열차속도 증가를 고려한 토공상 콘크리트궤도의 거동 분석
Analysis of the Behavior of Concrete Track on Earthwork Considering the Increase in Train Speed

김정일† 안석준* 권종욱** 김진일***
Jeong-Il Kim Suk-Jun Ahn Jong-Wook Kwon Jin-Il Kim

ABSTRACT

HONAM High Speed Railway project is under construction with the target to have 350km/h design speed from Songjeong Gwangju City to Osong. The track for the whole section of the line is scheduled to be a concrete track in order to decrease total life cycle cost (LCC) according to the decrease of track destruction. However, the study on the related parts to increase the train speed up to 400km/h is on going in order to strength the competitiveness of high speed railway. On this study, the stress of track has been analyzed according to the concrete track design method of Eisenmann using equivalent depth theory proposed by Odemark for behavior analysis of concrete track on track bed, which is having embankment deformation characteristics by train load. The behavior analysis of track is performed to analyze the stress of track bed layer and track according to the variation of design load and train speed. And also, the characteristics of concrete track have been figured out by analyzing the parameter according to the thickness of track bed layer.

1. 서론

오송과 광주송정리간의 호남고속철도 사업은 전구간 콘크리트 궤도 건설을 위해 노반은 설계가 완료되어 건설을 진행 중이며, 궤도는 실시설계 성과에 따라 노반건설 후 콘크리트궤도를 건설할 예정이다. 호남고속철도의 현재 설계속도는 350km/h이지만 “400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발” 연구사업에 의해 운영속도 400km/h급으로 검토 중에 있으며 특히 토공상 콘크리트궤도는 유지보수비의 감소를 위해 정확한 거동분석을 하는 것이 필요하다. 토공상에 건설되는 콘크리트궤도는 성토층의 처짐에 따른 수직변형에 의해 휨응력이 발생하므로 각 궤도층의 휨응력에 대한 평가가 필요하다. 이 평가방법의 예로는 독일의 Dr.Eisenmann에 의해 개발된 기법이 한국의 설계기준에 반영되어 적용되고 있다.

따라서 본 논문에서는 고속화에 따른 토공상 콘크리트궤도의 거동 분석을 위해 열차속도 함수인 동적할증 충격계수와 설계하중을 매개변수로 선정하고 열차속도와 설계하중의 증감에 따른 콘크리트궤도층의 응력의 분석을 수행하였다. 또한 콘크리트궤도층 두께 변화에 따른 파라미터 분석을 하여 열차속도 증가에 따른 토공상 콘크리트궤도의 거동을 분석하였다.

2. 해석이론

2.1 해석개요

고속철도에서 적용되고 있는 현장타설식 연속 철근보강 콘크리트궤도는 주어진 하중에 대해 콘크리트궤도 슬래브와 기층의 응력이 허용응력을 초과하지 않도록 설계를 하고 있다. 콘크리트궤도의 설계법으

† 교신저자, (주)삼안, 철도사업부
E-mail : jikim2@samaneng.com
* (주)삼안, 철도사업본부
** (주)삼안, 철도사업부(*** 동일함)

로는 독일의 Dr.Eisenmann[1)]가 Odemark의 등가깊이이론을 이용하여 다층의 궤도구조를 단일층의 슬래브로 치환하여 응력 계산을 하였으며 또한 기층과 슬래브의 결합상태도 고려하였다. 그리고 흙노반의 지반 스프링상수는 노반의 탄성계수가 주어진다면 Boussinesq이론과 Odemark의 등가 깊이이론에 따라 노반스프링계수를 산정하여 적용토록 하였다.

