

노반의 강성도에 따른 도상압력분포 형상

Shape Pressure Distribution of the Ballast on the Stiffness of Subgrade Soils

최찬용* 황재광** 김대상* 이진욱*
Chan-Yong Choi, Jae-Kwang Hwang, Dae-Sang Kim, Jin-Wook Lee

ABSTRACT

Most of the railroad was constructed as the ballast track which involved in gravel layer, it was gradually increased in plastic settlement due to cyclic train loading. Considerable researcher was investigated a primary factor of the plastic settlement by track model test with ballast track. In this study, computer program named Pentagon 3-D which is a part of FEM program was used in the numerical analysis. Based on the results of numerical results were found to be the effect of load distribution and settlement according to the stiffness of the roadbed condition.

keywords: Ballast, Pressure Distribution, Stiffness, Subgrade Soil, FEM

1. 서론

철도선로의 대부분을 차지하고 있는 유도상궤도는 자갈을 포함하고 있으며, 이러한 자갈도상은 조립재이며, 열차의 반복하중에 의해 점진적으로 침하가 발생한다. 기존 자갈도상궤도의 특성은 한마디로 자갈속에서 부유하는 지지물(Floating support)로 파악할 수 있으며, 이러한 부유하는 지지물로서의 특성은 궤도의 점진적인 파괴 및 궤도틀림의 발생을 기인한다. 국내·외 연구에서는 이러한 자갈도상의 침하에 영향을 미치는 요소들을 정량적으로 검토하기 위하여 흙 노반상의 유도상 궤도를 모사한 궤도모형 시험을 실시하고 있다. 또한, 철도설계편람에서는 기존 강화노반두께 산정시 도상자갈의 연직응력분포는 노반강성에 영향을 미치지 않고 도상두께에 의존된다고 하였으나, 최근 연구에서는 도상자갈의 응력분포는 노반 강성에 따라 크게 변화하며, 노반 강성이 작은 경우에는 응력이 넓게 분산되는 경향이 있고, 노반 강성이 비교적 큰 경우에는 침묵 직하에 집중되고 있다는 논문이 다수 발표되고 있다. 본 연구에서는 노반 강성도에 따라 도상자갈의 응력 및 변위와의 관계를 수치해석을 통하여 검토하였다.

2. 도상자갈의 일반적 특성

2.1 국내 도상자갈규격

철도용품표준규격(도상자갈)기준에 의하여 물리적 시험과 입도시험은 <표 1>과 같다. <표 1>에서와 같이 자갈의 크기에 따라 도상자갈과 채움자갈로 구분하고 있다.

<표 1> 도상자갈의 물리적 성질시험규격

| 품 명 | 규 격 | 단 위 중 량 | 마 모 율 | 압축강도(흡수) |
|------|-----------|------------------------|--------|--------------------------|
| 도상자갈 | 22.4~63mm | 1.4t/m ³ 이상 | 25% 이하 | 800kg/cm ² 이상 |
| 채움자갈 | 10~22.4mm | | | |

* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.

** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원, Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI.

<표 2> 도상자갈의 입도분포

| 품 명 | 호칭차수 (mm) 규 격 | 체를 통과하는 무게 백분율(%) | | | | | |
|------|---------------------|-------------------|------|------|-------|--------|-----|
| | | 10 | 22.4 | 31.5 | 40 | 50 | 63 |
| 도상자갈 | 22.4~63mm | - | 0~5 | 5~35 | 30~65 | 60~100 | 100 |
| 채움자갈 | 10~22.4mm | 0~3 | 100 | - | - | - | - |

국내 도상자갈의 재질 및 두께 규정은 철도건설규칙 제18조(도상의 두께)에서 도상의 두께는 선로의 등급에 따라 <표 3>의 두께 이상으로 하여야 하며, 일반철도의 장대레일(길이가 200미터 이상인 레일을 말한다)구간은 선로의 등급에 관계없이 300밀리미터 이상으로 한다고 규정하고 있다.

