

# 수치해석을 통한 콘크리트궤도 하부 강화노반의 적정성 검토

## Appropriateness Evaluation of Reinforced Subgrade beneath Concrete Track through Numerical Analysis

이수형\*  
Lee, Su-Hyung

### ABSTRACT

An active application of concrete track is being expected for the future constructions of Korean railroad. For the successful concrete track construction in earthwork areas, proper reinforced subgrades, which effectively distribute train loads to subground, should be installed. In this paper, behaviors of concrete track on the reinforced subgrade with the standard stiffness and depth were investigated through numerical analyses. The appropriateness of the reinforced subgrade was evaluated by analyzing the distributions of the settlements and vertical stress beneath the concrete slab.

### 1. 서론

경부고속철도 2단계, 호남고속철도 등의 향후 철도 건설에는 콘크리트궤도의 본격적인 적용이 예상된다. 토공구간에서 콘크리트궤도의 성공적인 시공을 위해서는 열차하중을 하부 지반에 적절하게 분산시켜 전달할 수 있도록 강화노반을 설치해야 한다. 그러나 현 고속철도 설계기준에 적용된 콘크리트 궤도 하부 강화노반의 강성 및 두께는 국내의 지반특성이나 공학적인 평가 없이, 외국의 기준을 토대로 다소 임의적이고 보수적으로 결정되어 있다. 본 논문에서는 수치해석을 통해 강화노반 위에 설치된 콘크리트 궤도의 거동을 분석하였다. 궤도의 침하 및 하부에 전달되는 수직응력 분포에 대한 분석을 통해, 적용 예정인 강화노반의 강성 및 두께의 적정성을 검토하였다.

### 2. 콘크리트궤도 하부의 강화 노반 설치 현황

콘크리트궤도에는 다양한 형식이 있지만, 국내의 경우 토공구간에 대하여 그림 1과 같은 형식이 설치될 예정에 있으며, 강화노반 위에 도상강화층(HSB, Hydraulically Stabilized Basecourse)이 최소두께 300mm, 최소폭 3800mm로 설치되고, 그 위에 궤도콘크리트층(TCL, Track Concrete Layer)이 최소두께 40mm, 최소폭 3200mm로 설치된다.

콘크리트 궤도의 하부에는 일정 강성과 두께를 갖는 강화노반이 설치된다. 강화노반은 노반의 상부에 강성이 큰 재료로 이루어진 층을 부설함으로써 상부노반의 변형을 최소화하기 위해 사된다. 또한, 강화노반은 보조도상층과 입도조정층으로 나뉘며, 입도조정층은 상부노반이 입자가 큰 보조도상층으로 관입되는 것을 감소시키고 도상 표면의 침투수가 상부노반으로 유입하는 것을 차단하는 기능을 하게 된다.

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

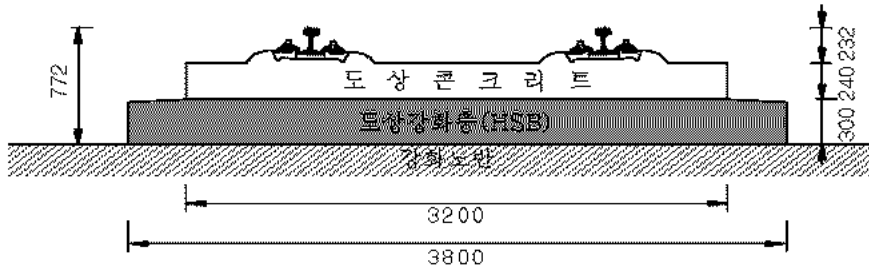


그림 1. 토공구간 콘크리트제도 형식

강화노반의 재료로는 일본의 경우 쇠석, 아스팔트 콘크리트와 교로슬래그가 사용되고 있으나, 국내에서는 현재 입도 조정된 쇠석만을 사용하고 있다. 일반적으로 강화노반의 강성은 지반반력계수( $K_{30}$ ) 또는 재재하시의 탄성계수  $E_{v2}$ 를 이용하여 규정된다. 향후 국내 고속철도 콘크리트제도의 토공구간에는  $E_{v2}$ 를 이용한 규정이 적용되며, 표 1에 나타난 바와 같이 재재하시의 탄성계수( $E_{v2}$ )와 초기재하시 탄성계수( $E_{v1}$ )에 대한 재재하시 탄성계수 비( $E_{v2}/E_{v1}$ )를 이용하여 총 50cm~65cm의 총 두께로 설계하도록 되어 있다. 강화노반의 하부에는 일정 강성(다짐도)과 두께 이상의 상부 노반 및 하부노반을 조성하도록 규정하고 있다.

