

곡선부 장대레일 궤도의 거동 특성에 관한 연구

The Study on the Behavior of Curved CWR Track under Thermal Load

이원경* 성덕룡** 김만철*** 박용걸****
Lee, Won Gyeong Sung, Deok Yong Kim, Man Cheol Park, Yong Gul

ABSTRACT

The use of the CWR track has increased consistently in the worldwide. Because the use of CWR track not only reduces the track maintenance cost, noise and vibration, but increases the life cycle of track components. Therefore, to increase train speed, improve riding condition and secure running stability, the necessity of study on making CWR is increasing.

This study includes the development of a thermal buckling theory in the evaluation of curved track stability. The lateral stability of curved CWR is studied for track buckling prevention through the parameter studies. It studied the lateral buckling of the curved CWR track on the 3-D nonlinear analysis. The parameters include rail size, cant, track curvature.

1. 서론

최근 열차의 고속화와 승차감 향상 및 유지보수의 편리성에 대한 사회적 관심이 증대되면서 차량의 개발뿐만 아니라 신궤도시스템의 개발 및 유지관리에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히 기존 레일의 이음매에서 발생하는 열차의 동적 충격은 이음매판의 마모, 체결력의 이완, 침목의 파손, 이음매의 처짐, 노반 배수의 불량 등 궤도파괴의 주요한 요인이었다. 이러한 취약개소를 줄이기 위해 레일의 이음매 부분을 제거하고 서로 연속적으로 용접하여 수백 미터 혹은 수 킬로미터까지 연결되는 장대레일의 사용이 전세계적으로 급증하고 있다. 이는 궤도파괴와 소음·진동 문제 및 보수구간을 줄일 수 있는 등의 장점이 있으나 레일 체결장치와 침목 및 도상에 의해 종방향 이동이 억제되므로 온도변화에 따른 신축을 하지 못한다. 따라서 억제된 신축량은 레일 내부의 에너지(축응력)로 축적되며 이러한 에너지가 과다할 시에는 레일의 좌굴 및 파단 등의 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 좌굴메커니즘에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. Kerr(1980)는 초기에 순수 온도변화에 따른 직선 장대레일 궤도의 좌굴에 대하여 연구하였으며, 후에 궤도의 종방향 저항의 비선형성을 고려한 정적 좌굴온도에 대한 연구를 하였다.⁽²⁾ 이후 레일크기, 초기변형, 체결구의 비틀림 강성 등 여러 가지 변수의 영향을 고려한 정적 좌굴 연구가 있었으며⁽³⁾ 이와 함께 궤도의 안정성을 해석하는데 중요한 좌굴온도와 에너지에 대한 관계를 규명하는 연구도 활발히 이루어졌다.⁽⁴⁾

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정, 정회원

** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정, 정회원

*** 한국철도기술연구원 궤도구조연구팀 선임연구원, 정회원

**** 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수, 정회원

이러한 연구들을 바탕으로 국내에서는 장대레일 궤도의 좌굴안정성을 평가하기 위해 최저좌굴강도를 기본으로 하여 약 20%정도의 여유를 갖는 궤도구조를 정하고 도상저항력 확보를 위한 관리를 하고 있다. 그러나 최저좌굴강도는 실제의 좌굴하중과는 상이하며 이론상의 좌굴하중은 일반적으로 최저좌굴강도보다 크다. 이론상 좌굴하중과 최저좌굴하중의 차이는 곡선반경이 작을수록 작아지며 최저좌굴강도에 기초를 둔 종래의 좌굴안정성의 평가는 곡선반경이 작을수록 좌굴안전율이 낮아지게 된다. 따라서 급곡선에서 장대레일을 적용할 때 정량적으로 평가하는 것이 필요하다. 하지만 온도하중에 의해 전 궤도구간에 일정한 축응력이 발생하는 직선궤도와는 달리 곡선부에서는 곡률에 따라 매우 복잡한 거동 특성을 보인다.

이에 따라 본 연구에서는 직선부 장대레일 궤도구조의 좌굴특성을 제시하고 곡선부 장대레일궤도의 좌굴특성을 파악하기 위한 거동 특성 및 좌굴이론을 파악하고자 하였으며 장대레일의 안전성 향상을 도모하여 효율적인 유지관리에 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 장대레일 궤도의 좌굴특성

1) 레일의 신장

Fig 1. 과 같이 레일이 휘어지게 되면 좌굴부분의 레일은 늘어나게 되어 레일의 변형에너지는 감소하게 된다. Fig 1.의 좌굴모양은 실험결과 sine 곡선 파형과 유사한 파형임이 알려져 있다.

