

GEOTRACK을 이용한 궤도변수에 따른 침하 및 응력 특성 분석
**Analysis of Settlement and Stress Characteristics about Influence of Track
Parameters on Railroad Roadbed by using GEOTRACK**

신은철* 이한진** 강정구*** 양희생****
Shin, Eun-Chul Lee, Han-Jin Kang, Jeong-Gu Yang, Hee-Saeng

ABSTRACT

Railroad track consists of relatively simple structures such as rail, sleeper, ballast. Roadbed shares vertical pressure by train load which passed through rail to ballast as base that supports the track. For evaluating stress and displacement of roadbed due to the railroad load is an important role on the track as a basic data for estimation of the durability and design of the roadbed thickness. GEOTRACK program applied multi-layered theory was developed for analyzing railroad track structure. GEOTRACK program is a sort of numerical analysis program which has advantage that can analysis component of track by simple method. In this study, this program was used to preform the numerical analysis by changing track conditions and roadbed conditions such as tie, reinforced roadbed, dynamic wheel load, Resilient modulus and so on. Further detail will be presented on the paper.

Keywords : Railroad roadbed, Elastic settlement, Vertical stress, Geotrack program

1. 서 론

철도의 궤도는 레일, 침목, 도상부 등 간단한 구조로 되어져 있으나, 열차하중이 작용할 때 레일부를 통해 침목, 도상상부로 거쳐 노반에서의 응력변화는 다양하게 변화한다. 이러한 철도하중에 대한 노반의 응력과 침하를 적절하게 평가하는 것은 노반설계 또는 노반의 내구성 평가 등의 기초자료로 매우 중요한 역할을 한다. 국내에서 철도노반과 관련되어 수행된 연구는 주로 철도기술연구원을 중심으로 수행되었다(최찬용외 3인, 2005).

본 연구에서는 궤도의 구성요소를 간단한 방법으로 모두 구현할 수 있는 장점을 가진 GEOTRACK 프로그램(Chang et al., 1979)을 통해 일반적으로 많이 사용되고 있는 궤도조건과 노반조건을 해석한 후 침목 종류, 층두께, 주행운중의 조건을 변화시켜 도상, 노반부에 발생된 응력 및 침하를 검토하였다.

* 인천대학교, 토목환경시스템공학과, 정희원

E-mail : ecshin@incheon.ac.kr

TEL : (032)770-8466 FAX : (032)770-8460

** 한양건설

*** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정

**** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정

2. GEOTRACK Model

2.1 GEOTRACK 프로그램의 개요

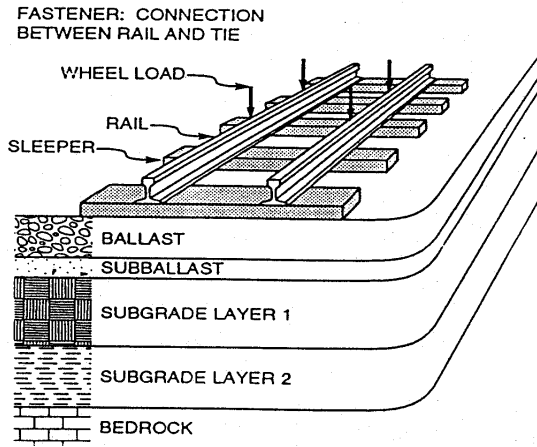


그림 1. GEOTRACK Model의 단면

GEOTRACK 프로그램은 축하중, 레일과 침목의 물성치, 도상과 하부층에 대한 물성치, 침목간격과 층두께 등을 고려할 수 있는 프로그램으로서 도상, 보조도상 그리고 노반층에서 응력과 변형을 해석할 수 있다. GEOTRACK 프로그램은 도상, 보조도상, 그리고 노반재료들을 위한 응력 종속 변수를 이용하는 3차원 다층모형 (Multilayer Model)이다. 이 프로그램의 결과는 레일에 작용하는 하중, 침목과 도상사이에서 작용되는 반력, 침목 및 레일의 휨모멘트 등을 결과로 산출된다. 이 밖에도, 결과는 도상, 보조도상, 그리고 노반에서의 각 위치에 따른 수직변위와 응력 등을 3차원 응력상태로 해석이 가능하다.

