

토목섬유로 보강된 철도노반의 동상 및 지지력 평가 Estimation of Reinforced Railway Roadbed by Geosynthetics on Frost and Bearing Capacity

심재범¹⁾, Jae - Bum Shim, 채영수²⁾, Young - Su Chae

¹⁾ 한국철도대학 시설토목과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea National Railway College.

²⁾ 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Suwon.

SYNOPSIS : Geosynthetics have been studied especially Korean Railway earthworks from the outset and have proved successful in both technical and economic terms. Hitherto Geosynthetics have been given consideration chiefly in dimensioning the requisite track subbase thickness, but have not been considered when calculating the thickness of the frost protection layer. this often made it impossible to reduce the thickness of the subbase. The article therefore puts forward a proposal for considering the German Geosynthetics in dimensioning the requisite thickness of the frost protection layer.

Key words : Geosynthetics, maintenance and upgrading work on existing track, the thickness of frost protection layers.

1. 서 론

철도선로의 이용상태를 훼손시키는데 빈번히 대두되는 요인으로는 철도하부구조에서 발생하는 동해와 지지력의 감소를 들 수 있다. 이것은 철도상부 및 하부구조를 포함한 전체시스템의 상태에 부정적으로 작용하고 그리고 철도시설의 하자를 야기시킨다.

하부구조에서 노반의 감소된 지지력의 회복을 위해서나 또는 지지력을 증가시키고 그리고 이를 장기간 유지하기 위해서는 개선조치가 불가피하다. 기존 철도선로의 통상적인 개선방법은 하나의 노반 보호층의 설치이다.

노반보호층의 필요한 두께는 지지력 및 동상에 대한 측정에 의해 산정 되어진다. 독일 철도 "흙구조물 시방서(DS 836)"에 따른 지지력의 측정은 원지반면의 변형계수 E_{v2} 에 대해서 하나의 노반보호층의 설치를 통해 소정의 두께가 될 수 있도록 시공기면의 필요한 변형계수 E_{v2} 를 개선하는 것에 근거를 두고 있으며, 동상보호층의 최소두께는 동상작용지역에 예측하여 결정되어진다. 그리고 이들 중 큰 값이 필요한 두께이다.

이와 같이 측정된 노반보호층의 설치에는 많은 비용이 소요되는데, 이는 지지력이 약한 흙은 부분적으로 걷어 내거나 또는 경우에 따라서는 치환하지 않으면 안되기 때문이다. 이에 따라 복선 선로에서는 인접 선로의 안전운행을 위해 공비가 많이 드는 차단시설의 설치가 필수적이다. 걷어낸 흙들을 쓰레기 집하장으로 운반하거나 경우에 따라서 재사용 하는 것은 항상 많은 비용이 들고 복잡하며, 양질의 무기질

혼합물을 공급하고 운반하는 것도 또한 많은 문제점이 있다. 노반보호층을 부분적으로 높게 설치하여 파내는 흙의 양을 줄이는 것은 전동화, 교량 및 터널구조물과 같은 기존의 강제지점 때문에 다만 제한적으로만 가능하다.

기존의 흙을 개량하거나 또는 토목섬유를 활용한 지지시스템의 개량에 의해 설치되어 지는 노반보호층의 두께를 줄이기 위한 목표설정은 독일에서는 이미 오래 전부터 추구되어 왔다. 이의 현실화는 건설기술적 및 철도운영적인 측면에서 많은 장점과 그리고 철도에서 쓰레기로 처리되는 흙의 양을 현저하게 줄일 수 있는 결과를 가져오게 되므로, 아래에서는 이에 대해 고찰해 보고자 한다.

2. 기본개념

다층구조를 갖는 철도노반시스템의 기본개념은 다음과 같다(그림 1 참조).

