

콘크리트 슬래브 궤도의 3차원 거동해석

3-D Analysis of Concrete Slab Track System

김정일*
Kim, Jeong il

장승엽**
Jang, Seung Yup

ABSTRACT

In this study, three dimensional FE analysis of concrete slab track has been performed in order to develop the realistic design of precast concrete slab track. The precast slab track system including the precast concrete slab panel and the grout layer is modeled using the three dimensional solid element with crack softening effect. The input load is computed from the one dimensional beam element model constituting the rail and several discrete springs. To investigate the effect of the longitudinal connection of slab panels, two different systems - continuous and discrete systems - are modeled. The analytical results show that the stresses of both the slab panel and the grout layer are in the range of linear elastic, and, at the interface between two adjacent panels, the primary stresses of the grout layer of the discrete system are higher than those of the continuous system. However, The overall stress levels of the grout layer are very low relative to the strength of th grout.

1. 서론

콘크리트 슬래브 궤도는 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. 일본에서는 산양신간선 이후의 신간선 신설 건설 시 선로 대부분이 터널 및 고가교 등 구조물 위에 건설되게 되어 보수작업을 대폭 감소하는 궤도 개발의 필요성을 인식하여 길이 5m 정도의 프리캐스트슬래브 궤도를 개발하여 신선에 건설하고 있다.

기존의 슬래브 궤도의 응력해석은 선로방향의 경우 레일 및 슬래브를 2중 탄성보로, 선로직각방향 슬래브를 탄성보로 가정하여 균형방정식을 구성한 후 미분방정식을 계산하여 슬래브의 응력과 처짐의 일반해를 구하였다. 그러나 연구가 진행되면서 이 해법으로는 근사값을 얻을 수는 있어도 궤도슬래브의 국부적인 응력이나 슬래브 지지체의 비선형 거동을 해석하는데는 적절하지 않아 이의 대안으로 유한요소법에 의한 해석으로 슬래브 궤도의 역학적 거동을 연구하기 시작하였다.

유한요소법에 의한 해석은 일본의 경우 레일을 보로 궤도슬래브를 판(Plate)으로 유한요소를 구성하여 궤도슬래브의 거동을 분석하여 설계를 하고 있으며¹⁾, Katsutoshi ANDO는 3차원 솔리드 모델을 이용하여 접합부응력이나 온도변화에 기인한 슬래브의 응력과 변형율을 연구했다.²⁾ 유럽의 경우 3-차원 다층 시스템에 기초한 정적 프로그램인 GEOTRACK으로 다양한 궤도시스템에 대한 궤도부재, 도상, 슬래브, 노반 등의 국부적인 응력과 변형율을 분석하는데 활용하고 있다.³⁾

* 한국철도기술연구원 위촉연구원

** 한국철도기술연구원 선임연구원

본 연구에서는 프리캐스트 슬래브 궤도의 합리적인 설계를 위해 유한요소해석을 적용하여 슬래브 궤도의 3차원 거동과 국부적인 응력의 발생을 관찰하고자 한다. 또한 슬래브 궤도의 종방향 연결에 대한 비교를 보기 위해 연속·불연속 궤도시스템에 대한 효과도 분석한다.

2. 궤도슬래브의 해석

2.1 해석대상 슬래브 궤도

본 연구의 슬래브궤도는 불연속의 경우 슬래브 길이가 493.5 cm, 폭 230 cm, 두께 18 cm, 체결구의 간격 62.5 cm, 슬래브지지체의 두께는 3 cm이고, 연속슬래브의 경우 길이만 연속이고 나머지 항목은 불연속 슬래브궤도와 동일하다.

해석시 사용한 프로그램은 범용유한요소해석 프로그램인 LUSAS를 이용하였으며, 레일은 6개의 자유도를 가진 2절점 Beam element를 사용하였고, 슬래브와 슬래브지지체는 절점당 3개의 자유도를 가진 8절점 3D isoparametric solid element를 사용하였다. 1차원 보 모델은 레일 위에 가해지는 윤중이 레일 체결장치부에 설치된 저탄성의 궤도패드를 통해 슬래브에 전달되므로 레일체결부마다 1개의 Linear Spring 요소로 레일과 바닥을 연결하여 구성하였으며, 3차원 슬래브 모델은 1차원 Beam 모델에서 윤중에 의한 Spring의 반력을 모델의 입력하중으로 사용하였다. 그림1은 본 연구에서 해석한 대상 슬래브 궤도의 단면형상을 나타내며 그림3은 1차원 보모델과 3차원 솔리드 모델의 적용과정과 경계면의 구속조건을 나타낸다. 불연속 슬래브 모델은 첫 번째 슬래브궤도가 더 높은 하중을 받으므로 해석 시간의 단축을 위해 첫 번째 슬래브 궤도만을 해석대상으로 삼았다. 그리고 표1은 슬래브궤도의 재료 특성값을 나타낸다.