2.2 흙노반의 스프링정수

슬래브궤도 하부 흙노반의 지지조건을 탄성스프링으로 치환하는 경우에 노반의 탄성계수가 주어진다면 Boussinesq이론과 Odemark의 등가 깊이이론에 따라 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$k_s = \frac{E}{h_e} \tag{1}$$

$$h_e = \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot h_i \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_u}} \tag{2}$$

여기서 k_s, h_e, h_i는 노반 스프링정수(MN/m) 및 가상 노반두께(m), i번째 층 두께(m)이고, E_i, E_u는 i번째 층의 탄성계수(MPa), 흙노반(강화노반)의 탄성계수(MPa)로 DIN 18134에서는 E_u는 E_{v2}로 가정할 수 있다. 또한 f_i는 각 층의 결합특성에 관한 상수로서 역철질 결합 또는 비결합은 0.9이고 수경성 결합은 0.83을 적용한다.

2.3 궤도슬래브 및 기층의 응력 계산

Eisenmann의 설계법에 따르면 슬래브와 기층의 결합상태에 따라 궤도층은 다른 응력거동을 나타낸다. 결합 또는 비결합 시스템에 대해 응력 계산은 시스템의 등가두께를 산정 후 대체시스템의 모멘트를 산정하고 각 층에서의 휨모멘트 및 휨응력을 산정한다.

비결합 시스템(System I)의 응력 계산은 다음과 같다. 먼저 기층과 궤도슬래브의 2개의 층을 Odemark의 등가 깊이이론을 이용하여 단일층의 슬래브(E=E_1)로 치환한다.

$$h_I = \sqrt[3]{\frac{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}{E_1}} \tag{3}$$

여기서, h_1, h_2는 궤도 슬래브와 기층의 두께이며 E_1, E_2는 궤도 슬래브와 기층의 탄성계수이다.

대체 시스템의 모멘트 산정은 트윈블럭침목(단침목)을 사용하는 경우 또는 침목을 사용하지 않는 경우는 선로직각방향에 대해서도 슬래브의 응력검토가 필요하므로 이 경우 판이론(plate theory)을 적용해야 한다. 판이론을 적용하는 경우 Westergaard 이론이나 Pikett-Ray 영향도표 또한 유한요소 해석 등의 방법을 적용하여 대체 시스템(k, h_I, E_1)에서의 모멘트 M_I을 계산한다. 그림1은 Westergaard에 의한 휨모멘트의 영향선을 보여주고 있다.

각 층에서의 휨모멘트(M_1,M_2) 및 휨응력(σ_1, σ_2) 산정은 아래 식(4) 및 (5)와 같이 계산한다.

$$M_1 = M_I \cdot \frac{E_1 \cdot h_1^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3}, \quad M_2 = M_I \cdot \frac{E_2 \cdot h_2^3}{E_1 \cdot h_1^3 + E_2 \cdot h_2^3} \tag{4}$$

$$\sigma_1 = 6 \cdot \frac{M_1}{h_1^2}, \quad \sigma_2 = 6 \cdot \frac{M_2}{h_2^2} \tag{5}$$

결합 시스템(System II)의 경우는 시스템의 등가두께를 아래 식(6)과 같이 계산한다.

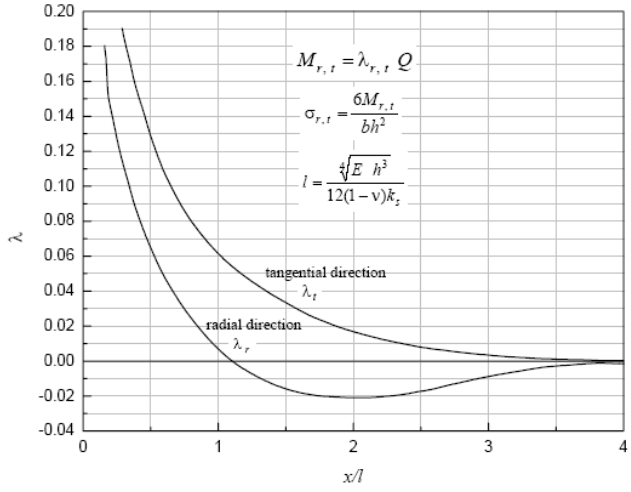

그림1. Westergaard에 의한 휨모멘트 영향선

$$h_{II} = h_1 + 0.9h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} \tag{6}$$

