

레일 매립형 궤도시스템(ERS, Embedded Rail System)의 최적단면에 관한 연구

황만호¹, 윤경민², 김순철³, 임남형^{2*}

¹한국철도시설공단 기술본부, ²충남대학교 토목공학과, ³(주)청도코퍼레이션

A Study on the Optimized Cross-section of Embedded Rail System

Man-Ho Hwang¹, Kyung-Min Yun², Soon-Cheol Kim³ and Nam-Hyung Lim^{2*}

¹Engineering Headquarters, Korea Rail Network Authority

²Department of Civil Engineering, Chungnam National University

³Chungdo Corporation

요약 레일 매립형 궤도시스템은 연속레일지지방식으로 하중분산 효과가 크며, 궤도부재에 발생하는 응력이 매우 작다. 다양한 장점을 갖고 있는 레일 매립형 궤도는 국내에 적용사례가 드물며, 고속 운행선 적용을 위한 연구는 매우 미흡하다. 본 논문에서는 고속운행선에서의 레일 매립형 궤도시스템 적용을 위한 기초연구로써, 실내시험을 통한 수직강성을 도출하였으며, 도출된 강성과 이론해석을 통해 최적단면을 도출하였다.

Abstract An ERS(Embedded Rail System) has large effect on the load distribution because of its continuous rail support. Therefore, stress level of the track components is lower than that of other system. Though the ERS has various advantages, the application example in a domestic railway is rarely applied and the studies for the application of high-speed service lines are insufficient. In this paper, the vertical stiffness is derived from laboratory test and the optimized cross-section is also derived from the analytical analysis as a basic study for application of ERS on the high-speed service lines.

Key Words : ERS, Continuous rail support, Optimal cross section, High speed railway

1. 서론

철도에 있어 궤도시설물의 역할은 선로를 통행하는 각종 차량이 안전하고 신속하게 주행할 수 있도록 주행을 제공한다. 또한 차량을 탈선 위험 없이 안전하게 안내하는 외에 차량으로부터 가해지는 힘을 수직 및 수평 방향으로 흡수하고 이들의 힘을 궤광과 도상층을 거쳐 노반으로 분산시키는 구조적인 역할을 수행한다[1].

그러나 궤도시설물은 반복되는 열차운행으로 인해 파괴가 발생하게 되어 상기 언급한 궤도역할이 제공되기 위해서는 불가피하게 주기적인 보수가 요구된다. 이런

이유로 일찍이 선진 외국에서는 빈번하게 보수가 요구되는 자갈도상궤도의 취약점에서 탈피하기 위해 생력화 목적으로 콘크리트도상 궤도시스템을 개발하여 사용하고 있으며, 그에 대한 연구는 현재도 끊임없이 진행 중이다. 또한 불연속지지(이상지지 또는 단속지지) 형태의 레일 체결장치를 사용하는 궤도시스템외에 유럽의 일부 국가에서는 약 40년 전부터 연속지지 형태를 갖는 레일 매립형 무도상 궤도시스템을 개발하여 사용해오고 있다.

본 논문은 레일 매립형 무도상 궤도시스템의 고속선 적용을 위한 기초연구로써 궤도의 탄성요소와 관계되는 탄성패드, 매립재 그리고 조합체의 강성을 실내시험을

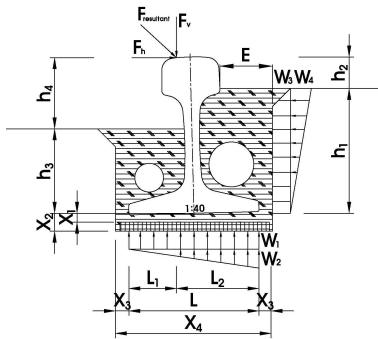
*Corresponding Author : Nam-Hyung Lim(Chungnam National Univ.)