2.2 기본조건

본 해석에서는 노반층(도상층+강화노반)의 두께, 설계속도에 의한 주행운하중의 변화 및 침목 Segment에 따른 침하량 및 응력의 상태를 검토하였다. 레일과 침목의 물성치는 모든 해석에서 동일하다. 그림 2에 침목 Segment를 나타내었고 그림 3에 침목 물성치를 입력하는 창을 나타내었다.

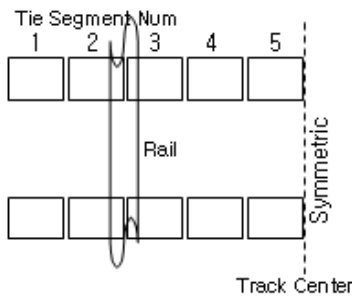


그림 2. 침목 Segment

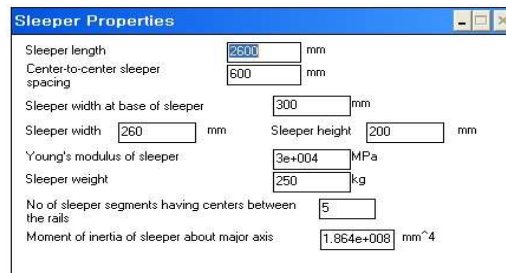


그림 3. 침목 물성치

표 1과 표 2은 침목과 레일의 물성치를 나타내었다. 층은 도상, 강화노반, 노상, 원지반의 4층으로 나누었으며 해석에 사용된 층 특성은 표 3에 나타내었다. 강화노반의 회복탄성계수는 안전측 해석을 위해 낮은 값인 14MPa로 설정하였다.

표 1. 침목 물성치

침목	길이 (mm)	간격 (mm)	저면폭 (mm)	폭 (mm)	높이 (mm)	탄성계수 (MPa)	무게 (kg)	Segment	단면2차M (mm^4)
물성치	2600	600	300	260	200	30000	250	5	18640000

표 2. 레일 물성치

레일	레일간격 (mm)	단면적 (mm^2)	탄성계수 (MPa)	무게 (kg/m)	체결구 (kN/m)	단면2차M (mm^4)
물성치	1435	7750	210000	60	800000	30900000

표 3. 해석시의 층별 기본 물성치

층	회복 탄성계수 (MPa)	포아송비	층 두께 (mm)	단위중량 (kN/m^3)	수평토압계수	응력 의존성	K1	K2
도상	118	0.30	300	1.9	0.34	1	1569	0.535
강화노반	14	0.35	800	1.8	0.38	6	0	0
노상	19.4	0.35	2000	1.8	0.42	6	0	0
원지반	19.4	0.35	infinite	1.8	0.42	5	0	0

3. 수치해석 및 결과

3.1 층 두께별 노반침하량 및 응력

본 해석에서 층은 노반층(도상층+강화노반), 노상, 원지반 4층으로 구분하였으며 총 두께는 3100mm로 고정시켰다. 수치해석은 도상층 두께 200mm와 300mm에 대해 강화노반층의 두께를 100mm, 200mm, 300mm, 500mm, 800mm로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 침하량 측정위치는 도상층 두께 200mm 시 노반표면으로부터 300mm, 400mm, 500mm, 1000mm깊이의 위치로 하였고, 도상층 두께 300mm 시 400mm, 500mm, 600mm, 1100mm깊이에서 측정하였다. 표 4는 해석에 쓰인 입력 변수값을 나타내었다.