대체시스템의 모멘트 산정은 비결합의 경우와 마찬가지로 Westergaard 또는 Pikett-Ray 이론, 유한요소해석 등의 방법을 적용하여 대체 시스템(k, h_{II}, E_1)에서의 모멘트 M_{II}을 계산한다. 각 층에서의 휨응력 산정은 아래 식(7) 및 식(8)과 같이 상하부의 응력(σ_{1t}, σ_{1b}, σ_{2t}, σ_{2b})을 계산한다.

$$\sigma_{1t} = \frac{M_{II}}{I} \cdot e_o, \quad \sigma_{1b} = \frac{M_{II}}{I} \cdot (h_1 - e_o) \tag{7}$$

$$\sigma_{2t} = \kappa \cdot \frac{M_{II}}{I} \cdot (h_1 - e_o), \quad \sigma_{2b} = \kappa \cdot \frac{M_{II}}{I} \cdot e_1 \tag{8}$$

여기서 I는 슬래브 빔의 관성 모멘트(mm^4/mm)로 $\sum(I_i + A_i x_i^2)$과 같고, e_o, e_1은 등가시스템 중립축에서 상하부 연단까지의 거리이다.

2.4 허용응력의 검토

위에서 계산된 슬래브와 기층의 응력(종방향 및 횡방향 각각)은 다음 표1의 조건에 만족해야 한다.

표 1. 슬래브 및 기층의 허용응력 검토 기준

슬래브 응력	System I(비결합상태)		System II(결합상태)		비 고
	$E_{21} = E_{cd}$	$E_{22} = 0.5E_{cd}$	$E_{21} = E_{cd}$	$E_{22} = 0.5E_{cd}$	
슬래브	×	×	×	×	◯: 허용응력 이내(의무) △: 허용응력 이내(권장) ×: 허용응력 초과 허용
기 층	×	◯	◯	◯	

주) E_2: 기층의 탄성계수, E_{cd}: 탄성계수 설계값

슬래브의 응력은 허용응력을 초과하더라도 보강철근에 의해 충분한 하중전달이 이루어지므로 문제가 되지 않는다. 독일의 경험에 따르면 0.8~0.9%의 철근량을 적용하는 경우 균열폭은 0.5mm을 넘지 않는다. 다만 기층의 경우는 보강철근이 없기 때문에 기층에 발생하는 응력은 허용응력 이내에 있도록 해야 한다. 이 때 기층은 균열이 발생한 상태로 가정하여 탄성계수를 50%로 감소시킨다.($E_2 = E_{cd}$)

3. 콘크리트궤도의 거동 분석

3.1 궤도 입력 제원

궤도슬래브 설계변화 요인 분석을 위해 아래 표 2.와 같이 시나리오를 작성하였다. CASE1은 독일의 표준 현장타설 콘크리트궤도의 특성값으로 독일 인증기관인 EBA에 의해 검증된 특성값[2)]으로 작성하였으며 CASE2는 국내 궤도설계 사례를 반영하였다.

표 2. 궤도 입력 제원

구 분				단위	CASE1	CASE2	CASE 2/1
체결장치	C	:동적스프링계수		kN/mm	40.0	54.3	1.36
궤도 슬래브	w*h	:높이*폭		mm	3,200*240	3,200*240	
	f_{ck}	:설계기준강도		N/mm^2	C30/C37	C30	
	E	:탄성계수		N/mm^2	34,000	32,000	0.94
	f_a	:허용 응력	long.	N/mm^2	0.85	0.9	1.06
			trans.		2.10	1.7	0.81
기층	w*h	:높이*폭		mm	3,800*300	3,800*289	
	E	:탄성계수		N/mm^2	10,000	26,000	2.6
	f_a	:허용응력		N/mm^2	0.80	1.57	1.96
강화노반	t	:강화노반두께		mm	300	400	1.33

3.2 해석 매개변수

동적 충격계수와 설계하중으로 다음과 같이 변화율을 설정하였다.

