

콘크리트도상 방진침목의 파손에서 부등침하가 미치는 영향

김진일 · 이지호[†]

동국대학교 토목환경공학과
(2005. 10. 29. 접수 / 2006. 4. 7. 채택)

Effect of Unequal Settlement on Damage of Resilient Sleepers on Concrete Ballast

Jin-Il Kim · Jee-Ho Lee[†]

Civil & Environment Engineering, Dongguk University
(Received October 29, 2005 / Accepted April 7, 2006)

Abstract : In the present study damage behavior of resilient sleepers on concrete ballasts is analyzed. Cracks of resilient sleepers in a railway track system are concentrated on inside of blocks to which the tie bars are connected. Finite element analysis is performed by dividing a block into the straight section and the curved section according to the load condition of the resilient sleeper, and limited the interpretation within the range of resilience. In addition, the value of stress obtained from the interpretation was compared with the allowable stress of concrete to determine the safety. According to the result of numerical analysis, compared with the stress before unequal settlement, the tensile stress of the inside of the block increased significantly after the settlement considering the entire block, and the tensile stress of this part exceeded the allowable stress of concrete, so was undesirable in terms of safety. In reality, the arrangement of tensile stiffeners inside blocks connected to tie bars is improper in the design of resilient sleepers, and when unequal settlement occurs, tensile stress increases on this part and consequently causes cracking damage. It is necessary to arrange wire meshes or tensile reinforcing bars in a structurally safe way to reinforce the inside of blocks on which cracks are concentrated.

Key Words : resilient sleepers, concrete ballast, unequal settlement, finite element analysis

1. 서 론

콘크리트도상 궤도는 자갈도상 궤도의 문제점인 유지보수의 노력과 비용을 절감하고 궤도의 변형을 최소화할 수 있도록 도상을 콘크리트로 시공한 궤도이다¹⁾. 현재 국내 지하철에 가장 많이 사용되는 프랑스 STEDEF식 궤도의 트윈블록 콘크리트침목(twin block concrete sleeper)은 열차의 진동이 박스 및 터널 구조물과 기초지반에 전달되는 것을 억제하기 위하여 저면과 측면에 방진패드와 방진상자가 설치되어 있는 RC 방진침목이다. 방진패드는 진동의 차단과 충격 에너지 흡수가 목적이며, 방진상자는 침목과 콘크리트도상 사이에서 수평방향으로의 침목 움

직임에 대한 완충작용을 한다. 이러한 방진침목의 잦은 파손은 콘크리트도상 궤도의 유지보수비의 증가를 초래하여 경제성에서의 장점을 크게 감소시킬 수 있다. 실제로 사용중인 콘크리트도상 궤도에서 흔하게 발생하는 방진침목의 파괴양상은 Fig. 1과 같이 타이바(tie bar)와 연결되는 콘크리트 블록 내측부의 파손이다.

방진침목의 파손은 블록의 기초 역할을 수행하는 방진재의 비탄성 변형에 의한 침하가 주요 원인으로 추정된다. 이러한 침하는 침목 좌우측 블록이 균등 침하되는 경우와 부등침하되는 경우로 나눌 수 있으며, 부등침하는 궤도틀림(track irregularity) 구간의 열차운행과 좌우측 레일에 재하되는 윤하중의 불균형, 방진재의 점탄성에 기인한 레일압력의 증가가 원인이 된다고 알려져 있다²⁾.

[†] To whom correspondence should be addressed.
jeeholee@dgu.edu

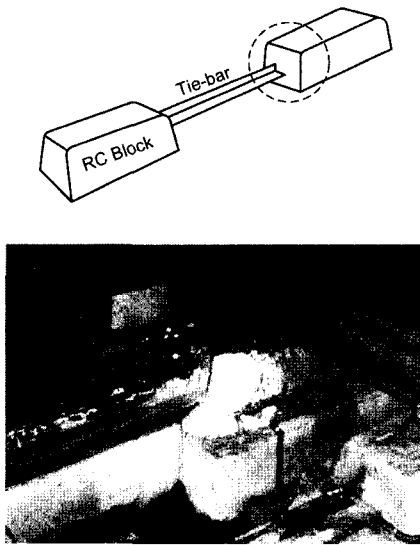


Fig. 1. Damage to inside area of concrete sleeper.

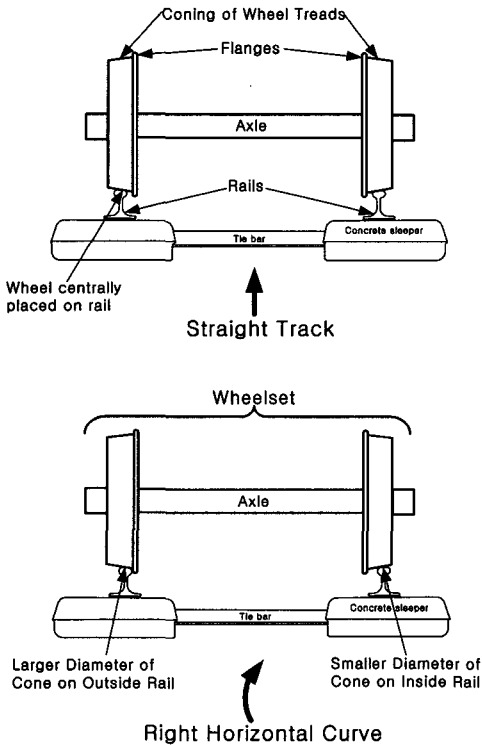


Fig. 2. Straight and curved tracks.