표 4. 층별 물성치 및 두께변화 조건

층	회복 탄성계수 (MPa)	포아송비	층 두께 변화조건(mm)		단위중량 (kN/m^3)	수평토압 계수	응력 의존성	K1	K2
도상	118	0.30	200	300	1.9	0.34	1	1569	0.535
강화노반	14	0.35	100,200,300, 500,800	100,200,300, 800	1.8	0.38	6	0	0
노상	19.4	0.35	2800,2700,2600, 2400,2100	2700,2600, 2500,2000	1.8	0.42	6	0	0
원지반	19.4	0.35	infinite	infinite	1.8	0.42	5	0	0

그림 4, 그림 5은 도상의 두께가 200mm일 때 강화노반두께별 침하량, 응력을 나타내었으며, 그림 6, 그림 7은 도상의 두께가 300mm일 때 결과를 나타내었다. 그림 4에서와 같이 도상두께가 20cm일 때 강화노반두께를 증가시킬수록 침하량은 감소하는 것으로 나타났으며, 침하가 가장 적게 발생하는 곳은 침목 끝부분이었다.

강화노반의 두께가 얇을수록 침하는 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 최대 침하가 발생하는 곳은 강화노반두께 800mm에서는 Segment 2과 Segment 3사이에서, 그 외 강화노반두께에서는 Segment 3과

Segment 4사이 구간에서 발생하고 있다. 이는 열차하중이 재하되는 Segment 2과 Segment 3의 사이에서 최대 침하가 일어나는 것과 상이한 결과이다.

이러한 결과가 나온 이유는 침하는 각 침목으로 지지된 하중분포내 장방형 등분포 하중에 의해 생기므로 최대 침하량은 각각의 침목에 발생하는 침하를 중첩시킨 결과라고 판단된다. 이 그림에서 보듯이 강화노반의 두께가 두꺼워 질수록 중첩의 효과는 감소하는 것을 알 수 있다.

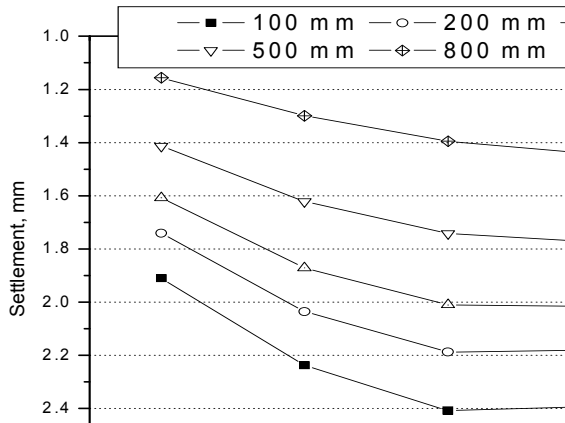


그림 4. 강화노반두께별 노반상부에서의 침하량 (도상두께 200mm)

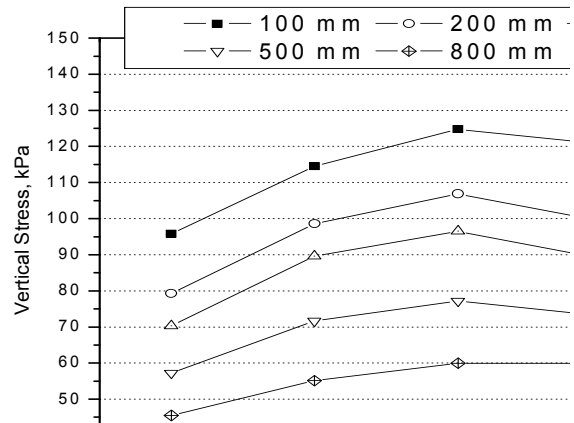


그림 5. 강화노반두께별 노반상부에서의 수직응력 (도상두께 200mm)

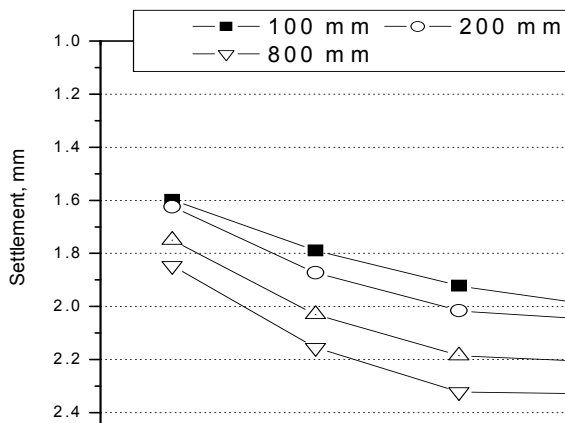


그림 6. 강화노반두께별 노반상부에서의 침하량 (도상두께 300mm)