충격계수는 열차속도 400km/h에서 검증된 식이 없어 철도설계편람[궤도편] 및 독일 등에서 열차속도 300km/h에서 검증되어 사용하는 아래 식(9)을 적용하였다

$$DAF = 1 + t \cdot \varphi (1.0 + 0.5 \cdot \frac{V-60}{190}) \quad (9)$$

여기서 V는 열차속도(km/h)이고 t는 표준편차 가중치로 레일 응력, 체결장치, 침목 구조계산에는 3(확률 99.7%)을 적용하고 접촉응력, 노반 구조계산에는 1(확률 68.3%)을 적용한다. φ는 궤도품질 지수로 콘크리트궤도는 매우 양호한 경우로 0.1을 적용한다.

표 3. 열차속도에 따른 충격계수 및 증감율

속 도	km/h	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
충격계수	-	1.29	1.33	1.37	1.41	1.45	1.49	1.53	1.57	1.61	1.65
증 감 율	%	14	29	43	57	71	86	100	114	129	143

설계하중은 호남고속철도 표준활하중(여객전용)으로 하였으며 하중 민감도 해석은 표준축중 250kN(100%)에서부터 200kN(80%), 150kN(60%), 125kN(50%)으로 4가지 경우를 적용하였다.

3.3 해석결과

열차속도와 표준축중을 증감시키면서 궤도슬래브층과 기층의 응력을 계산한 결과는 다음과 같다. 그림2에서 5은 설계축중이 250kN인 경우 궤도슬래브층과 기층의 횡방향(trans)과 종방향(longited) 응력을 비결합(System I)과 결합조건(System II)의 경우를 고려하여 해석한 결과로 응력의 경향은 열차속도의 증가에 따

라 궤도층의 응력은 증가하는 경향을 나타냈다. 궤도의 최대응력은 비결합의 궤도슬래브의 횡방향 응력($\sigma_{1,trans}$)에서 발생하였으며 궤도층의 응력은 슬래브의 응력(σ_1)이 기층의 응력(σ_2)보다 높게 나타났다.

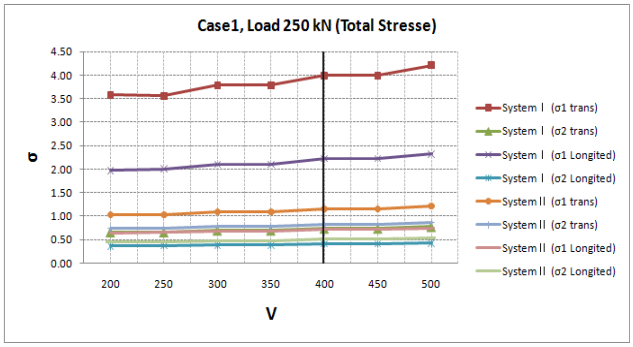

그림 2. CASE1의 최대휨인장응력

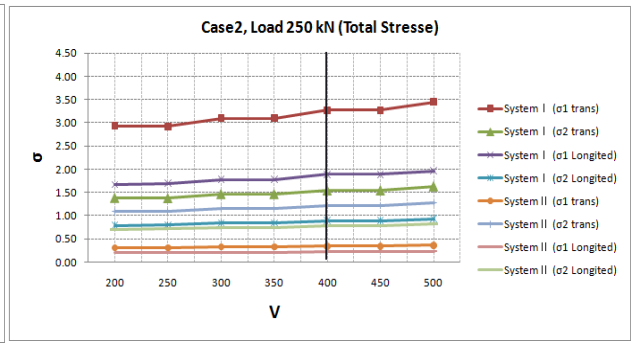

그림 3. CASE2의 최대휨인장응력

궤도의 응력결과 중에서 허용응력 의무조건을 만족해야하는 결합조건의 궤도 기층 응력중 횡방향 응력을 허용응력과 비교한 결과 그림 4~5와 같은 경향을 나타내었다. 그림 4의 CASE1의 경우 기층의 횡방향 응력($\sigma_{2,trans}$)은 열차속도 400km/h에서 설계하중이 250kN일 경우는 독일의 허용응력 기준을 초과하는 경향을 나타내었으며 설계하중을 200kN으로 낮추었을 경우는 열차속도 500km/h까지 안전함을 확인하였다. 그림 5의 CASE2의 경우는 열차속도가 500km/h까지 증가하고 설계하중을 250kN까지 적용하여도 발생응력은 증가하지만 기층의 탄성계수증가에 따른 허용응력 증가로 안전하였다.