<표 3> 국내 도상자갈두께 규정

| 선로의 등급 | 설계속도(km/hr) | 도상두께(mm) |
|--------|-------------|---------------|
| 고속선 | 350 | 350 (도상매트 포함) |
| 1급선 | 200 | 300 |
| 2급선 | 150 | 300 |
| 3급선 | 120 | 270 |
| 4급선 | 70 | 250 |

3. 수치해석에 의한 검토

3.1 해석의 개요

본 해석은 노반 강성 변화에 따른 도상에서의 변위 및 응력을 살펴보기 위해 범용 FEM 프로그램인 Pentagon3D를 이용하여 수행하여 비교·분석하였다. 폭 1.2m, 길이 1.4m, 높이 0.78m(침목 포함)로 침목, 도상, 노반의 세 부분으로 모델링 하였으며, 하나의 침목을 수직으로 중심에서 교차되게 1/4등분한 부분을 모델링 하였다. 침목과 도상, 노반에 사용된 요소는 4절점 8면체를 사용하였으며, 하중은 동적하중이 아닌 정적하중인 점과 모델링 된 침목의 크기를 고려하여 6tonf를 침목 중앙부에 재하하였다.

도상자갈 아래의 하부노반의 강성은 지지력계수(k_{30})를 사용하여 변화를 주었으며, k_{30} 의 변화에 따라 Vesic(1961)이 제안한 <식 1>의 근사식인 <식 2>를 이용하여 변형계수(E_s)를 산정하였다.

$$k = 0.65^{1/3} \sqrt{\frac{E_s B^4}{E_f I_f}} \frac{E_s}{B(1-\nu^2)} \quad \text{<식 1>}$$

$$k = \frac{E_s}{B(1-\nu^2)} \quad \text{<식 2>}$$

본 해석에서는 포아송비를 0.3으로 두고 다음 <식 3>을 이용해 탄성계수(E_s)를 추정하였다.

$$E_s = 48.7 k_{30} \quad \text{<식 3>}$$

3.2 모델링 및 해석과정

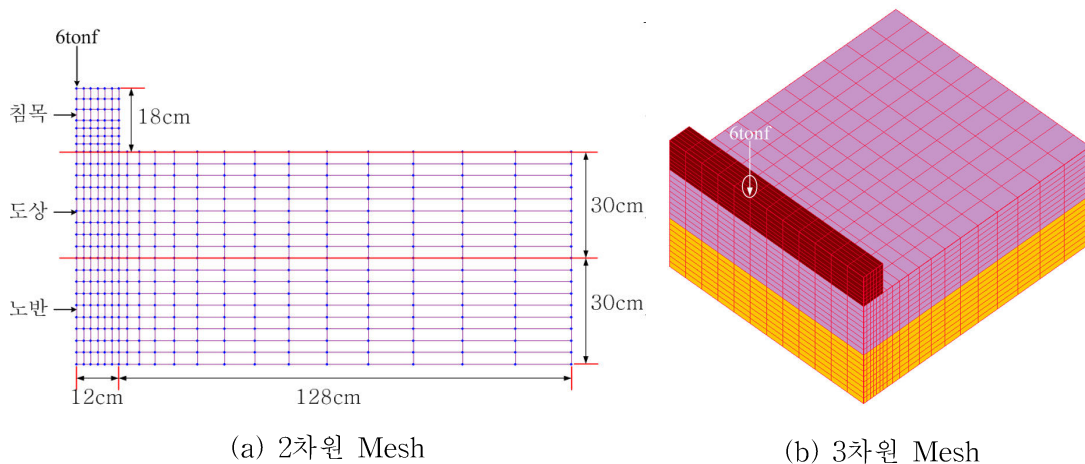
본 논문에서는 노반 강성에 따른 도상에서의 변위 및 응력을 수치해석을 통해 살펴보기 위하여 실시하였으며, 침목과 도상, 노반의 세 부분으로 구성하였다. 침목 모델은 폭 24cm, 높이 18cm, 길이 240cm의 침목을 수직으로 중심에서 교차되게 1/4등분한 부분을 모델링하였으며, 해석지반 모델은 침목높이 18cm를 제외한 깊이 60cm(도상 30cm, 노반 30cm), 폭 120cm로 침목의 1/4부분에 해당하는 하부 도상과 노반을 모델링하였다.

수치해석에 사용된 요소들은 침목과 도상, 노반 모두 4절점 8면체요소를 사용하였으며, 해석에 사용된 각각의 요소들의 물성치는 <표 4>와 같다.