Tel: +82-41-821-7005 email: nhrim@cnu.ac.kr

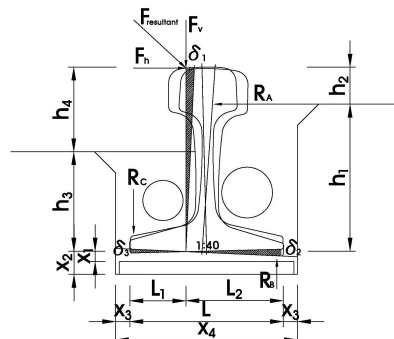
Received March 7, 2014

Revised March 17, 2014

Accepted April 10, 2014



[Fig. 2] Model for analysis of ERS



[Fig. 3] model for calculation of lateral displacement of rail

통하여 도출하였다. 또한 60kg레일을 고려한 매립단면을 모델링하여 이론해석에 따른 최적 단면을 도출하였다.

일저부에는 20mm 공간을 두어 10mm 공간에 엑상매립재가 원활하게 채워지도록 트러프 내공 폭을 175mm로 제작하였다. 시험편 제원 및 전경은 Fig. 1과 같다.

2. 레일매립형 궤도의 거동특성 분석

레일 매립형 궤도 시스템의 거동을 살펴보기 위한 물성치 실험을 하였다. 실험은 구성재료의 시험과 조립체 실험으로 나누어 수행하였다.

2.1 조립체 실험

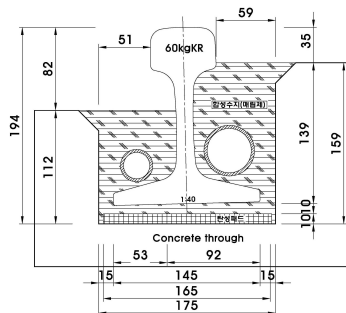
시험편 길이 600mm인 콘크리트재 트러프내에 트러프 양단에서 50mm씩 돌출되도록 길이 700mm인 60KR 레일을 좌면이 1:40으로 기울어지도록 놓고, 외측은 레일 두정면에서 하방 35mm, 내측은 80mm까지 함성수지를 매립하였다. 매립재 사용량 절감을 위해 적당한 크기의 PVC파이프를 레일 복부 내외측에 함께 매립하며, 레

[Table 1] Result comparison of vertical loading test

| CASE | Static vertical stiffness (kN/mm) |
|---------------------|--------------------------------------|
| Before Fatigue test | 32.61 |
| After Fatigue test | 28.93 |
| Average | 30.77 |

시험방법은 EN 13146-9[2]을 적용하였으며, 피로시험 전·후의 시행한 결과(평균) 값은 Table 1과 같다. 피로 시험은 300만회의 하중재하를 수행하였다.

2.2 구성재료 실험



(a) Cross section



(b) The whole view of specimen

[Fig. 1] Assembled specimen of ERS

조립체 시험편을 구성하는 주요 재료 중 매립재와 탄성패드에 대한 압축강성 및 인장강도 시험결과는 다음과 같다.

① 매립재의 압축강성

시험의 사이즈는 50×50×25(t)mm로서 시험의 평면적 A=2,500mm²이며, 시험하중 범위 0.2~0.5MPa(0.5~1.25kN)에서 측정된 변위(δ)를 이용하여 Eq. 1과 같이 정적 압축계수(C_{stat})를 산정하였다. 3회에 걸친 시험결과와 평균값을 고려하면 정적압축계수(C_{stat})는 5.59 MPa이다. Eq.1에서 Δσ는 시험하중 범위(MPa), t는 시험의 두께(mm)를 나타낸다.

$$C_{stat} [MPa] = \frac{\Delta\sigma}{\delta/t} \dots\dots\dots \text{Eq. 1}$$

산정된 정적 압축계수(C_{stat})를 이용하여 매립재의 정적 강성(K_b)은 Eq. 2와 같이 산정될 수 있다. 이때, Length은 조립 시험편 길이(600mm), T는 레일하면의 매립재 두께(mm), B는 유효폭으로서 레일저면폭 145mm에 두께에 따른 하중 분산각을 고려하여 10mm를 더한 155mm로 가정하였다.

$$K_s [kN/mm] = C_{stat} \times \frac{Length \times B}{T} \dots\dots\dots \text{Eq. 2}$$

Eq. 2를 이용하여 산정한 결과 조립 시험편의 길이를 고려한 강성은 55.34kN/mm이며, 길이 1m당으로 산정 시 55.34kN/mm/0.6m=92.23kN/mm/m로 나타낼 수 있다.

