

# 강화노반 두께 결정을 위한 영향인자 민감도 분석

## Sensitivity Analysis of the Factors Influencing for Decision of Reinforced Roadbed Thickness

최찬용 이진욱 배재훈 신은철  
Chan yong, Choi Jin Wook, Lee Jae Hoon, Bae Eun Chul, Shin

### ABSTRACT

The purpose of a railway track is to provide a smooth surface for safe and economical train transportation. The performance of the track results from a complex interaction of the track and subgrade components in response to train loading and environmental actions. In the past, the role of subgrade as the track foundation were not recognized adequately. There are insufficient information and inadequate methods for subgrade design, assessment and improvement. This situation has survived for a long time largely because a subgrade defect can often be adjusted by adding more ballast under the ties or applying more frequent track maintenance. Therefore, the application of reinforced roadbed technology will be expected to increase in the future. The reinforced roadbed thickness is set depending on subgrade reaction modulus( $K_{30}$ ) in the condition of upper subgrade through PBT in both conventional railroad and KTX railroads. As train velocity (V), train passing tonnage (N), and train axial load (P) are not considered in design, the roadbed thickness could be overestimated (or underestimated). Therefore, In this study, the computer model, GEOTRACK, was analyzed the influence of reinforced roadbed thickness factors on track modulus and the characteristics of stress pulses in track and subgrade generated by repeated axle loading.

### 1. 서론

고속철도의 도입과 함께 도입된 강화노반은 분니 발생 억제와 자갈도상궤도의 생력화를 위해 많은 장점을 가지고 있으며, 열차속도향상을 위해서 향후 적용이 확대될 것으로 예상된다. 강화노반두께를 증가시키는 것은 안전 측을 위해서는 바람직하나, 경제적인 설계두께를 가지기 위해서는 최적의 강화노반 두께를 결정할 필요가 있다. 강화노반두께는 궤도구조형식, 윤중 크기, 상하부노반의 강성, 열차통과톤수 등 고려해야 할 인자들에 의해 결정하여야 한다. 현재 국내에서 설계기준서에 제시하고 있는 강화노반 두께를 결정하는 방법은 평판재하시험으로 구한 지반반력계수( $k_{30}$ )의 범위로 강화노반두께를 결정하고 있다. 이러한 지반반력계수로 강화노반 두께를 결정하는 설계방법은 일본철도설계동해설(토공편)<sup>1</sup> 기준서를 참고하여 제정되었다. 또한, 고속철도 설계기준에서 제시하고 있는 강화노반두께는 보조도상과 입도조정층으로 구분하여 관리하고 있다. 본 논문에서는 궤도 조건을 동일하다고 가정하여 상부노반과 하부노반의 지반조건에 따른 강화노반층의 응력과 변형특성을 해석하였다. 이를 통해 강화노반의 영향을 주는 토공부의 민감도 분석을 실시하였다.

### 2. 기존 강화노반 설계법

일반철도의 강화노반의 두께는 궤도구조, 열차속도, 노반의 강도 등 여러 조건을 고려하여 결정하고 <표 1>과 <표 2>에서 정한 두께를 표준으로 한다.

\*한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 정회원, E-mail: [cychoi@krri.re.kr](mailto:cychoi@krri.re.kr) TEL:(031)460-5317 FAX:(031)460-5319

\*\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 정회원

\*\*\* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원 비회원

\*\*\*\* 시립인천대학교 토목환경시스템공학과 교수 정회원

<표 1>과 <표 2>는 일반철도에서 사용하고 있는 강화노반 설계두께이다. 기본적으로 하부노반과 상부노반으로 이루어진 2층계 탄성체 지반의 표면에 장방형 등분포의 도상 압력이 작용될 때, 그 표면 중심의 변형이 기준치(2.5mm) 이하가 되도록 노반두께를 구한 것이다. 강화노반두께에 대해서는 최소치를 제한하여 노반을 시공할 때 재료분리가 생기지 않도록 하여야한다. 시공 시의 재료분리는 시공 두께가 얇은 경우에 발생하므로 일반적으로 최대 입경의 약 3배정도 두께가 되도록 한다.