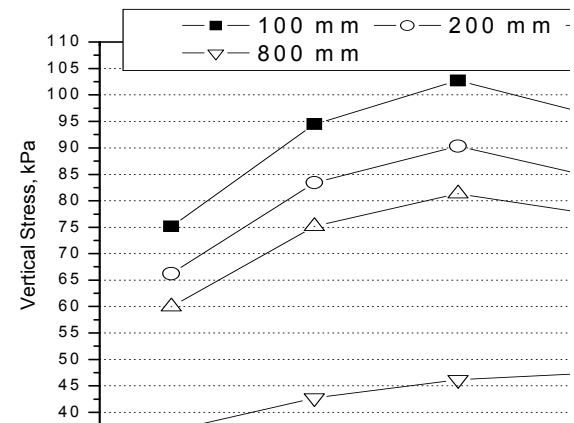


그림 7. 강화노반두께별 노반상부에서의 수직응력 (도상두께 300mm)

그림 5은 노반두께변화에 따른 응력을 나타낸다. 응력특성은 열차하중이 재하되는 Segment 3근처에서 가장 높은 값을 나타내고 있다. 응력은 침목끝과 궤간사이에서 낮은 값을 보여주고 있다. 강화노반의 두께가 증가 할수록 강화노반에 발생하는 응력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 깊이가 깊어질수록 하중이 분산되는 효과가 발생하기 때문이다.

도상두께 200mm일 때 강화노반 두께별 최대침하량은 강화노반 두께가 증가할수록 침하량은 감소하고 있다. 강화노반두께가 100mm 일때 최대침하량은 2.4mm정도로 허용침하량 기준 2.5mm 내에 포함되고 있다.

그림 6은 도상두께가 300mm일 때 강화노반두께에 따른 침하량을 나타낸 것이다. 이는 도상두께 200mm일 때와 비슷한 침하특성을 보여주고 있다. 그러나, 도상두께가 200mm일 때보다 침하가 전체적으로 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 도상두께의 증가로 인해 하중이 분산되어 응력이 감소되었기 때문이다. 그림 7은 도상두께 300mm일 때 강화노반두께 별로 응력 특성을 나타내고 있는 그래프로 역시

도상두께 200mm와 같은 양상을 보여주고 있다. 침하그래프와 같이 도상두께 200mm일 때보다 발생하는 응력이 감소했음을 알 수 있다. 도상두께 300mm일 때 강화노반두께별 최대침하량은 도상두께의 증가로 인해 강화노반의 최대침하량이 강화노반 두께가 증가함에 따라 감소하고 있으며, 도상두께 200mm일 때 보다 작은 침하를 유발시킨다.

3.2 설계속도에 의한 주행 윤회중별 노반침하량 및 응력

이 해석을 수행하기 위해 선로 급선별 축중과 윤회중을 산출하였다. 산출된 정적윤회중으로부터 주행윤회중은 식 (1)로 계산된다.

$$P_d = \left(1 + \frac{0.0052 V}{D}\right) P_s \quad (1)$$

선로급선별 설계속도와 열차하중, 축중과 정적윤회중과 위 식으로부터 산출된 주행윤회중을 다음 표 6에 나타내었다.

표 5. 급선별 주행윤회중

급선별	설계속도 (km/hr)	열차하중	축중 (kN)	정적윤회중 (kN)	주행윤회중 (kN)
고속철도	350		180	90	252
1급선	200	LS-22	220	110	223
2급선	150	LS-22	220	110	195
3급선	120	LS-18	180	90	145
4급선	70	LS-18	180	90	122

그림 8는 급선별 주행윤회중에 따른 침하량을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 주행윤회중이 클수록 침하는 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 9은 주행윤회중에 따른 응력특성을 나타내고 있다. 유발하는 응력 역시 주행윤회중이 클수록 크게 발생하였다. 주행윤회중에 따른 최대침하량은 고속철도의 침하량이 2.23mm, 1급선이 1.94mm, 2급선이 1.66mm, 3급선이 1.10mm, 4급선이 0.87mm로 허용 침하량인 2.5mm를 만족하는 것으로 나타났다.