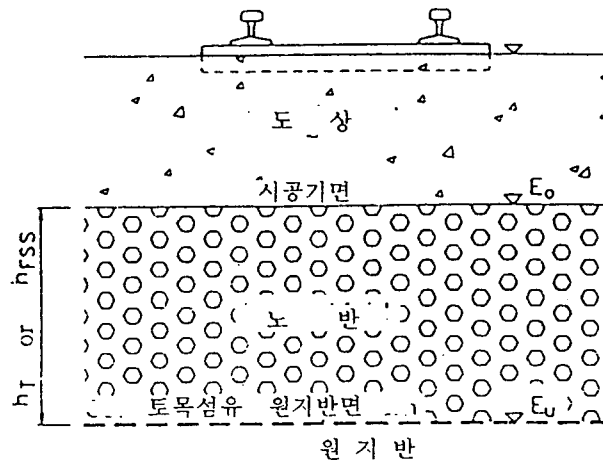


그림 1 기본개념

필요한 노반층의 두께 [h_T] : 지지층의 지지력에 필요한 두께에 대한 측정결과

노반층 : 원지반과 상부구조사이에 놓여있고 토목섬유에 의해 보강되어질 수 있는 흙 또는 인공적인 무기질이 혼합된 흙으로 구축된 층

동상보호층 [FSS] : 동상에 안전한 흙으로 구축된 층

필요한 동상보호층의 두께 [h_{FSS}] : 동상에 안전한 흙들로 축조된 필요한 지지력층을 포함한 동상보호층의 층 두께에 대한 측정결과(도상 제외)

원지반 : 자연적으로 인접한 원지반

시공기면 : 노반층의 상부경계면

원지반면 : 자연적으로 인접하였거나 또는 개량된 원지반의 상부 경계면

변형계수 E_{v2} : 원지반면 및 시공기면 위에서 DIN18134에 따라 평판재하시험을 통해 얻어진 변형계수

3. 동상의 영향에 대한 근거

철도선로에서 만일 아래와 같은 조건들이 동시에 존재한다면 동해가 발생된다고 계산하지 않으면 안 된다.

- 동상에 변화가 심한 원지반
- 충분한 수분의 공급
- 원지반면에서 빙점 이하의 온도
- 하부구조위에 작용하는 교통하중의 작용

만일 동상이 동상에 예민한 노반층에 발생된다면, 인접한 흙의 공극에 있는 수분은 얼게 된다. 점성토의 경우에는 모관수두의 도움으로 열의 전도에 의한 온도경사(溫度傾斜)가 형성되며 이것은 밑에 있는 토층으로부터 빙점등온선(氷點等溫線)의 범위로 수분을 빨아올리게 한다. 그리고 수분은 거기에서 결빙되고 아이스렌즈(ice lens)가 형성된다(그림 2참조). 이러한 과정의 결과가 철도선로의 융기(heaving)를 야기시키는 동상현상이며, 이를 초기 동해작용이라고 한다.

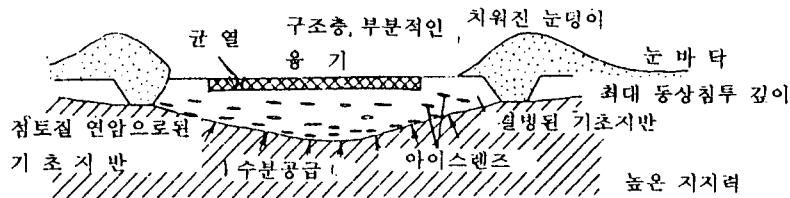


그림 2. 결빙기간 중 하나의 도로의 거동에 대한 도해적 표시

해빙기(解氷期)에는 빙층은 위에서부터 아래로 용해된다. 용해된 수분은 아직 흐를 수 없고 피잉수분이 되어 흠속에 존재하며, 이로 인해 지지력의 감소가 일어난다(그림 3참조). 그 결과 최소의 지지력, 입자의 전위, 지지시스템의 포화 및 변형이 일어나는데, 이러한 현상을 2차적인 동해작용이라고 말한다.