본 연구에서는 방진침목의 파손원인과 메커니즘을 규명하고 구조적 보완방법을 제시하는데 그 목적이 있다. 궤도 선형에 따른 블록 응력의 검토를 위하여 Fig. 2와 같이 직선구간과 곡선구간을 구분하

여 방진침목의 유한요소법으로 3차원 응력해석을 수행하였다. 부등침하가 블록내측 부분의 파괴에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수치해석을 통하여 계산된 블록의 부등침하 전과 후의 응력을 콘크리트구조설계 기준의 허용응력과 비교하였다. 유한요소해석에는 SAP2000³⁾을 사용하였으며 탄성해석을 통하여 초기 손상 평가를 수행하는 것으로 연구범위를 한정하였다.

2. 방진침목 구조 및 궤도하중

2.1. 방진침목 구조

STEDEF 궤도는 Fig. 3과 같은 구조형식이며 이 궤도에 사용되는 침목은 RC 트윈블록 방진침목이다. 이 침목의 가장 큰 특징으로는 좌우측 블록이 타이바로 연결되어 있다는 것이다. 좌우측 블록을 타이바로 연결한 구조가 된 이유는 초기에 트윈블록 침목을 자갈도상에서 사용할 목적이었으며 이 침목을 콘크리트 도상에도 사용하면서 타이바는 그대로 두고 콘크리트침목 바닥과 측면에 방진패드와 방진고무상자가 설치된 것이다. 방진침목은 Fig. 4와 같이 위에서부터 레일, 레일패드, 침목, 방진패드, 방진상자로 구성되어진다.

2.2. 궤도에 작용하는 하중

곡선구간에서 열차운행 시 원심력(F)과 차량중량(W)의 합력(P)이 Fig. 5(a)와 같이 궤간의 중심을 향

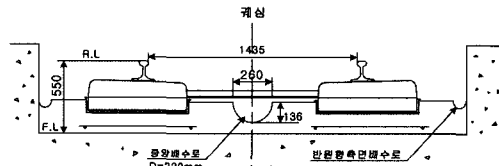


Fig. 3. Structure of STEDEF track⁴⁾.

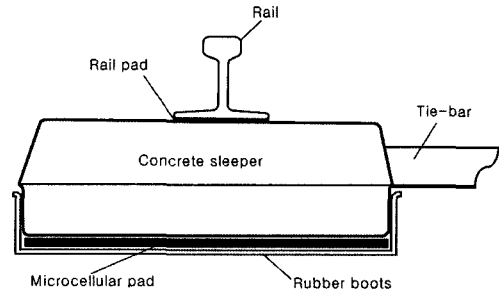
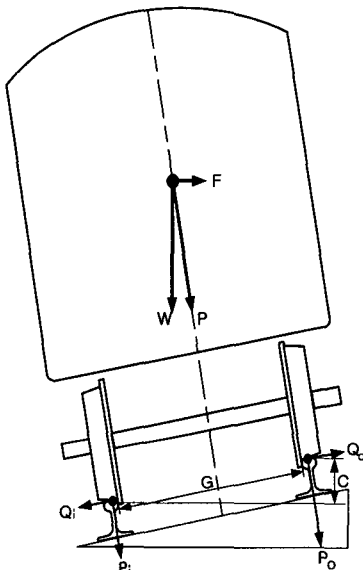
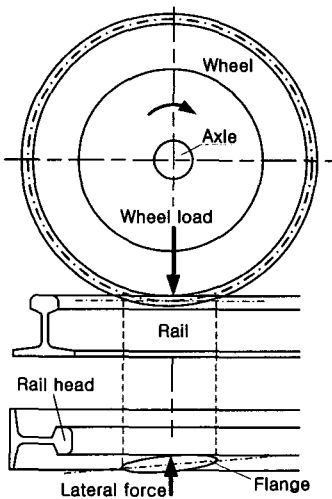


Fig. 4. Twin block resilient concrete sleepers.

하면 좌우측 레일에 재하되는 윤하중은 거의 균등하게 재하된다. 궤도에 작용하는 하중은 Fig. 5(b)와 같이 윤하중과 수평하중으로 나눌수 있다. 윤하중(Fig. 5의 P_o, P_i)은 차륜과 레일의 접촉면을 통하여 궤도에 전달되는 하중으로 레일 상하방향 수직으로 움직이는 힘이다. 정적인 중량을 기준으로 속도에 비례하여 증가하는 동적인 변동이 있으며 차륜과 레일 두부 상면의 요철을 가진원으로 한다. 수평하중은 (Fig. 5의 Q_o, Q_i) 차륜으로부터 수평방향으로 레일 두부에 직각으로 작용하는 힘이다.