<표 1> 노반 조건별 강화노반 두께(장대레일), [철·설(노반편) 제2편 토공편]

노반조건	재료	입도조정 쇄석 또는 고로슬래그쇄석(mm)	배수층 (mm)	수경성입도조정고로 슬래그쇄석(mm)	배수층 (mm)
흙쌓기	$K_{30} \geq 110 \text{kN/m}^3$	200	0	150	0
흙쌓기	$70 \text{kN/m}^3 \leq K_{30} < 110 \text{kN/m}^3$	350	0	250	0
땅깎기, 평지	$K_{30} \geq 110 \text{kN/m}^3$	200	150	150	150
땅깎기, 평지	$70 \text{kN/m}^3 \leq K_{30} < 110 \text{kN/m}^3$	350	150	250	150

<표 2> 노반 조건별 강화노반 두께(이음레일), [철·설(노반편) 제2편 토공편]

노반조건	재료	입도조정 쇄석 또는 고로슬래그쇄석(mm)	배수층 (mm)	수경성입도조정고로 슬래그쇄석(mm)	배수층 (mm)
흙쌓기	$K_{30} \geq 110 \text{kN/m}^3$	350	0	250	0
흙쌓기	$70 \text{kN/m}^3 \leq K_{30} < 110 \text{kN/m}^3$	650	0	500	0
땅깎기, 평지	$K_{30} \geq 110 \text{kN/m}^3$	350	150	250	150
땅깎기, 평지	$70 \text{kN/m}^3 \leq K_{30} < 110 \text{kN/m}^3$	650	150	500	150

<표 3>는 고속철도 설계기준에 있는 노반조건별 강화노반두께이다. 앞서 일반철도와 달리 고속철도에서는 강화노반을 보조도상과 입도조정층으로 구분하여 강화노반으로 정의하고 있으며, 상부노반조건에 따라 보조도상을 20cm로 동일하게 하고 각 조건에 따라 입도조정층을 다르게 설계하고 있다.

사용하는 재료의 입경기준으로 볼 때 고속철도의 보조도상은 일반철도의 강화노반과 유사한 기능을 하며, 입도조정층은 동상방지의 기능과 보조도상을 통해 침투하는 우수가 상부노반으로 침투하는 것을 방지하기 위한 층으로써 상부노반의 조건에 따라 30~60cm를 사용하도록 규정되어 있다. 따라서, 고속철도의 경우 흙쌓기의 경우 최대 80cm~50cm로 강화노반층을 설계하도록 규정되어져 있다.

<표 3> 고속철도 노반조건별 강화노반 두께

상부노반조건	종별 재료	강화노반		계(cm)
		보조도상	입도조정층	
둔기	$7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	20	60	80
	$K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	20	30	50
본바닥 및 깎기	$7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	20	75	95
	$K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$	20	45	65
	압반	20	15~25	35~45

<표 4>는 고속철도와 일반철도의 강화노반 두께를 보이고 있다. 고속철도의 경우(장대레일) 입도조정층을 포함하여 강화노반두께를 비교할 경우 일반철도보다 약 2배 이상의 강화노반두께로 설계하고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 일반철도에서도 압반상의 강화노반두께에 대한 규정항목이 추가할 것으로 판단

된다.

<표 4>는 고속철도와 일반철도의 강화노반 두께

종별	고속철도 설계기준 강화노반	일반철도			비고			
		보조 도상	입도 조정층	계(cm)				
상부노반 조건	재료							
돋기	$7 \leq K_{30} < 11kgf/cm^3$	20	60	80	장대 레일	이음 레일	동상 방지층	
	$K_{30} \geq 11kgf/cm^3$	20	30	50	35	65	필요시 설계	
분바닥 및 깎기	$7 \leq K_{30} < 11kgf/cm^3$	20	75	95	35	65	“	
	$K_{30} \geq 11kgf/cm^3$	20	45	65	20	35	“	
	압반	20	15~25	35~45	-	-	-	

### 3. Geotrack 해석결과를 이용한 민감도 분석

#### 3.1 해석조건

본 논문에서는 상부노반과 하부노반의 회복탄성계수( $M_R$ )에 따라 토공노반의 응력과 변위량의 변화를 통해 해석조건에 따른 민감도 해석을 실시하였다. 일반적으로 강화노반 두께에 영향을 주는 인자로는 크게 궤도조건(하중, 열차 통과톤수, 레일, 패드, 침목 등)과 강화노반을 지지하고 있는 토공 지반강성조건으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 궤도조건은 모두 동일하다는 가정하여 상부노반과 하부노반의 지반 강성도를 상, 중, 하로 구분하여 해석조건별 민감도 분석을 수행하였다.