② 매립재 인장강도[3]

아령형의 시험편을 제작하여 3회에 걸쳐 시험하였으며, Eq. 3과 같이 인장강도를 도출하였다. 여기서 W_{max}는 인장최대하중(N), A는 시험의 단면적(mm²)을 나타낸다.

$$\sigma_t [MPa] = \frac{W_{max}}{A} \dots\dots\dots \text{Eq. 3}$$

실험결과 인장강도의 평균값은 1.17MPa로 나타났다.

③ 탄성패드의 압축강성

시험의 사이즈는 120×120×10(t)mm, 시험하중범위는 0.05 ~ 0.3MPa(= 0.72kN ~ 4.32kN)이며 압축강

성 산정 방법은 매립재의 압축강성 산정방법과 동일하게 하였다. 조립 시험편의 길이를 고려한 강성은 28.27 kN/mm이며, 길이 1m당으로 산정 시 28.2kN/mm/0.6m=47.12kN/mm/m로 산정되었다.

각종 탄성재의 단품 시험 결과와 조립체의 시험결과를 Table 2와 같다.

변위에 영향을 주는 요소를 비교 분석하기 위해 각각의 구성품 및 조립체 시험편 단면을 기준으로 단위 m 당으로 환산한 강성값을 비교하였다. 조립체의 강성 산정 시 피로시험전의 강성(32.61kN /mm)을 기준으로 산정하였다. 매립재의 압축 강성이 가장 크게 나타났으며, 탄성패드가 가장 작게 나타났다.

[Table 2] Performance comparison result of component and assembly(length : 1m)

| CASE | | Vertical Stiffness (kN/mm/m) | Type |
|-----------|---------------------|------------------------------|-------------|
| Component | Filling material(A) | 92.23 | Compression |
| | Elastic Pad(B) | 47.12 | Compression |
| Assembly | | 54.35 | Compression |

3. 레일 매립형 궤도시스템의 최적 단면

일반적으로 ERS의 거동을 정확하게 묘사하기 위해서는 유한요소 해석을 통한 3D 모델이 효과적이지만 소요 시간이 오래 걸리며, 다수의 평가가 요구되는 최적화 과정에 사용되는 것은 어렵다. 그러므로 ERS 샘플의 중앙에서 모델이 평면변형조건(plane strain condition)을 만족한다는 가정 하에 2D 모델에 의한 해석이 이루어지는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 2D 모델에 의한 해석을 수행하였다. ERS 해석을 위한 2D 모델은 Fig. 2와 같으며 레일 두부 횡방향 하중에 의한 레일의 경사(기울기) 해석을 위한 횡방향 변위 모델은 Fig. 3과 같다[4].

레일 매립형 궤도구조에 대한 최적화 단면을 연구함에 있어, 구성재료의 강성과 트러프내 각 부의 수치를 결정하는 기준은 다음 사항을 만족하는 것을 조건으로 하였다.

저부폭이 L은 145mm인 60KR레일 형상을 조건으로 최적화 단면을 수치화 시 한국철도표준규격에서 분류하

고 있는 C형 체결장치의 운영하중조건에서 하중-변위 관계에 대해 레일의 정적 수직 침하량은 1~2mm이어야 하며, 레일 두부의 탄성 횡변위량은 약 2mm 이내이어야 한다[5,6]. 레일 저부와 트러프 바닥면간의 높이는 재료비 절감을 목적으로 최소한의 공간 확보를 위해 20mm로 하고 10mm두께의 탄성패드를 삽입하는 것으로 하였다. 해석상 하중 지지점과 관련된 $L_1(53mm)$ 와 $L_2(92mm)$ 는 일정한 것으로 하였으며, $h_4(80mm)$ 도 차륜 주행에 지장이 없는 한계로서 일정한 것으로 하였다.

