

일반철도와 고속철도의 강화노반두께에 관한 연구

Study on the Reinforcing Subgrade Depths of Highspeed and Conventional Railroads

김대상¹ · 이수형² · 최찬용³ · 황선근⁴

Dae-Sang Kim · Su-Hyung Lee · Chan-Yong Choi · Seon-Keun Hwang

Abstract

The reinforcing subgrade, which first introduced Korea for the highspeed subgrade construction, has the many advantages to maintain the quality of ballast track as well as to prevent the softening of subgrade by mud-pumping. It causes the subgrade soil to spout into the ballast on many lines. Therefore, the application of reinforcing subgrade will be expected to increase in the future. This paper introduces the reinforcing subgrade as a maintenance-free technology for the railroad operation and the method for the determination of reinforcing subgrade depth. The criteria on reinforcing subgrade depths of highspeed and conventional railroad were verified from the calculation results based on an elastic analysis method.

Keywords : Reinforcing subgrade(강화노반), Highspeed railroad(고속철도), Conventional railroad(일반철도), Elastic analysis(탄성해석)

1. 서론

고속철도의 도입과 함께 도입된 강화노반은 분니 발생 억제 등 자갈도상 궤도의 생력화에 많은 장점을 가지고 있으므로 향후 국내에도 그 적용이 확대될 것으로 예상된다. 안전 측의 설계를 위해서는 강화노반두께를 증가시키는 것이 바람직하나, 경제적인 설계를 위해서는 열차의 주행 안전성 및 승차감과 궤도의 유지보수용을 고려한 최적의 강화노반두께를 결정할 필요가 있다.

강화노반 두께 결정에는 궤도 구조 형식, 윤증크기, 상부노반의 강성 및 강화노반의 탄성허용침하량 등 다양한 요소들이 영향을 미친다. 본 논문에서는 국내 표준궤도에 적합한 강화노반의 탄성허용침하량을 제시하고 이를 기준으로 강화노반 두께를 결정하였다. 강화노반 두께 결정을 위하여 2층 탄성체를 균일한 1층 탄성체로 치환하는 방법을

사용하였다[1]. 탄성해석에 기초한 강화노반두께 산정법으로 현재 일반철도의 철도설계기준(노반편) 및 고속철도에 적용된 강화노반두께 기준에 대한 적정성을 검토해 보았다.

2. 강화노반 소개

Fig. 1은 궤도하부의 노반구조에 대한 개념도이다. 궤도하부의 노반구조는 도상 아래에 강화노반, 상부노반, 하부노반으로 구성되어 있다. 강화노반은 상부노반의 상부에 강성이 큰 재료로 이루어진 층을 부설함으로써 상부노반의 변형을 최소화하기 위해 사용된다. 또한, 강화노반은 도상부의 자갈이 상부노반으로 관입됨으로서 발생하는 궤도틀림을 감소시키고 도상 표면의 침투수가 상부노반으로 유입하는 것을 차단하는 기능이 있어서 분니발생 억제효과가 있다. 강화노반의 재료로는 일본의 경우 쇄석, 아스팔트 콘크리트와 고로슬래그가 사용되고 있으나, 국내에서는 현재 입도 조정된 쇄석만을 사용하고 있다.

1 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원/공학박사
2 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원/공학박사
3 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원
4 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

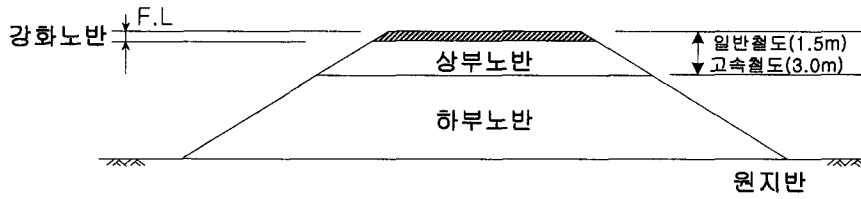


Fig. 1. 케도하부 노반구조

Table 1. 강화노반 설계기준(일반철도 장대레일)[2]

상부노반조건	재 료	입도조정 쇄석 또는 고로슬래그쇄석(cm)	배수층 (cm)	수경성입도조정 고로슬래그쇄석(cm)	배수층 (cm)
	흙쌓기($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$)	20	0	15	0
	흙쌓기($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$)	35	0	25	0
	땅짜기, 평지($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$)	20	15	15	15
	땅짜기, 평지($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$)	35	15	25	15

Table 2. 강화노반 설계기준(일반철도 이음매레일)[2]

상부노반조건	재 료	입도조정 쇄석 또는 고로슬래그쇄석(cm)	배수층 (cm)	수경성입도조정 고로슬래그쇄석(cm)	배수층 (cm)
	흙쌓기($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$)	35	04	25	0
	흙쌓기($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$)	65	0	50	0
	땅짜기, 평지($K_{30} \geq 11 \text{kgf/cm}^3$)	35	15	25	15
	땅짜기, 평지($7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$)	65	15	50	15

Table 3. 고속철도 강화노반 설계기준[3]

종 별 재 료		강화노반(cm)		계(cm)
		보조도상	입도조정층	
돌기	$7 \leq K_{30} < 11 \text{kgf/cm}^3$	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
	암반	20	15~25	35~45

일반철도의 강화노반 설계기준은 Table 1 및 Table 2와 같다. 일반철도 건설 시 적용되는 철도설계기준(노반편)에 의하면 강화노반의 두께는 케도구조 조건(장대레일 Table 1, 이음매레일 Table 2)과 상부노반의 지반반력계수(K_{30})에 따라 결정된다. 강화노반두께는 장대레일의 경우 20cm~35cm 범위로, 이음매레일의 경우는 35cm~65cm 범위로 K_{30} 에 따라 설계하도록 규정되어 있다. 강화노반의 재료로는 쇄석과 고로슬래그가 고려되어 있다.