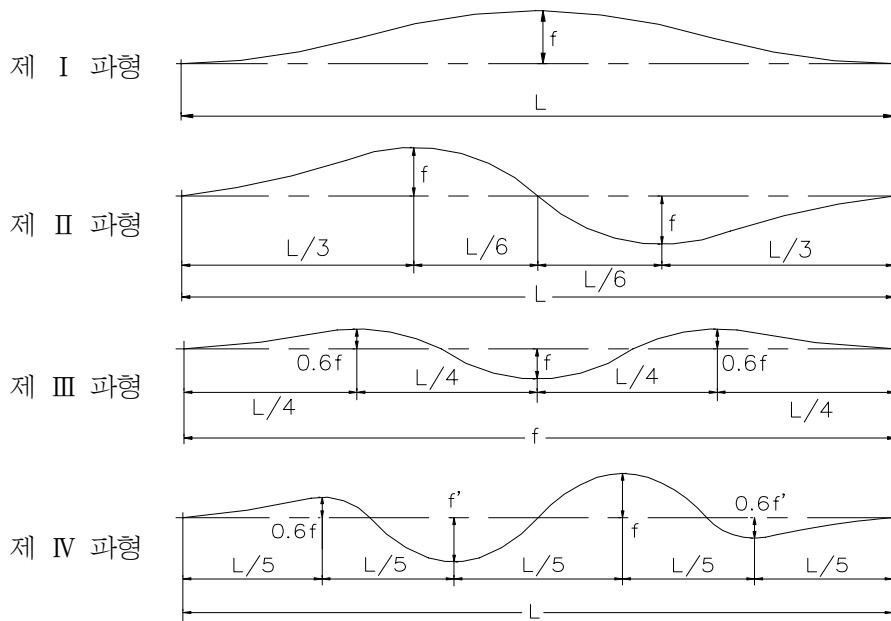


Fig 1. 좌굴파형의 분류

2) 궤도의 휨

궤도의 휨강성은 레일 체결장치의 회전저항에 의하여 레일 2분의 휨강성보다도 크게 되며, 좌굴에 의하여 궤도가 꺾이게 되면 내부에너지는 증가하게 된다.

3) 도상횡저항력에 대한 작용

궤도가 횡변형한다는 것은 도상횡저항력을 초과하는 횡압이 작용된 것을 의미한다.

4) 도상종저항력에 대한 작용

Fig 2.의 축응력분포에서 명확하게 나타난 바와 같이 좌굴부분의 인접한 부분에서는 레일이 좌굴부분으로 향하여 양측으로부터 이동한다. 즉, 이 부분에서는 도상종저항력을 초과하는 횡압이 작용된 것을 의미한다.

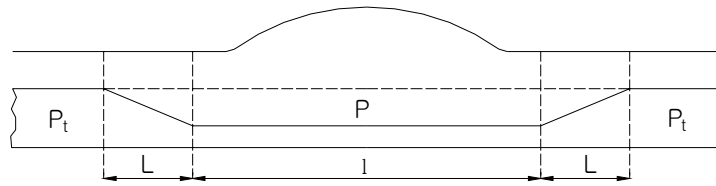


Fig 2. 좌굴후 축응력분포

궤도 좌굴이론 계산은 에너지와 운동량의 평형상태를 가정한 「가상일의 원리」를 적용함으로써 구할 수 있으며, 좌굴강도를 나타낸 식은 다음과 같다.

$$P_t = P + \sqrt{\frac{\gamma^2 r^2}{P} + \frac{\alpha r}{P^3 \sqrt{P}} \left\{ \left(g - \xi \frac{P}{R} \right)^2 + k \left(g - \xi \frac{P}{R} \right) \frac{P}{R} \right\}} - \frac{\gamma r}{\sqrt{P}} \quad \text{식 (1)}$$