(a) 궤도에 재하되는 하중분산



(b) 윤하중과 수평하중

Fig. 5. Loadings on rails⁵⁾.

직선구간에서도 궤도틀림 구간 운행 시 수평하중이 발생할 수 있으나, 주로 수직하중이 재하된다⁶⁾. 곡선구간에서는 윤축의 전향력(turning force)이나 평형속도 이상 운행 시 초과원심력에 의하여 곡선의 측 레일에서 수평하중이 발생된다. 수평하중은 곡률이 큰 구간 운행 시 또는 열차 좌우 진동에 의한 차체관성력으로 인해 곡선내측 레일에서도 발생할 수 있으나 본 연구에서는 곡선의외측 레일의 수평하중을 고려하였다.

2.3. 블록의 부등침하

방진침목의 좌우측 블록은 궤도틀림 구간의 운행, 사행동(hunting motion)에 의해서 발생하는 수평하중의 작용, 곡선구간에서 부족켄트에 비례하여 증가하는 초과원심력의 발생, 시공오차 등으로 Fig. 6과 같이 방진재에 불완전하게 걸쳐 있는 상태가 되며 열차하중이 가해지면 부등침하를 유발하게 된다. 본 연구에서는 블록 전체가 수평으로 부등침하하는 것으로 가정하였다.

3. 방진침목의 응력해석

3.1. 방진침목 제원

방진침목 좌우측 블록의 외측까지 총길이는 2234 mm, 높이는 215mm이며 타이바는 65×65×8mm의

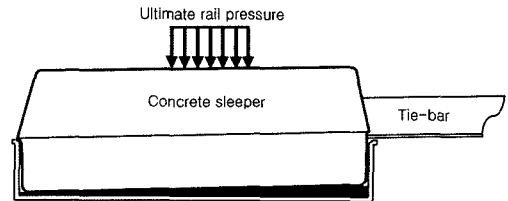


Fig. 6. Unequal settlement of concrete sleeper block.

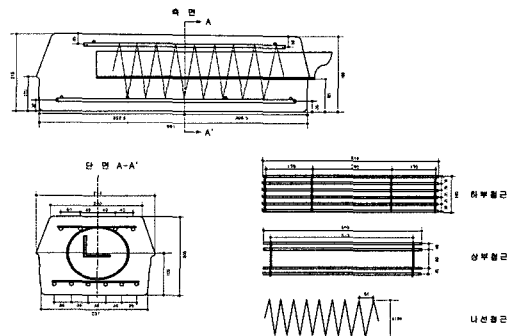


Fig. 7. Structure of resilient sleeper block.

등변 7형강이 사용되었다. 각각의 블록에 주철근은 상부 $\varnothing 9 \times 4$ 개, 하부 $\varnothing 9 \times 6$ 개가 침목길이 방향으로 배근되어있고, 주철근의 간격유지, 콘크리트 건조수축 및 크리프에 대한 응력분산을 목적으로 $\varnothing 5\text{mm}$ 의 배력철근이 있고, 타이바 주위에서 일어나는 응력의 균등한 분산을 위해서 $\varnothing 5\text{mm}$ 의 나선철근이 Fig. 7과 같이 배근되어있다^{1,7)}.

방진침목의 유한요소모형(Fig. 8)에서 콘크리트 블록은 솔리드요소, 타이바는 플레이트요소, 철근은 트러스요소, 방진패드와 방진상자의 경계조건은 스프링요소로 모델링 하였다. 방진침목은 역학적 특성이 상이한 콘크리트, 방진재, 타이바와 철근의 강제로 구성되며 구성 재료의 제한^{1,7)}은 Table 1과 같다.

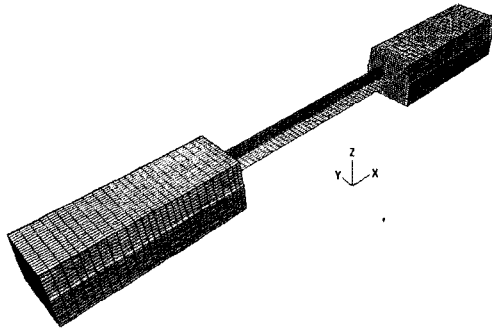


Fig. 8. Finite element model of twin block resilient sleeper.