고속철도의 경우 강화노반 다짐관리기준은 Table 3과 같다. Table 3은 지반반력계수를 기준으로 강화노반두께를 결

정한 것으로 고속철도 표준단면도에 제시된 것이다. Table 4는 2003년 4월에 발간된 고속철도 전문시방서(노반편)에 의한 강화노반 및 상부노반의 다짐 관리기준이다. Table 3과 Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 고속철도의 경우 다짐 관리기준에 대하여 지반반력계수(K_{30})와 변형률계수(E_{v2}) 규정을 동시에 적용하고 있다. 지반반력계수와 변형률계수와의 상관관계에 대해서는 좀 더 많은 고찰이 필요할 것으로 판단되며, 본 논문에서는 두 규정을 모두 소개하고 적용해 보았다.

고속철도의 경우 상부노반의 지반반력계수(K_{30})에 따라

Table 4. 고속철도 노반의 다짐관리기준[4]

구분		보조도상층	입도조정층	상부노반	하부노반
다 짐 도	DIN 18 134	$E_{v2} \geq 120\text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.2$	$E_{v2} \geq 80\text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$	$E_{v2} \geq 80\text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.3$	$E_{v2} \geq 60\text{MN/m}^2$ $E_{v2}/E_{v1} < 2.7$
	KS F 2311	최대건조밀도의 100% 이상	-	최대건조밀도의 95% 이상	최대건조밀도의 90% 이상

보조도상층과 입도조정층으로 구성된 강화노반을 50cm~95cm의 층 두께로 설계하도록 규정하고 있다. 철도설계기준(노반편)과 상이한 점은 돌기와 각기에 따라 입도조정층의 두께를 다르게 적용하여 각기부를 15cm 더 두껍게 시공하도록 규정하고 있는 점이다.

3. 강화노반두께 결정

강화노반의 두께는 강화노반과 상부노반으로 구성되는 2층 탄성지반의 표면에 2대의 대차에서 작용하는 8개의 윤중에 의한 연행 하중이 작용할 때, 표면의 최대 침하량이

2.5mm이하가 되도록 결정된다. 강화노반의 두께 결정 절차는 아래와 같다.

- 1) 연행 하중재하시의 강화노반두께 계산 방법 결정
- 2) 도상으로부터 강화노반에 전달되는 압력 결정
- 3) 강화노반의 탄성허용침하량 결정
- 4) 강화노반과 상부노반의 변형계수 결정
- 5) 강화노반두께 결정

아래의 절에는 상기 각 항의 결정 방법을 소개하고, 그 방법에 따라 국내 제반 조건에서의 소요 강화노반 두께를 산정하고 그 결과를 평가하였다.

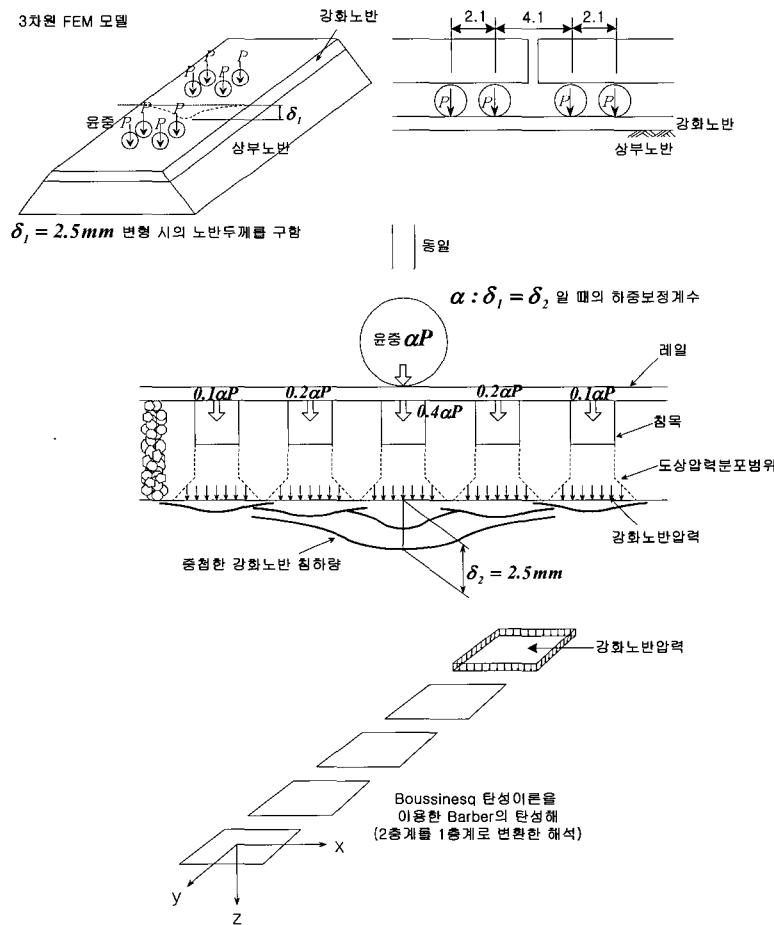


Fig. 2. 강화노반두께 결정 시 FEM 해석과 Barber 탄성해 사이의 관계도[5]

3.1 연행 하중재하시 강화노반두께 계산 방법

과거의 설계법에서는 설계하중으로 하나의 침목에 대한 하중만을 이용하여 재하점 직하의 침목만 하중을 받고, 주변 침목으로의 하중 분산효과는 고려되지 않았다. 최근의 강화노반 설계법에서는 2대의 대차에 의한 연행하중을 3차원 FEM 해석을 수행하여 고려하고, 도상으로 전달되는 하중이 복수의 침목을 통하여 전달되도록 하여 하중 분산이 고려되었다. 3차원 FEM 해석의 경우 특정조건에 대한 정확한 해석을 수행할 수 있으나, 구성 재료 각각의 특성이 강화노반두께 계산에 미치는 영향을 파악하기는 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 3차원 FEM 해석과 탄성해에 기초하여 제안된 강화노반두께 계산법으로 강화노반두께를 계산해 보았다.

