

한국형 프리캐스트 슬래브 궤도 설계

Design of Korean Precast Slab Track

지광습†

이승정*

장승엽**

Goangseup Zi

Seungjung Lee

Seungyup Jang

ABSTRACT

We proposed a design procedure for Korean Precast Slab Track system. Korean Precast Slab Track system cannot use the same design procedure to German slab track system because of different shapes and some problems. We identified the problems of German slab track design system that cannot simulate effects of loads. This proposed procedure is implemented for the commercial software of ABAQUS. Using this procedure, one can consider uncombined effects between slab panel and hydraulic sub base, effect of close sleepers.

1. 서론

현재 부설되어 있는 대부분의 자갈도상 궤도(ballasted track)는 하중이 지속적으로 작용하는 경우 자갈층의 소성변형을 동반할 수 있으며 궤도의 틀림과 파괴의 가속으로 유지보수비가 증가하는 단점으로 인해 변경이 요구되어 왔다. 이러한 이유로 자갈도상을 사용하지 않는 무도상 궤도(ballastless track)가 개발되어 현재 다양한 국가에서 적용되고 있다. 무도상 궤도의 일종인 콘크리트 슬래브 궤도는 자갈대신 콘크리트를 사용하고 고탄성 레일체결장치와 침목을 사용할 수 있어 열차의 고속화에 따른 궤도 변형에 의한 유지보수를 절감할 수 있는 혁신적인 궤도구조이다.[1]

프리캐스트 슬래브 궤도는 공장에서 제작된 콘크리트 슬래브 패널을 현장에 운반하여 설치하는 궤도 구조로 현장타설식 궤도구조에 비해 고품질, 고강도 콘크리트의 시공이 용이하고 인력 및 고속 시공이 가능하며 유지보수가 용이한 장점을 가지고 있다.[2] 현재 일본, 독일, 이탈리아, 오스트리아 등에서 프리캐스트 슬래브 궤도를 개발하여 고속철도 부설에 사용하고 있으며 국내에서도 한국철도기술연구원과 (주)삼표이앤씨가 2002년에 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도를 개발하여 영업선 시험부설에 성공하였고 현재 장기 성능검증 중에 있다. 국내에서 개발된 PST A-type 및 B-type의 경우 오랜 철도역사를 가지고 있는 유럽, 일본과 같은 적절한 설계개념이 부족한 현실에 처해있다. 따라서 본 연구에서는 독일 RHEDA 궤도의 설계개념과 절차를 분석하고 문제점을 파악하여 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도의 설계 시 반영할 수 있도록 한다.

2. 프리캐스트 슬래브궤도 설계개념

2.1 기본 개념

프리캐스트 슬래브 궤도는 그림1과 같이 공장에서 제작된 프리캐스트 콘크리트 슬래브 패널과 도상강화층(Hydraulic Sub Base)을 기본구성으로 한다. 콘크리트 슬래브 궤도의 설계는 Eisenmann이 제안한

† 책임저자 : 정희원

E-mail : g-zi@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3324 FAX : (02)928-7656

* 비회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석·박사통합과정

** 정희원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원

설계개념을 기본으로 하며 적용기준은 Beton Kalender 2000으로 한다.[3,4] 그림2는 국내에서 개발된 PST A-type 및 B-type의 모습이다.

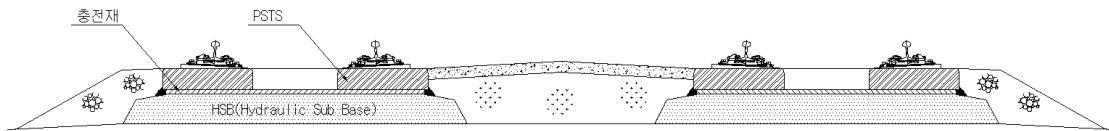
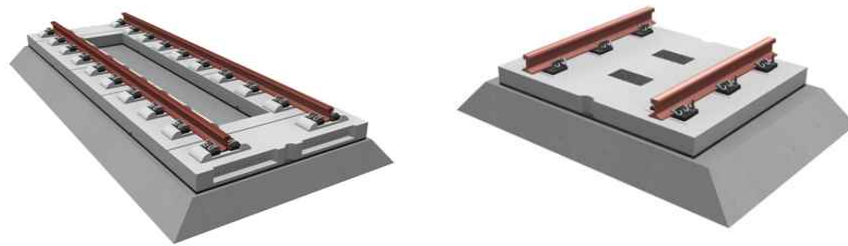