매립제 절감을 위해 레일 복부 측면에 설치하게 되는 PVC 파이프는 레일면과는 10mm 이상 이격거리를 두되 밖으로는 레일 저부쪽을 벗어나지 않을 정도의 적당한 크기를 선정하여야 한다. 이것은 레일면과의 사이에 충진되는 매립제의 부착력과 인장강도를 확보하면서 레일의 회전이나 연직방향의 분포하중에 대해 레일 저면으로부터 보호되도록 하기 위한 것이다. 60KR에서는 외경이 30~50mm인 파이프가 적정한 것으로 판단된다.

수직 및 횡변위에 대해 비교될 수 있는 기하학적 조건과 재료 강성 변화 조건 등을 고려한 해석결과는 Table 3과 같으며, 구조계산은 부록(Appendix)에 제시하였다.

[Table 3] Stiffness and displacement of model of ERS model CASE

| Model | Params(mm) | | | | Vertical(y) & lateral(h) disp.(mm) |
|-------|------------|-------|-------|----|------------------------------------|
| | x_4 | h_1 | h_2 | E | |
| ① | 175 | 139 | 35 | 59 | y=1.22 h=2.0 |
| ② | 170 | 139 | 35 | 54 | y=1.22 h=1.8 |
| ③ | 175 | 171 | 3 | 59 | y=1.22 h=0.9 |
| ④ | 175 | 129 | 45 | 59 | y=1.22 h=2.6 |
| ⑤ | 170 | 129 | 45 | 54 | y=1.22 h=2.3 |

상기 계산값은 차륜의 $L/V=0.4(22^\circ)$ 를 적용하여 산출한 것으로 통상적으로 부족센터량이 40mm 이하인 경우로서 승차감상 횡가속도의 영향이 거의 없는 경우에 해당된다.

4가지 경우에 대한 해석 결과에서 모델 ①~③의 변위가 허용치내에 들었다. 횡변위에 영향을 주는 요소는 레일 외측의 노출 높이(h_2)와 매립제 노출 폭(E)의 영향

을 받으며, h_2 와 E가 작을수록 횡변위량이 작게 나타났다.

재료비 저감과 궤도의 횡방향 안정성 면에서는 트러프 내 공간면을 최소화한 ②번 모델이 최적일 수 있지만, 레일 저부 측면 공간이 협소해짐에 따라 액상 매립제의 유동성을 방해할 우려가 있게 된다.

따라서 재료비를 최소화하면서 횡변위 제어에 효과적인 최소한의 단면은 $x_4 = 175mm$ 를 유지하되 h_2 를 35mm이며(①), h_2 를 증가시키기며 매립제의 압축강성이 높은 재료를 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

반면, 소음 저감과 유지보수 측면에서는 대기에 노출되는 레일의 표면이 가능한 최소화되는 게 유리하게 되므로 h_2 를 3mm까지 축소하는 것이 유리해지나 재료비가 증가되는 문제가 있다. h_2 를 3mm까지 축소할 경우는 부족센터량이 40mm ~ 70mm인 경우로서 약간의 횡가속도가 발생하면서 횡압증가로 인해 외측 레일에 과다한 편마모가 발생함에 따른 잦은 레일 교체의 번거로움을 피하기 위한 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 근래 국내에서 관심이 고조되고 있는 연속지지 형태의 레일 매립형 무도상 궤도구조의 최적단면 도출을 위하여 실내시험 및 이론해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 불연속지지 형태의 무도상 궤도구조에서의 하중-변위 특성은 실험을 통해서만 도출이 가능하며, 실내시험을 통해 거동에 영향을 미치는 압축강성을 도출하였다. 압축강성의 크기는 매립제>조립체>탄성패드로 나타났다.
- 2) 2D 해석모델을 통하여 최적단면을 제안하였으며, 레일 매립형 궤도시스템의 구조적 안정성 기준을 만족하는 동시에 차륜의 주행 및 수직치침, 횡변위, 소음저감, 매립제 절감, 유지보수 문제를 고려하여 최적안을 도출하였다. 하중재하점의 위치가 고려된 상태에서 x_4 , h_1 , h_2 , E는 각각 175mm, 139mm, 35mm, 59mm로 나타났으며, 부족센터량을 40mm ~ 70mm 고려 시 h_2 를 3mm까지 축소시키는 것이 유리할 것으로 판단된다.