Fig. 2는 강화노반 두께를 구할 때 3차원 FEM 해석과 2층계를 1층계로 변환하여 해석하는 Barber의 탄성해 사이의 관계도이다. 이 방법의 특징은 가해진 윤증이 5개의 침목에 0.1 : 0.2 : 0.4 : 0.2 : 0.1 비율로 분산된다는 가정을 이용한 점이다. 그리고 3차원 FEM 해석으로 구한 강화노반의 침하량과 Boussinesq의 탄성이론을 이용한 Barber의 탄성해로 구한 침하량이 같아지도록 하중보정계수(a)를 적용하여 윤증을 보정하는 방법을 사용한다. 하중보정계수는 강화노반두께, 상부노반 변형계수의 함수이나 3차원 FEM 해석을 통하여 기 제안된 값을 ($a=0.614+0.00057E_2$, E_2 는 상부노반의 변형계수(kgf/cm²)) 사용하였다. 강화노반에 작용하는 직사각형 분포하중(Fig. 3)에 의한 강화노반 표면의 침하량은 Barber의 탄성해인 식 (1)로부터 구할 수 있다. 최대 강화노반 침하량은 침목 5개로 지지된 하중 분포내의 5개 직사각형 등분포하중에 의하여 발생하므로 각각의 직사각형 등분포하중에 의한 침하량을 구하여 이들을 중첩하여 구한다. 강화노반두께(h)는 중첩된 침하량(w_0)이 제한치 이하가 되는 두께로 결정된다.

$$w_0 = \frac{2bP_0(1-\mu^2)}{\pi E_2} \left\{ \log_e \frac{\sqrt{1+m^2+(h/b)^2(E_1/E_2)^{2/3}}+m}{\sqrt{1+m^2+(h/b)^2(E_1/E_2)^{2/3}}-m} \right. \\
 + m \log_e \frac{\sqrt{1+m^2+(h/b)^2(E_1/E_2)^{2/3}}+1}{\sqrt{1+m^2+(h/b)^2(E_1/E_2)^{2/3}}-1} \\
 - \frac{1-2\mu}{1-\mu} (h/b)(E_1/E_2)^{1/3} \tan^{-1} \\
 \left. \frac{m}{\frac{h}{b}(E_1/E_2)^{1/3} \sqrt{1+m^2+(h/b)^2(E_1/E_2)^{2/3}}} \right\} \left(1 - \frac{E_2}{E_1}\right) \\
 + 2 \frac{E_2}{E_1} \left[\log_e \left(\sqrt{1+m^2}+m \right) + m \log_e \frac{\sqrt{1+m^2}+1}{m} \right] \quad (1)$$

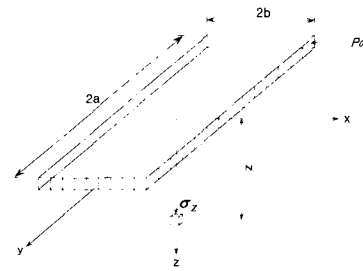


Fig. 3. 직사각형 등분포하중

- 여기서, w_0 : 직사각형 등분포하중 중심점의 침하량(cm)
- $2a$: 직사각형 등분포하중의 긴 변 길이(cm)
- $2b$: 직사각형 등분포하중의 짧은 변 길이(cm)
- m : a/b , Fig. 3 참조
- P_0 : 강화노반 압력(kgf/cm²)
- μ : 포아송비(강화노반과 상부노반의 포아송비로 0.3을 적용)
- h : 강화노반의 두께(cm)
- E_1 : 강화노반 변형계수(kgf/cm²)
- E_2 : 상부노반 변형계수(kgf/cm²)

3.2 강화노반에 전달되는 압력 산정

강화노반의 설계에 사용되는 압력은 궤도 구조, 윤증 크기, 열차속도 등에 따라 달라진다. Fig. 4는 강화노반압력을 구하는 방법을 흐름도 형식으로 정리한 그림이다. 윤증에는 정적 윤증과 동적인 주행윤증이 있는데, 주행윤증(P_r)은 정적윤증(P_s)에 열차속도의 함수인 속도 충격률을 곱하여 구한 값을 사용한다. 속도에 따른 충격계수는 열차속도를 V 라고 하면, 장대레일은 $1+0.3V/100$ 를, 이음매레일은 $1+0.5V/100$ 로 다르게 적용하고 최대치는 1.8로 하였다.

계산 시 사용된 도상압력분포는 Fig. 5와 같이 도상 두께 15cm 까지는 하중 분산이 없고, 15cm 보다 깊은 곳에서는 45°로 하중이 분산되는 것으로 하였다. 현재 국내에는 다양한 크기의 침목이 사용되고 있으나 일반철도와 고속철도를 대표하는 2개의 침목 크기에 대하여 도상압력분포 면적을 구하였다.