<표 5>은 본 논문에서 수행한 해석조건을 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 궤도조건은 모두 동일하다고 가정한 후 강화노반을 지지하고 있는 상부노반과 하부노반의 강성을 변화시켜가며, 토공노반에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 해석번호 Test 1은 현재 설계에 최소기준으로 제시하고 있는 상부노반의 지반반력계수( $k_{30}$ )  $11kgf/cm^3$ 과 하부노반 지반반력계수( $k_{30}$ )  $7kgf/cm^3$ 을 Vesic(1961)이 단일층의 지지력계수를 구하는 방법 식(1)으로 지반의 탄성계수를 가정하였다.

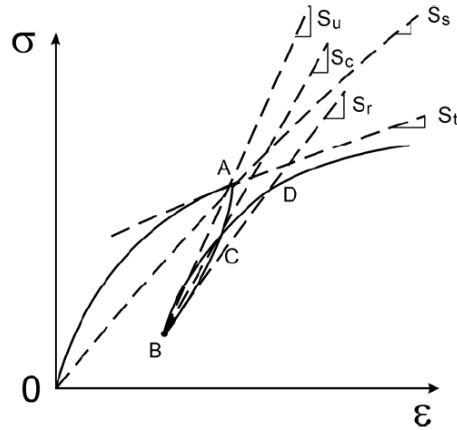
$$k = 0.65^{12} \sqrt{\frac{E_s B^4}{E_f I_f} \frac{E_s}{B(1-\nu^2)}} \quad (\text{식 1})$$

- 여기서,  $E_s$ = 지반의 탄성계수
- $B$ = 기초의 폭(평판의 지름)
- $E_f$ = 기초의 탄성계수
- $I_f$ = 기초의 단면 2차 모멘트
- $\nu$ = 지반의 포아송 비

식 (1)을 근사적으로 정리하여 식 (2)로부터 지반의 탄성계수를 산정할 수 있다.

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

따라서, 평판의 지름 30cm와 포아송 비 0.3, 지반반력계수  $110kN/m^3$ 로 가정할 경우,  $E_s$ 는 약 30MPa이다. 그러나, <그림 1>에서와 같이 GEOTRACK 프로그램의 경우 회복탄성계수( $E_r$ )을 입력하기 때문에 다소 크게 가정하여 상부노반 50MPa, 하부노반 30MPa으로 가정하였다.



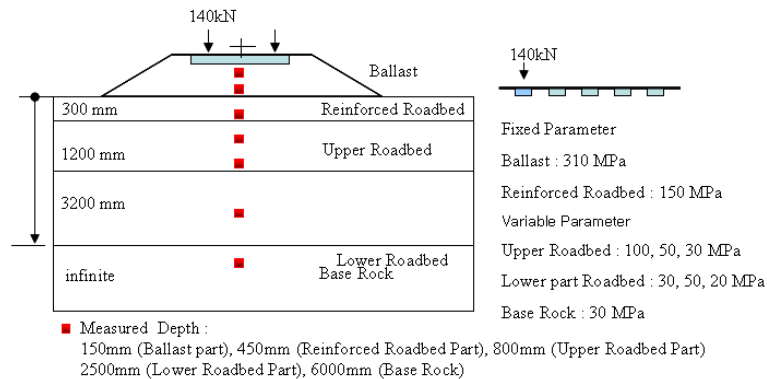
<그림 1> 흙의 탄성계수의 정의(Jean-Louis BRIAUD, 2001)

<표 5> 강화노반 영향 민감도 분석을 위한 해석조건

해석번호	회복탄성계수( $E_R$ )	도상 (MPa)	강화노반 (MPa)	상부노반 (MPa)	하부노반 (MPa)	원지반 (MPa)	비고
Test 1		310	150	50	30	30	기본 조건
Test 2		310	150	100	30	30	
Test 3		310	150	30	30	30	
Test 4		310	150	50	50	30	
Test 5		310	150	100	50	30	
Test 6		310	150	30	50	30	
Test 7		310	150	50	20	30	
Test 8		310	150	100	20	30	
Test 9		310	150	30	20	30	

본 논문에서 가정된 토공노반의 기하학적 형상은 <그림 2>와 같다. 전체 토공노반의 높이를 5m로 중형규모의 흙쌓기 단면으로 도상자갈, 강화노반, 상부노반, 하부노반, 원지반으로 구성된 총 5개의 층으로 산정하였다. 도상자갈은 침목하면으로부터 30cm, 강화노반두께는 30cm로 가정하였다. 상부노반은 강화노반층 두께를 포함하여 총 1.5m, 하부노반은 2.5m로 가정하였다.

해석에 사용된 하중은 140kN으로 LS22하중에서 윤중(Wheel Load)으로 환산하여 충격계수를 포함한 동적하중으로 140kN으로 가정하였다. 총 6개의 침목으로 구성된 레도에서 재하된 하중은 침목 1에서 재하 하였다.