그림1. 프리캐스트 슬래브 궤도 표준단면



(a) A-type

(b) B-type

그림2. 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도

2.2 하중 산출

콘크리트 슬래브 궤도의 설계에는 차륜하중과 온도 및 피로하중이 고려된다. 사용하중 상태에서 슬래브 궤도를 설계하는 경우 차륜하중에 의해 발생하는 응력으로 설계를 실시하며 온도 및 피로하중의 경우 강도검토 시 사용된다. 차륜하중은 고속철도의 경우 그림3과 같은 UIC 71 하중 모델을 사용하며 레일과 체결장치를 통해 슬래브 궤도에 분산되어 작용하는 것으로 고려한다.

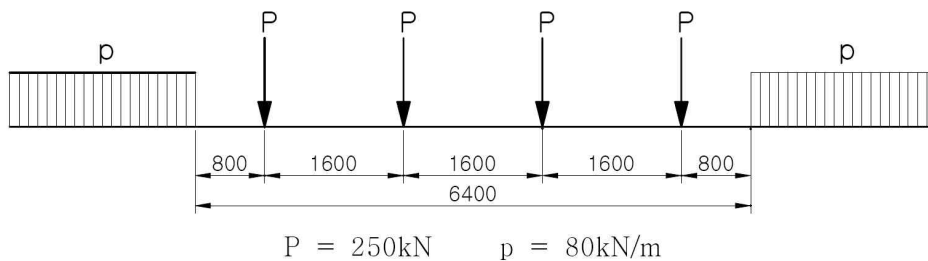


그림3. 프리캐스트 슬래브 궤도 표준단면

슬래브 궤도에 발생하는 응력의 경우 차륜하중의 이동에 따른 검토를 수행하여야 한다. 또한 불균일한 궤도를 운행하는 경우 차륜과 레일간의 요철로 인해 발생할 수 있는 동적효과는 실측자료를 고려한 동적충격계수를 발생응력에 곱하여 설계에 사용한다.

2.2 강도 산출

콘크리트 슬래브 궤도에 작용하는 하중에 의한 응력과 콘크리트의 강도는 그림 3과 같은 개념도로 설명할 수 있다. 강도와 비교되는 슬래브의 응력은 두 층으로 구분된 슬래브 궤도에서 슬래브 패널의 하면의 미소요소 A에서의 응력으로 정의하고 이를 σ_A 라 한다. 이러한 σ_A 는 슬래브에 장주기로 가해지는 온도에 의한 응력과 단주기로 가해지는 차륜에 의한 응력을 중첩시켜 얻을 수 있다. 그림4의 그래프는 시간에 따른 A에서의 응력 변화를 도시한 것이며 (a)는 온도에 의해 발생하는 응력, (b)는 차륜에 의해 발생하는 응력, (c)는 (a)와 (b)를 중첩시켜서 얻어진 것이다.

그림4의 (c)에서 온도에 의해 발생된 응력을 제외한 응력, 즉 차륜에 의한 응력만을 고려한 응력을 피로응력 σ_f 라고 하고, 차륜과 온도에 의해 발생된 인장응력의 최대값을 최대인장응력 σ_t 라고 한다. 이러한 경우 슬래브의 강도 검토는 식 1, 2를 이용할 수 있다. 식 1은 최대인장응력이 콘크리트의 인장강도를 넘지 않아야한다는 사실을 의미하고 식 2는 피로응력이 콘크리트의 피로강도를 넘지 않아야한다는 사실을 의미한다.

$$\sigma_t < f_t \quad \text{식 1}$$

$$\sigma_f < f_f \quad \text{식 2}$$

여기서 f_t, f_f 는 각각 콘크리트의 인장강도와 피로강도를 의미한다.