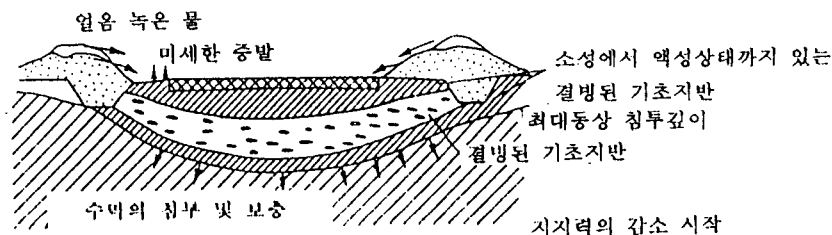


그림 3. 해빙기간 중 하나의 도로의 거동에 대한 도해적 표시.

철도의 하부구조에서는 근본적으로 지지력과 그리고 동상에 예민한 원지반이 존재한다면 동상에 대해 측정하지 않으면 안된다. 동상에 대한 측정을 통해 동상보호층(FSS)의 최소 두께가 산정되어 진다. 이에 따라 동상에 예민한 원지반은 보다 깊이 놓여지게 되고 그리고 하부구조의 동상에 대한 안전성이 충분하게 보장되어 진다. 선로의 종류와 동해작용 지역에 의해 결정되어 지는 동상보호층의 최소두께는 독일 철도 “흙구조물 시방서(DS 836)”에 주어져 있다[1].

동상보호층을 위한 최소두께를 결정함에 있어 경제적인 이유 때문에 동상에 예민한 원지반에서 동상의 발생이 완전히 배제되어야 하는지(완전한 동상안전) 혹은 혹독한 겨울에는 한시적으로 허용되어 지는가에 (부분적인 동상안전) 대한 문제가 해결되어야만 한다.

동상에 대한 측정의 토대는 공기동결지수[F_L]이다. 공기동결지수는 하나의 동상기간 또는 겨울동안의 부정적인 낮 평균온도의 합계로 정의되어 지고 그리고 온도-일($^{\circ}\text{C}\text{-day}$)로 표시된다. 공기동결지수는 겨울의 혹독함을 측정하기 위한 기본치를 나타낸다. 아래 그림 4에서는 독일 슈베린시(Schwerin)와 아우구스브루그시(Augsburg)의 기상관측소의 1889/90년부터 1963/64년까지 74년간의 공기동결지수를 보여주고 있다[8]. 최대 공기동결지수 약 600 온도-일[$^{\circ}\text{C}\text{-day}$]에는 50년 이상의 오랜 기간동안 다만 한 번만 도달하였다. 그 결과 이 값은 하나의 완전한 동상의 안전을 위해 측정된 공기동결지수로 표시되어 진다. 간선의 주요 선로의 신축을 위해서는 이러한 완전한 동상에 대한 안전이 요구되어 지며, 이 경우 원지반에서는 한시적인 동상의 발생이 허용되지 않는다.