이와 같은 도상압력 분포면적을 이용하여 계산된 강화노반 압력은, 일반철도 장대레일은 L-22 하중에 대하여 $P_r=0.6(1+0.3V/100)$ 로, 고속철도의 경우 $P_r=0.34(1+0.3V/100)$ 로 결정되었다. 이음매레일의 경우 이음매레일 하부의 침목 크기 변화를 고려하면 이음매레일 하부에서 발생하는 강화노반압력은 조금 더 감소할 것으로 판단되나, 본 계산에서는 이를 고려하지 않았다. 따라서 일반철도 이음매레일의 강화노반 압력은 L-22 하중에 대하여 $P_r=0.6(1+0.5V/100)$ 로 계

산되었다. 이는 열차 속도와 차륜 직하의 침목 1개에 의한 강화노반압력과의 관계로 이를 그림으로 표시하면 Fig. 6, Fig. 7과 같다.

3.3 강화노반의 탄성허용침하량

강화노반 표면에 한계 이상의 침하가 발생하면 문제가 발생 할수 있으므로, 강화노반 표면의 침하량에 제한치를 결

정 할 필요가 있다. 일본에서는 도로의 아스팔트 포장에서 균열이 발생하는 처짐각(θ)의 상한치(0.0028)로부터 강화노반 표면 침하량의 제한치를 2.5mm로 결정하였다(Fig. 8). 그러나 이 값은 일본의 협례를 기준으로 결정된 값으로 국내의 표준궤도 조건(Fig. 9)와는 다르므로 국내 궤도조건을 고려하여 표면 침하량 제한치를 결정할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 일본의 경우 강화노반 표면에 아스팔트 콘크리트 재료의 피복층을 사용하므로 강화노반 재료로 쇄석만을 사용하는 국내 조건과는 다르다.

따라서 본 논문에서는 일본의 표면 침하량 제한치인 2.5 mm와 국내의 궤도조건을 고려하여 결정한 표면 침하량 제한치인 3.0mm를 이용하여 강화노반의 두께를 산정하여 보았다. 허용침하량을 3.0mm로 하였을 경우 선로횡단방향에 대한 일반철도의 허용처짐각(θ_1)은 0.0022이며, 고속철도의 허용처짐각(θ_1)은 0.0020으로 도로의 허용처짐각 이내였다.

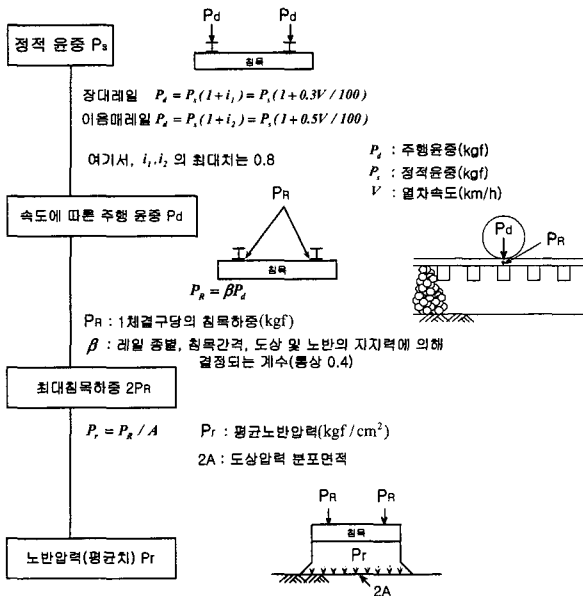


Fig. 4. 강화노반압력 구하는 법[4]

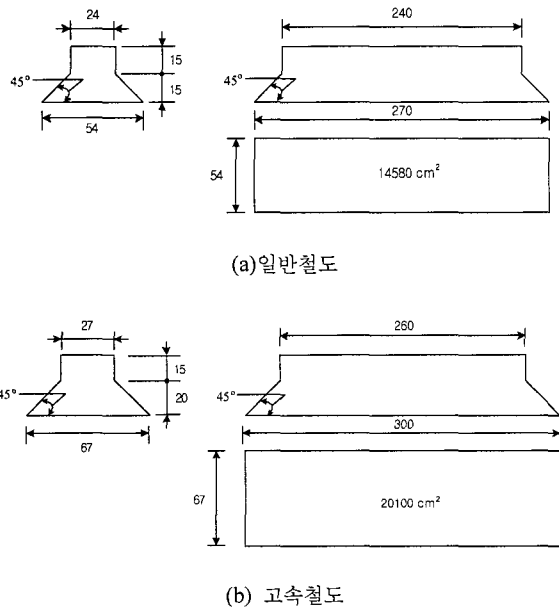


Fig. 5. 계산에 사용한 도상압력분포(단위:cm)

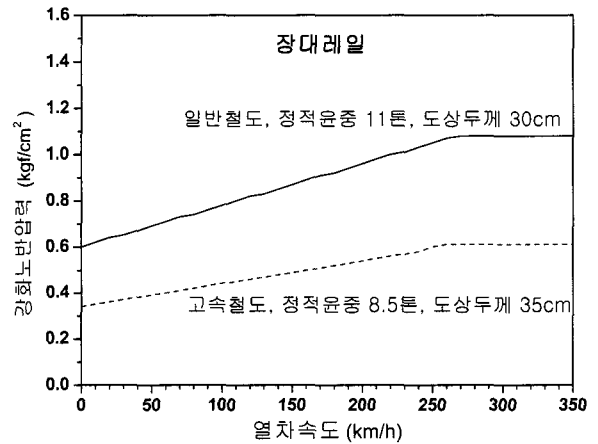


Fig. 6. 열차속도와 강화노반 압력과의 관계(장대레일)

