며 레일의 침하량은 레일지점마다 분배된 하중과 레일을 지지하는 탄성재의 동적 스프링계수에 따라 달라지게 된다. 도상형태별 동적거동을 식(1), (2), (3)에 따라 계산하면 도표 4와 같다.

도표 4. 도상형태별 궤도구조 모델링 및 레일침하량과 하중부담

개량전 자갈도상 궤도구조		개량후 콘크리트도상 궤도구조	
 <p>unsprung mass $m = 816\text{kg}$ Rail KS 50N Rail pad stiffness = 400kN/mm sleeper block $M = 240\text{kg}$ Ballast stiffness = 200kN/mm Concrete invert</p>	<p>$D_F = 0.68$ (하중분배계수) $y_{dyn} = 0.23\text{mm}$ (레일침하량) $F = 55\text{kN}$ (하중부담력)</p>	 <p>unsprung mass $m = 326\text{kg}$ Rail KS 50N Steel base plate Elastic pad stiffness = 17.5kN/mm Precast Concrete Panel Concrete invert</p>	<p>$D_F = 0.373$ (하중분배계수) $y_{dyn} = 1.42\text{mm}$ (레일침하량) $F = 30\text{kN}$ (하중부담력)</p>

상기 이론계산에서 레일의 동적 침하량이 자갈도상은 0.23mm, 콘크리트도상은 1.42mm로서 자갈도상 궤도구조가 매우 경직되어 있어 도상자갈의 탄성이 거의 상실되어 있음을 알 수 있다. 반면 콘크리트도상의 경우 레일 지지점에 작용하는 차량하중 30kN에 대해 1.42mm가 침하되나 레일체결장치에 의해 이미 침하되고 있는 양은 $1.42\text{mm} \div 30\text{kN} \times 18\text{kN} = 0.85\text{mm}$ 이므로, 차량통과시 추가로



그림 10. 슬라브궤도에서 레일의 침하

침하되는 양은 $1.42 - 0.85 = 0.57\text{mm}$ 정도로 유연한 거동을 보인다. 그에 비해 자갈도상의 경우에는 레일침하량이 매우 작는데 이는 레일패드와 도상자갈보다도 딱딱하여 도상자갈층에서만 침하작용이 일어나기 때문이다. 이상의 이론적인 고찰에 대해 그림 10과 같이 차량 주행시 실제변위를 측정된 결과 정적일 때 0.6mm~0.8mm, 동적일 때 0.5mm~0.7mm로 이론값과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

4.5 소음·진동에 대한 평가

궤도에서의 소음·진동은 주로 레일과 차륜접촉에 기인하게 되며, 특히 진동에 대해서는 레일표면 거칠기에 크게 좌우된다. 때문에 콘크리트도상에서는 진동을 흡수·완화시키는 것이 중요하며 이 때문에 콘크리트도상 궤도구조를 계획할 경우에는 레일 저면에서 노반상면 사이 어딘가에 부드러운 재료의 탄성패드를 사용하여 방진층을 구성하는 것이 일반적이다. 이때 중요한 것은 탄성패드의 물리적 성질로서 최대한 부드러우면서도 변위가 적은 것이 방진성과 궤도안정성면에서 최상이라 할 것이다. 또한, 방진성능은 차량주행에 의한 가진주파수와 궤도의 고유진동수와의 관계에서 진동전달율로 나타내어지며, 궤도 고유진동수가 가진주파수에 비해 작을수록, 또 damping 계수가 작을수록 효과가 크다. 본 연구에서는 식(4), (5), (6), (7)에 따라 고유진동수와 가진주파수 및 진동전달율과 insertion loss를 구하고 이를 현장 실측값과 비교하였다. 다만, 소음·진동에 가장 민감하게 영향을 주는 가진주파수는 레일표면요철(파상마모)에 의한 것이나 이는 레일보수상태에 따라 차이가 크므로 본 연구에서는 침목통과 주파수를 기준으로 이론적인 고찰을 하였다.