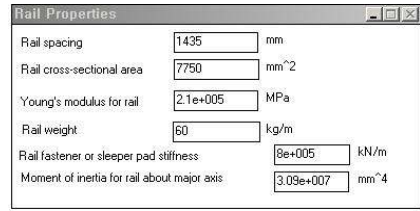


<그림 2> 해석 단면

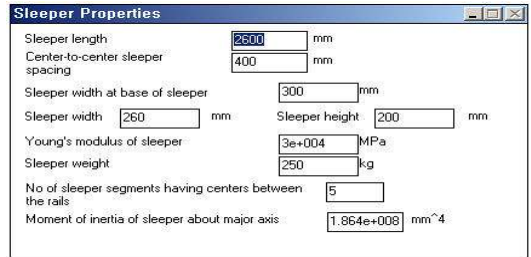
<그림 3>와 <그림 4>은 침목과 레일에 대한 해석물성값이다. 레일의 간격, 종단면적, 영탄성계수, 패드의 물성값 등 여러 가지 해석값을 입력하였으며, 침목의 경우에도 침목간격, 기하학적 형상, 침목 자중 등을 입력하였다.

<표 6> 층별 해석 물성값

층 번호	회복탄성계수 (MPa)	포아송비	층 두께 (mm)	흙의 단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	횡방향 토압계수
1. 도상자갈	310	0.4	300	2.3	0.5
2. 강화노반	150	0.4	300	1.9	0.5
3. 상부노반	100	0.3	1200	1.9/1.8/1.6	0.5
	50				
	30				
4. 하부노반	50	0.3	3500	1.8/1.6/1/5	0.5
	30				
	20				
5. 원지반	20	0.3	infinite	1.9	0.5



<그림 3> 레일 물성값



<그림 4> 침목의 물성값

### 3. 해석결과

#### 3.1 상부·하부노반의 회복 탄성계수에 따른 강화노반의 민감도 결과

앞서 언급한 바와 같이 상부, 하부 노반의 회복탄성계수의 변화에 따른 강화노반의 영향을 주는 민감도 해석을 수행하였다. 총 9가지 조건으로 해석을 수행한 결과는 다음 <표 1>과 같다. <표 1>에서와 같이 해석결과는 도상, 강화노반, 상부노반, 하부노반에서 해석된 응력과 위치별 변위량을 정리하였다. 동일한 원지반 조건에서 상부노반과 하부노반의 지반조건이 좋은 조건일 때 응력과 침하 측면에서 유리한 결과가 나타났다. 강화노반에 작용하는 응력의 범위는 약 0.5~0.7kgf/cm<sup>2</sup>로 도상자갈층의 중간층의 응력 0.9~1.2kgf/cm<sup>2</sup>에 비해 약 50%정도의 응력이 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 상부노반과 하부노반은 도상자갈층의 응력에 각각 30%, 10%정도의 응력이 발생하고 있다. 따라서, 열차하중에 대하여 흩쌓기 높이가 300mm이상인 경우 약 10%정도의 응력이 작용하는것을 확인 할 수 있었다. 고속철도에서는 이러한 이유로 인해 상부노반의 높이를 3m로 규정하고 있으며, 일반철도는 1.5m로 규정하여 일반철도에서도 상부노반의 높이 규정에 대하여 면밀히 검토하여야 할 것으로 판단된다.

<표 7> 해석조건별 해석결과

해석조건	회복탄성계수 (MPa)		도상(150mm)		강화노반층(450mm)		상부노반(800mm)		하부노반(2500mm)	
	상부노반	하부노반	응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	변위량 (mm)	응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	변위량 (mm)	응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	변위량 (mm)	응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	변위량 (mm)
Test 1	50	30	1.083	2.438	0.577	2.357	0.387	2.131	0.105	1.300
Test 2	100	30	1.174	2.021	0.689	1.941	0.450	1.794	0.091	1.218
Test 3	30	30	1.026	2.847	0.499	2.765	0.345	2.457	0.112	1.361
Test 4	50	50	1.209	2.175	0.619	2.084	0.415	1.843	0.120	1.085
Test 5	100	50	1.167	1.752	0.703	1.668	0.464	1.517	0.105	1.021
Test 6	30	50	0.991	2.502	0.520	2.419	0.359	2.113	0.127	1.124
Test 7	50	20	0.956	2.752	0.562	2.681	0.372	2.457	0.098	1.526
Test 8	100	20	1.055	2.285	0.668	2.215	0.436	2.070	0.084	1.411
Test 9	30	20	0.991	3.192	0.499	3.113	0.323	3.113	0.105	1.612