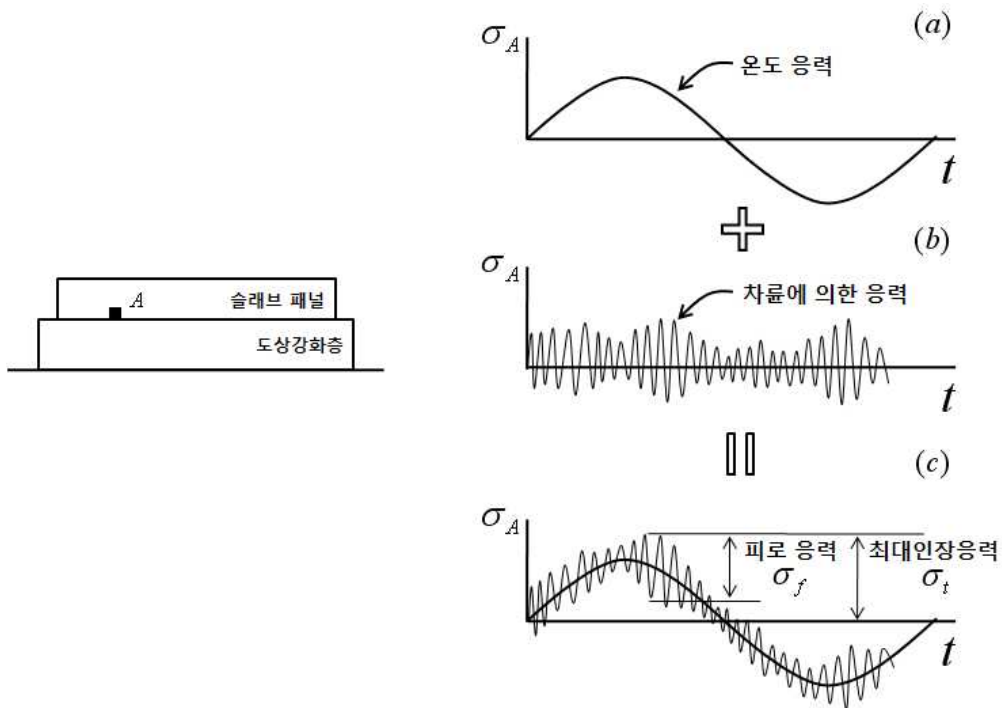


그림4. 슬래브 패널의 발생 응력

콘크리트의 피로강도는 총응력과 평균응력 좌표계를 이용해 콘크리트의 극한강도와 피로강도를 연결하여 얻은 Smith diagram을 통해 얻을 수 있다.[4] 그림5는 Smith diagram을 나타낸 것이며 차륜하중에 의한 허용응력비 σ_Q/β_{BZ} 는 피로강도에서 고르지 못한 가열에 의한 온도응력비 σ_w/β_{BZ} 를 제외시켜 얻을 수 있다. 여기서 $\sigma_Q, \sigma_w, \beta_{BZ}$ 는 각각 차륜하중에 의한 응력, 온도응력, 콘크리트의 휨강도를 의미한다.