• 궤도의 고유진동수 : $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{dyn}(N/m)}{m(kg)}}$ (4) • 차량의 1차 가진주파수 : $f_d = \frac{V(km/h)}{3.6 \times \ell(m)}$ (5)

도표 5. 궤도구조별의 고유진동수와 unsprung mass 계산

자갈도상궤도 : $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \times 10^8}{816}} = 78.8\text{Hz}$	콘크리트도상궤도 : $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{17.5 \times 2 \times 10^6}{326}} = 52.1\text{Hz}$
<ul style="list-style-type: none"> • 자갈중량 : $(1700\text{kg/m}^3 \times 0.30 \times 0.625 \times 2.4) / 2 \approx 383\text{kg}$ • 침목(1/2), 레일, 체결구중량 : $120\text{kg} + 50 \times 0.625 + 2.5 \approx 153\text{kg}$ • 차량의 유효질량 : $8,000\text{kg} \times 0.35 \times 10\% \approx 280\text{kg}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • 베이스플레이트 중량 $\approx 10\text{kg}$ • 레일, 체결구중량 : $50 \times 0.625 + 5 \approx 36\text{kg}$ • 차량의 유효질량 : $8,000\text{kg} \times 0.35 \times 10\% \approx 280\text{kg}$
\therefore unsprung mass m $\approx 816\text{kg}$	\therefore unsprung mass m $\approx 326\text{kg}$

• 진동전달율 $T_r = \left| \frac{\sqrt{1 + (2 \times f_d / f_n \times \zeta)^2}}{\sqrt{\{1 - (f_d / f_n)^2\}^2 + (2 \times f_d / f_n \times \zeta)^2}} \right|$ (여기서, ζ 는 damping 계수) (6)

• insertion loss : $\Delta \ell = -20 \log T_r$ (7)

도표 6. 차량의 1차 가진주파수

항 목	V=40km/h 일 경우	V=80km/h 일 경우	가진대상물 배치간격(ℓ)
침목통과 주파수	17.8 Hz	35.6 Hz	침목간격 : 0.625m
차륜통과 주파수	5.3 Hz	10.6 Hz	축거 : 2.1m
파상마모통과 주파수	37 Hz ~ 370.4 Hz	74.1 Hz ~ 740.7 Hz	pitch : 0.03m ~ 0.3m

도표 7. 침목통과주파수에 대한 f_d/f_n

열차속도별 도상종별	V=40km/h 일 경우		V=80km/h 일 경우	
	자갈도상	콘크리트도상	자갈도상	콘크리트도상
f_n	78.8 Hz	52.1 Hz	78.8 Hz	52.1 Hz
f_d	17.8 Hz	17.8 Hz	35.6 Hz	35.6 Hz
1차 f_d/f_n	0.23	0.34	0.45	0.68
2차 f_d/f_n	0.46	0.68	0.90	1.36
3차 f_d/f_n	0.69	1.02	1.35	2.04
4차 f_d/f_n	0.92	1.36	1.80	2.72

도표 8. 진동전달율과 insertion loss

열차속도별 도상종별	V=40km/h 일 경우(승강장구간)				V=80km/h 일 경우(일반구간)			
	자갈도상		콘크리트도상		자갈도상		콘크리트도상	
구 분	T_r	insertion loss	T_r	insertion loss	T_r	insertion loss	T_r	insertion loss
1차 가진주파수	1.056	-0.47dB	1.131	-1.06dB	1.254	-1.96dB	1.860	-5.39dB
2차 가진주파수	1.268	-2.06dB	1.860	-5.39dB	5.263	-14.4dB	1.177	-1.41dB
3차 가진주파수	1.909	-5.61dB	24.75	-27.8dB	1.215	-1.69dB	0.316	10.00dB
4차 가진주파수	6.510	-16.2dB	1.177	-1.41dB	0.446	7.013dB	0.156	16.13dB

이상의 계산 결과는 damping 계수를 0으로 하여 계산한 결과이며, damping 계수가 크면 진동 전달율이 커져 방진효과가 감소된다. damping 계수와 진동전달율의 관계는 그림11과 같다.

V=40km/h 일 경우 콘크리트도상은 3차 침목통과 주파수를 정점으로 4차 침목통과 주파수 이후 방진효과가 기대되나, 자갈도상의 경우에는 4차 침목통과 주파수에서 진동전달율이 최대가 되고 있으며 이 때(71.2Hz)의 진동 방출량 차이는 16.2-1.41=14.79dB이다. 측정자료에 의하면 시공전 · 후

진동 감소량이 전반적인 주파수대역에서 평균 14.6dB이며 4차 침목통과 주파수인 71.2Hz 부근에서도 이와 유사한 경향을 보이고 있어 이론계산과 잘 일치하고 있다. 속도가 상승될 경우에는 진동방출량 차이는 다소 줄어든다. 소음에 대해서는 통상 자갈도상보다는 콘크리트도상일 경우가 소음이 증가하는 것이 일반적이며, 시공전후의 측정결과에 의하면 저주파수 대역에서는 크게 감소하였으나 고주파수 대역에서는 약간 증가하는 경향을 보여 속도가 높은 일반구간에서는 방음대책이 필요함을 보여주고 있다.

