

프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도 기술현황

Precast concrete slab track - state of the art

장승엽*
Jang, Seung Yup

양신추**
Yang, Sin-Chu

김정일***
Kim, Jeong Il

김태욱****
Kim, Tae Wook

ABSTRACT

Precast concrete slab track has been already turned out to be more efficient than cast-in place concrete slab track in view of the easiness of construction and the quality control of concrete. Thus, there is a great need to bring in the precast slab track system. In order to develop the realistic precast slab track system that is well conformed to our circumstances, the performance criteria of slab track, and the state-of-the art of precast slab track systems that are used in other countries are briefly discussed here.

1. 서론

콘크리트 슬래브궤도는 기존 자갈도상 궤도에 비해 구조적으로 더 안정적이며 유지보수를 혁신적으로 절감함으로써 궤도구조의 총 생애주기 (total life cycle cost)의 측면에서도 충분한 경쟁력을 가지고 있는 것으로 평가되고 있다. 그러나, 슬래브궤도의 여러 장점에도 불구하고 현장타설 콘크리트 슬래브궤도는 콘크리트 양생기간에 따른 시공속도의 지연, 콘크리트 품질저하 등의 문제를 수반하게 된다.

공장제작 후 현장에서 조립시공되는 프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도(precast or prefabricated concrete slab track)는 이런 문제점을 해결하기 위해 개발되었다. 일반적으로 프리캐스트 슬래브궤도가 가지는 장점은

- 높은 품질의 콘크리트를 얻을 수 있다는 점 외에도
- 기계화 시공의 수준을 높일 수 있다는 점,
- 슬래브에 직접 레일을 조정하고 체결할 수 있다는 점
- 건설노동력의 절감,
- 시공오차의 저감,
- 보수의 용이성

등을 꼽을 수 있다[1]. 이러한 우수성 때문에 일본의 신칸센 철도에서는 신설선의 대부분을 프리캐스트 슬래브궤도로 부설하고 있으며, 독일, 이탈리아, 오스트리아 등에서도 프리캐스트 슬래브궤도가 이미 실용화의 단계에 접어들었다고 볼 수 있다. 이에 국내에서도 슬래브궤도 기술의 발전을 통해 외국과의 기술격차를 줄이고 기존 현장타설 슬래브궤도의 문제점을 보완하여 슬래브궤도의 실용화를 앞당기기 위해 프리캐스트 슬래브궤도 개발이 요구되고 있다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원
** 한국철도기술연구원 책임연구원
*** 한국철도기술연구원 위촉연구원
**** 한국철도기술연구원 주임연구원

따라서, 본 연구에서는 국내 적용에 적합한 프리캐스트 슬래브케도의 개발을 위해 일반적인 슬래브케도의 종류와 요구조건을 분석하고, 국외에서 개발된 프리캐스트 슬래브케도의 특징을 간략히 분석하여 제시한다.

2. 콘크리트 슬래브케도의 성능요건

2.1 슬래브케도의 일반 성능요건

슬래브케도의 성능을 결정하는 가장 기본적인 요소는 다음과 같이 요약될 수 있다 (그림 1).

- 시공성
- 경제성
- 구조적 안정성
- 유지보수의 용이성
- 승차감 및 주행안전성
- 진동·소음 저감

이 가운데 승차감과 주행안전성은 케도구조의 제 요소, 즉, 레일, 체결장치, 도상, 침목, 지지층 등이 모두 관여되는 사항이며 진동·소음의 문제도 슬래브 케도의 탄성 뿐 아니라 방진패드, 플로우팅 슬래브(floating slab) 등의 진동절연시스템이나 흡음장치와 같은 소음방지설비, 차량과 레일의 인터페이스, 차량 자체의 진동 및 소음 등이 여러 요소가 함께 고려되어야 하는 문제이므로, 슬래브케도 자체의 설계를 위해 고려해야 할 요소는 시공성, 경제성, 구조적 안정성, 유지보수의 용이성을 꼽을 수 있다.

시공성은 케도구조를 선정하는 데 있어서 매우 중요한 요소로서, 프리캐스트 슬래브케도는 기계적 시공을 통해 시공성을 극대화할 수 있는 장점을 가지고 있다. 신칸센 슬래브케도의 경우 하루 200m 이상의 시공속도를 확보하고 있고, 독일의 프리캐스트 슬래브케도 시스템인 FFBögl은 하루 650m 이상의 부설이 가능하다고 알려져 있다.