Table 1. Properties of resilient sleeper components

재료	역학적 성질
콘크리트블록	$E_c : 2.66 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ $\sigma_{ck} : 350 \text{kgf/cm}^2$ Poisson's ratio: 0.18 넓이: $25.7 \times 68.4 \text{cm}$ 높이: 20.5cm
방진패드	스프링상수: $10,700 \text{kgf/cm}$ 탄성계수: 8.46kgf/cm^2 전단탄성계수: 2.82kgf/cm^2 Poisson's ratio: 0.5 넓이: $23 \times 66 \text{cm}$ 두께: 1.2cm
방진상자	스프링상수: $650,000 \text{kgf/cm}$ (저면) $80,000 \text{kgf/cm}$ (측면) 탄성계수: 214kgf/cm^2 넓이: $26 \times 69 \text{cm}$ 두께: 0.5cm (저면) 0.6cm (측면)
타이바	$E_s : 2.0 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ $\sigma_y : 8,000 \text{kgf/cm}^2$ Poisson's ratio: 0.3 등변 7형강: $6.5 \times 6.5 \times 0.8 \text{cm}$
철근	$E_s : 2.0 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ $\sigma_s : 3,000 \text{kgf/cm}^2$ Poisson's ratio: 0.3 상부주철근: $\varnothing 9 \times 4$ 개 하부주철근: $\varnothing 9 \times 6$ 개

3.3. 하중 및 경계조건

직선구간 방진침목의 좌우측 블록에 작용하는 운하중은 충격계수를 고려하여 재하하였고, 한 개의 블록이 받는 극한레일압력을 레일 저면과 블록 상면이 접촉되는 면적의 절점에 등분포하중으로 재하하였다. 곡선구간의 수직하중 재하는 부족캔트를 고려해서 직선구간과 같은 방법으로 재하하였고, 곡선 외측 블록에 작용하는 수평하중은 극한레일수평하중을 좌측 블록의 외측 방향으로 재하하였다. 극한레일수평하중과 레일높이를 곱한 값을 모멘트하중으로 좌측 블록의 외측 방향으로 재하하였다. 궤도선형별 하중조건 및 부등침하량은 Table 2와 같다.

직선구간 방진패드의 경계조건은 Fig. 9(a), (b)와 같이 블록 저면과 방진패드가 접촉되는 부분의 절점에 전체좌표계의 Z축 방향으로 스프링상수를 부여하였고 블록 측면과 방진상자가 접촉되는 부분의 절점에 X, Y축 방향으로 스프링상수를 부여하였다. 곡선구간의 경계조건은 직선구간의 경계조건에 곡선 외측 레일의 수평하중을 고려하여 역시 Fig. 9(a), (b)와 같이 방진패드의 X, Y축 방향으로 횡방향 스프링상수를 부여하였다.

Table 2. Loading conditions on resilient sleepers

구분		적용 값	비고	
직선구간	수직하중	운행속도 $V = 90 \text{km/h}$ 축중 $W = 16 \text{tonf}$ 운하중 $P = 8 \text{tonf}$ 동윤하중 $P_i^{\text{max}} = 10.16 \text{tonf}$ 극한레일압력 $P_r^{\text{max}} = 3.19 \text{tonf}$	$i=1.27$ 분배율: 0.31	
	부등침하	-3mm	우측블록	
	곡선구간	수직하중	운행속도 $V = 60 \text{km/h}$ 곡선반경 $R = 400 \text{m}$ 부족캔트 $C_d = 20 \text{mm}$ 축중 $W = 16 \text{tonf}$ 외측윤하중 $P_o = 8.29 \text{tonf}$ 내측윤하중 $P_i = 7.78 \text{tonf}$ 외측동윤하중 $P_o^{\text{max}} = 9.78 \text{tonf}$ 내측동윤하중 $P_i^{\text{max}} = 9.18 \text{tonf}$ 외측극한레일압력 $P_{ro}^{\text{max}} = 3.07 \text{tonf}$ 내측극한레일압력 $P_{ri}^{\text{max}} = 2.88 \text{tonf}$	$i=1.18$ 분배율: 0.31
		수평하중	적용속도 $V = 60 \text{km/h}$ 곡선반경 $R = 400 \text{m}$ 축중 $W = 16 \text{tonf}$ 수평하중 $Q_o = 3.89 \text{tonf}$ 외측극한레일압력 $Q_o = 2.68 \text{tonf}$	$Q/P=0.5$ 분배율: 0.69
부등침하		-3mm	좌우측블록	

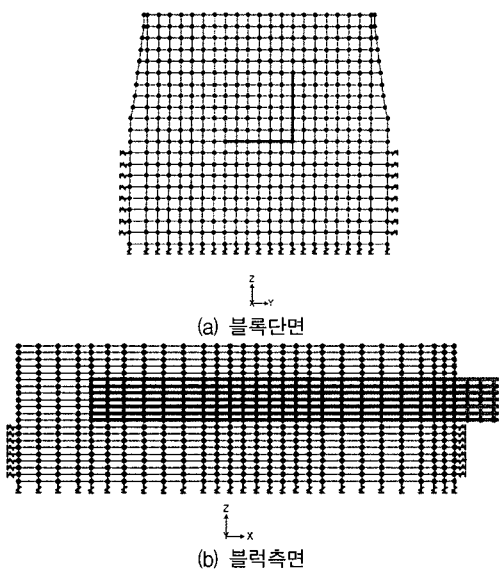


Fig. 9. Boundary conditions in finite element model.