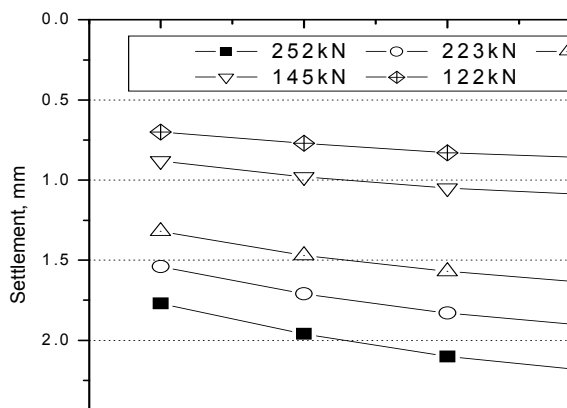


그림 8. 주행윤회중별 침하량

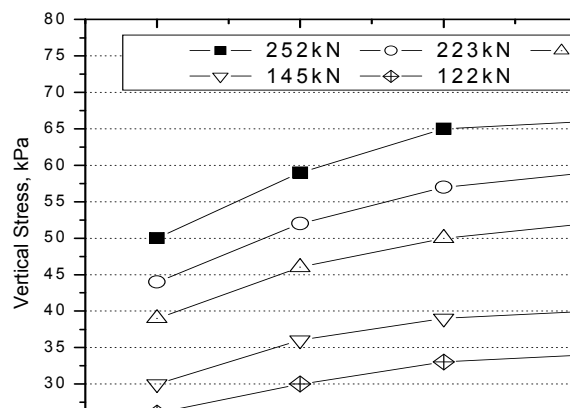


그림 9. 주행윤회중별 수직응력

3.3 침목별 침하량 및 응력

본 해석에서는 침목별 침하량과 응력을 산출하였다. 침목은 콘크리트침목으로 보통침목과 분기침목으로 구분하여 수치해석에 사용하였다. 표 6은 침목의 물성치와 규격을 나타내었다.

표 6. 침목별 물성치와 규격

보통침목		분기침목	분기침목종류	침목길이
길이	2500 mm	1~7 mm	1	2800 mm
간격	600 mm	600 mm	2	3100 mm
저면폭	300 mm	300 mm	3	3400 mm
폭	240 mm	240 mm	4	3700 mm
높이	150 mm	150 mm	5	4000 mm
탄성계수	30000 MPa	30000 Mpa	6	4300 mm
무게	250 kg	250 kg	7	4600 mm
Segment	5	5		
단면2차M	18640000 mm ⁴	18640000 mm ⁴		

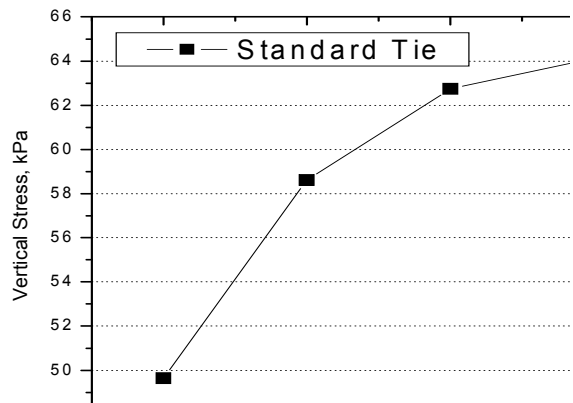
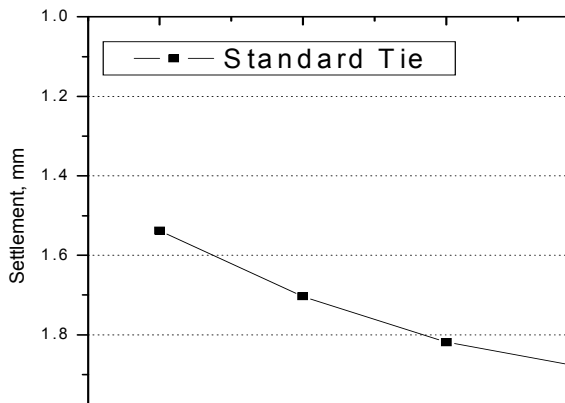