여기서,

- P_t : 좌굴하기 직전의 레일 축압력 (궤도의 좌굴강도) (kgf)
- P : 좌굴후 평형상태에 있을 때의 축압력 (평형축응력) (kgf)
- J : 궤도강성을 고려한 레일의 수직축 단면 2차모멘트 (cm^4)
- $\mu \ \varphi \ \xi$: 좌굴과형에 의하여 정하여지는 상수
- $n=1$ 일 때 $\mu = 8.8857, \ \varphi = 7.7714, \ \xi = 1$
- $n=2$ 일 때 $\mu = 7.9367, \ \varphi = 0, \ \xi = 0$
- g : 도상 횡저항력 (1본 레일당 환산) (kgf/cm)
- E : 레일의 탄성계수 2.1×10^6 kgf/cm²

$$\gamma = \frac{(n+1)\sqrt{2\pi EJ}}{2} \quad \alpha = 8\mu E^2 JA \sqrt{EJ} \quad k = \frac{\varphi}{2\mu}$$

- n : 좌굴과형의 수
- r : 도상 종저항력 (kgf/cm)
- A : 레일의 단면적 (cm^2)
- R : 궤도의 곡선반경 (cm)

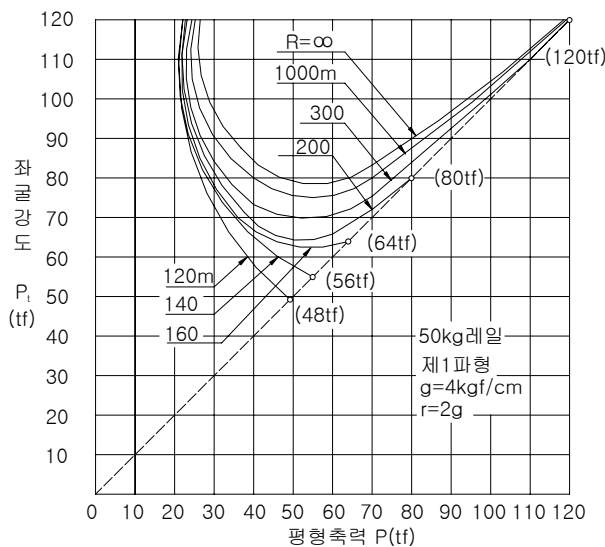


Fig 3. 곡선반경과 좌굴강도

위 식에 의하여 P의 여러 값에 대하여 50kg 레일, 도상횡저항력 $g=4\text{kgf/cm}$, 도상종저항력이 도상횡저항력의 2배라고 가정하였을 때의 좌굴강도 P_t 는 Fig 3과 같이 구할 수 있다.

3. 장대레일 좌굴이론

Fig 4. 는 레일의 온도좌굴 곡선을 나타내는데 상부좌굴온도($T_{b,max}$)는 외부의 하중이나 에너지의 도입 없이 좌굴이 발생되는 온도증가를 의미하며, 하부 좌굴온도($T_{b,min}$)는 외부의 하중이나 에너지의 도입시에 좌굴이 발생할 수 있는 최소의 온도증가를 의미한다. Fig 4. 의 현상처럼 갑자기 좌굴이 발생한 경우는 급진적인 좌굴이라 하고, Fig 5. 와 같이 두 개의 좌굴온도가 한 점에서 일치하는 경우 점진적 좌굴이라 한다.

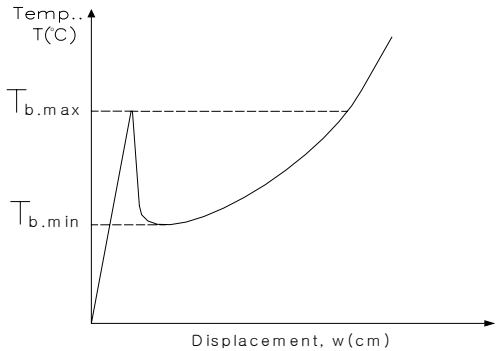


Fig 4. 급진적 좌굴온도 곡선

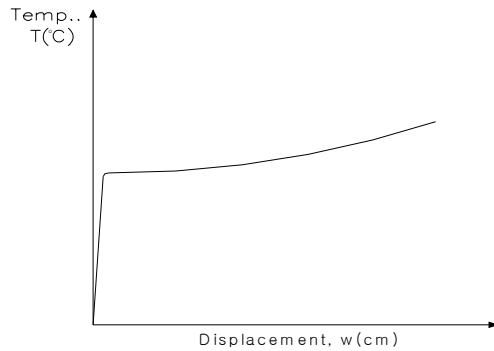


Fig 5. 점진적 좌굴온도 곡선

Fig 6. 은 곡선 장대레일 궤도의 좌굴 전과 좌굴후의 기하학적 형상을 보인 것이다. 기본가정은 좌굴영역에서는 종방향 변위는 무시하고, 인접영역에서는 횡방향 변위는 무시한다.