표 1. 국내 고속철도 콘크리트제도 노반의 다짐도 및 두께

강화 노반	보조도상층	$E_{v2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.2$ 두께 : 200mm
	입도 조정층	$E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$ 두께 : 300mm(똥기), 450mm(깎기)
	상부노반	$E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$ 최대건조밀도의 95%이상
	하부노반	$E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ , $E_{v2}/E_{v1} < 2.7$ 최대건조밀도의 90%이상
	깎기 및 본바닥 조건	시공기면 3m이내 $N_{치} \geq 4$ $K_{30} : 69 \text{ MN/m}^3$ (7kgf/cm <sup>3</sup> )이상

### 3. 수치해석 방법

#### 3.1 수치모델링

수치해석에는 Itasca Consulting Group, Inc.에서 개발한 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3D Version 2.0을 사용하였다. 수치해석 모델은 그림 2와 같다. 모델링의 범위는 폭 7.2m, 길이 9.1m로 단선의 궤도와 15쌍의 레일체결부를 포함하도록 결정 하였으며, 궤도 하부의 노반 및 원지반은 깊이 20.0m까지 고려하였다. 경계조건으로는 4개의 옆면을 수평방향, 바닥면을 수직방향으로 각각 구속하였다.

강화노반, 상하부 노반 및 원지반은 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 탄소성 재료로 모델링 하였다. 궤도 하부 노반층과 원지반의 두께 및 변형계수는 표 2에 제시된 규정에 따라 결정하였으며, 강도는 일반적인 값을 적용하였다. 표 3은 해석에 사용된 노반 및 원지반의 두께, 변형계수

및 강도를 나타낸다. TCL층은 Shell요소를 사용하여 크기 3.2m×9.1m, 두께 0.24m 판으로 모델링하였고, HSB층은 크기 4.0m×9.1m, 두께 0.3m의 탄성연속체로 모델링하였다. 레일은 Beam요소를 이용하여 모델링하였다. 레일패드는 수직방향으로 동가의 축강성을 갖는 Beam요소로 모델링 하였으며, 이를 통해 레일의 Beam요소와 TCL층의 Shell요소가 연결되어 열차하중이 하부로 전달될 수 있도록 하였다. 궤도 재료의 물성치는 전형적인 값을 사용하였으며 표 3에 나타내었다.

### 3.2 하중 재하

작용하중으로는 고속열차 대차 1대의 주행하중을 정적 집중하중으로 환산하여 고려하였다. 주행하중( $P_d$ )은 정적하중( $P_s$ )에 열차속도의 함수인 속도 충격률을 곱하여 구한 값을 사용하였다. 일반적으로 속도에 따른 충격계수는 열차속도를  $V$ 라고 하면, 장대레일은  $1 + 0.3 V/100$ 를 적용한다. 설계속도 300km/hr에 대하여, 고속열차의 축하중 170kN의 1/2인 85kN을 정적하중으로 적용하면 아래와 같이 주행하중을 산정할 수 있다.

$$P_d = P_s \times (1 + 0.3 V/100) = 85 \times \{1 + 0.3(300/100)\} = 161.5 \text{ kN}$$

결정된 주행하중은 그림 1과 같이 레일 상부 4 지점에 정적 집중하중으로 재하하였다.