그림 10. 보통침목에서 발생된 침하량 및 수직응력

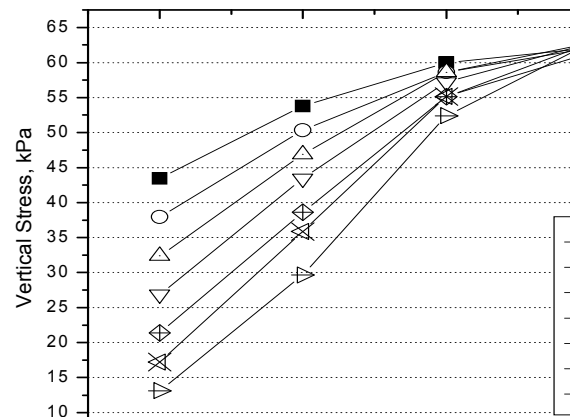
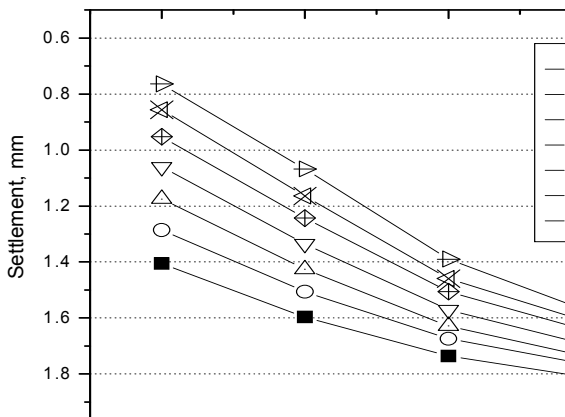


그림 11. 분기침목에서 발생된 침하량 및 수직응력

그림 10는 노반(도상+강화노반)두께가 1000mm일 때 보통침목 사용 시 강화노반의 침하량과 작용하는 응력을 나타내고 있다. 침하의 양상은 앞의 침하특성과 비슷하며, 침목 Segment별 침하량은 1.5mm~2.0mm 사이인 것을 알 수 있다. 최대응력은 열차하중 재하 지점 근처에서 64kN으로 나타나고, 최소응력은 침목 끝 부분에서 50kN이 발생하는 것으로 나타났다.

그림 11은 분기침목 제원별 침하량과 작용하는 응력을 나타낸 것이다. 분기침목 1에서 7로 갈수록 침목의 길이가 큰 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 침목길이가 짧을수록 즉, 하중이 재하되는 단면적이 작을수록 침하는 크게 발생하고 침목길이가 커질수록 침하는 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 침목의 단면적이 클수록 열차하중을 받아 도상으로 넓게 분산하기 때문이라고 판단된다. 또한, 침목의 길이가 변화되어도 허용침하기준 2.5mm이내 포함되고 있음을 알 수 있다. 분기침목별 응력특성은 침목이 열차하중을 받는 침목 단면적이 작을수록 노반에는 높은 응력이 발생됨을 알 수 있다. 여기서 침목 Segment 4에서 분기침목별 응력이 거의 같은 값을 나타내고 있다. 이는 궤간 중앙 부분에서는 침목의 단면적이 거의 영향을 주지 않음을 나타낸다고 할 수 있다.

3.4 침목 Segment별 깊이에 따른 침하량 및 응력

침목 Segment별 깊이에 따른 침하량 및 응력을 검토하기 위해 강화노반의 두께가 300mm 일때, 수치해석을 수행하였다. 침하량 및 응력의 측정위치는 도상표면으로부터 175mm, 300mm, 600mm, 1000mm에서 측정하였다. 표 7은 해석에 입력된 변수들을 나타내었다.