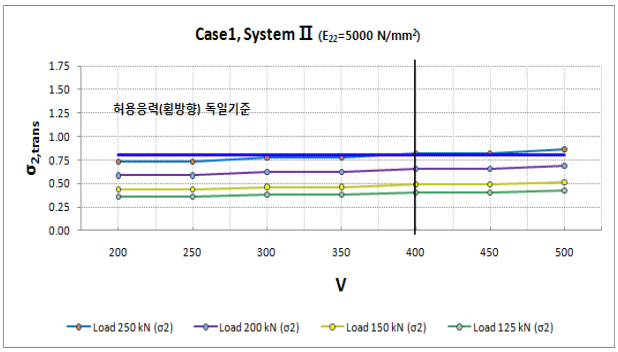

그림 4. CASE1 결합조건 궤도기층 응력

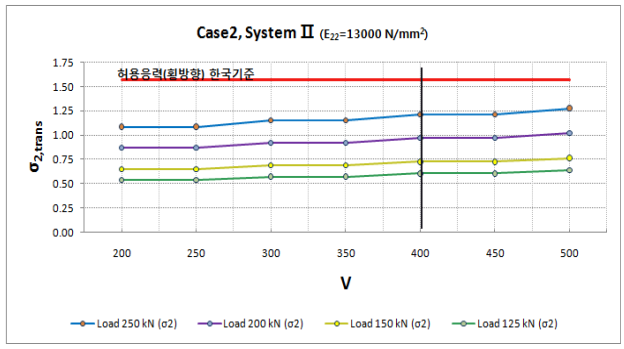

그림 5. CASE2 결합조건 궤도기층 응력

열차속도 및 설계하중과 궤도층 두께와의 상관성을 분석하기 위해 궤도의 두께를 증가시켜 계산을 수행하였다. 그림6과 7은 슬래브층 해석결과는 횡방향 응력은 두께가 증가할수록 응력이 증가하는 경향을 나타났으며, 기층의 탄성계수가 높은 Case2에서 슬래브층의 응력이 더 낮게 발생하였다.

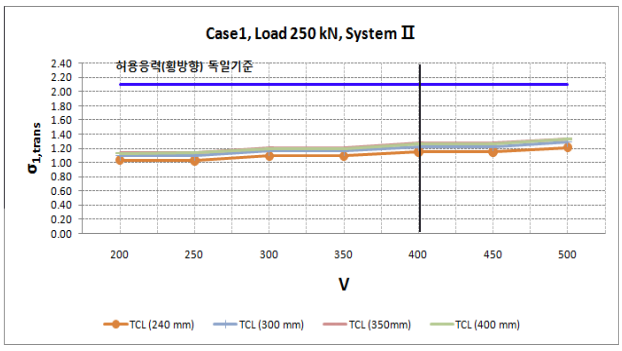

그림 6. CASE1 슬래브층 두께 변화 응력

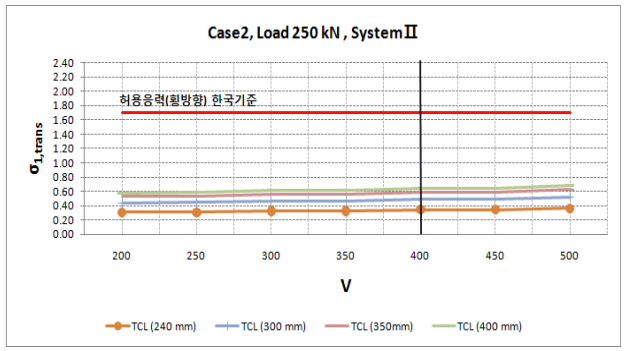

그림 7. CASE2 슬래브층 두께 변화 응력

또한 궤도 기층의 두께를 증가시켜 분석한 결과 기층의 종방향 응력은 두께가 증가할수록 응력이 감소하는 경향을 나타냈으며 CASE1의 경우 기층의 종방향 응력은 설계하중이 250kN이고 열차속도가 400km/h일 때 두께가 300mm인 경우만 발생응력이 허용응력을 초과하며 그 외의 모든 두께에서는 모두 허용응력 이내로 안전함이 확인되었다.