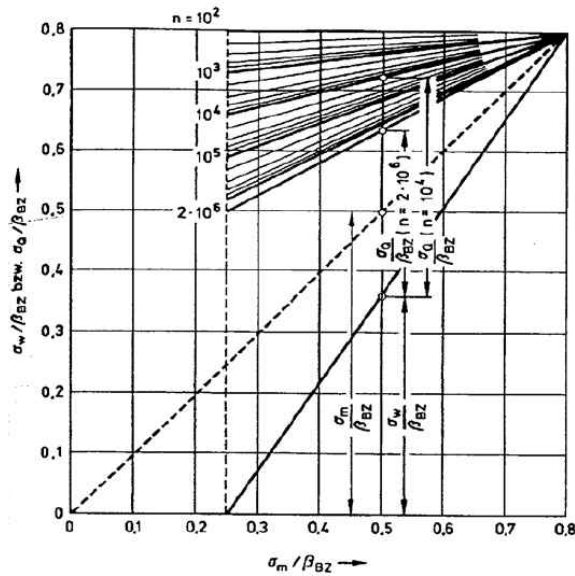


그림5. smith diagram

3. 설계응력 산정

3.1 독일의 설계응력 산정절차

콘크리트 슬래브 궤도는 그림1과 같이 슬래브 패널과 도상강화층으로 구성되어 두 층이 충전재로 연결되어 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다. 충전재 층이 슬래브 패널과 도상강화층을 완벽히 연결하여 두 층이 결합된 것으로 가정하거나 (system II) 충전재 층의 영향을 무시하고 슬래브 패널과 도상강화층이 결합되지 않은 것으로 가정하는 (system I) 두 가지의 시스템을 고려할 수 있다. 두 층이 결합되어 있지 않다고 가정하는 system I 이 더 보수적이 설계에 적합하다.

독일의 설계응력 산정절차는 그림6과 같다. 하중조건이 2.2결과 같이 결정되면 레일의 탄성거리를 고려하여 레일의 변위와 체결구의 지지점력을 계산한다. 또한 슬래브 패널과 도상강화층의 결합여부를 결정하여 두 층을 하나의 등가 층으로 치환한다. 치환된 층에서 계산된 지지점력 중 최대값을 이용하여 인장응력을 계산한다. 이 때 차륜하중에 의한 인장응력은 식 3에 의해 구할 수 있다. 계산된 인장응력을 실제 슬래브 패널의 하부 응력으로 다시 변환하여 설계응력을 산정하게 된다.

$$\sigma = \frac{0.275}{h^2} Q(1+\mu) \left[\log\left(\frac{Eh^3}{kb^4}\right) - 0.436 \right] \quad \text{식 3}$$

여기서 Q , h , μ 는 각각 계산된 최대 지지점력, 치환된 등가 층의 두께, 콘크리트의 횡축변형계수를 의미한다. 슬래브 궤도의 설계 시 도상강화층이 탄성지반(elastic foundation) 위에 존재한다고 가정하는데 이러한 탄성지반의 강성이 k 를 나타내고 b 는 인장응력을 계산하기 위한 길이 값으로 체결구의 크기와 등가 층의 두께에 영향을 받는다.

최대 지지점력 직하면에서의 설계응력을 산정하기 위해서는 최대 지지점력에 의한 응력 외에 인접체결구에 작용하는 하중의 영향을 고려해야 한다. 이러한 영향은 탄성지지 판 이론에 준한 단일하중 하에서의 모멘트 영향선으로 계산할 수 있다.

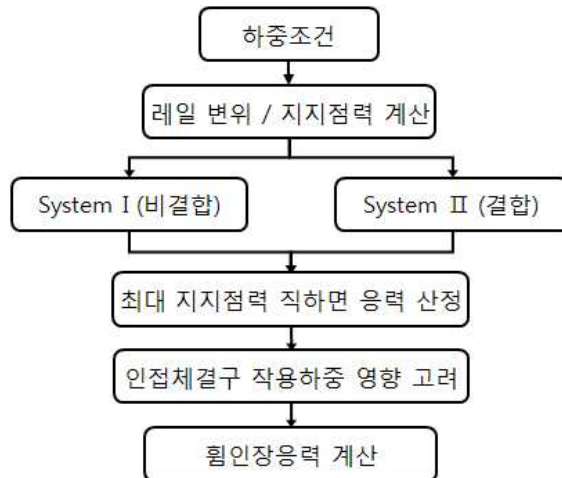


그림6. 독일의 설계응력 산정절차

3.2 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도의 설계

한국형 프리캐스트 슬래브 궤도는 독일의 프리캐스트 슬래브와 다른 형태를 가지고 있으며 현 독일의 설계응력 산정절차의 경우 몇가지의 문제점을 가지고 있기 때문에 현 독일의 설계응력 산정절차를 동일하게 사용할 수 없다.