좌굴영역 ($0 \leq \theta \leq \theta$)의 횡방향 미분 방정식은 탄성으로 연속지지된 보의 해석과 링효과를 고려하여 식 (1) 과 같이 표현될 수 있다.

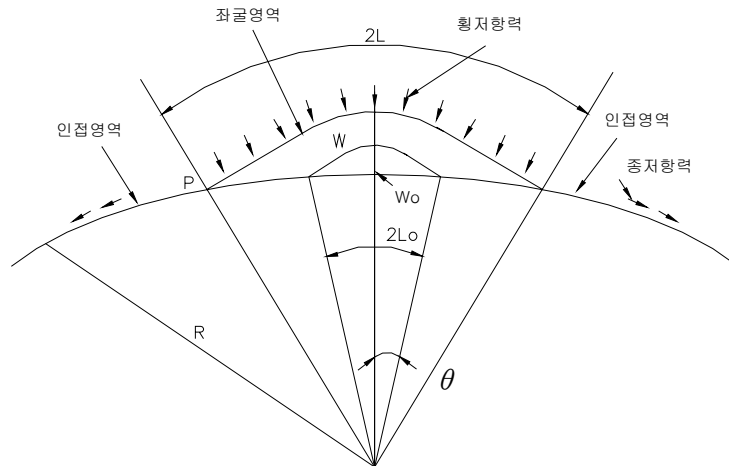


Fig 6. 곡선 CWR 궤도의 좌굴전과 좌굴후의 형상

$$\frac{EI_{zz}}{R^4} \frac{d^4 w}{d\theta^4} + \frac{(\bar{P} - \tau_0)}{R^2} \frac{d^2 w}{d\theta^2} = -F[u(\theta)] + \frac{\bar{P}}{R} - \frac{\bar{P}}{R^2} \frac{d^2 w_0}{d\theta^2} \quad (2)$$

여기서, $u(\theta)$ 는 횡방향 변위, E는 탄성계수, R은 궤도의 곡선반경, I는 횡방향 휨에 대한 레일의 단면 2차 모멘트, $F[u(\theta)]$ 는 횡방향 저항분포 함수, τ_0 는 체결재의 단위길이당 선형 비틀림 강성, \bar{P} 는 레일의 압축응력이고, w_0 는 횡방향 초기변형 결함이다. 식 (2)에서 사용된 변수들을 다음 식으로 나타낼 때, θ

$$u(\theta) = \sum_{m=1,3,5..}^{\infty} A_m \cos\left(\frac{n\pi\theta}{2\phi}\right) \quad (3)$$

$$\frac{d^2 w_0}{d\theta^2} = \sum_{m=1,3,5..}^{\infty} b_m \cos\left(\frac{n\pi\theta}{2\phi}\right) \quad (4)$$

$$F[u(\theta)] = \sum_{m=1,3,5..}^{\infty} a_m \cos\left(\frac{n\pi\theta}{2\phi}\right) \quad (5)$$

$$\frac{\bar{P}}{R} = \sum_{m=1,3,5..}^{\infty} \frac{\bar{P}}{R} c_m \cos\left(\frac{n\pi\theta}{2\phi}\right) \quad (6)$$

식 (3)-(6)를 식 (2)에 대입하면 식 (7)을 구할 수 있다.

$$A_m = \frac{-(a_m - \frac{\bar{P}}{R} c_m + \frac{\bar{P}}{R^2} b_m)}{\frac{EI}{R^4} \left(\frac{n\pi}{2\phi}\right)^4 - \left(\frac{\bar{P} - \tau_0}{R^2}\right) \left(\frac{n\pi}{2\phi}\right)^2} \quad (7)$$

경계조건 $(w, F, \frac{d^2 w_0}{d\theta^2} = 0 @ \theta = \pm\phi$ 와 $w' = 0 @ \theta = \pm\phi)$ 을 식 (3)-(7)에 적용시키면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$w'(\phi) = \sum_{m=1,3,5..}^{\infty} mA_m \sin\left(\frac{n\pi\theta}{2\phi}\right) = 0 \quad (8)$$

식 (8)에서 좌굴길이 L을 가정한 후 압축하중 \bar{P} 를 반복계산으로 구할 수 있다.