또한 슬래브 모델에서 슬래브와 슬래브지지체의 비선형 거동을 보기 위해 LUSAS의 Concrete Crack Model에 표1에서의 슬래브지지체의 인장강도, 인장 연화곡선 단부 변형율의 재료 물성치를 입력하여 비선형 해석을 실시하였다. Concrete Crack Model의 인장의 연화곡선은 그림2이 지수(Exponential)의 연화곡선을 갖는다.

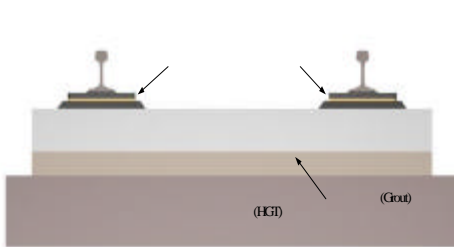


그림1. 프리캐스트 슬래브 궤도의 단면 형상

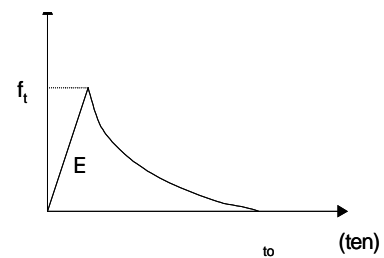
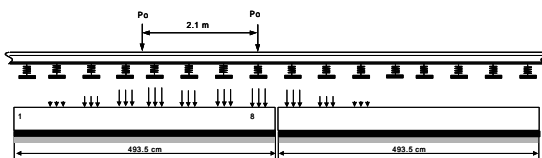
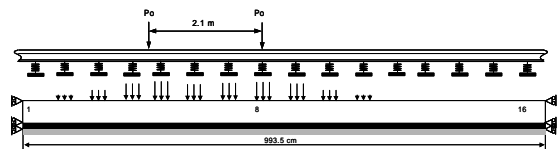


그림2. Concrete Crack 인장 지수연화곡선



a) 불연속 슬래브의 모델



b) 연속 슬래브의 모델

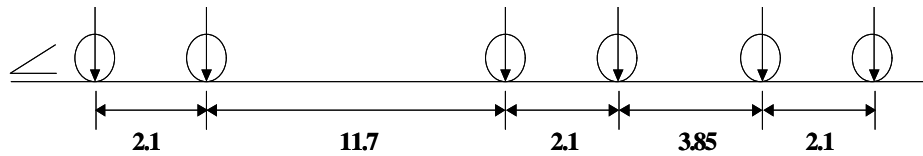
그림3. 연속·불연속 슬래브 궤도의 모델

표1. 해석 대상 슬래브케도의 재료 특성값

항 목	구 분	재료특성	
KS60 레일	단면적 A	cm ²	64.2
	단면2차모멘트	cm ⁴	3090
	탄성계수 E	MPa	210,000
탄성패드	스프링계수	N/m	30,000,000
콘크리트	설계기준강도	MPa	35
	탄성계수	MPa	26,500
	포아송비	-	0.18
	허용 압축응력 $0.4 f_c'$	MPa	14
	허용 휨인장응력 $0.42\sqrt{f_c'}$	MPa	0.786
슬래브 지지체	탄성계수	Mpa	2,000
	포아송비	-	0.35
	인장강도	MPa	4
	인장 연화곡선 단부에서의 변형을	-	0.003

2.2 해석하중

해석에 사용된 하중은 다음 그림과 같이 도시철도 전동차 하중을 고려하였다.



축중단위: tonf ,길이단위 m

그림4. 지하철 전동차 하중선도

불연속 슬래브케도의 길이가 493.5cm 이므로 1개의 슬래브 케도에 적용될 수 있는 축거를 고려하여 2.1m 축거의 축중 2개만을 고려하였다. 그리고 축중에 의해 발생하는 윤중은 열차주행시 차륜의 마모로 인한 차륜플랫을 고려하여 충격윤중이 준정적윤중의 3배까지 발생된다는 측정결과를 근거로 하여 해석윤중은 정적윤중의 3배로 적용하여 24 tonf로 하였다.⁴⁾

$$Q = \frac{P}{2} \times N$$

2.3 1차원 보 모델 해석

1차원 범요소에 레일 체결장치 간격으로 스프링지점을 적용한 모델에 2개의 윤중을 재하하여 선형해석을 실시하였다. 정적 해석을 수행한 결과 최대처짐 -2.904mm의 레일의 처짐과 그림5와 같은 레일의 처짐곡선을 확인하였다. 또한 레일 체결장치의 위치에 따른 반력의 크기를 그림6와 같이 확인 할 수 있었다.