독일의 설계에서는 탄성지지 판 이론에 준한 단일하중 하에서의 모멘트 영향선을 실제 설계에 사용하기 위해 보간법을 이용한 식으로 대체하고 있는데 이러한 설계 식 중 접선방향의 영향을 나타내는 식이 그림7에서와 같이 원거리에서 적절히 모사하지 못하는 것을 알 수 있다. 실제로는 원거리 체결구의 영향이 미소하기 때문에 탄성길이 이상은 적용이 불가능함을 확인할 수 있다.

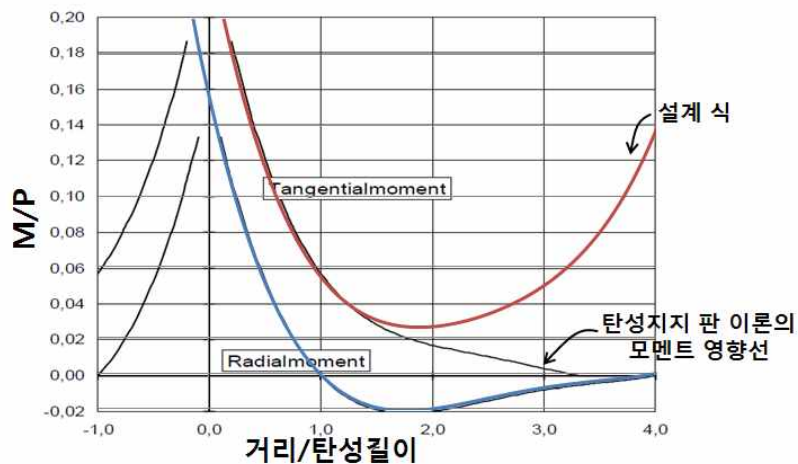


그림7. 인접 체결구 작용하중의 영향

또한 현재 개발된 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도 A-type의 경우 슬래브 패널의 중앙부에 중공부가 있다. 이러한 중공부의 영향으로 폭과 길이 모두가 넓은 판보다는 일방향 슬래브 또는 빔과 같이 거동하게 된다. 따라서 슬래브 패널의 측면 설계 시 탄성지지 판 이론에 준한 단일하중 하에서의 모멘트 영향선의 적용에 무리가 따르며 설계를 위한 검토가 필요하다.

위와 같은 이유로 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도를 설계하기 위해서는 삼차원 유한요소해석을 통한 직하면 응력 및 인접체결구의 영향을 검토하는 과정이 필요하다. 현재 일본의 프리캐스트 콘크리트 슬

래브 궤도의 경우 설계 시 응력산정을 위해 유한요소해석을 사용하고 있으며 세계적으로도 슬래브 궤도의 설계 시 응력산정에 유한요소해석을 사용하는 추세를 보이고 있다.

본 연구에서는 그림8과 같은 삼차원 유한요소해석 모델을 사용하여 설계에 반영하였다. 유한요소해석은 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수행하였다. 유한요소해석 모델은 슬래브 궤도의 대칭성을 고려하여 1/2모델로 고려하였으며 길이에 비해 두께가 얇은 본 구조물의 해석을 위해 휨 거동 능력이 향상된 요소인 C3D8I 요소를 사용하였다.

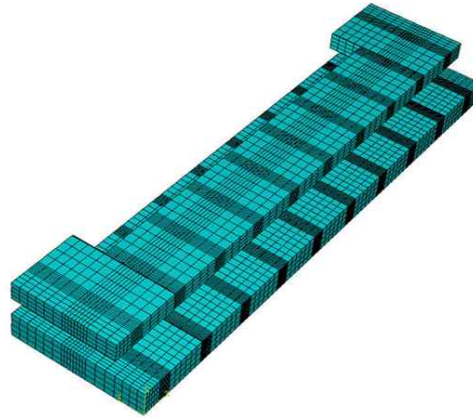


그림8. 유한요소해석 모델

3.1절에서 언급한 충전층에 의한 효과를 무시하기 위해 슬래브 패널과 도상강화층을 비구속하여 해석을 수행하였으며 결과는 그림 9와 같다. 단부에서 두 층의 상대변위가 존재함으로부터 두 층이 결합되지 않았음을 다시 확인할 수 있다.