인접영역 $(\theta > \phi)$ 에서의 미분방정식은 종방향으로의 평형상태로부터 유도할 수 있다. 또한 비례적인 종방향 저항이 가정된다면 인접영역에서의 미분방정식은 아래와 같다.

$$\frac{AE}{R^2} \frac{d^2 u}{d\theta^2} = k_f u \quad (9)$$

여기서, $dx = R d\theta$, u 는 종방향 변위, A는 두개 레일의 단면적이다. 식 (9)의 일반해는 x 값이 무한이 될 때, 경계조건식 $u = u' = 0$ 을 적용하면 다음과 같다.

$$u(x) = Ce^{-\phi x} \text{ or } u' = -\phi u \quad (10)$$

여기서, $\phi^2 = k_f / AE$ 이다.

횡방향 저항 효과를 설명하는 Fourier 상수 a_m 은 다음의 적분 항으로 유도된다.

$$a_m = \frac{2}{\phi} \int_0^{\phi} F[u(\theta)] \cos\left(\frac{n\pi\theta}{2\phi}\right) d\theta \quad (11)$$

또한, 초기변형을 4차 다항식으로 가정할 때

$$w_0(\theta) = \delta_0 \left[1 - 2\left(\frac{\theta}{\phi_0}\right)^2 + \left(\frac{\theta}{\phi_0}\right)^4 \right] \quad (12)$$

초기변형 효과를 설명하는 Fourier 상수 b_m 은 다음과 같이 유도된다.

$$b_m = \frac{2}{\phi} \int_0^{\phi} \frac{d^2}{d\theta^2} \cos\left(\frac{n\pi\theta}{2\phi}\right) \quad (13)$$

여기서, $\phi' = \begin{cases} \phi & \text{if } \phi \leq \phi_0 \\ \phi_0 & \text{if } \phi > \phi_0 \end{cases}$ 이며, ϕ_0 는 초기 결합 반과장 각도이다. 식 (12)을 식 (13)에 대입 적분하면 아래와 같다.

$$\frac{b_m}{R^2} = -\frac{16\delta_0}{m\pi L^2} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \left[1 - 3\left(\frac{L}{L_0}\right)^2 - 2\left(\frac{2}{m\pi}\right)^2\right] \quad \phi \leq \phi_0 \text{ 경우} \quad (14)$$

$$\frac{b_m}{R^2} = -\frac{16\delta_0}{m\pi L^2} \left[-6\left(\frac{L}{L_0}\right)\left(\frac{2}{m\pi}\right)\cos\left(\frac{m\pi L_0}{2L}\right) + 2 - 1 + 3\left(\frac{2L}{m\pi L_0}\right)^2 \sin\left(\frac{m\pi L_0}{2L}\right)\right] \quad \phi > \phi_0 \text{ 경우} \quad (15)$$

또한, 곡선의 링효과를 고려한 Fourier 상수 C_m 은 다음과 같다.

$$c_m = \frac{2}{\phi} \int_0^\phi \cos\left(\frac{m\pi\theta}{2\phi}\right) d\theta = \frac{4}{m\pi} \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) \quad (16)$$

온도의 영향을 고려한 계산식은 좌굴영역과 인접영역에서의 종방향 변위의 연속성을 만족시키는 다음 식으로 유도된다.

$$U(\phi) = -\frac{\overline{PR}\phi}{AE} - ZR + aTR\phi \quad (17)$$

$$U'(\phi) = -\frac{\overline{PR}}{AE} + aTR \quad (18)$$

여기서, ZR 은 겹보기 변형길이를 정의되고, 초기변형과 곡률이 있을 경우를 생각하면 아래식과 같게 되며,

$$ZR = \int_0^\phi \left(-\frac{w'^2}{2R^2} + \frac{w'_0 w}{R^2} - \frac{w'\theta}{R}\right) R d\theta \quad (19)$$

식 (3)과 식 (4)을 식 (19)에 대입하여 적분식을 풀면, 다음과 같은 식이 유도된다.

$$ZR = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left[-\frac{2L}{m\pi R} A_m \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right) + \frac{A_m^2}{4L} \left(\frac{m\pi}{2}\right)^2 - \frac{A_m b_m L}{2R^2} \right] \quad (20)$$

식 (17)과 식 (18)을 식 (10)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{\overline{P}}{AEa} + \frac{ZR\phi}{a(1+\phi L)} \quad (21)$$

3. 수치해석

3.1 해석모델

곡선부 장대레일 궤도의 좌굴해석을 위하여 사용된 궤도의 제원은 Table 1과 같다. 여기서 궤도의 길이에 따라 최소좌굴온도는 민감하게 반응하며 궤도연장 200m이상의 구간에서 최소좌굴온도가 수렴해⁽¹⁰⁾가므로 해석을 위해 필요한 궤도연장을 200.4m로 산정하였으며 궤도전체에 걸쳐 곡률을 도입하여 모델링하였다. 레일과 침목은 frame요소로 모델링하였으며 체결구와 자갈도상에 대해서는 종·횡·수직·회전저항력은 비선형 스프링요소로 모델링하였다. Table 2는 문헌자료를 기초로 하여 어깨더푼기높이 20cm에 대한 도상 스프링계수와 체결구시스템에 대한 스프링계수값이며 Table 3은 해석조건에 따른 분류를 나타낸다.