<표 4> 해석지반의 물성치 및 해석조건

| 구분 | 치수 (cm) | 단위중량 γ_t (tonf/m ³) | 체적 탄성계수 K(tonf/m ²) | 전단 탄성계수 G(tonf/m ²) | 점착력 (kgf/cm ²) | 마찰각 (°) | 포아송비 ν | |
|----|--------------|---|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------|---------------|-----|
| 침목 | 120×12×18(h) | 2.3 | 150150 | 128535 | 200 | 60 | 0.3 | |
| 도상 | 30 | 2.1 | 15000 | 7000 | 3 | 35 | 0.3 | |
| 노반 | Case 1 | 30 | 1.9 | 2030 | 937 | 5 | 30 | 0.3 |
| | Case 2 | 30 | 1.9 | 4058 | 1873 | 5 | 30 | 0.3 |
| | Case 3 | 30 | 1.9 | 6088 | 2810 | 5 | 30 | 0.3 |
| | Case 4 | 30 | 1.9 | 8117 | 3746 | 5 | 30 | 0.3 |
| | Case 5 | 30 | 1.9 | 10146 | 4683 | 5 | 30 | 0.3 |

경계조건으로는 침목 및 도상의 상부면과 내부요소들은 자유경계조건을 주었으며, 해석영역 좌·우측면의 X방향 변위, 하단면의 Y방향 변위를 고정하였다. Z방향에 대해서는 경계가 되는 전면과 후면만 구속시켰으며, 그 외의 면과 요소에 대해서는 모두 자유경계로 두고 해석을 수행하였다. <그림 1(a),(b)>은 본 해석에 사용된 모델링을 나타내었다.



<그림 1> 해석단면 및 Mesh

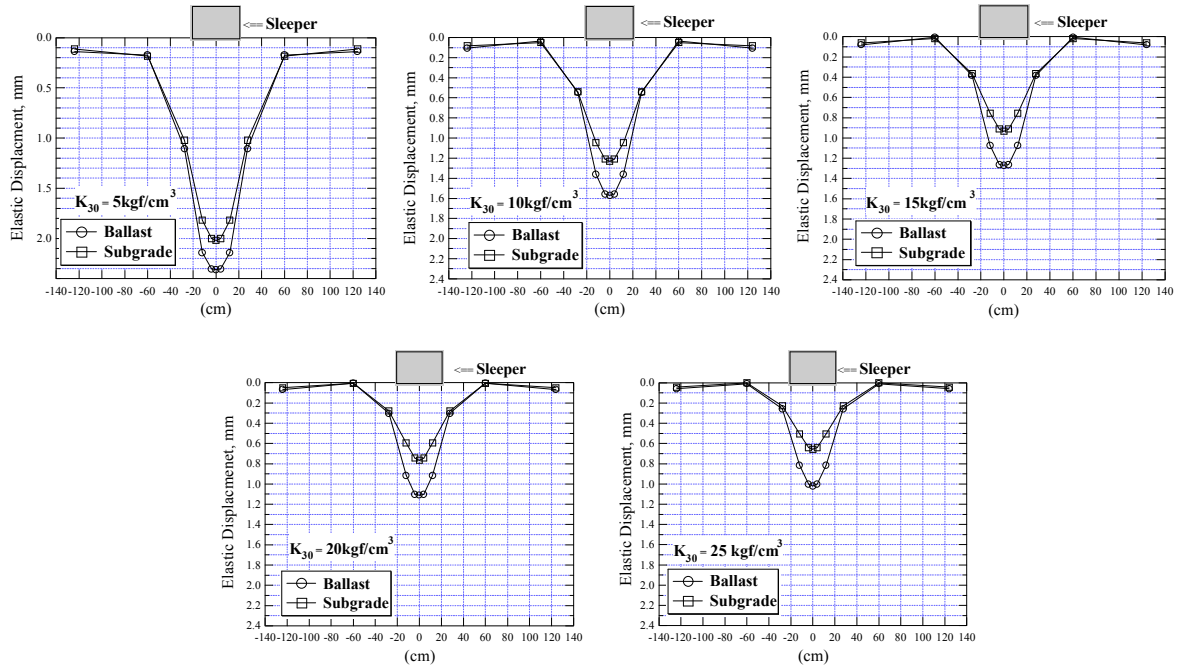
열차하중은 차량특성, 운전조건, 곡선제원, 열차속도 등으로부터 결정된다. 또한 정하중은 정적윤중 값을 이용하는 것으로 하며, 정적 축중을 1/2로 한 것을 정적 윤중으로 한다. 본 해석에 적용된 하중은 설계속도 200km/h를 기준으로 LS22하중을 적용하였으며, 동적하중이 아닌 정정하중이라는 점과 침목 크기가 1/4인 점을 고려하여 설계축중 22tonf의 약 1/4하중인 6tonf를 침목에 재하하였다.