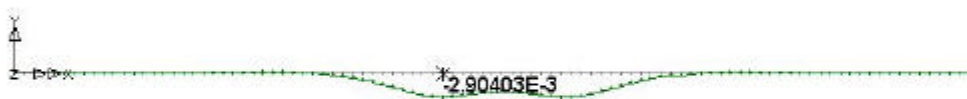


그림5. 레일의 처짐 곡선

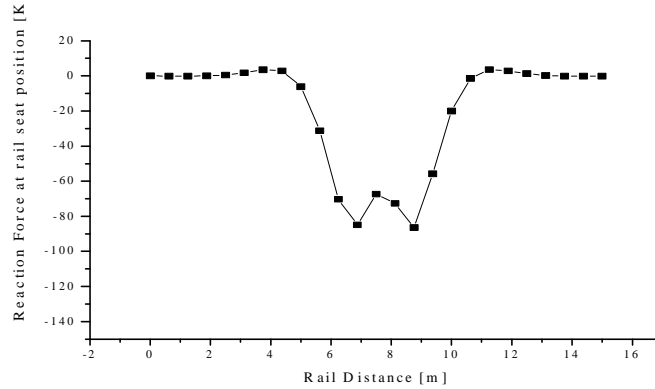


그림6. 1차원 보해석 시 레일 지지점의 반력

2.4 3차원 슬래브 모델 해석

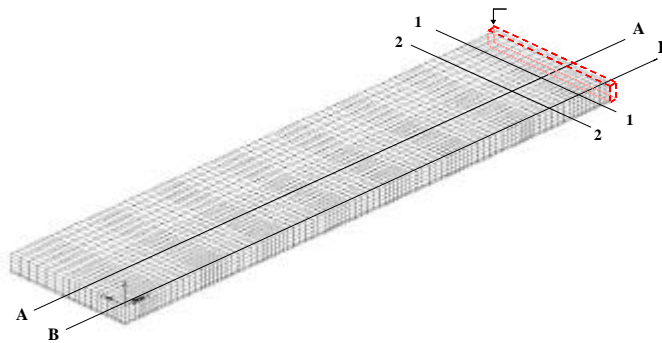


그림7. 3차원 슬래브케도의 모델

1차원 보 구조해석에서 도출한 레일지지점 반력을 베이스플레이트 면적($0.22 \times 0.45 = 0.099 \text{ m}^2$)에 대한 등분포하중으로 변환하여 그림7과 같은 슬래브 모델의 레일지지점에 재하하였다. 이 모델에 대한 구조해석결과 표2와 같이 모델의 처짐을 확인할 수 있었다. 위의 결과를 1차원 보 모델의 처짐값 -2.904mm 와 비교해 볼때 슬래브 케도시스템의 처짐은 저탄성 베이스플레이트패드 스프링 상수에 의해 전체의 처짐이 나타남을 알 수 있다. 또한 두 모델간의 결과치를 비교해보면 수직운중에 대한 전체슬래브의 최대 처짐의 차이는 상기의 모델에서 매우 적게 나타나고 있다. 응력을 검토해보면 슬래브가 받는 최대 압축응력은 불연속모델에서 그림7의 1-1단면에서 0.965MPa 이고 최대 인장응력도 불연속 모델에서 그림7의 2-2단면에서 0.280MPa 이다. 콘크리트의 허용 인장응력이 0.786MPa 이므로 허용 응력 범위 안에 있다. 전체슬래브 지지층의 최대 압축·인장응력은 불연속모델에서 0.513MPa , 0.074MPa 이다.

두 슬래브간 경계면에서의 슬래브 지지층의 응력상태를 관찰한 결과 표3과 같은 응력상태를 확인 하였다. 이 결과로부터 슬래브 경계면에서의 두 모델간 압축응력의 차이는 1.60배 인장응력의 차이는 2.05배로 불연속모델이 선로방향의 경계면에서 더 높은 응력의 상태에 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 슬래브지지체의 전체응력의 상태는 지지체의 강도에 비해 상당히 낮은 범위에 있다. 그림9. a)는 A-A단면에서의 연속·불연속 슬래브 지지체 바닥의 응력을 그림9. b)는 B-B단면에서의 슬래브지지체 상면 응력을 나타낸 것이다.