4. 해석결과 및 분석

방진침목 블록의 응력 계산 및 검토는 Fig. 10과 같이 블록의 길이방향으로 내측부분, 중앙부분, 외측부분에서, 블록의 단면 상하방향으로 상단, 중간, 하단에서 수행하였다.

4.1. 직선구간 해석결과

부등침하를 고려하지 않은 경우의 주응력 분포는 Fig. 11과 같으며, 응력이 집중되는 부분은 레일 저부와 블록이 접촉되는 중앙상단 부분이며 윤하중이 일차적으로 재하되는 부분이다. 한쪽 블록(우측)의 부등침하를 고려한 경우의 주응력을 살펴보면 Fig. 11과 비교해서 전반적인 분포에서 큰 차이는 없으나, Fig. 12(a), (b)에 제시된 바와 같이 좌우 블록의 내측 중간부분, 즉 타이바가 콘크리트블록에 연결되는 부분에서 응력이 집중된다.

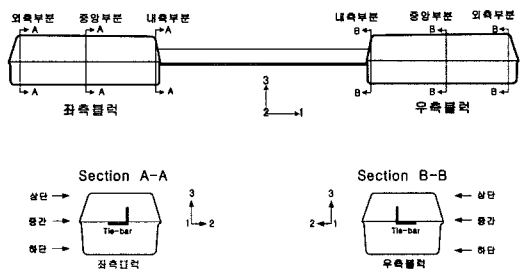


Fig. 10. Stress evaluation points.

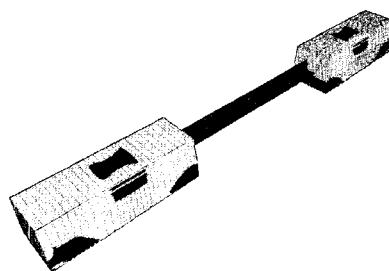
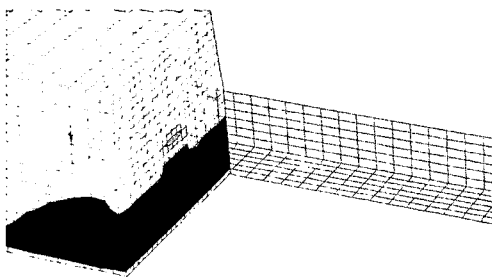
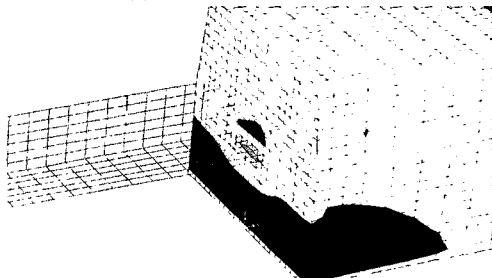


Fig. 11. Principal stress contour in straight track case: without settlement.



(a) 좌측블록 내측 주응력도



(b) 우측블록 내측 주응력도

Fig. 12. Principal stress contour inside areas in straight track case: with unequal settlement.

Table 3과 4는 직선구간 콘크리트블록의 최대인장응력과 최대전단응력을 나타내고 있다. 윤하중이 레일을 통해 재하되는 중앙부분 상단의 모서리 근방에서 부등침하 전과 후에 허용응력을 초과하는 결과를 보이며, 이는 집중하중 재하부에서 흔히 관찰되는 것으로 응력계산이 실제보다 과장되는 경향이 있다. 부등침하 후 응력이 집중되는 곳은 블록내측 타이바가 콘크리트블록에 연결되는 부분으로 σ_{33max} 는 부등침하전에 최대값 발생지역인 중앙부 상단의 값과 비교하여 84% 증가하였고, 허용휨인장응력과 비교하면 65%가 초과한다. 파손이 집중적으로 발생하는 블록의 내측부에서 부등침하의 영향을 검토하기 위하여 좌측블록 내측응력을 비교한 결과는 Fig. 13(a)

Table 3. Maximum stresses in straight track: without unequal settlement(kgf/cm²)

*: 허용응력 초과

구분	σ_{11max}	σ_{22max}	σ_{33max}	τ_{12max}	τ_{13max}	τ_{23max}
응력값	4.28	9.30*	7.11	4.5	10.4*	18.8*
최대응력위치	중앙부분하단	중앙부분상단	중앙부분상단	중앙부분상단	중앙부분상단	중앙부분상단
허용응력	$\sigma_{ta} = 7.96\text{kgf/cm}^2$			$\tau_{ca} = 4.68\text{kgf/cm}^2$		

Table 4. Maximum stresses in straight track: with unequal settlement(kgf/cm²)

*: 허용응력 초과

구분	σ_{11max}	σ_{22max}	σ_{33max}	τ_{12max}	τ_{13max}	τ_{23max}
응력값	4.29	9.30*	13.1*	4.5	10.4*	18.8*
최대응력위치	중앙부분하단	중앙부분상단	내측부분중간	중앙부분상단	중앙부분상단	중앙부분상단