경제성의 측면에서 보면 슬래브케도는 일반 자갈도상케도에 비해 건설비가 높지만, 유지보수를 대폭 줄일 수 있기 때문에 생애주기비용(life cycle cost)의 측면에서 보면 자갈도상케도에 비해 더 경제적이 된다[1]. 생애주기비용 면에서의 경제성 확보를 위해 신칸센 슬래브케도의 경우 건설비가 총 자갈도상케도 건설비의 2배 이하가 되도록 목표 건설비용을 설정한 바 있다[2]. 슬래브케도의 경우 케도 설치의 정밀성이 건설비를 결정하는 가장 중요한 요소가 되므로 프리캐스트 슬래브케도 제작의 정확성을 높이면서 동시에 시공속도를 향상시키는 것이 경제성 확보의 주요 관건이 될 것이다.

구조적 안정성은 정적 힘, 종방향 또는 횡방향 활동(sliding), 피로하중 등 외력에 대한 저항성 뿐 아니라 온도변화나 건조수축에 의한 콘크리트 균열 발생을 효과적으로 억제할 수 있는가도 중요한 요소가 된다.

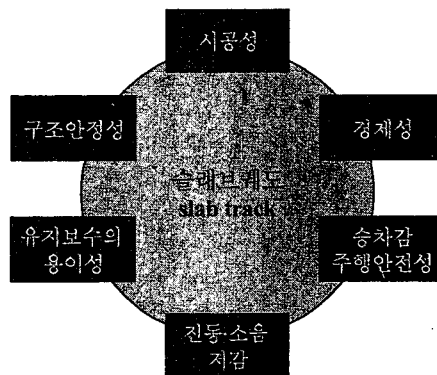


그림 1. 슬래브케도의 기본요건

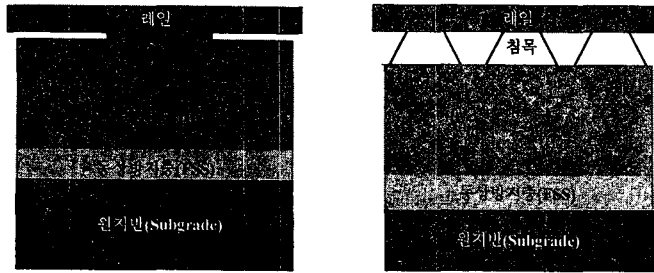


그림 2. 일반적인 토노반상 슬래브케도의 지지층구조

슬래브케도는 유지보수가 거의 필요 없지만, 지반의 침하, 탈선사고로 인한 손상 등에 의해 케도의 교체 또는 보수가 필요할 때 제반 보수작업이 용이해야 하며, 슬래브케도에 적용되는 레일체결장치는 케도의 틀림조정을 위해 충분한 조절능력을 확보해야 한다.

2.2 부설위치에 따른 슬래브케도 성능요건

이상 서술한 일반 성능요건 외에도 슬래브케도를 설계하는 경우에는 토노반, 교량, 터널, 천이구간 등 케도의 부설위치에 따른 성능요건을 아울러 고려해야 한다[1].

□ 토노반 상의 슬래브케도 성능요건

슬래브케도는 슬래브케도는 건설 후 케도틀림을 조정할 수 있는 능력이 상대적으로 제한되기 때문에 침하를 최소화하도록 해야 하고, 하부구조에 대한 폭넓은 대책을 필요로 한다. 토공을 준비하기 전에 지반조건과 변형거동에 관한 광범위한 조사가 반드시 수반되어야 하며 지질조사는 적어도 50m마다 최소 6m이상의 지반탐사가 필요하다.

토노반 상에서 일반적인 슬래브케도의 하부구조는 다짐 또는 안정화를 통해 개량된 지반(subgrade)과 그 위에 동상방지층(frost protection layer)으로 구성되며 그 위에 다시 콘크리트 또는 아스팔트 콘크리트 기층이 적용된다. 그림 2는 토노반상 슬래브케도의 지지층구조를 나타내고 있다.

□ 교량 상의 슬래브케도 기술요건

교량 위에 연속적으로 놓여지는 케도구조는 교량과의 상호작용으로 발생하는 역학적 거동을 고려해야 한다. 이러한 역학적 거동으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 온도변화 및 건조수축에 의한 교량의 종방향 이동
- 교량의 종방향 및 횡방향 처짐
- 지점에서의 비틀림 (twisting)

따라서, 슬래브케도는 이상의 교량거동에 대하여 대응할 수 있도록 충분한 대책을 강구해야 한다.