표2. 3차원 슬래브 모델의 처짐

	불연속 모델	연속모델
슬래브 콘크리트층		
최대절대처짐 [mm]	-0.0096	-0.0095
최대상대처짐 [mm]	-0.004579	-0.00461
슬래브 지지층 [mm]	-0.005021	-0.004890

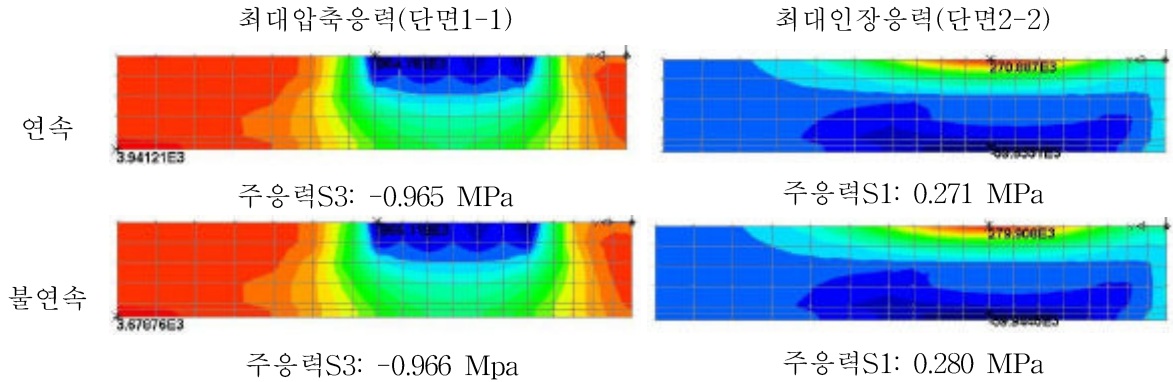
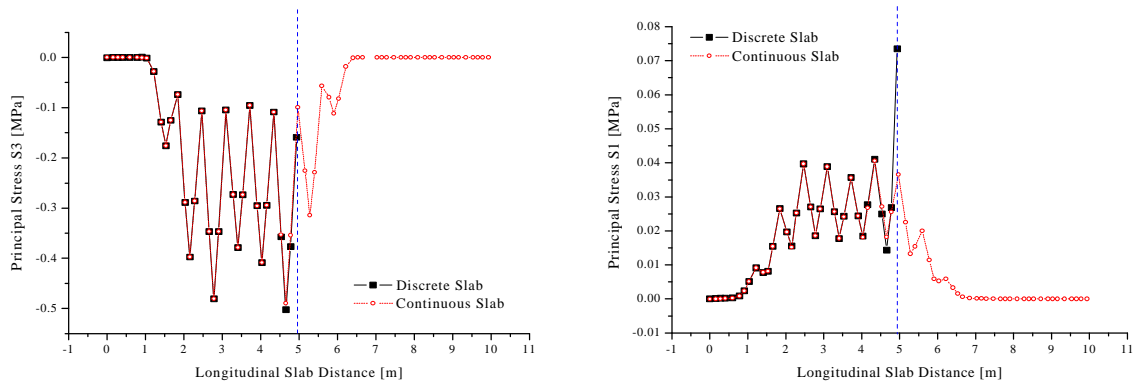


그림8. 슬래브모델의 최대응력비교

표3. 슬래브 지지층의 선로방향 경계면에서의 응력값

	불연속모델		연속모델(Full Fix at Bottom)	
	최소값	최대값	최소값	최대값
주응력 S1 MPa	-0.019	0.074	-0.053	0.036
주응력 S2 MPa	-0.061	0.019	-0.072	0.005
주응력 S3 MPa	-0.159	0.004	-0.099	0.003
Sx MPa	-0.064	0.019	-0.075	0.005
Sy MPa	-0.061	0.017	-0.054	0.007
Sz MPa	-0.112	0.057	-0.097	0.027



a) 압축응력

b) 인장응력

그림9. 연속·불연속 모델의 슬래브 지지체 선로방향 응력곡선

3. 결론

슬래브 궤도시스템에 대한 1차원 보모델의 반력을 베이스플레이트 면적의 등분포하중으로 변환하여 3차원 슬래브모델의 입력하중으로 적용한 해석방법을 채택함으로써 슬래브에 가해지는 하중의 분산효과를 얻을 수 있었으며 이 3차원 모델로부터 슬래브 콘크리트와 슬래브 지지체가 선형의 응력범위안에 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 연속·불연속 슬래브 모델비교에서 슬래브지지체는 수직 윤중에 대한 선로방향 경계면의 응력에서 불연속 모델이 압축응력에서는 1.60배 인장응력에서는 2.05배 정도 더 높은 응력의 상태에 있음을 확인하였다. 그러나 슬래브 지지체의 전체 응력의 범위는 지지체의 강도에 비해 상당히 낮은 범위에 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) 安藤吉彦(1997), “新軌道力學”
- 2) Katsutoshi ANDO(1997), “A study on Load-Carrying Structures and Its Design for Low-Maintenance Tracks on Earthworks“
- 3) Coenraad Esveld(2001,) “Modern Railway Track” , MRT-Production
- 4) 양신추 외, “도시철도 선로시스템 표준화”, 도시철도 표준화 연구개발사업 2003년도 최종보고서 한국철도기술연구원, 건설교통부, 2003

후기

본 연구는 건설교통부 도시철도 표준화 연구개발사업의 “도시철도 선로시스템 표준화” 과제에서 수행되었습니다.