References

- [1] C. Esvelde, *Modern Railway Track (2nd Edition)*, 1994
- [2] CEN, *EN 13146-9 Railway applications - Track. Test methods for fastening systems -Part 9 : Determination of stiffness*, Brussels, Belgium, 2012
- [3] Korean Standards Service Network, *ISO 527-2, Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*, 2012
- [5] A.P. de Man, C. Esvelde, *Requirements for rail fastenings on slab track*, Rail Engineering International, 2001
- [5] UIC, *Ballastless Track Application and Experience with Ballastless Track*, 2008
- [6] UIC, *Vertical elasticity of ballastless track*, 2008

Sign

- x_1 = 레일 저부 중심에서 탄성패드 상면 높이
- x_2 = 레일 저부 중심에서 트러프 바닥면 높이
- x_3 = 레일 저부 측면에서 트러프 벽면까지 이격거리 (모델에서는 좌우 대칭이나 슬래키 있는 급곡선의 경우에는 달라질 수도 있음)
- x_4 = 트러프 폭
- L = 레일 저부폭 (기울어진 경우의 수평거리와는 오차가 미세하므로 레일 저부폭으로 취급)
- L_1 = 레일좌측끝단과 하중재하점까지의 수평거리
- L_2 = 레일우측끝단과 하중재하점까지의 수평거리
- W_1 = 레일의 수직하중에 수직반력
- W_2 = 레일의 회전에 따른 하단부의 수직반력
- W_3 = 레일의 수평하중에 수평반력
- W_4 = 레일의 회전에 따른 측면부의 수평반력
- $R_A = W_3 + W_4$
- $R_B = W_1 + W_2$
- R_C = 레일 회전에 따른 내측 레일의 상방향 반력
- δ_1 = 레일 상단의 수평변위
- δ_2 = 레일 저부 좌측 끝단의 수직변위
- δ_3 = 레일 저부 우측 끝단의 수직변위
- h_1 = 레일 외측면에 대해 레일 저부 중심에서 매립재 상단까지 높이

- h_2 = 레일 외측면에 대해 매립재 상단에서 레일두정면까지 높이
- h_3 = 레일 내측면에 대해 레일 저부 중심에서 매립재 상단까지 높이
- h_4 = 레일 내측면에 대해 매립재 상단에서 레일두정면까지 높이

Appendix

최적 궤도구조단면을 도출하기 위한 구조계산은 다음과 같다. 본 부록에서는 Table 4의 모델 ①에 대한 구조계산을 기술하였으며, 나머지 모델도 동일한 방식으로 계산하였다.

[해석조건]

| 항 목 | 제 원 |
|--------------|----------------------------|
| 레일중량 | 60kg/m |
| 레일좌면기울기 | 1/40 (1.43°) |
| 레일지지간격 | 연속지지 (레일지지간격 600mm 가정) |
| 속도충격계수 | 1.707 (t=3, $\phi=0.1$ 적용) |
| 윤중(Q) | 110kN |
| 축거(L_a) | 2,500mm |
| 열차속도(V) | 250km/h |
| 레일 탄성계수 | 210kN/mm ² |
| 레일 단면 2차 모멘트 | 30,900,000mm ⁴ |
| L/V (횡압고려) | 0.4 |

1. 수직 강성 및 궤도계수

- (1) 레일 지지체의 종합 정적 스프링계수 (K_s)
 - $K_s = 32.61kN/mm$
- (2) 레일 지지체의 종합 동적 스프링 계수 (K_{sd})
 - $K_{sd} = K_s \times 1.2 = 32.61 \times 1.2$
 $= 39.13kN/mm$
- (3) 정적궤도계수(K_t), 동적궤도계수(K_{td})
 - $K_t = K_s / L \times 1,000$
 $= 32.61/600 \times 1,000 = 54.35N/mm/mm$
 - $K_{td} = K_{sd} / L \times 1,000$
 $= 39.13/600 \times 1,000 = 65.22N/mm/mm$

2. 레일의 반력과 레일 침하량 및 하중 분배계수 계산 (Zimmermann 공식)