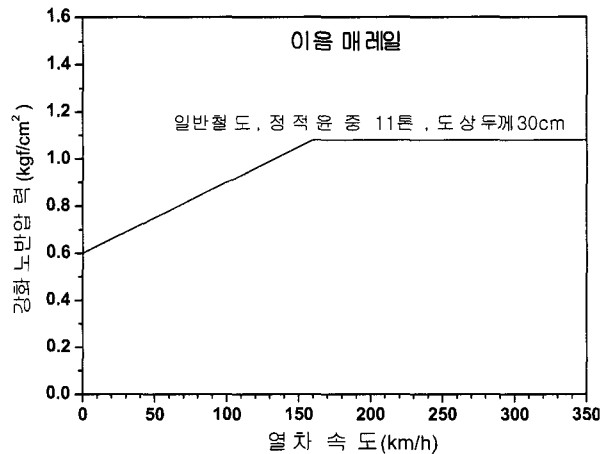


Fig. 7. 열차속도와 강화노반 압력과의 관계(이음매레일)

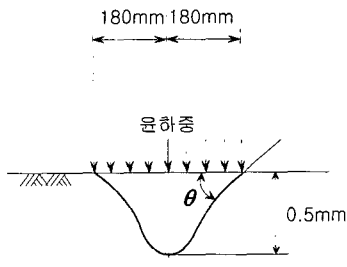
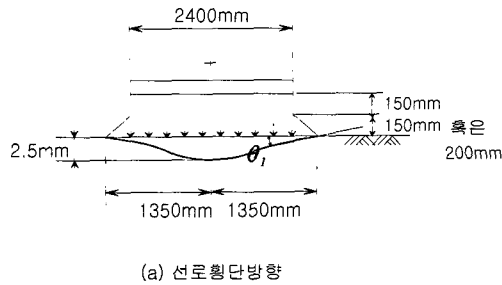
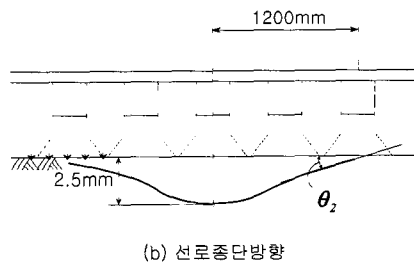


Fig. 8. 도로의 허용처짐각 구하는 법



(a) 선로횡단방향



(b) 선로종단방향

Fig. 9. 철도의 허용처짐각 구하는 법

선로종단방향의 경우도 허용처짐각(θ_2)은 0.0025로 도로의 균열발생 처짐각 이내였다.

상기의 조건은 강화노반의 처짐에 의해 표면 균열이 발생하지 않도록 하는 허용처짐량으로, 승차감이나 궤도보수 조건으로부터 결정된 강화노반의 허용처짐량은 아니다. 그러나 과거의 경험에 의하면 노반의 처짐량이 4.0mm 이내라면 궤도 보수상에 큰 문제는 없는 것으로 알려져 있으므로, 허용침하량을 3.0mm로 하여도 승차감 혹은 궤도 보수 상 큰 문제는 없을 것으로 판단된다. 이에 대해서는 향후 추가적인 검토가 필요하다.

3.4 강화노반과 상부노반의 변형계수 결정

변형계수는 변형률 및 구속압에 의존하므로[6], 강화노반의 설계에도 이를 고려한 변형계수를 사용하는 것이 바람직

하다. 쇄석 강화노반의 변형계수는 도로나 공항 등에 관련된 일본의 연구를 참고로 $1,800\text{kgf/cm}^2$ 과 고속철도공사 전문시방서(노반편)의 보조도상층에 대한 변형률 계수인 $E_{v2} \geq 1,200\text{kgf/cm}^2$ 를 사용하였다.

상부노반의 변형계수(E_2)는 현재 일반철도와 고속철도에 서 이원화되어 있는 다짐 규정을 고려할 수 있도록 하였다. 일반철도의 경우 평판재하시험으로 규정된 지반반력계수(K_{30})로부터 Timoshenko의 탄성이론을 이용하여 결정하였다. Timoshenko의 기본식은 식 (2)와 같으나, 이를 식 (3)와 같이 변형하면 K 값과 변형계수의 관계가 얻어진다. 주의할 점은 식 (3)의 K 가 K_{30} 이 아니라 K_{75} 이라는 점이다. 열차중이 상부노반에 미치는 영향 범위를 고려하면, 평판재하시험시의 평판의 직경이 큰 것을 사용하는 것이 바람직하나, 직경 75cm의 재하 시험은 큰 반력을 필요로 하므로 시험이 곤란하여 K_{30} 과 K_{75} 와의 상관 관계식인 $K_{30}=2.2K_{75}$ 을 이용하여 상부노반의 변형계수를 결정하였다. 또한 상부노반 변형계수의 변형률 의존성을 고려하기 위하여 식 (4)와 같이 변형계수를 2배하여 사용하였다. 이는 평판재하시험 시 발생하는 변형률(10^{-3} 정도)이 열차하중에 의하여 상부노반에 발생하는 변형률(10^{-4} 정도)보다 크므로 이를 보정하기 위함이다.

$$\delta = \frac{\pi Pa(1-\mu^2)}{2E} \quad (2)$$

$$\frac{P}{\delta} = K_{75} = \frac{2E}{\pi a(1-\mu^2)} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{2\pi a(1-\mu^2)K_{30}}{2 \times 2.2} = 48.7K_{30} \quad (4)$$

여기서, δ : 강성원형 재하판에 의한 지표면 침하량(cm)

P : 재하응력(kgf/cm^2)

a : 원형재하판 반경(37.5cm)

μ : 포아송비(0.3)

E_2 : 상부노반 변형계수(kgf/cm^2)

K_{75} : 직경 75cm의 재하판에 의한 재하시험값(kgf/cm^3)

K_{30} : 직경 30cm의 재하판에 의한 재하시험값(kgf/cm^3)

고속철도의 경우 고속철도공사 전문시방서(노반편)에 변형률 계수로 규정되어 있는 상부노반의 다짐도 기준($E_{v2} \geq 800\text{kgf/cm}^2$)을 사용하였다.