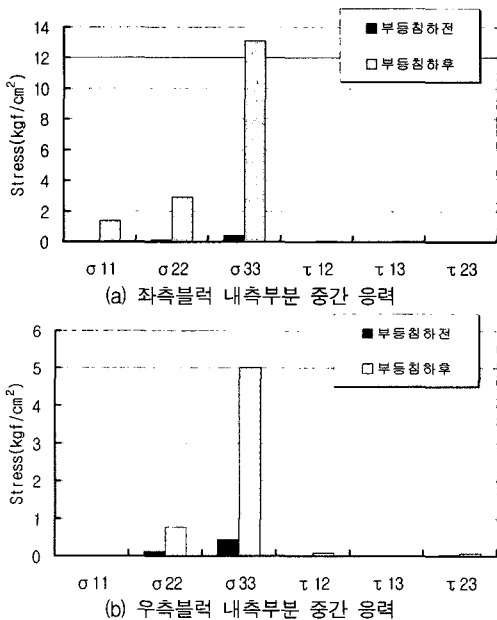


Fig. 13. Effect of unequal settlement on stresses in straight track case.

와 같으며 부등침하후 $\sigma_{33}(13.1\text{kgf/cm}^2)$ 는 부등침하 전의 $\sigma_{33}(0.43\text{kgf/cm}^2)$ 와 비교해서 응력의 증가가 크며 허용휨인장응력을 64% 초과하여 안전하지 못하다고 평가할 수 있다. 침하 발생을 가정한 우측블록 자체의 내측응력 비교는 Fig. 13(b)와 같고 부등침하후 $\sigma_{33}(5\text{kgf/cm}^2)$ 는 부등침하 전 $\sigma_{33}(0.43\text{kgf/cm}^2)$ 와 비교해서 응력의 증가를 보이지만 허용휨인장응력의 62%로 안전하다.

4.2. 곡선구간 해석결과

부등침하가 발생되기 전의 곡선구간 변형도와 주응력도는 Fig. 14, 15와 같으며 직선구간 주응력도와 비교해서 수평하중이 재하되는 좌측블록 내측부

분 하단의 압축응력이 감소된 것을 볼 수 있다(Fig. 16). 곡선구간의 비대칭성을 고려하여 좌측 및 우측 블록의 부등침하를 각각 고려하였다. 좌우측 블록의 주응력 분포는 좌 및 우측 부등침하에 대하여 각각 Fig. 17, 18과 같다. 부등침하 발생으로 좌우측 블록의 타이바가 콘트리트 블록에 연결되는 내측부분에서 응력이 집중됨을 알 수 있다. Table 5, 6, 7은 곡선구간 블록의 최대인장응력과 최대전단응력을 나타낸다. 부등침하 전과 후 공통적으로 윗하중이 직접적으로 재하되는 중앙부분 상단의 모서리에서 허용응력을 초과하며 응력이 집중되는 것으로 나타난다. 부등침하 전 σ_{33max} 와 비교해서 부등침하 후 σ_{33max} 는 좌측블록 부등침하후 59% 증가하였고, 우측블록 부등침하후 43% 증가하였다. 허용휨인장응력과 비교하면 부등침하전은 수평하중이 작용하는 좌측블록에서 30%가 초과했다. 좌측블록 부등침하후의 σ_{33max}



Fig. 14. Deformed shape of twin block concrete sleeper on curved rail track.

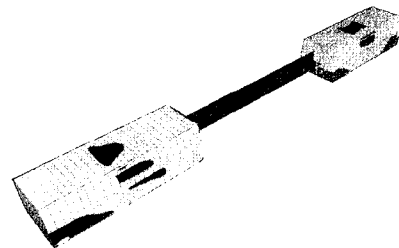


Fig. 15. Principal stress contour in curved track case: without unequal settlement.

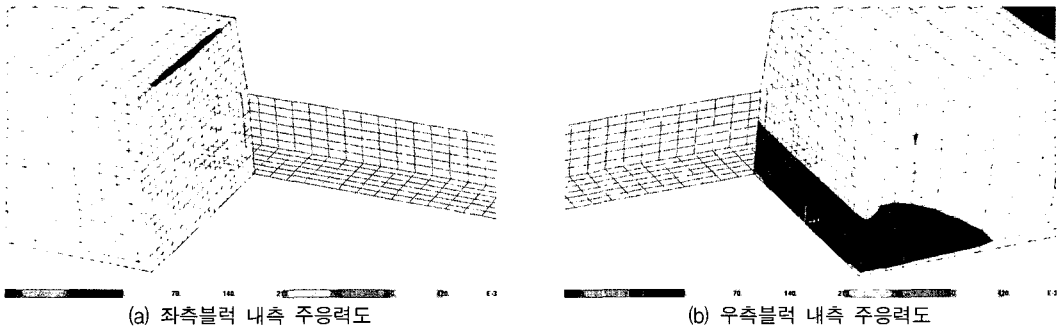


Fig. 16. Principal stress contour at inside areas in curved track case: without unequal settlement.