(1) 레일의 반력(R_s, R_{sd})

$$\cdot R_s = \frac{d \times Q}{\sqrt{8}} \times \left(\frac{K_t}{E \times I} \right)^{\frac{1}{4}} = 39.70 kN$$

$$\cdot R_{sd} = \frac{d \times Q}{\sqrt{8}} \times \left(\frac{K_{td}}{E \times I} \right)^{\frac{1}{4}} = 41.55 kN$$

(2) 하중 분배계수(D_F, D_{Fd})

$$\cdot D_F = \frac{R_s}{Q} = \frac{d}{\sqrt{8}} \times \left(\frac{K_s}{d \times E \times I} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.36$$

$$\cdot D_{Fd} = \frac{R_{sd}}{Q} = \frac{d}{\sqrt{8}} \times \left(\frac{K_{sd}}{d \times E \times I} \right)^{\frac{1}{4}} = 0.38$$

(3) 레일의 특성길이(L_s, L_d)

$$\cdot L_s = \left(\frac{4 \times E \times I}{k_T} \right)^{\frac{1}{4}} = 831 mm$$

$$\cdot L_d = \left(\frac{4 \times E \times I}{k_{Td}} \right)^{\frac{1}{4}} = 794 mm$$

(4) 레일의 침하량(y_{stat}, y_{dym})

$$\cdot y_{stat} = \frac{Q \times D_F}{K_s} = 1.22 mm$$

$$\cdot y_{dym} = \frac{Q \times D_{Fd}}{K_s} = 1.06 mm$$

3. 레일 두부의 횡변위 계산

(1) 하중계산

· 수직하중

$$F_v = \text{윤중} \times \text{속도충격계수} \times \text{분배계수} \\ = 67.69 kN$$

· 수평하중

$$F_h = L/V \times F_v \\ = 27.35 kN$$

· 합력($F_{resultant}$)

$$F_{resultant} = \sqrt{(F_v^2 + F_h^2)} \\ = 73.00 kN$$

· 합력($F_{resultant}$)의 각도 $S^\circ = 22^\circ$

$$F'_v = F_{resultant} \times \cos(S^\circ - R^\circ)$$

= 68.35 kN (켄트가 있을 경우에 적용)

$$F'_h = F_{resultant} \times \sin(S^\circ - R^\circ)$$

= 25.65 kN (켄트가 있을 경우에 적용)

(2) 레일저면부 지지체 제원

· 유효폭 : 145 mm (레일 저부폭)

· 유효길이 : 600 mm (가상의 레일 지지간격)

· 단위유효폭당 정적 스프링계수

$$K_{sb} = (K_s / \text{유효폭}) = 224.90 N/mm^2$$

(3) 레일외케측(매립재)

· 유효높이 : 139 mm (외케측 매립높이)

· 유효길이 : 600 mm (레일 길이방향 시편길이)

· 측면 매립재 두께 : 59 mm

· 시편의 단위 면적당(측면 매립재두께 × 레일길이방향 유효길이) 횡스프링계수 : 0.595 kN/mm

· 횡방향 강성 (시편길이 횡방향 투영 면적 및 매립재 두께 기준)

$$0.595 kN/mm \times \frac{(139 \times 600)}{(50 \times 50)} \times \frac{25}{59} = 8.41 kN/mm$$

· 횡방향 강성 (종방향 평면적 기준)

$$\frac{8.41 kN/mm}{600 mm \times 59 mm} \times 2.0 = 0.000475 kN/mm^3$$

여기서, 종방향 평면적을 기준으로 횡방향 강성을 계산 시 레일 외케측에 매립된 매립재는 압축에 저항하는 반면, 동시에 내케측 매립재는 트러프 벽체 및 레일 복부와 강력하게 부착되어 있어 인장에 저항하게 되므로 압축강성 계산값에 2배를 적용하여 계산.