표 7. 입력변수

층	회복 탄성계수 (MPa)	포아송비	층 두께 (mm)	단위중량 (kN/m^3)	수평토압계수	응력 의존성	K1	K2
도상	118	0.30	300	1.9	0.34	1	1569	0.535
강화노반	14	0.35	300	1.8	0.38	6	0	0
노상	19.4	0.35	2000	1.8	0.42	6	0	0
원지반	19.4	0.35	infinite	1.8	0.42	5	0	0

강화노반두께 300mm일때 침목 Segment별 침하와 응력은 그림 12에 나타낸 바와 같다. 가장 작은 응력특성을 나타내는 구간은 침목 Segment 1구간 즉, 침목의 끝부분에서 발생하였다. 최대응력이 발생하는 구간은 열차하중이 작용하는 3구간근처이나 측정 깊이가 낮은 곳에서는 4구간에서 가장 큰 응력이 발생되었다. 측정깊이가 깊어질수록 침목 Segment별 응력 및 침하량은 구간별 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 층두께가 증가하면서 하중을 분산시켜 깊은 심도에서는 침목 Segment에 따라 열차하중의 영향이 거의 없다는 의미이다.

깊이에 따른 Segment별 침하와 응력을 살펴보면 도상 표면에서 깊이 5000mm에서는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 기존의 연구문헌에서 열차하중의 영향은 5000mm 깊이 정도 까지 그 영향을 미치며 그 깊이 이상에서는 거의 영향을 받지 않는다는 결과와 유사한 경향을 보여주는 것이다. 그림 13는 이러한 경향을 보여주는 나타내고 있다.

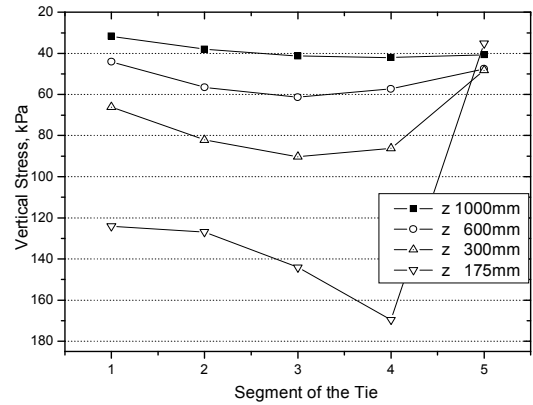
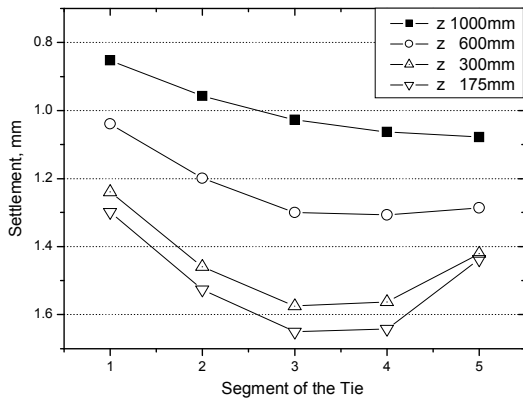


그림 12. Segment별 측정위치에 따른 침하량 및 수직응력(강화노반 두께 300mm)