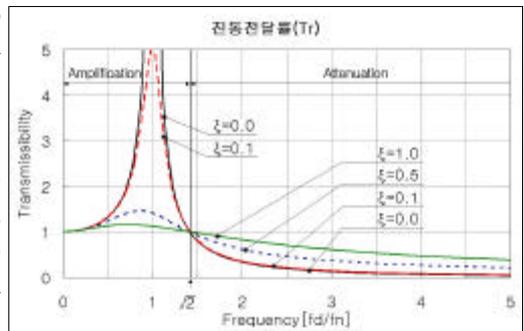


그림11. damping 계수와 진동전달율

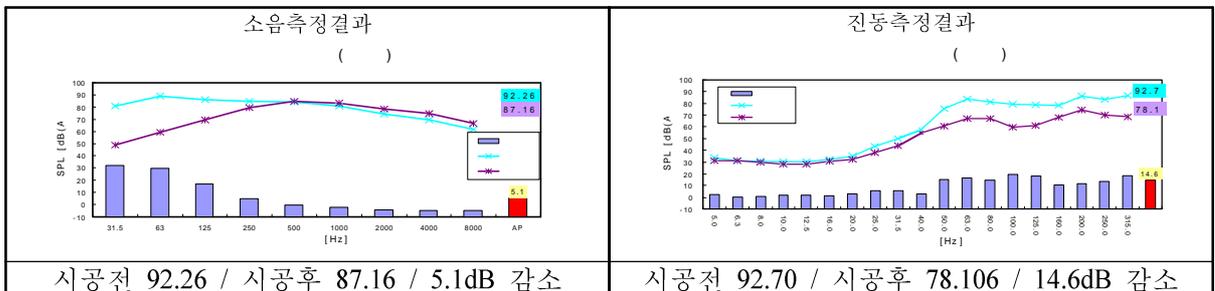


그림12. 소음 · 진동 측정결과 (시공전 '03. 11. 22, 시공후 '04. 01. 08 측정)

4.6 궤도변상 점검결과

서울지하철공사에서는 본 시험시공궤도에 대한 궤도의 변상유무를 도표 9에 따라 매월 정기적으로 점검한 결과 현재까지 특별한 변상은 없는 것으로 보고되고 있다.

도표 9. 시험시공궤도 점검항목

궤도상태	도상콘크리트	Precast Panel	레일체결장치	레일손상여부
궤간, 고저, 수평, 방향틀림	콘크리트 침하, 콘크리트 균열	균열, 깨짐, 쪽떨어짐 등, 체결구 밀착상태	크립절손, 크립이완, 기타 부속품 훼손 등	파상마모, 박리, 균열, 웰링

5. 결론

본 연구에서는 사업기간 단축과 예산절감을 위해 시험 시공한 Precast Concrete Panel 슬라브궤도에 대해 여러 가지 측면에서 이론과 실측을 통해 비교 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 가받침 궤도구조에 대한 안정성면에 대해서는 기존의 장침목 가받침 궤도구조에 비해 궤도 변위 억제 효과가 크게 개선된 것으로 평가되었다.
- (2) 시공성과 경제성면에 대해서는 신공법 적용과 콘크리트 타설물량 감소로 대폭 개선되었으나 시험 시공구간의 현장여건이 비교적 양호한 반지하구간이므로 작업여건이 어려운 단선터널 등에 대해서도 공법 검토가 필요한 것으로 판단된다.
- (3) 레일의 동적거동과 소음·진동에 대해서는 방음·방진효과가 기대에 부응하므로 콘크리트도상 개량공법으로서 매우 효과적인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Amnon Piter De Man (2002), "Dynatrack" A survey of dynamic railway track properties and their quality
2. Coenraad Esveld (2001), "Modern Railway Track Second Edition"