□ 터널에서의 슬래브케도 기술요건

슬래브케도는 터널에 매우 적합한 구조이지만, 지하수의 용출이나 지반의 침하 또는 기타 변화가 있는 불안정한 시공기면을 갖는 경우에는 슬래브케도가 부적절할 수 있다. 따라서, 슬래브케도를 터널에 적용할 경우에는 터널에서의 특정 지질요구조건을 만족해야 한다. 또한, 충분한 배수를 확보하고 사고 시를 대비하여 구출차량이 슬래브에 접근할 수 있도록 해야 한다. 또, 터널에서는 횡단면이 제한되는 경우가 많기 때문에 콘크리트 기층의 두께나 트로프(trough) 설치 등 케도형식을 결정함에 있어서 터널 횡단면의 면적을 고려해야 한다.

□ 천이구간에서의 슬래브케도 기술요건

천이구간은 상부구조의 천이구간과 하부구조의 천이구간으로 나눌 수 있다. 상부구조 천이구간으

로는 슬래브 케도와 자갈도상케도의 천이접속과 다른 형식의 슬래브케도 간의 천이접속이 있다. 하부 구조의 천이접속으로는 토노반-교량, 토노반-쿨버트, 토노반-터널 등이 있다. 이러한 천이접속구간에서는 강성이나 유연도, 침하거동의 차이를 점진적으로 연결할 수 있도록 적절한 방안이 강구되어야 한다.

3. 국외 프리캐스트 콘크리트 슬래브케도 기술현황

지금까지 국외에서 개발된 프리캐스트 슬래브케도는 일본의 신칸센 슬래브케도, 독일의 FFBögl 케도, 오스트리아 ÖBB-Porr 슬래브케도, 그리고 이탈리아의 IPA 슬래브케도 등을 꼽을 수 있다. 다음에서 각 케도구조의 개발현황을 살펴보고 각 케도의 특징을 간략히 비교, 분석한다.

3.1 신칸센 슬래브케도 [1,2]

일본의 신칸센 철도에 적용되는 슬래브케도는 보수의 생력화(省力化)를 목표로 개발되어 1975년부터 적용되기 시작하였다[2]. 신칸센 슬래브케도는 시멘트 안정화기층(콘크리트기층), 횡방향 및 종방향 이동방지를 위한 원형의 돌기콘크리트, 프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 슬래브, 그리고 슬래브 하부에 시멘트 아스팔트 모르타(cement asphalt mortar, CAM)라 불리는 채움재층(grout layer)으로 구성된다(그림 3).

1997년 개통된 Hokuriku 신칸센에서는 전체 부설연장의 85%에 해당하는 약 210km 구간을 슬래브케도로 부설하는 등 일본 신칸센에서는 신선 건설에서 슬래브케도가 주류를 이루는 단계에 접어들었다고 볼 수 있다.

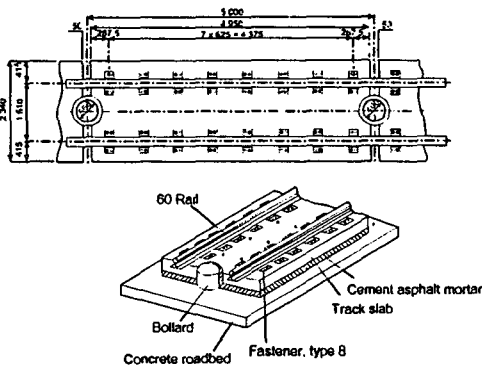


그림 3. 신칸센 슬래브케도

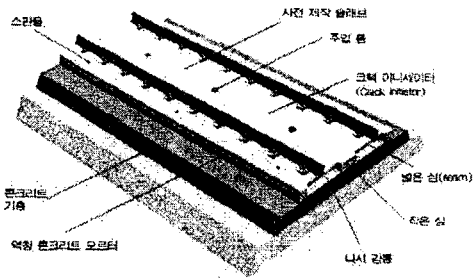


그림 4. FFBögl 슬래브케도

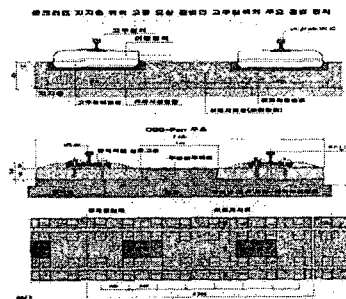
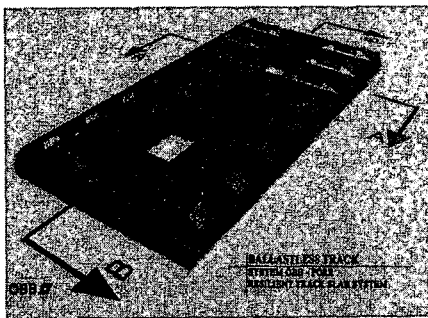