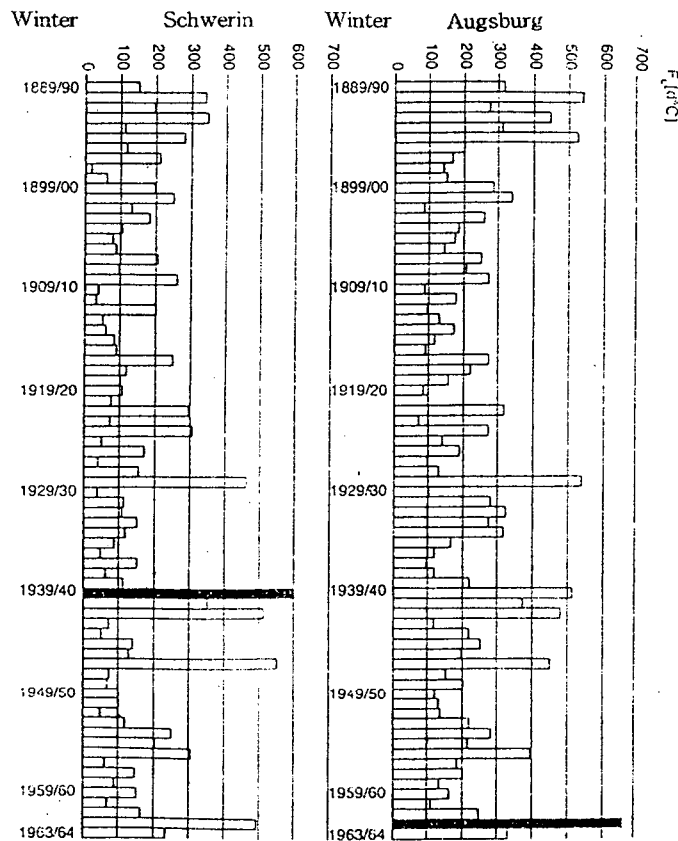


그림 4. 슈베린과 아우구스부르구시의 기상관측소를 위한 1889/90-1963/64기간의 겨울의 공기동결지수 F_L

만일 그 밖의 모든 선로에서 동상에 안전하게 동상보호층의 두께가 설치된다면, 이는 경제적으로 바람직스럽지 못하다. 따라서 이러한 선로에서는 부분적인 동상안전으로 측정되어 지는데, 이 경우 추위가 매우 혹독한 겨울에는 측정 공기동결지수를 넘게 되고 그리고 한시적으로 동상에 예민한 원지반에 동상의 발생이 허용되어 진다. 부분적인 동상안전을 위한 측정 공기동결지수는 이러한 공기동결지수의 가능한 회귀기간(回歸期間)이 매 10, 20 경우에 따라서는 5년으로 예상되어질 수 있다는 전제하에 확정되어 졌다. 이것은 동상이 이 기간 후에 동상에 예민한 흙에 발생되고 그리고 1차 및 2차 동해작용을 일으킨다는 것을 의미한다. 선로의 종류에 의존되어 확정되어진 회귀기간, 이에 따른 측정 공기동결지수 그리고 동상보호층의 최소두께가 표 1에 나타나 있다[2],[3].

표 1. 동상작용지역Ⅲ에서 측정겨울의 회귀기간에 예측된 동상보호층의 최소두께

선로종류		노반층을 포함한 동상보호층의 최소두께[m]	측정겨울의 회귀기간 [year]	공기동결지수 F_L [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$]	동상안전의 종류
신설 건설	간선의 연속된 본선 (도시철도제외)	0.70	50	600	완전
	도시철도 및 지선의 연속된 본선	0.60	20	500	부분적
	그 밖의 선로	0.50	10	400	
유지 보수	기존철도	$v > 160\text{km/h}$	0.50	10	400
	선로	$v \leq 160\text{km/h}$	0.50	5	300

국제철도연합(UIC)의 연구조사청(ORE)의 위임으로 드론틀헬름 공과대학교(Technische Universitaet Dronthelm, Norway)에서 수행되어진 연구조사에서는, 그림 5에서 보여주는 것과 같은 하나의 측정 겨울의 온도·일($^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$)에서 동결지수에 의존된 동상에 안전한 철도선로 구조의 필요한 두께를 구할수 있는 계산도표를 연구결과로 발표하였다[2].