3.5 강화노반두께 결정

강화노반두께는 3차원 FEM 해석을 통하여 제안된 하중 보정계수를 이용하여 차륜 직하의 침묵에서의 윤중을 구하고 이로부터 강화노반압력을 산정하였다. 5개의 침묵 각각

에서 작용하는 강화노반 압력으로부터 각각에 대한 침하량을 구하여 이들을 중첩함으로써 강화노반 표면의 침하량을 구하였다.

강화노반두께 계산은 일반철도 2급선과 고속철도를 대상으로 수행하였다. 일반철도는 설계속도 150km/h에 대하여 장대레일과 이음매레일을 대상으로 노반 변형계수 및 탄성허용침하량 변화에 따라, 강화노반의 강성(E_1)이 1,200kgf/cm²이고 허용침하량이 2.5mm(Fig. 10)와 3.0mm(Fig. 11)인 경우와, E_1 이 1,800kgf/cm²이고 허용침하량이 2.5mm(Fig. 12)와 3.0mm(Fig. 13)인 경우에 대하여 각각 강화노반두께를 계산하였다. 고속철도는 영업속도 300km/h에 대하여 장대레일을 대상으로 노반 변형계수 및 탄성허용침하량 변화에 따라, 강화노반의 강성(E_1)이 1,200kgf/cm²(Fig. 14) 1,800kgf/cm²(Fig. 15)인 경우에 대하여 강화노반두께를 계산하였다. 그림

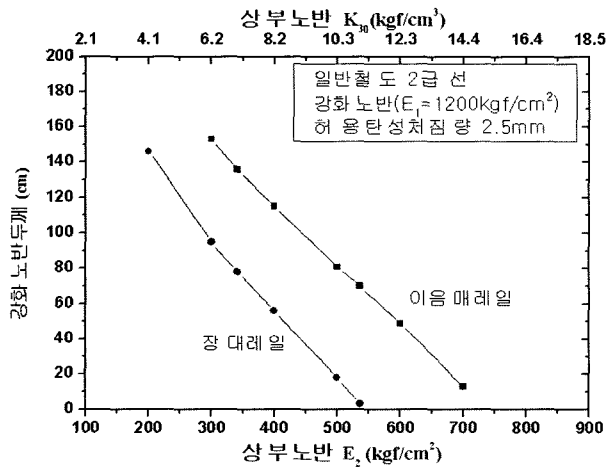


Fig. 10. 강화노반두께 설계도(일반철도: $E_1=1,200\text{kgf/cm}^2$, 처짐량 2.5mm)

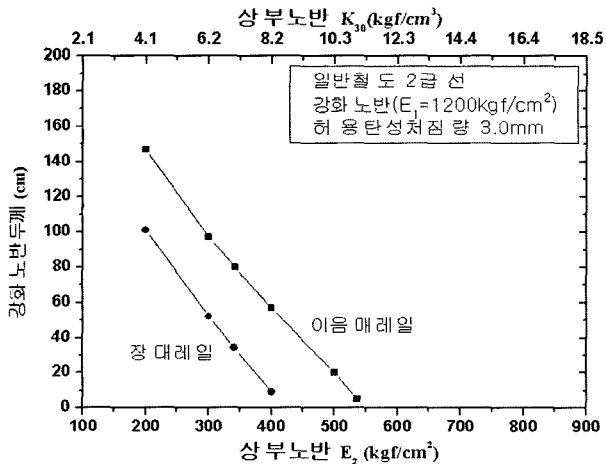


Fig. 11. 강화노반두께 설계도(일반철도: $E_1=1,800\text{kgf/cm}^2$, 처짐량 3.0mm)

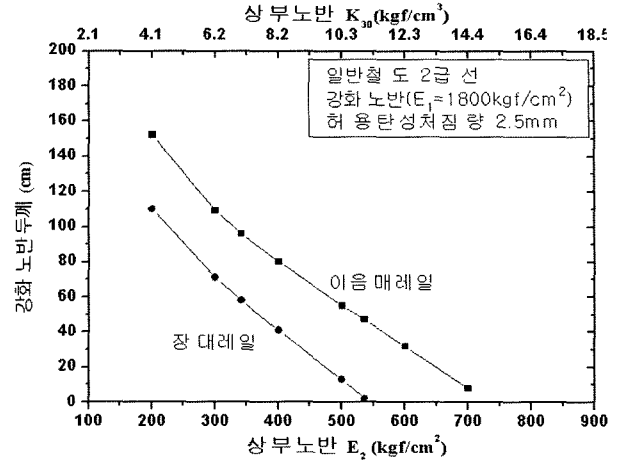


Fig. 12. 강화노반두께 설계도(일반철도: $E_1=1,800\text{kgf/cm}^2$, 처짐량 2.5mm)