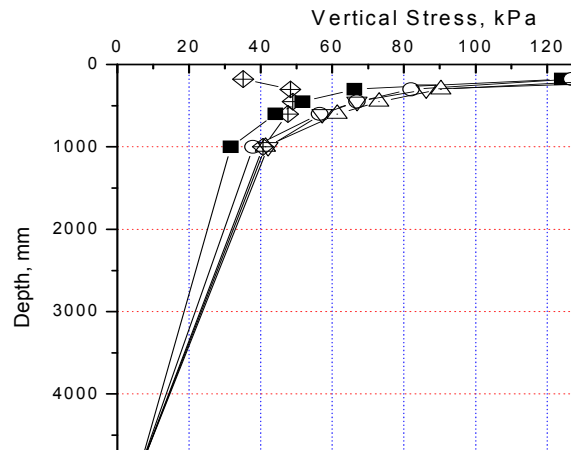
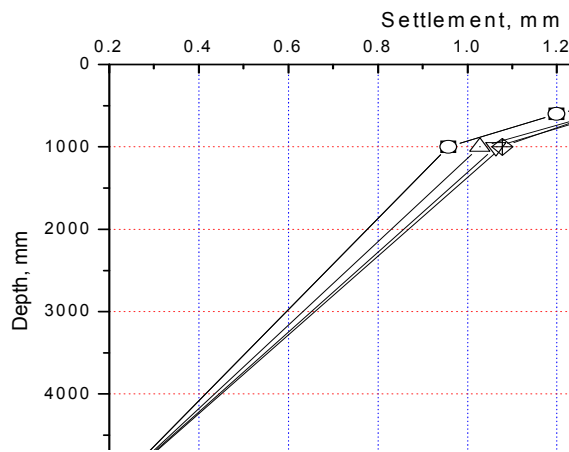


그림 13. Segment별 깊이에 따른 침하량 및 수직응력(강화노반 두께 300mm)

4. 결 론

본 연구에서는 노반에서 환경조건을 다양하게 제시하여 Geotrack을 사용, 수치해석을 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 강화노반과 노상의 두께를 변화시켜 수치해석을 실시한 결과는 다음과 같이 나타났다. 도상두께가 20cm일 때 강화노반두께별로 침하가 발생하는데 강화노반두께를 증가 시킬수록 침하량은 감소하는 것으로 나타났다. 침하가 가장 적게 발생하는 곳은 침목 끝부분이었다. 도상두께 200mm일 때 강화노반 두께별 최대침하량을 나타내고 있다. 강화노반 두께가 증가할수록 침하량은 감소하고 있다. 강화노반두께가 100mm 일 때 최대침하량은 2.4mm정도로 앞에서 제 설정한 허용침하량 기준 2.5mm 내에 포함되고 있다. 도상두께가 300mm일때는 200mm일 때와 비슷한 침하특성을 보여주고 있다. 그러나 도상두께가 200mm일 때보다 침하가 전체적으로 감소하였다.
- (2) 급선별 주행윤중에 따른 침하량은 주행윤중이 클수록 침하는 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 주행윤중에 따른 최대침하량은 고속철도의 침하량이 2.23mm, 1급선이 1.94mm, 2급선이 1.66mm, 3급선이 1.10mm, 4급선이 0.84mm로 허용 침하량 2.5mm를 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 침목 Segment별 작용하는 응력특성과 침하특성을 검토한 결과, 가장 작은 응력을 나타내는 침목 Segment는 1구간 즉, 침목의 끝부분에서 발생하였다. 최대응력이 발생하는 구간은 열차하중이 작용하는 3구간근처이나 측정 깊이가 낮은 곳에서는 4구간에서 가장 큰 응력이 발생되었다. 측정깊이가 깊어질수록 침목 Segment별 응력 및 침하량은 구간별 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 층두께가 증가하면서 하중을 분산시켜 깊은 심도에서는 침목 Segment에 따라 열차하중의 영향이 적다는 것을 뜻한다.

감사의 글

본 연구는 건교부 건설기반구축사업의 일환으로 “토공노반 최적두께산정을 위한 설계표준 기술연구”의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. Ching S. Chang, Clement W. Adegoke, Ernest T. Selig (1980), "GEOTRACK Model for Railroad Track Performance" Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 106, No. 11, November 1980, pp.1201-1218
2. Dingqing Li (1994), "Railway Track Granular Layer Thickness Design Based on Subgrade Performance under Repeated Loading"
3. 김대상, 이수형, 최찬용, 황선근 (2005), “일반철도와 고속철도의 강화노반두께에 관한 연구”, 한국철도학회, 제8권, 제2호
4. 최찬용, 이진욱, 황선근, 김성수 (2005), “Geotrack을 이용한 궤도변수에 따른 침하 및 응력특성”, 대한토목학회 정기학술대회 논문