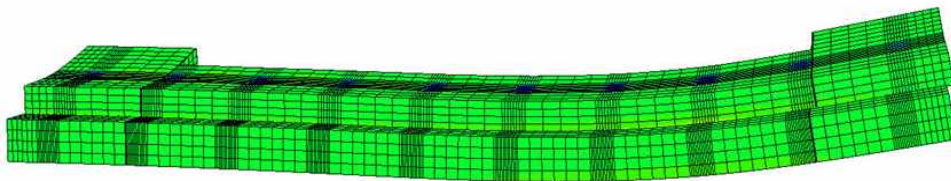


그림9. 슬래브 패널과 도상강화층이 비구속된 해석결과

그림10은 유한요소해석의 결과 얻을 수 있는 슬래브 패널 하면의 종방향 응력도이다. 실제 설계에서는 종방향과 횡방향 각각의 응력을 산정하여 반영하면 된다.

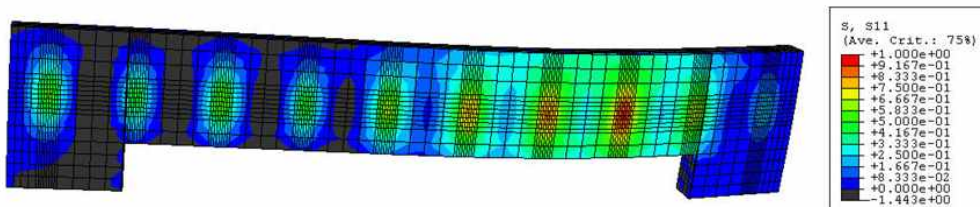


그림10. 슬래브 패널 하면의 종방향 응력도

본 연구에서 제안한 설계응력 산정법과 현 독일의 설계응력 산정법을 이용해 종방향과 횡방향 설계응력을 표 1에 나타내었다. 진술한 바와 같이 독일의 설계에서 응력 산정 시 제안된 설계응력 산정법에 비해 과도하게 산정된 것으로 확인할 수 있다.

표1. 산정 설계응력 비교

구분	전체 조합 하면 응력 (동적충격계수 미고려)		전체 조합 하면 응력 (동적충격계수 미고려)	
	독일 설계	설계제안	독일 설계	설계제안
종방향	1.06	0.934	1.91	1.701
횡방향	1.72	1.274	3.10	2.331

4. 결 론

본 연구에서는 프리캐스트 슬래브 궤도의 기본개념과 하중 및 강도를 산출하는 방법을 정리하고 현재 독일에서 사용하고 있는 설계응력 산정법의 문제점을 파악하였다. 현재 독일에서 사용하고 있는 방법은 탄성지지 판 이론에 준한 단일하중 하에서의 모멘트 영향선을 보간한 설계 식이 인접 체결구의 하중 영향을 적절히 모사하지 못하는 단점을 가지고 있다. 또한 개발된 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도의 형상에 따른 변화를 모사하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 개발된 한국형 프리캐스트 슬래브 궤도의 설계 대안을 제시하였다. 인접체결구의 영향과 단일하중에 의한 직하면 응력산정을 위해 유한요소 해석모델을 사용하였으며 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 유한요소해석을 수행하여 설계응력을 산정할 수 있었다. 이러한 설계 대안을 통해 슬래브 패널과 도상강화층의 비구속효과, 인접체결구 하중의 영향 등을 적절히 고려할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 (재)정인옥학술장학재단의 FRP로 보강된 프리캐스트 슬래브 궤도 개발과제의 지원으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 (재)정인옥학술장학재단의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 서사범, “궤도역학2”, BG북갤러리, 2009.
2. 장승엽, 강윤석, 김은, “고속철도 콘크리트 슬래브 궤도의 최신 기술”, 콘크리트학회지, 16권, 4호, pp.10-17, 2004.
3. J. Eisenmann, "Introduction : Ballasted tracks and the goals of slab track development," RTR Special, 2006.
4. J. Eisenmann, G. Leykauf, "Beton-fahrbahnen, 2nd ed.", Ernst & Sohn, Berlin, 2001.