· 횡방향 강성 (시편길이 기준)

$$R_b = 0.000475 kN/mm^3 \times 600 mm \times 1000 \\ = 285.11 N/mm^2$$

(4) 수평하중에 의한 레일의 기울기 계산

· 모멘트합 공식으로 치환하여 계산

$$0 = 6F_v(L_2 - L_1) - 6F_h h_1 - 12F_h h_2 \\ + K_{sb} L^3 \tan \alpha + R_b h_1^3 \tan \alpha$$

여기서,

$$\tan\alpha = \frac{6F_v \times (L_1 - L_2) + 6F_h \times (h_1 + 2h_2)}{K_{sb} \times L^3 + R_b \times h_1^3}$$

$$= 0.0127$$

$$\therefore \alpha = \tan^{-1}(0.0127) = 0.73^\circ$$

(5) 분배하중 계산

· 수직력 합

$$\sum F_y = 0 = W_1 \times L + \frac{1}{2} \times W_2 \times L - F_v \quad \text{에서,}$$

여기서,

$$W_1 = \frac{(F_v - \frac{W_2 \times L}{2})}{L} = 259.78N/mm$$

$$W_2 = L \times K_s \times \tan\alpha = 415.16N/mm$$

· 수평력 합

$$\sum F_x = 0 = F_h - W_3 \times h_1 - \frac{1}{2} \times W_4 \times h_1 \quad \text{에서,}$$

여기서,

$$W_3 = \frac{(F_h - \frac{W_4 \times h_1}{2})}{h_1} = -55.29N/mm$$

$$W_4 = h_1 \times R_b \times \tan\alpha = 504.53N/mm$$

(7) 콘크리트도상에 영향을 미치는 압력 계산

· A점 :

$$P_A = \frac{W_1}{\text{탄성패드, 매립재 유효길이}} = 43.30N/cm^2$$

· B점 :

$$P_B = \frac{W_1 + W_2}{\text{탄성패드, 매립재 유효길이}} = 112.49N/cm^2$$

· C점 :

$$P_C = \frac{W_3}{\text{매립재 유효길이}} = -9.21N/cm^2$$

· D점 :

$$P_D = \frac{W_3 + W_4}{\text{매립재 유효길이}} = 74.87N/cm^2$$

여기서,

A= 레일 저부 좌측단 하방향 하중작용점

B= 레일 저부 우측단 하방향 하중작용점

C= 레일 저부 우측단 횡방향 하중작용점

D= 레일 외측측 두부 횡방향 하중작용점

(8) 레일 지지체 변위 계산

$$\cdot \text{A점} : \Delta_A = \frac{W_1}{K_s} = 1.2mm$$

$$\cdot \text{B점} : \Delta_B = \frac{W_1 + W_2}{K_s} = 3.0mm$$

$$\cdot \text{C점} : \Delta_C = \frac{W_3}{R_b} = -0.2mm$$

$$\cdot \text{D점} : \Delta_D = \frac{W_3 + W_4}{R_b} = 1.6mm$$

(9) 레일 지지체 변위에 따른 레일 두부의 탄성 횡변위량 계산

$$\cdot \text{C점에서 수평변위} : \frac{W_3}{R_b} = -0.2mm$$

· 레일 경사(기울기)로 인한 변위 :

$$(h_1 + h_2) \times \tan\alpha = 2.2mm$$

$$\therefore \text{레일 두부의 탄성 횡변위량} \\ -0.2mm + 2.2mm = 2.0mm$$

[해석결과]

| 구분 | 해석 결과 |
|------|--------|
| 수직변위 | 1.22mm |
| 수평변위 | 2.0mm |

황 만 호(Man-Ho Hwang)

[정회원]



- 2007년 2월 : 우송대학교 공학대학원 철도건설환경공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정
- 1988년 2월 ~ 2003년 3월 : 철도청 근무
- 2004년 4월 ~ 현재 : 한국철도시설공단 기술본부 궤도차 사업부장

<관심분야>

구조공학, 궤도공학

임 남 형(Nam-Hyoung Lim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2005년 3월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2005년 4월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 강구조, 궤도공학

윤 경 민(Kyung-Min Yun)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

구조공학, 강구조, 궤도공학

김 순 철(Soon-Cheol Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 한경대학교 토목공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 서울산업대학교 철도전문대학원 건설공학과 (공학석사)
- 2012년 6월 ~ 현재 : (주)청도코퍼레이션 대표이사

<관심분야>

철도공학, 궤도역학