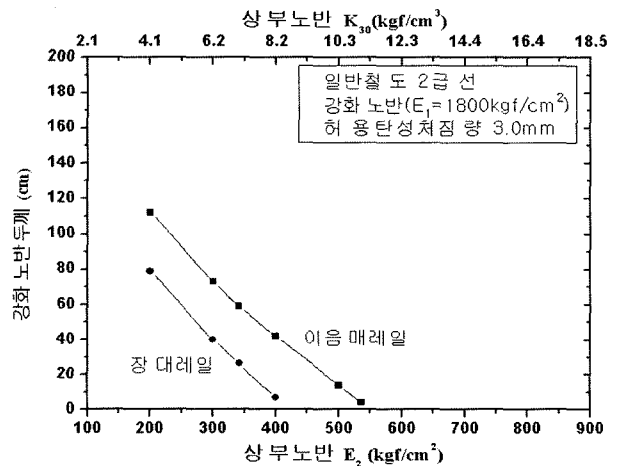


Fig. 13. 강화노반두께 설계도(일반철도: $E_1=1,800\text{kgf/cm}^2$, 처짐량 3.0mm)

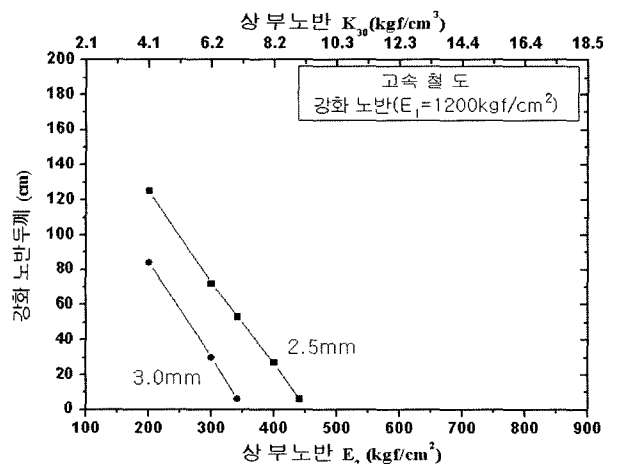


Fig. 14. 강화노반두께 설계도(고속철도 $E_1=1,200\text{kgf/cm}^2$)

에서 확인할 수 있는 바와 같이 강화노반과 상부노반의 변형 계수가 증가할 때 강화노반의 소요 두께가 감소함을 알 수

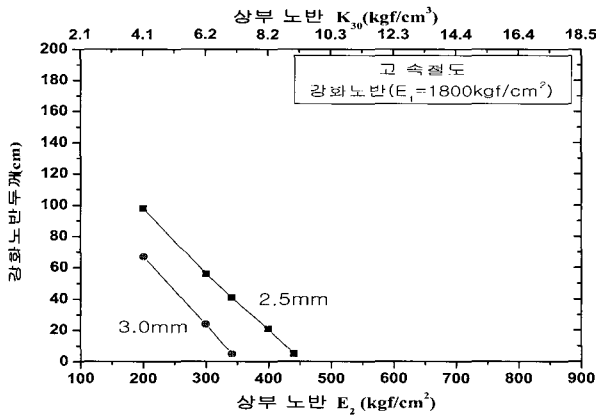


Fig. 15. 강화노반두께 설계도(고속철도 $E_1=1,800\text{kgf/cm}^2$)

있다. 또한 탄성허용치짐량이 증가함에 따라 강화노반 두께는 감소하였다.

Table 5는 강화노반의 강성(E_1)이 $1,200\text{kgf/cm}^2$ 인 경우에 철도설계기준(노반편)의 강화노반두께와 탄성허용침하량 2.5mm와 3.0mm에 대하여 결정된 강화노반두께를 비교한 결과이다. Table 6은 강화노반의 강성(E_1)이 $1,800\text{kgf/cm}^2$ 인 경우에 철도설계기준(노반편)의 강화노반두께와 탄성허용침하량 2.5mm와 3.0mm에 대한 탄성해인 강화노반두께를 비교한 결과이다.

탄성허용침하량 2.5mm에 대한 계산 결과를 설계기준과 비교해 보면, 장대레일이고 상부노반의 지반반력계수가 $K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$ 인 경우를 제외하면 강화노반의 소요 두께가 더 두꺼워야 할 것으로 판단된다. 그러나 국내의 궤도조건을 고려하여 제시한 탄성허용침하량 3.0mm로 계산한 결과를 보면, 강화노반의 강성이 $1,200\text{kgf/cm}^2$ 인 이음매레일의 경우 상부노반의 지반반력계수가 $7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$ 일 때

Table 5. 일반철도의 강화노반두께 비교($1,200\text{kgf/cm}^2$)

상부노반조건	재 료	철도설계기준(cm)		허용침하량 2.5mm일때(cm)		허용침하량 3.0mm일때(cm)	
		장대레일	이음매 레일	장대레일	이음매 레일	장대레일	이음매 레일
	흙쌓기($K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}$)	20	35	3	70	0	5
	흙쌓기($7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}$)	35	65	78	136	34	80
	땅깎기, 평지($K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}$)	20	35	3	70	0	5
	땅깎기, 평지($7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}$)	35	65	78	136	34	80

Table 6. 일반철도의 강화노반두께 비교($1,800\text{kgf/cm}^2$)

상부노반조건	재 료	철도설계기준(cm)		허용침하량 2.5mm일때(cm)		허용침하량 3.0mm일때(cm)	
		장대레일	이음매 레일	장대레일	이음매 레일	장대레일	이음매 레일
	흙쌓기($K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$)	20	35	2	47	0	4
	흙쌓기($7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$)	35	65	58	96	26	59
	땅깎기, 평지($K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$)	20	35	2	47	0	4
	땅깎기, 평지($7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$)	35	65	58	96	26	59

Table 7. 고속철도의 강화노반두께 비교($E_1= 1,200\text{kgf/cm}^2$)