Table 1. 궤도의 제원

전 체	궤도연장(m)	침목길이(cm)		궤간(cm)	침목간격(cm)		
	200.4	250		143.5	60.0		
레 일	구 분	A (cm ²)	I (cm ⁴)	E (kN/cm ²)	G (kN/cm ²)	β	ν
	50kg	64.21	332.02	2.1×10 ⁴	8×10 ³	1.14×10 ⁻⁵	0.3
	60kg	77.20	508.96	2.1×10 ⁴	8×10 ³	1.14×10 ⁻⁵	0.3
	UIC60	76.69	510.45	2.1×10 ⁴	8×10 ³	1.14×10 ⁻⁵	0.3
	70kg	88.38	632.71	2.1×10 ⁴	8×10 ³	1.14×10 ⁻⁵	0.3
목 침 목	A (cm ²)	Ix (cm ⁴)		Iy (cm ⁴)	E (kN/cm ²)		
	361.3	9518		12431.6	1.23×10 ³		

Table 2. 저항 계수값(도상어깨폭: 20cm의 경우)

도상 ⁽⁷⁾	K _H (kN/cm)	K _V (kN/cm)	K _L (kN/cm)	K _θ (kN/cm)		
	0.0348	1.76	5.0	85.74		
체 결 구 시스템	K _x (kN/cm)	K _y (kN/cm)	K _z (kN/cm)	K _{θx} (kN/cm)	K _{θy} (kN·cm/rad)	K _{θz} (kN·cm/rad)
	52.6	263.02	350.69	166.3×10 ²	166.3×10 ²	166.3×10 ²

Table 3. 해석조건에 따른 분류

곡선반경에 따른 분류	직선궤도	R 300	R 600	R 900	R 1200	R 1500
캔트랑에 따른 분류 (R 300일 경우)	C 0	C 50	C 100	C 150	C 200	C 250

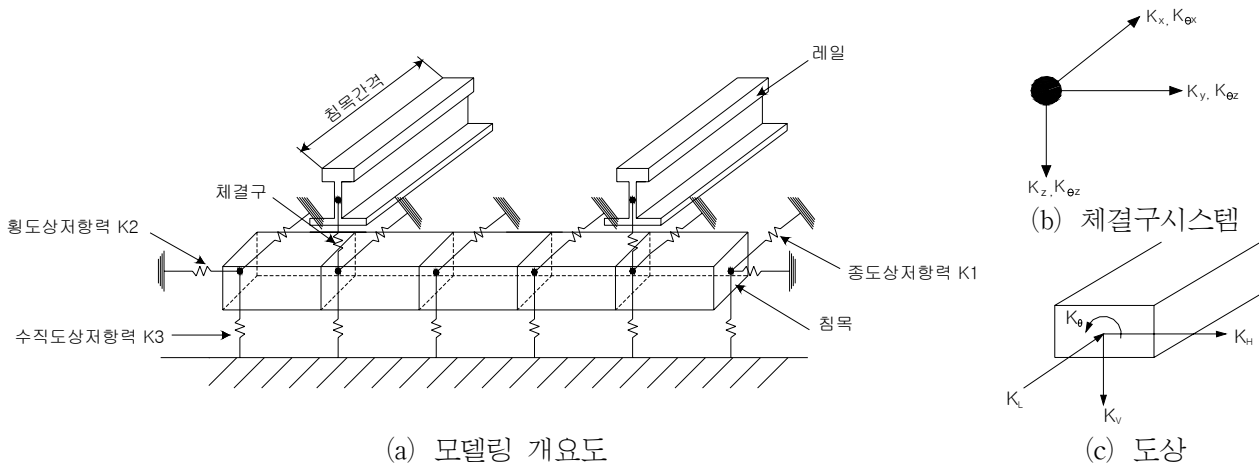


Fig 7. 모델링

3.2 해석에 대한 기본가정

온도하중에 의한 곡선 장대레일 궤도의 거동을 파악하기 위해 모델링한 3차원 해석모델은 다음과 같은 기본가정을 전제로 한다.