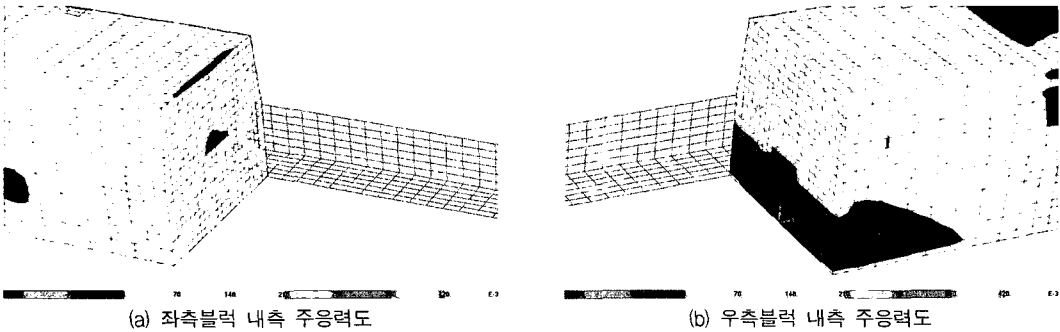


Fig. 17. Principal stress contour at inside areas in curved track case: with unequal left-block settlement.

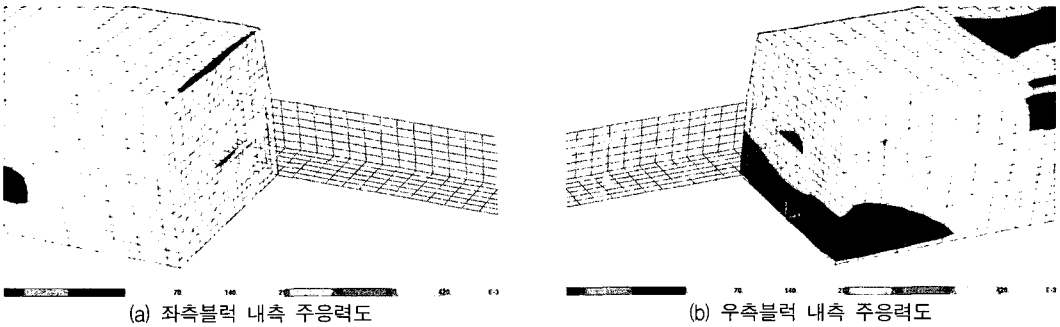


Fig. 18. Principal stress contour at inside areas in curved track case: with unequal right-block settlement.

는 허용휨인장응력을 108% 초과했고, 우측블록 부등침하후는 87% 초과했다. 최대응력 위치가 좌측블록에 집중되는 원인은 수직으로 재하되는 운하중에 더하여 수평하중이 곡선외측 블록인 좌측블록에 작용하는 것이 주요 원인이다. 곡선구간에서도 부등침하후 응력변화가 집중되는 부분은 블록내측 타이가 콘크리트블록에 연결되는 부분이다.

제 상황에서 파손이 집중적으로 발생하는 블록의 내측부에서 부등침하의 영향을 검토하기 위하여 좌측블록 내측응력을 비교한 결과는 Fig. 19(a)와 같고

좌측블록 부등침하후 $\sigma_{33}(7.14\text{kgf/cm}^2)$ 는 부등침하 전의 $\sigma_{33}(2.64\text{kgf/cm}^2)$ 와 비교해서 허용휨인장응력의 89%로 안전하다. 그러나 우측블록 부등침하후 $\sigma_{33}(14.9\text{kgf/cm}^2)$ 는 허용휨인장응력을 87% 초과했다. 수평하중을 받지 않는 우측블록 내측응력비교는 Fig. 19(b)와 같고 좌측블록 부등침하후 $\sigma_{33}(13.0\text{kgf/cm}^2)$ 는 부등침하전의 $\sigma_{33}(0.39\text{kgf/cm}^2)$ 와 비교해서 응력증가가 크며 허용휨인장응력을 63% 초과했고 우측블록 부등침하후 $\sigma_{33}(5.07\text{kgf/cm}^2)$ 는 허용휨인장응력의 63%로 안전하다.