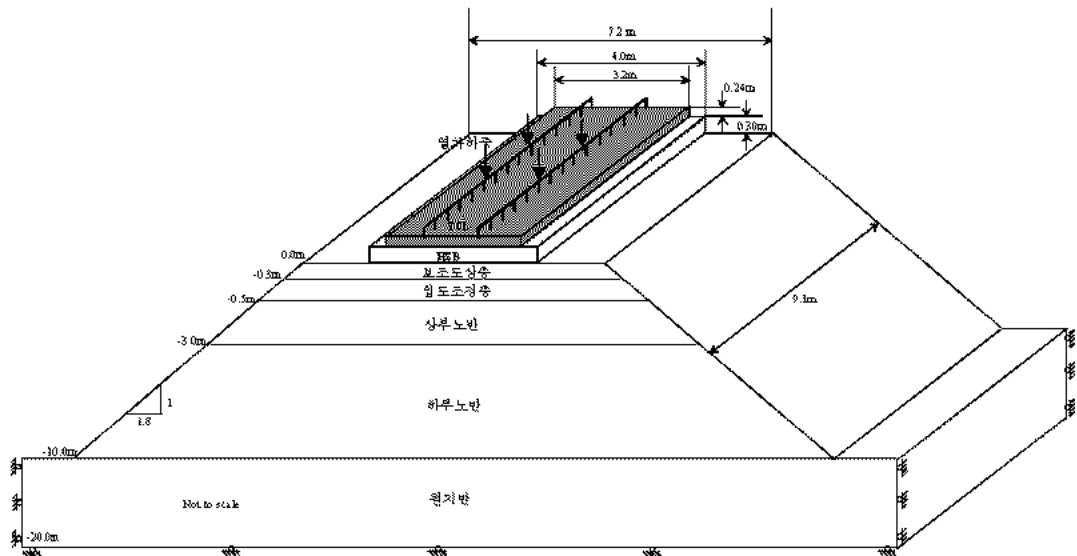


그림 2. 수차해석 모델

표 2 궤도 하부 노반 및 원지반의 물성치

층	강화노반		상부노반	하부노반	원지반
	보조도상층	입도조정층			
탄성계수	120 MPa	80 MPa	80 MPa	60 MPa	30 MPa
포아송비	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
점착력	0 kPa	0 kPa	0 kPa	1.0 kPa	5.0 kPa
내부마찰각	35°	35°	32°	30°	25°
두께	0.2 m	0.3 m	2.5 m	7.0 m	10.0 m

표 3. 궤도 재료의 물성치

재료	모델	물성	값
레일	Beam요소	탄성계수	210 GPa
		포아송비	0.3
		단면적	$7.75 \times 10^{-3} \text{ m}^2$
		단면2차모멘트	$3.09 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
레일패드	Beam요소	축방향강성 (레일패드강성)	$60 \times 10^8 \text{ kN/m}$
TCL	Shell요소	탄성계수	26.5 GPa
		포아송비	0.24
		두께	0.24 m
HSB	탄성연속체	탄성계수	10.0 GPa
		포아송비	0.2
		두께	0.3 m

#### 4. 해석 결과 및 분석

##### 4.1 침하량 분포

그림 3은 선로종단방향 침하량 분포를 길이에 따라 나타낸 것이다. 레일의 경우는 레일 위치에서의 침하량을 나타내고, TCL, HSB, 노반 및 원지반의 경우는 최대 침하량이 발생하는 궤도 횡단 방향 중앙 단면에서의 침하량을 나타낸다. 표 4에는 각 층 상부에서의 최대침하량을 나타내었다.

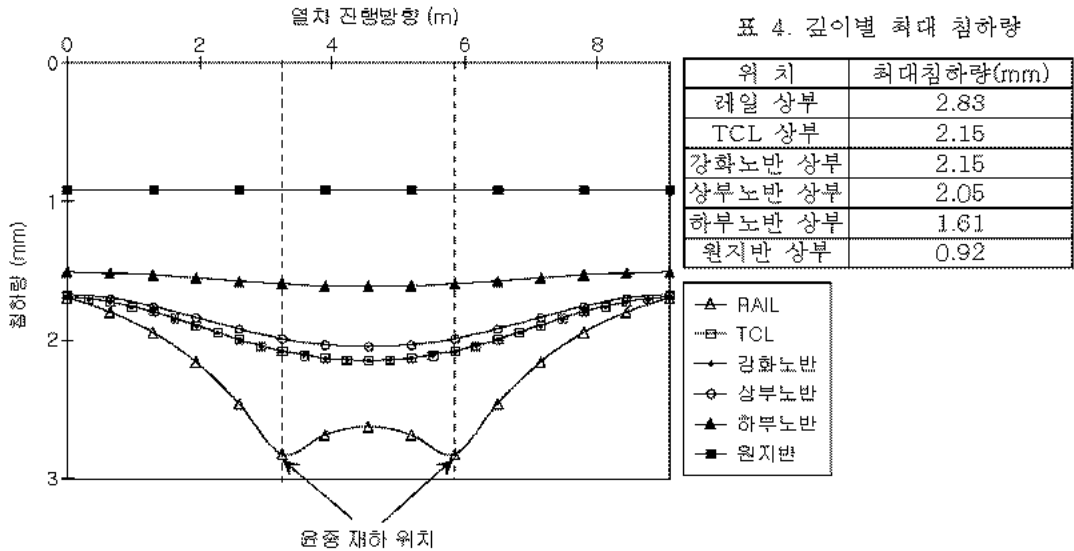


그림 3. 열차하중에 의한 궤도 종단 침하량의 길이별 분포

레일 상부에서의 침하는 운동이 작용하는 지점에 2.83mm의 최대 침하가 발생하였으며, TCL의 최대침하 2.15mm와 비교할 때 약 0.68mm (24%)의 침하가 레일의 처짐과 레일패드의 변형에 의하여 발생하는 것으로 나타났다. 일반적으로 승차감을 고려한 열차의 허용침하량이 2~5mm인 것을 감안하면(황선근 등, 2001), 레일에서의 침하로 평가한 강화노반의 다짐도 및 두께는 비교적 적절한 것으로 평가되었다.