- ① 단면은 변형후에도 원래의 단면을 유지한다.
- ② 단면의 중앙면에 발생하는 전단변형률은 무시할 수 있을 정도로 작다.
- ③ 휨에 의해 발생하는 법선응력의 축방향 변화에 따른 전단변형률은 무시할 수 있을 정도로 작다.
(Euler-Bernoulli의 가정)

4. 해석결과 및 분석

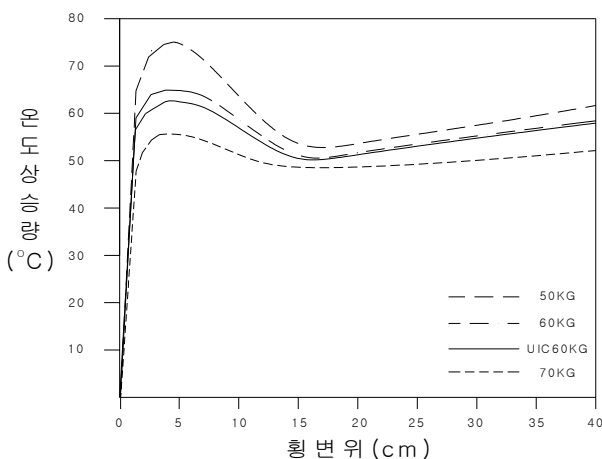
4.1 레일 종류

Fig 3. 으로부터 50kg레일에 대해 곡선반경이 커질수록 좌굴강도가 커지는 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 곡선반경 600m의 장대레일 궤도에서 레일의 종류에 따른 좌굴의 영향을 알아보기 위해 현재 국내에서 주로 사용하고 있는 KS 50kg, 60kg, 70kg와 UIC 60kg을 대상으로 하절기 온도 45℃에 의한 축응력 및 모멘트를 검토하였으며 레일의 종류에 따른 좌굴온도를 검토하였다. 검토결과, 레일의 단면적이 커짐에 따라 축응력이 크게 발생하며 KS 60kg레일보다 UIC 60kg의 경우가 축응력이 다소 적게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, Fig 8. (b)를 보면 레일의 크기에 따른 발생 모멘트가 축응력과 같은 경향이 나타나는 것을 알 수 있으며 Fig 9.에서는 레일의 최저좌굴강도가 레일의 크기가 커짐에 따라 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, 레일의 크기가 커질수록 상·하부 좌굴온도의 차이가 작아져 좌굴에 불리한 것으로 나타났다. 이는 레일의 단면적이 증가함에 따라 온도하중에 의한 영향(축응력 및 모멘트)이 동시에 증가되어 레일의 휨강성 증가에 대한 효과를 상쇄시키기 때문이다.

(a) 레일크기 - 축응력

(b) 레일크기 - 모멘트

Fig 8. 레일 종류의 영향(R=600)



(a) 좌굴온도 곡선

(b) 레일 종류 - 좌굴온도

Fig 9. 레일 종류 따른 좌굴온도 곡선

4.2 곡선반경

본 연구에서는 60kg레일, 목침목, 캔트량이 0인 궤도에 곡선반경을 300, 600, 900, 1200, 1500m로 변화시켜 레일에 발생하는 축응력과 모멘트의 변화를 검토하였으며, 그 결과를 Fig 10에 나타내었다. Fig 10.

(a)를 보면 곡선반경이 작을수록 레일에 발생하는 축응력은 작게 나타났으며 곡선반경 1200m이상의 궤도에서는 곡선반경에 따른 축응력의 변화가 매우 작은 것으로 나타났다. 또한, Fig 10. (b)에서와 같이 곡선반경이 작을수록 모멘트가 크게 발생하며 곡선반경이 커질수록 모멘트변화량이 작은 것으로 나타났다. 이는 곡선궤도 레일의 경우 온도팽창에 의해 발생하는 포텐셜에너지가 곡선반경에 비례하여 모멘트로 치환되기 때문이다. 또한, Fig 10. (c)로부터 곡선반경이 증가할수록 모멘트/축응력의 비가 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 모멘트/축응력의 비가 좌굴에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