4. 수치해석결과

4.1 시험조건별 침하특성

<그림 2>는 최대 정적하중재하시 노반 표면의 지반반력계수에 따른 도상부와 노반부의 탄성침하량을 나타내었다. <그림 2>에서와 같이 노반의 지반반력계수가 커짐에 따라 도상부와 노반부의 탄성침하량이 작아짐을 알 수 있으며, 노반의 지반반력계수에 따라 노반부와 도상부의 침하량에

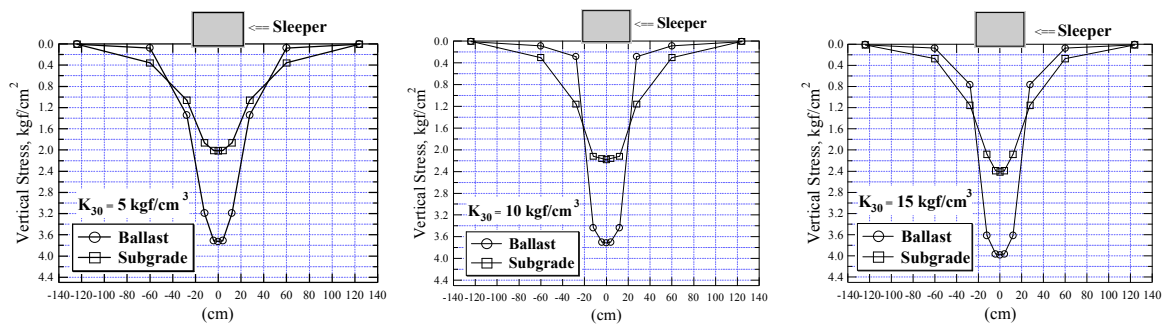
영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 또한, 현재 일반철도의 노반부 지반반력계수의 최소기준인 7kgf/cm^3 이하일 경우에는 허용탄성침하량 2.5mm 에 거의 도달하고 있는 것을 볼 수 있어 관리기준 차원에서 7kgf/cm^3 이상이 필요할 것으로 판단된다. 노반의 지반반력계수가 10kgf/cm^3 이상일 경우에는 거의 변화정도가 미미한 것을 알 수 있었다.