TCL의 침하는 강화노반 상부의 침하량과 거의 동일한 것으로 나타났으며, 따라서 TCL이나 HSB층의 압축 변형에 의한 침하는 무시할 만한 것으로 나타났다. 강화노반 상부에서의 최대 침하는 읍중작용 위치가 아닌 대차의 중앙부에서 나타났으며, 그 크기는 2.15mm로 산정되었다. 산정된 최대침하량은 일본에서 사용하는 강화노반의 허용침하량 기준 2.5mm를 만족시켰다(철도총합기술연구소, 1992). 특히 일본의 강화노반 허용침하량 기준이 강화노반 표면의 차수성을 확보하기 위해서 균열이 생기지 않는 한도의 침하량을 토대로 규정한 비교적 엄밀한 규정인 것을 고려하면, 산정된 강화노반 상부에서의 침하량은 적절한 것으로 판단된다.

하부노반이나 원지반의 침하량은 각 층의 두께 및 강성에 따라 변화하지만, 본 연구에서 고려한 조건에서는 전체 침하의 상당한 부분이 원지반 및 하부 노반에서 발생하는 것으로 나타났다. 레일 상부에서 최대 침하(2.83mm)의 약 32.5%(0.92mm)가 원지반의 침하에 의하여 발생하였으며, 약 24.4%(0.69mm)가 하부노반층의 침하에 의해 발생하였다. 따라서, 강화노반 뿐만 아니라 원지반 및 하부노반의 다짐 관리도 매우 중요한 것으로 판단된다.

그러나, 본 연구에서 제시된 침하량에 대한 평가는 정성적인 측면의 분석만이 가능하며 구체적인 정량적인 평가는 추후 현장계측이나 실험재하시험을 통해 수차모델의 적정성에 대한 검증이 이루어진 후에 가능한 것으로 사료된다. 특히, 콘크리트레도의 경우는 윤하층이 특정 침묵 하부에 집중되는 유도상레도와 달리, 상대적으로 강성이 큰 슬래브에 의해 선로종단방향 전 영역에 고르게 윤하층이 분포하기 때문에 선로종단 경계에서의 수직방향 구속조건에 따른 침하량의 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서, 선로종단방향의 적절한 해석 경계와 구속조건에 대한 추가적인 연구가 반드시 필요하다.

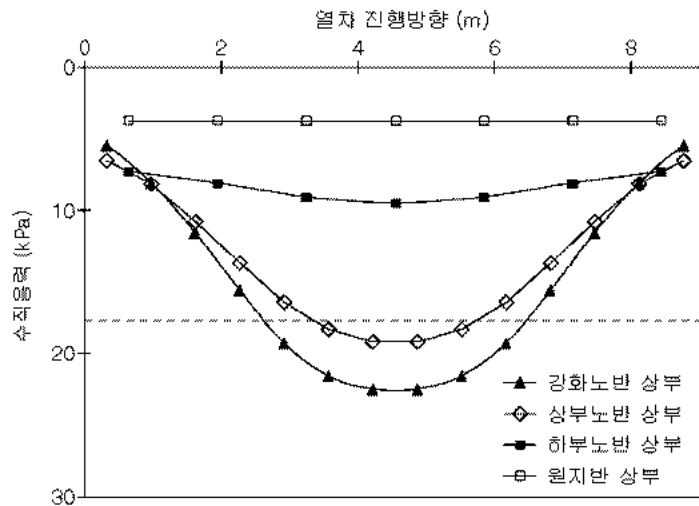


그림 4. 열차하중에 의한 레도 종단 수직응력의 깊이별 분포

#### 4.2 수직응력 분포

그림 4는 열차하중에 의하여 증가되는 수직응력의 분포를 깊이별로 나타낸 것이다. 그림 4에서 점선은 윤하층이 콘크리트레도가 차지하는 부분에 균등하게 분포한다고 가정할 때 강화노반에 작용하는 수직응력(17.69kPa)을 나타낸다. 강화노반 층에 전달되는 수직응력은 대차 중앙부에서 가장 크며, 최대값(22.5kPa)은 등분포로 가정할 경우에 비해 27% 정도 크게 나타났다.