(a) 곡선반경 - 축응력

(b) 곡선반경 - 모멘트

(c) 곡선반경 - 모멘트/축응력

Fig 10. 곡선반경에 따른 축응력 및 모멘트 검토(60kg Rail)

4.3 캔트량

곡선부에서는 내·외측레일에 발생하는 원심력을 줄이고 차량의 중심이 궤간중심에 오도록 하기 위해 캔트량을 산정하여 곡선부를 설계한다. 따라서 본 연구에서는 곡선 장대레일 궤도에서 캔트량의 변화에 따른 레일의 축응력 및 모멘트를 알아보기 위해 곡선반경이 600m인 궤도에 대해 캔트량을 0, 50, 100, 150, 200, 250mm로 하여 검토하였으며 그 결과를 Fig 11.에 나타내었다. 해석 결과, 캔트량이 증가함에 따라 내·외측레일의 축응력이 감소하고 모멘트가 증가하는 경향이 나타났으며 이는 외측레일에서 더 크게 발생하였다. 이는 외측레일에 캔트량을 부여함으로써 축방향의 포텐셜에너지가 모멘트로 발생하는 것으로 판단된다.

(a) 캔트량 - 축응력 (b) 캔트량 - 모멘트
Fig 11. 캔트량에 따른 축응력 및 모멘트 검토 (R=600m, KS60kg)

5. 결 론

본 연구는 온도하중에 의한 곡선부 장대레일 궤도의 거동 특성에 대한 연구로써, 좌굴에 영향을 미치는 축응력과 모멘트의 영향을 파악하기 위한 해석을 수행하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 레일의 크기가 커지면 레일의 휨강성과 단면2차모멘트가 커지지만 단면적이 증가하여 온도하중의 영향을 많이 받게되므로 좌굴강도가 낮아지는 것으로 분석되었다.

(2) 곡선반경이 증가함에 따라 축응력은 증가하였으며 모멘트는 감소하였다. 이러한 결과는 곡선 장대 레일 궤도의 경우 온도팽창에 의해 발생하는 포텐셜에너지가 곡선반경에 비례하여 모멘트로 치환되기 때문이며 곡률이 증가할수록 모멘트/축응력의 비가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 모멘트/축응력의 비가 좌굴에 미치는 영향이 크다는 것을 의미한다.

(3) 캔트량이 증가함에 따라 내·외측레일의 축응력이 감소하고 모멘트가 증가하는 경향이 나타났으며 이는 외측레일에서 더 크게 발생하였다. 이는 외측레일에 캔트량을 부여함으로써 축방향의 포텐셜에너지가 모멘트로 발생하는 것으로 나타났다.

(4) 따라서 곡선부 장대레일 궤도에서는 캔트량에 따라 외측레일에서 발생하는 모멘트와 열차의 주행에 의한 횡압이 작용할 경우 궤도에 발생하는 축응력과 모멘트가 더욱 커질 것으로 이러한 거동 특성을 감소시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 지속적으로 있어야 할 것이다.

참고문헌

1. A. D. Kerr, "Lateral buckling of railroad tracks due to constrained thermal expansions - a critical survey, in Railroad Track Mechanics and Technology" Proceedings of Symposium held at Princeton University, 21-23 April 1975.
2. G. Samavedam, A. Kish, and D. Jeong. Influence of Vehicle Induced Loads on the Lateral Stability of CWR Track, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 1985, Dot/FRA/ORD-85-3.
3. G. Samavedam, A. Kish, A. Purple, and J. Schoengant, Parametric Analysis and Safety Concepts of CWR Track Buckling, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 1993, Dot/FRA/ORD-93/26
4. Kish A. (1982), Analysis of Thermal Buckling Tests on U.S. Railroads, FRA/ORD-82/45

5. A. D. Kerr, An analysis of thermal track buckling in lateral plane, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Report No. 1976, FRA/DOSD-76-285
6. 백효순, “곡선부 장대레일 궤도의 좌굴안전성 평가”, 1999, 성균관대학교 산업대학원 토목공학과 석사논문.
7. 안흥환, “궤도 구성 인자들이 장대레일 궤도 안정성에 미치는 영향”, 2004, 고려대학교 토목환경공학과 석사논문.
8. 김호배, “직선 장대레일 궤도의 좌굴온도”, 대한토목학회 학술 발표회의, 1998. Vol., 4, pp. 253-256.
9. 서상철, “온도하중에 의한 장대레일 궤도의 거동특성 연구”, 고려대학교 토목환경공학과 석사논문
10. 서사범, 선로공학, 2006. 1.