그림 5. ÖBB-Porr 케도

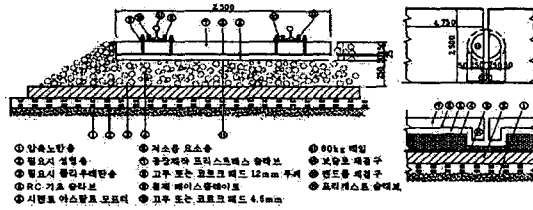


그림 6. IPA 궤도

3.2 FFBögl[1,3]

독일의 Max Bögl사에 의해 개발된 슬래브궤도 시스템인 FFBögl 슬래브궤도는 대체로 일본의 신칸센 슬래브궤도와 유사하지만, 내장 스펀들에 의한 슬래브의 위치조정방식, 중방향 슬래브 연속화 등의 특징을 가진 슬래브궤도이다 (그림 4). 1977년 처음으로 시험선에 부설되어 현재까지 약 20년이상 시험 운행동안 유지보수가 거의 없었을 만큼 높은 안정성을 보여주었고, 높은 승차감과 주행안전성이 입증되었다[3]. 추가적인 성능보완을 거쳐서 현재 독일의 고속철도에 채택, 부설 중에 있어 상용화를 바로 눈앞에 두고 있다.

3.3 ÖBB-Porr 궤도[4]

오스트리아의 연방철도(ÖBB)와 Porr사에 의해 공동 개발된 ÖBB-Porr 궤도는 프리스트레싱없이 철근콘크리트로만 이루어진 슬래브패널로 구성되며, 슬래브 패널의 개구부로 현장타설 콘크리트를 채워 넣어 만든 돌기콘크리트로 횡방향 및 종방향 이동을 제어하는 구조를 가지고 있다 (그림 5). ÖBB-Porr 슬래브 궤도로 부설된 오스트리아 북부의 뢰머베르크 터널에서의 운행 결과, 진동감소가 요구치를 충분히 만족하고 있는 것으로 나타났다. 이외에도 ÖBB-Porr 슬래브 궤도는 째머터널, 카포니히 터널, 갈젠베르그 터널 등에서 부설실적으로 가지고 있다.

3.4 IPA 궤도[5]

이탈리아에서 개발된 IPA 슬래브궤도는 일본의 신칸센 슬래브를 계승한 궤도구조로 신칸센 슬래브궤도의 원형돌기, 프리스트레스트 콘크리트 슬래브패널과 콘크리트 기층과의 경계층에 채우는 CAM(cement asphalt mortar) 등 신칸센 슬래브궤도의 특색을 모두 가지고 있다. 차이점으로는 소음 및 진동제어를 목적으로 할 때는 콘크리트 기층 위에 탄성층(폴리우레탄)을 설치하도록 하고 있으며, 돌기부가 슬래브 패널의 일부분으로 콘크리트 기층의 홈 속으로 움푹 들어간 모양으로 설치된다는 점이다 (그림 6).

3.5 각국 프리캐스트 슬래브궤도 비교

이상의 각국 프리캐스트 슬래브궤도 가운데 그 특징별로 보면 대략 신칸센 슬래브궤도, FFBögl, ÖBB-Porr 궤도 3가지로 분류할 수 있다. 경제성을 제외한 구조적 안정성, 유지보수의 용이성, 시공성의 측면에서 각 궤도구조의 특성을 분석하였다(표 1).