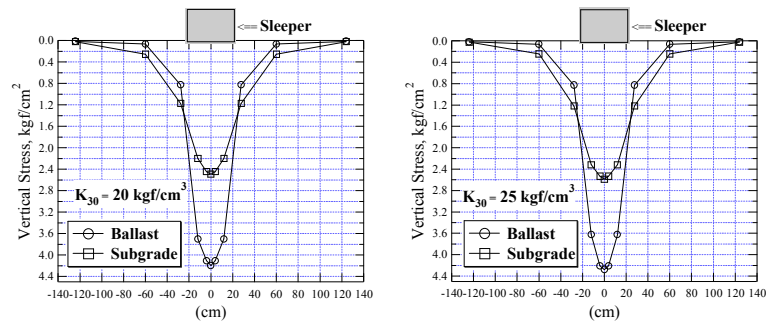


<그림 2> 노반의 지반반력계수에 따른 도상부 및 노반의 탄성침하

4.2 시험조건별 응력특성

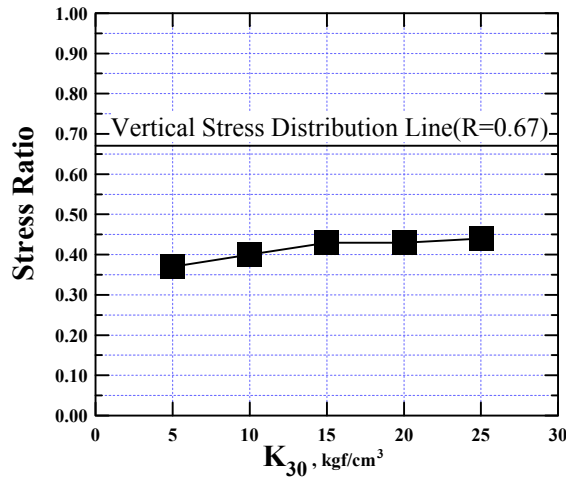
<그림 3>은 노반의 지반반력계수에 따른 도상부와 노반부에서 발생된 수직응력을 나타내었다. <그림 3>에서와 같이 노반부와 도상부에서 발생된 수직응력은 각각 $2.02\sim 2.59\text{kgf/cm}^2$, $3.73\sim 4.28\text{kgf/cm}^2$ 의 범위로 나타났다. 노반의 지반반력계수가 커짐에 따라 노반부와 도상부에서 약간씩 수직응력이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.





<그림 3> 노반의 지반반력계수에 따른 도상부와 노반부에서의 수직응력 특성

<그림 4>는 수치해석에서 얻은 도상층의 응력과 노반상부의 응력을 도상중간부분의 응력과의 비(이하 응력비)로 정리하였다. 일본 RTRI에서 수행된 결과에 따르면 침목직하 노반면의 응력비는 도상두께 200mm의 경우 약 0.67이라고 밝힌바가 있다. <그림 4>에서와 같이 노반의 지반반력 계수에 따라 응력비는 증가하는 경향을 보이고 있으며, 지반반력계수(k_{30})가 15kgf/cm³이상부터는 수렴하는 것을 알 수 있다. FEM해석결과, 침목 직하 노반면에서의 응력비는 0.38~0.43정도로서 0.67보다 상당히 작게 나온것을 알 수 있다. 따라서, 유도상궤도에서 노반강성에 따라 도상자갈층에서의 응력분포가 크게 변한다는 것을 알 수 있다. 향후 여러 침목에 의한 꺾침 효과 등을 고려하여 해석을 진행할 예정이며, 연구원에서 보유하고 있는 이동재하 시험장비를 이용하여 모델시험을 통해 타당성을 검토할 예정이다.



<그림 4> 노반지반반력계수와 침목직하 노반면 응력비의 관계

5. 결론

이동재하시험 토조와 동일한 크기로 모델링을 수행하여 향후 모델시험과 수치해석결과와 비교 분석을 수행하기 위하여 노반강성에 따른 유도상궤도의 침하, 응력 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 보였다.

1. 노반의 지반반력계수가 커짐에 따라 도상부와 노반부의 탄성침하량이 작아짐을 알 수 있으며, 노반의 지반반력계수에 따라 노반부와 도상부의 침하량에 영향을 미치는것을 볼 수 있다.
2. 노반부와 도상부에서 발생된 수직응력은 각각 2.02~2.59kgf/cm², 3.73~4.28kgf/cm²의 범위로 노반의 지반반력계수가 커짐에 따라 노반부와 도상부에서 약간씩 수직응력이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.
3. 침목 직하 노반면에서의 응력비는 0.38~0.43정도로서 0.67보다 상당히 작게 나온것을 알 수

있다. 따라서, 유도상궤도에서 노반강성에 따라 도상자갈층에서의 응력분포가 크게 변한다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. 철도용품표준규격(도상자갈)기준, 철도5610-1058가, 2000
2. 한국철도기술연구원, “철도노반 관리기준 정립 및 개선방안”, 2005
3. 村本勝己 외 1명, “반복하중에 대한 발라스트 궤도의 침하특성”, 토목학회 제55회 학술강연집, 2000
4. 林本勝己 외 2명, “반복하중에 따른 도상발라스트의 입도와 강도 변형특성에 관한 검토”, 제 36회 지반공학연구회 발표, 2001
5. 大塚 勝, “노반의 강성과 노반압력분포에 관한 검토”, 철도초연원간발표회 강연요령, 2001