종		강화노반(cm)		계(cm)	허용침하량 2.5mm일때 (cm)	허용침하량 3.0mm일때 (cm)
상부노반조건		보조도상	입도 조정층			
돌기	$7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$	20	60	80	53	6
	$K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$	20	30	50	0	0
분바닥 및 각기	$7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$	20	75	95	53	6
	$K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$	20	45	65	0	0
		압반	1525	3545		

Table 8. 고속철도의 강화노반두께 비교($E_1 = 1,800\text{kgf/cm}^2$)

종 별		강화노반(cm)		계(cm)	허용침하량 2.5mm일 때 (cm)	허용침하량 3.0mm일 때 (cm)
		보조도상	입도 조정층			
상부노반조건		재료				
돌기	$7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$	20	60	80	41	5
	$K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$	20	30	50	0	0
본바닥 및 깎기	$7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$	20	75	95	41	5
	$K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$	20	45	65	0	0
	암반	20	15~25	35~45		

15cm 더 두꺼운 강화노반이 필요하나, 강화노반의 강성이 $1,800\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 현 설계기준을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다.

Table 7과 Table 8은 강화노반의 강성($E_1 = 1,200\text{kgf/cm}^2$ 또는 $1,800\text{kgf/cm}^2$)과 탄성허용침하량 2.5mm와 3.0mm에 대한 탄성해인 강화노반두께를 비교한 결과이다.

고속철도의 경우 허용침하량 2.5mm의 경우에 대해서도 강화노반의 소요 두께 기준을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 국내의 궤도조건을 고려하여 제시한 탄성허용침하량 3.0mm로 계산한 결과와 비교해 보면 안전 측 설계가 이루어 졌음을 알 수 있다. 특이한 점은 상부노반의 지반반력계수가 $K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$ 인 경우 강화노반이 없어도 허용침하량에 대한 설계조건을 만족하는 결과를 얻었다는 점이다. 이는 작용 윤중에 대하여 상부노반이 충분한 지지강성을 보유하면 강화노반이 필요하지 않을 수 있음을 의미하나, 강화노반은 도상의 노반으로의 관입과 분니 발생 억제 등 다양한 생력화 기능도 함께 가지고 있으므로 유지보수 비용 절감을 위해서 최소한의 두께 확보는 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 탄성해석에 의한 강화노반두께 결정법과 이 방법에 의한 강화노반두께 결정 결과에 대하여 소개하였다. 탄성허용침하량의 제한치를 일본 협회에서 적용하고 있는 2.5mm뿐만 아니라 국내궤도조건을 고려한 3.0mm로 가정하여 강화노반두께를 결정함으로써 보다 경제적으로 강화노반두께를 결정할 수 있는 방안을 제시하였다.

(1) 철도설계기준(노반편)의 강화노반두께와 탄성허용침하량 2.5mm와 3.0mm에 대하여 강화노반두께를 계산한 결과는 다음과 같다. 탄성허용침하량 2.5mm에 대한 계산 결과, 장대레일이고 상부노반의 지반반력계수가 $K_{30} \geq 11\text{kgf/cm}^3$ 인 경우를 제외하면 강화노반의 소요 두께가 더 두꺼워져야 할 것으로 판단되었다. 국내의 궤도조건을 고려하여 제시한 탄성허용침하량 3.0mm로 계산한 결과, 강화노반의 강성이 $1,200\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 이음

매레일 상부노반의 지반반력계수가 $7 \leq K_{30} < 11\text{kgf/cm}^3$ 일 때 15cm 더 두꺼운 강화노반이 필요할 것으로 판단되나, 강화노반의 강성이 $1,800\text{kgf/cm}^2$ 인 경우는 현 설계기준을 모두 만족하고 있음을 알 수 있었다.

- (2) 고속철도는 탄성허용침하량 2.5mm의 경우 강화노반의 소요 두께 기준을 모두 만족하고 있음을 알 수 있었다. 국내의 궤도조건을 고려하여 제시한 탄성허용침하량 3.0mm로 계산한 결과와 현 설계기준을 비교해 보면 안전 측 설계가 이루어 졌음을 알 수 있었다.
- (3) 상부노반의 지지강성 변화에 따라 강화노반 소요 두께가 급격히 변하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 시공시 상부노반의 지지강성을 충분히 확보하는 것이 중요할 것으로 판단되었다.

향후 강화노반에 대하여 추가적으로 국내 궤도조건에 적합한 최적 탄성허용침하량에 관한 연구, 강화노반 재료로 입도 조정된 쇄석만을 사용했을 경우 상부노반으로의 표면 우수의 침투 억제 정도에 관한 연구, 쇄석만이 아니라 다른 강화노반 재료의 사용 가능성 여부에 관한 연구 등이 필요할 것으로 판단된다. 궤도를 지지하는 하부구조로서 강화노반 도입을 이제 막 시작한 국내실정을 고려하면, 강화노반에 대한 현장조사로부터 강화노반의 변상 유무를 파악하여 현 설계 및 시공의 적정성을 평가함으로써 궁극적으로는 선로의 생애주기비용을 최소화할 수 있도록 강화노반두께를 결정하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Makoto Sunaga, 철도강화노반의 합리적 설계법에 관한 연구, 일본철도총연보고, 1996.5
2. 철도설계기준(노반편), 철도청, 2001
3. 고속철도 표준단면도, 한국고속철도건설공단
4. 고속철도공사 전문시방서(노반편), 한국고속철도건설공단, 2003.4
5. 철도구조물등 설계기준 및 동해설, 토구조물편, 일본 철도종합기술연구소, 1992
6. 황선근 외, 철도노반재료로서의 고로슬래그의 활용화 방안 연구, 한국철도기술연구원, 2001.12