□ 구조적 특징 (구조적 안정성 측면)

우선 구조적 특징을 비교해보면, 신칸센 슬래브궤도의 경우에는 다양한 종류가 개발되었으나, 대표적인 A형 슬래브의 경우 대략 4.9m×2.22m×0.19m의 크기를 가지며 중량은 약 5tonf 정도이다 (그림 3 참조). 온난지용으로는 철근콘크리트 슬래브패널을 사용하고 한냉지나 방진슬래브용(방진매트 사용)으

표 1. 각국 프리캐스트 슬래브케도의 특징 비교

항 목	신칸센 슬래브케도	FFBögl	ÖBB-Porr 케도
개발연혁	- 1975년 일본 개발	- 1977년 독일 Max-Bögl사 개발	- 1988년 오스트리아 ÖBB와 Porr사 공동개발
구조적 특징	- 4.9m×2.22m×0.19m - RC 또는 PC슬래브 - 시멘트 아스팔트 모르타 (CAM) 사용 - 돌기콘크리트 (수평방향 이동 구속)	- 6.45m×2.55(2.8)m×0.2m - PC슬래브(횡방향) - 종방향 철근의 연결 (연속화) - 역청시멘트 모르타 사용	- 슬래브패널 내부의 현장타설식 돌기콘크리트 - 슬래브 패널과 돌기부를 분리시키는 폴리우레탄+고무분말 재질의 탄성분리층
체결장치 (조절능력)	- Type-8 (수평 ±30mm, 수직 ~+50mm)	- Vossloh system 300 (수평 ±10mm, 수직 -4~+26mm)	- Vossloh system 300 (수평 ±10mm, 수직 -4~+26mm)
시공상 특징 (시공속도)	- 이동식 플랜트에 의한 주행레이블 (200m/일 이상)	- 크레인을 이용하여 슬래브패널 설치한 후 top-down 방식으로 레일설치 (650m/일)	- 고정식 크레인이나 크레인이 설치된 화물트럭을 이용하여 슬래브패널 설치
부설실적 (시험선 포함)	- Sanyo(1975), Tohoku(1982), Hokuriku(1997)	- Karslfeld(1977), Rot-Malsch(1999), Hattstedt(1999)	- Zammertunnel(1999), Kaponigtunnel(1998), Galgenbergtunnel(1996)

로는 포스트테션 방식의 종방향(레일방향) 및 횡방향(레일직각방향)으로 프리스트레스를 도입한다. 종방향 프리스트레스는 휨에 대한 저항 뿐 아니라 온도균열을 제어에도 효과적이다. 신칸센 슬래브케도의 가장 중요한 특징으로는 슬래브 바닥 충전재로 사용되는 시멘트 아스팔트 모르타(cement asphalt mortar, CAM)를 꼽을 수 있다. 시멘트계 재료의 강성과 아스팔트 재료의 탄성이 적절히 조화를 이루도록 고안된 CAM은 소요의 강도와 동해저항성을 가지면서도 탄성 및 충격저항성 또한 우수한 것으로 알려져 있다. 또 한가지 신칸센 슬래브케도의 특징은 수평방향 활동력에 대한 저항을 위해 원형의 돌기콘크리트를 설치하고 있는 점이다. 원형 돌기콘크리트는 철근으로 보강하며 돌기 주위에는 바닥보다 큰 강도를 갖는 CAM을 전충한다.

FFBögl 슬래브케도는 크기가 6.45m×2.55(2.8)m×0.2m로 신칸센 슬래브케도에 비해 다소 크다. 신칸센 슬래브케도와 달리 횡방향으로만 프리스트레스를 도입하고 종방향으로는 철근만으로 보강하고 있다. 대신 두 개의 연속하는 슬래브 패널의 종방향 철근을 연결함으로써 종방향 활동력(sliding force)에 대한 지지력을 높일 수 있는 구조로 설계되었고, 온도균열 억제를 위해 균열유발줄눈을 두거나, 강섬유보강 콘크리트를 적용하기도 한다 [1]. 또, FFBögl은 내장형의 스펀들을 가지고 있어 시공 중 뿐만 아니라 유지관리 시에도 슬래브의 높이조절이 가능하도록 고안되었다. FFBögl 시스템에 적용되는 바닥 충전재는 일반적인 충전재로 많이 사용되는 역청시멘트 모르타(bitumen-cement mortar)이다.

ÖBB-Porr 케도는 5.16m×2.4m×0.16m로 신칸센 슬래브케도와 거의 같은 크기를 가지며, 기본적으로는 신칸센 슬래브케도와 유사한 돌기형 콘크리트로 수평방향 이동에 대해 구속하는 구조를 가지고 있다. 그러나, ÖBB-Porr 케도의 차이점은 현장타설 콘크리트로 만들어지는 돌기콘크리트와 프리캐스트 슬래브패널 사이에 존재하는 탄성분리층(resilient separation layer)이다. 전술한 바와 같이 슬래브 패널의 개구부(opening)을 통해 현장타설 방식으로 콘크리트를 채워 넣어서 돌기부를 형성하는데, 이때 현장타설 콘크리트와 슬래브패널 사이의 접촉면에 두께 약 3mm의 탄성분리층을 입힌다. 이 탄성