<표 8>는 해석조건별 강화노반 층에서 발생된 침하량을 통해 민감도 결과이다. 강화노반 층에서 발생된 탄성침하량을 기준으로 볼 때 가장 침하가 적게 발생된 해석은 Test 5, 가장 나쁨 조건은 Test 9로

분석되었다. 본 논문에서 표준 단면(상부노반 50MPa, 하부노반 30MPa, Test 1)을 기준으로 볼 때 표준 단면으로 가정된 것보다 좋은 단면은 Test 5, Test 2, Test 4, Test 8번으로 하부노반의 강성변화보다 상부노반의 강성변화에 따라 다른 해석결과를 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서, 침하량이 가장 작게 발생된 해석조그러나, 상부노반 지반강성 조건이 좋더라도 하부노반의 강성조건이 매우 나쁠 경우에는 침하량이 증가하여 하부노반에 대한 관리도 중요할 것으로 사료된다.

상부노반과 하부노반의 회복탄성계수(Er)의 변화에 따른 민감도 분석결과 강화노반의 탄성침하량 2.5mm로 한계를 두었을 때 상위 4개의 조건에서만 만족하고 모두 허용침하량을 초과하는 탄성침하량이 발생하였다. 따라서, 설계에서 규정하고 있는 최소규정을 만족하여야 열차하중에 대한 응력, 침하량이 한계범위 이내로 안정성이 확보할 것으로 판단된다. 향후 궤도조건과 토공조건 모두를 검토하여 강화노반 두께에 영향을 주는 인자에 대하여 정량화하여 표준화지표를 개발 할 예정이다.

<표 8> 해석조건별 강화노반 층에서 발생된 침하량 최소값으로 구한 순위

		상부노반 지반조건		
		Er=100MPa	Er=50MPa	Er=30MPa
하부노반 지반조건	Er=50	① (Test 5)	③ (Test 4)	⑥ (Test 6)
	Er=30	② (Test 2)	⑤ (Test 1)	⑧ (Test 3)
	Er=20	④ (Test 8)	⑦ (Test 7)	⑨ (Test 9)

#### 4. 결론

이 논문에서는 강화노반층을 지지하고 있는 상부노반과 하부노반의 해석물성값을 변화시켜가며 강화노반두께에 영향을 주는 인자에 대하여 민감도 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 흙쌓기에서 열차하중에 대한 응력범위는 약 3m로 도상자갈층에서 발생하는 응력의 약 10%이내로 작용하였다. 이는 일반철도와 고속철도 상부노반의 기준높이가 1.5m, 3.0m로 열차 응력범위 측면에서 고속철도 규정이 합리적인 규정인 것으로 판단된다.
- 2) 강화노반 침하량이 가장 적게 발생된 해석조건은 Test 5→Test 2→Test 4→Test 8→Test 1→Test 6→Test 7→Test 3→Test 9로 나타났다.
- 3) 강화노반 두께 민감도 분석결과, 원지반조건이 동일하다고 볼 때 상부노반의 지지력 조건이 매우 중요하며, 하부노반의 경우 최소 지지력 조건을 만족하여야 강화노반의 성능을 유지할 수 있다.
- 4) 향후, 원지반조건, 궤도조건, 토공조건 등을 통해 강화노반 두께에 영향을 주는 인자에 대하여 정량화하고 표준화하여 강화노반의 합리적 두께를 산정할 수 있는 자료로 활용할 예정이다.

#### 참고문헌

1. Ching S. Chang, Ernest T. Selig, Clement W. Adegok(1980), "GEOTRACK Model for Railroad Truck Performance" Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 106, No. 11, November 1980, pp. 1201-1218
2. Briaud, J.-L., 2001, "Introduction to Soil Moduli", Geotechnical News, June 2001, BiTech Publishers Ltd, Richmond, B.C., Canada
3. 運輸省 鐵道局, “鐵道構造物等設計標準·同解説 土構造物”, 鐵道總合技術研究所, 1992. 10.
4. 철도설계기준(2004)
5. 고속철도설계기준(2005)
6. 김동수, 서원석, 권기철, “반복식 평판재하시험을 이용한 노상토의 현장 변형계수 평가”, 한국지반공학회논문집 제21권 6호 2005년 8월, pp.67~79.
7. 한국철도기술연구원(2001), “토구조물 최적설계기술연구”, 국무조정실