Table 5. Maximum stresses in curved track: without unequal settlement(kg/cm²)

*: 허용응력 초과

구분	σ_{11max}	σ_{22max}	σ_{33max}	τ_{12max}	τ_{13max}	τ_{23max}
응력값	18.2*	11.8*	10.4*	19.7*	10.5*	17.4*
최대응력위치	좌측블록 중앙부분상단	좌측블록 중앙부분상단	좌측블록 중앙부분상단	좌측블록 중앙부분상단	우측블록 중앙부분상단	좌우측블록 중앙부분상단
허용응력	$\sigma_{ta} = 7.96\text{kg/cm}^2$			$\tau_{ca} = 4.68\text{kg/cm}^2$		

Table 6. Maximum stresses in curved track: with left-block unequal settlement(kg/cm²)

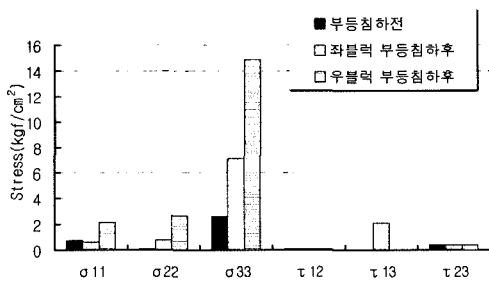
*: 허용응력 초과

구분	σ_{11max}	σ_{22max}	σ_{33max}	τ_{12max}	τ_{13max}	τ_{23max}
응력값	18.2*	11.8*	16.6*	19.7*	10.5*	17.4*
최대응력위치	좌측블록 중앙부분상단	좌측블록 중앙부분상단	좌측블록 내측부분중간	좌측블록 중앙부분상단	우측블록 중앙부분상단	좌우측블록 중앙부분상단

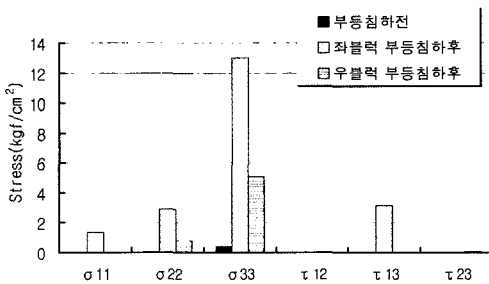
Table 7. Maximum stresses in curved track: with right-block unequal settlement(kg/cm²)

*: 허용응력 초과

구분	σ_{11max}	σ_{22max}	σ_{33max}	τ_{12max}	τ_{13max}	τ_{23max}
응력값	18.2*	11.8*	14.9*	19.7*	10.5*	17.4*
최대응력위치	좌측블록 중앙부분상단	좌측블록 중앙부분상단	좌측블록 내측부분중간	좌측블록 중앙부분상단	우측블록 중앙부분상단	좌우측블록 중앙부분상단



(a) 좌측블럭 내측부분 중간 응력



(b) 우측블럭 내측부분 중간 응력

Fig. 19. Effect of unequal settlement on stresses in curved track case.

5. 결론

본 논문에서는 콘크리트도상 방진침목의 파손에서 부등침하가 미치는 영향을 검토하였다. 열차운행 궤도에서 나타나는 침목의 파손양상은 블록 내측 부분에서 높은 빈도로 발생하며, 3차원 유한요소해석을 통한 응력검토에서 부등침하 발생 시 이 부분

에서 허용응력을 초과하는 것을 확인하였다.

응력해석 결과로부터, 직선구간 및 곡선구간에서 부등침하가 없는 경우에는 블록의 주요 부분의 응력은 허용응력 이내이나, 부등침하를 고려한 응력계산 결과는 방진침목의 블록내측의 일부에서 인장응력이 허용휨인장응력을 초과하는 경우가 있다는 것을 나타낸다. 이러한 초과 응력이 콘크리트 방진침목의 블록내측 부근의 파손에 직접적으로 영향을 준다고 판단된다.

콘크리트도상에서 발생하는 부등침하는 좌우측 블록에 불균등한 하중이 반복적으로 재하되는 것이 주원인이며, 이를 억제하기 위하여 방진재의 강성도를 크게하는 것은 열차충격을 효과적으로 흡수하지 못하여 진동이 궤도구조물의 손상을 유발시킬 수 있고, 승차감을 크게 떨어뜨린다는 점에서 합리적인 해결책이 될 수 없다. 결론적으로 콘크리트도상 방진침목의 설계에 부등침하의 영향을 중요하게 고려하여야 하며, 고강도 콘크리트를 사용하거나, 손상이 발생하는 침목 블록내측 부분에 와이어메쉬와 같은 추가 보강재의 설치가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- 1) 서울시지하철건설본부, 지하철 7호선 궤도 7-4공구 궤도부설공사 궤도구조 개량공사 설계, 1998.
- 2) 宮本俊光, 渡借年 編, 線路(軌道)의設計(管理), 山海堂, 東京, 1980.

- 3) Computers and Structures, SAP2000, Berkeley, CA, 2005.
- 4) 이방우, “분당선 콘크리트도상 궤도구조 결정”, 철도선로, 한국철도선로기술협회, No. 30, pp. 14~24, 1999.
- 5) Coenraad Esveld, Modern Railway Track, 2nd. Edition, MRT-Productions, 2001.
- 6) 이종득, “유도상궤도의 설계에 관한 새로운 고찰”, 철도시설, No. 62, 한국철도기술공사, pp. 27~35, 1996.
- 7) 서울시지하철건설본부, 서울지하철 6호선 궤도 실시설계 궤도구조 계산서, 1996.