분리층은 액상 폴리우레탄에 고무분말(Polyurethane-cemented rubber granules)을 섞어 마치 접착제 처럼 콘크리트 표면에 발라서 용고시킨다. 용고된 탄성분리층은 약 0.5N/mm^3 의 기초율을 가진다[4]. 이렇게 되면 슬래브패널은 하나의 질량-탄성시스템 (Mass-Spring system)으로 거동하게 되어 진동 제어 및 충격흡수의 보조적 역할을 담당하게 된다. 이런 특징 때문에 ÖBB-Porr 궤도는 주로 터널에서 방진플로우팅 슬래브궤도에 적용된다.

□ 체결장치 (유지보수 용이성 측면)

슬래브궤도의 일상적인 유지보수를 제외하고는 거의 궤도틀림이 발생하지 않는 것으로 알려져 있으나, 노반의 침하 등으로 인한 과도한 변형이 발생하는 경우에는 슬래브패널에서의 궤도틀림의 조정이 어렵기 때문에 체결장치가 틀림조정을 모두 부담해야 한다. 이 때문에 체결장치는 베이스플레이트 패드 등에 의해 슬래브궤도에 탄성을 부여함과 동시에 유지보수 측면에서도 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 각 궤도구조에서 주로 적용되는 체결장치를 표 1에 나타냈다.

□ 시공방법

프리캐스트 슬래브궤도는 일반 슬래브궤도에 비해 시공성을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 각 궤도구조는 모두 빠른 시공속도를 장점으로 내세우고 있다. 신칸센 슬래브궤도의 경우, 시공속도 향상을 위해 중선 가궤도법, 주행레일법, 편선 가 궤도법, 측도법 등 다양한 방식의 시공방법을 개발하였는데, 이 가운데 이동식 플랜트에 의한 주행레일법은 가장 시공속도가 빠르고 터널이나 교량, 고가교 어디에나 적용할 수 있는 장점이 있다.

FFBögl 슬래브궤도는 운반된 슬래브 패널을 크레인을 이용하여 설치한 후 먼저 레일 선형을 맞추어 부설하고(top-down 방식), 슬래브 패널의 고저를 미리 내장된 스펀들을 이용하여 세부 조정한 후 아래에 채움재를 채워 패널을 고정시킨 후 연속된 슬래브의 종방향 철근을 연결시키고 연결부를 그라우트로 채운다. FFBögl의 경우, 역청시멘트 그라우트의 경화속도가 빠르기 때문에 시공속도는 650m/일 에 이를 정도로 고속시공이 가능한 것으로 알려져 있다[3].

ÖBB-Porr 슬래브궤도는 종방향 연속화를 제외하고는 기본적으로 FFBögl 궤도와 거의 동일한 시공순서와 방법을 따른다. 슬래브의 설치에 고정식 크레인이나 크레인이 설치된 화물트럭을 이용한다.

4. 결론

이상 국내 적용에 적합한 프리캐스트 슬래브궤도의 개발을 위해 슬래브궤도의 성능요건을 고찰하였고, 아울러 국외에서 개발되어 적용되고 있는 프리캐스트 슬래브궤도의 특징을 간략히 살펴보았다. 가장 경제적이고 효율적인 프리캐스트 슬래브궤도의 개발을 위해 무엇보다 시공성, 구조적 안정성, 유지보수의 용이성 면에서 충분한 성능요건을 만족하도록 슬래브패널설계, 체결장치, 시공시스템 등 제반 설계요소를 고려해야 한다.

참고문헌

1. Esveld, C., "Modern Railway Track," 2nd ed., MRT-productions, Zaltbommel, 2001.
2. 이종득, "철도궤도역학", 노혜출판사, 2001.
3. Max-Bögl, "Slab track system," in CD-ROM Title produced by Max-Bögl, 2002.
4. 강원레일테크, "터널의 조립식 슬래브궤도 시공계획(ÖBB-Porr 구조)", (주)강원레일테크, 2002.
5. 양신추 외, "도시철도 선로시스템 표준화", 도시철도 표준화 연구개발사업 2002년도 최종보고서, 한국철도기술연구원, 건설교통부, 2002.

후기

본 연구는 건설교통부 도시철도 표준화 연구개발사업의 "도시철도 선로시스템 표준화" 과제에서 수행되었습니다.