하부에 전달되는 수직응력은 깊이에 따라 감소하여 최대값이 각각 상부노반에서 19.2kPa로 14.7%, 하부노반에서 9.5kPa로 57.8%, 원지반에서 3.75kPa로 78.8% 감소하는 것으로 나타났다.

원지반에 전달되는 수직응력은 상당히 감소하기는 하지만 열차하중의 특성 상 반복되어 작용되면 점성토지반인 경우 간극수압이 축적되었다가 서서히 소산되면서 압밀에 의한 장기적인 관류침하를 유발할 수 있을 것으로 판단되며 이에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다. 즉, 침하에 의하여 그 사용성이 민감한 영향을 받는 콘크리트궤도의 경우, 열차하중에 의한 즉시적인 탄성침하 보다는 장기적이고 반복적인 하중에 의한 소성침하에 대한 검토와 계층 관리가 매우 중요한 것으로 평가된다.

그림 4에서 강화노반 및 상부노반에 전달되는 수직응력을 비교하면, 그 분포나 크기가 유사한 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트궤도의 경우 하중 분산효과 측면에서의 강화노반의 효과는 그리 크지 않기 때문에, 강성이 매우 큰 얇은 두께의 강화노반 층보다는, 적절한 강성의 상대적으로 두께가 큰 강화노반 층이 유리한 것으로 판단된다. 이는 유도상궤도의 경우와 달리 콘크리트궤도에서는 TCL이나 HSB에서 상당한 하중 분산 효과가 있기 때문이다. 따라서, 유도상궤도에 적용되는 강화노반 기준을 콘크리트궤도에 그대로 적용하는 것은 비합리적이며, 콘크리트궤도와 강화노반의 두께 및 강성에 대한 parametric study를 통해 콘크리트궤도에 적합한 강화노반의 두께 및 강성을 결정하는 추가적인 연구가 요구된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 콘크리트궤도 하부의 강화노반, 상하부 노반, 원지반의 침하량과 수직응력 분포를 분석하고 그 적정성을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 열차하중에 의한 궤도 전체 침하량이나 강화노반층에서의 침하량은 기존의 허용기준을 만족하고 있는 것으로 산정되었다. 그러나, 하부지반이나 원지반에서도 상당한 크기의 침하량이 발생하여, 강화노반뿐만 아니라 하부지반이나 원지반에 대한 토공 관리 역시 매우 중요한 것으로 판단된다.
- 2) 열차하중에 의해 노반에 전달되는 수직응력 분포를 분석한 결과, 콘크리트궤도의 경우 유도상궤도와 달리 열차하중의 분산을 목적으로 한 강화노반의 효과는 작은 것으로 나타났다. 따라서 유도상궤도와 차별화되고 콘크리트궤도에 적합한 강화노반의 두께 및 강성을 결정하는 추가적인 연구가 요구된다.
- 3) 열차하중에 의해 원지반에 전달되는 수직응력은 비교적 그 크기는 작은 것으로 나타났지만, 점성토 지반의 경우 반복하여 작용하는 경우 간극수압의 축적으로 인한 압밀로 상당한 장기침하가 유발될 가능성이 있다. 침하에 의한 사용성 저하가 큰 콘크리트궤도의 경우 열차하중에 의한 즉시 침하 보다는 이러한 소성침하에 대한 검토 및 대처가 반드시 필요하다.
- 4) 본 연구의 수치해석 결과를 정량적으로 활용하기 위해서는, 현장계측, 실험 재하시험 등을 통한 해석 결과의 검증이 반드시 필요하며, 특히, 콘크리트궤도에 대한 선로종단방향 경계의 범위 및 구속조건을 적절하게 결정하기 위한 연구가 요구된다.

## 참고문헌

1. 철도총합기술연구소(1992), "철도구조물등 설계기준 및 동해설, 토구조물편" 일본 철도총합기술연구소
2. 황선근 등, (2001), "토구조물 최적설계 기술분야", 철도시스템 기반기술개발 연구보고서, 한국철도기술연구원
3. Itasca Consulting Group Inc. (1997) "FLAC3D Manual: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Version 2.0." Itasca Consulting Group Inc., Minnesota, USA.