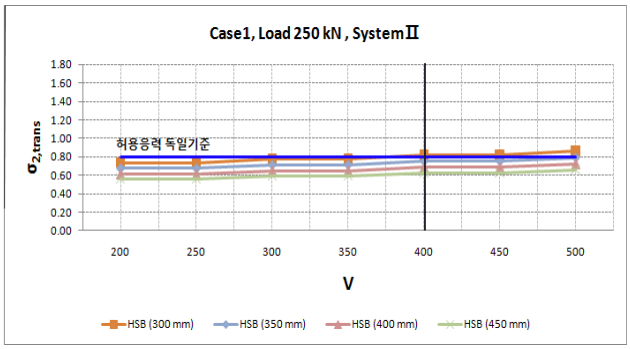

그림 8. CASE1 궤도 기층의 두께별 응력

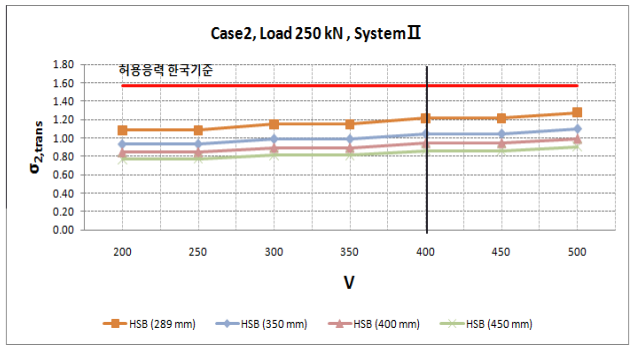

그림 9. CASE2 궤도 기층의 두께별 응력

4. 결론

본 연구는 열차 운영속도 400km/h이상 증가에 따른 토공상 콘크리트궤도의 거동특성 분석을 위해 Eisenmann의 설계법으로 열차속도의 함수인 충격계수와 설계하중을 파라미터로 콘크리트궤도 각 층의 응력을 계산하였다. 해석결과 독일의 표준단면궤도 Case1에서는 열차속도 400km/h와 설계축중 250kN 조건에서 궤도층의 발생응력이 허용응력을 초과하여 설계축중의 감소나 궤도단면의 재설계가 필요할것으로 판단된다. 국내 궤도설계 사례 Case2는 기층의 탄성계수가 독일 기준에 비해 2.6배 높아 허용응력이 독일 기준에 비해서 1.96배 높은 사유로 인해 발생응력이 상대적으로 높으나 열차속도 400km/h에서도 허용응력 이내로 안전함을 확인하였다. 또한 궤도층의 두께를 변화시키며 분석을 한 결과 슬래브층 응력은 두께가 증가할수록 증가하는 경향을 기층 응력은 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다.

따라서 열차속도에 따라 더욱 안전한 궤도설계를 위해서는 궤도층의 탄성계수와 두께의 조정에 의해 설계단면의 최적화가 가능할 것으로 판단된다. 상기의 분석은 300km/h까지의 경험으로 검증된 동적충격계수를 사용하였으며, 향후 400km/h급에서 검증된 동적충격계수 연구결과 반영할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부에서 지원한 "400km/h급 고속철도 인프라 시범적용 기술개발" 과제에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Eisenmann, Leykauf, "Beton Kalender 20000", Ernst & Sohn, pp. 11-15, 2000.
2. Eisenbahn-Bundesamt, "Antrag auf Zulassung für die Feste Fahrbahn(FF), System Rheda2000 für Gleise", 2000.07.04