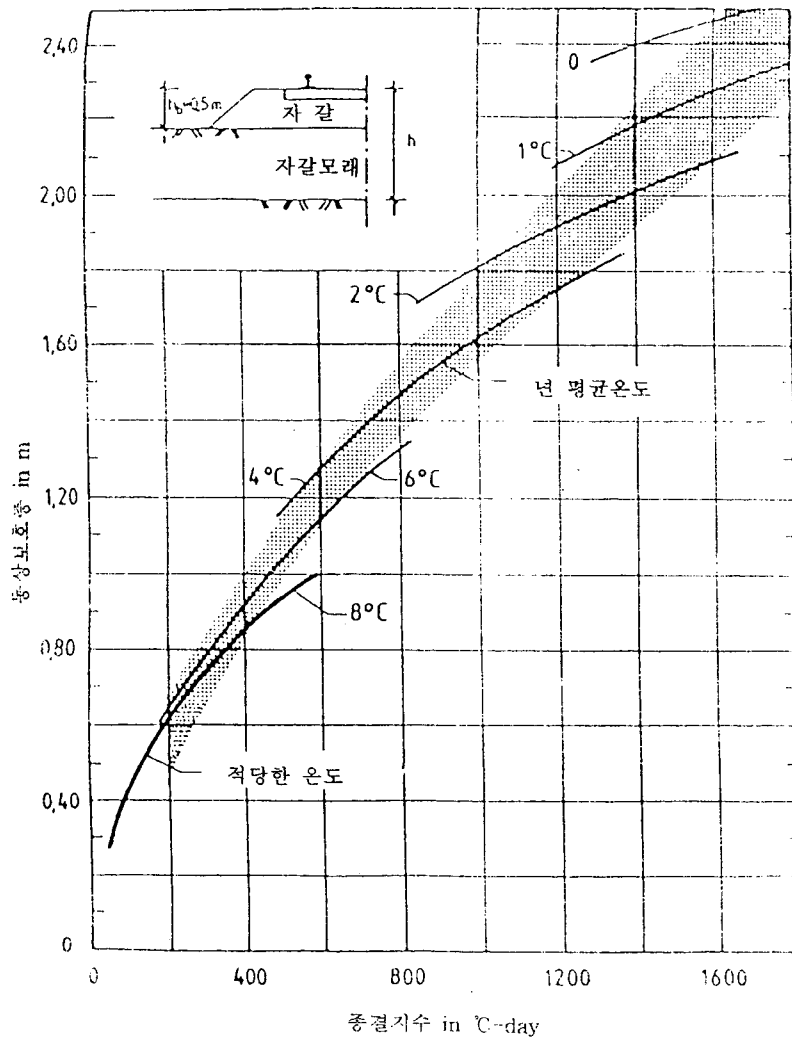


그림 5. 동상안전과 관련된 하나의 노반보호층의 두께를 위한 계산도표

4. 동상에서 토목섬유가 철도하부구조의 거동에 미치는 영향

토목 섬유를 특히 기존 선로의 보수 및 확장을 위해 사용하면서 일어나는 의문은, 원지반면과 동상 보호층 사이에 평면적으로 포설된 토목섬유가 동상작용에 대해 얼마만큼 기여할 수 있고 그리고 이로 인해 동상의 측정에 어느 정도의 영향을 미칠 수 있는가 하는 점이다. 이 경우 여러 가지의 연구조사에 의하면 비교적 얇은 토목 섬유에 의해 직접적인 열의 작용과 그리고 이에 따른 하나의 즉각적인 동상 깊이의 감소는 나타나지 않는다. 그러나 아래의 고찰에서 보여주는 것과 같이 동상과 관련하여 토목 섬유는 간접적이고 우회적인 작용에 귀속되어 진다.[8]

부분적인 동상 안전의 경우에는 동상에 예민한 원지반에서 온갖 동상이 발생되고 그리고 동절기 다음의 해빙기에는 위험스런 지지력의 감소 현상이 나타나며, 이것은 어떤 의미에서는 전체 시스템의 부분적인 파손을 야기 시킨다. 이 기간 동안의 지지력의 감소는 교통하중의 작용하에서 변형, 입자의 변위 그리고 무엇보다도 접촉 부위에 있는 흙들의 뒤엉킴과 동상 보호층으로의 침투 현상 등을 불러일으킨다(그림 6, 7, 8, 9참조).

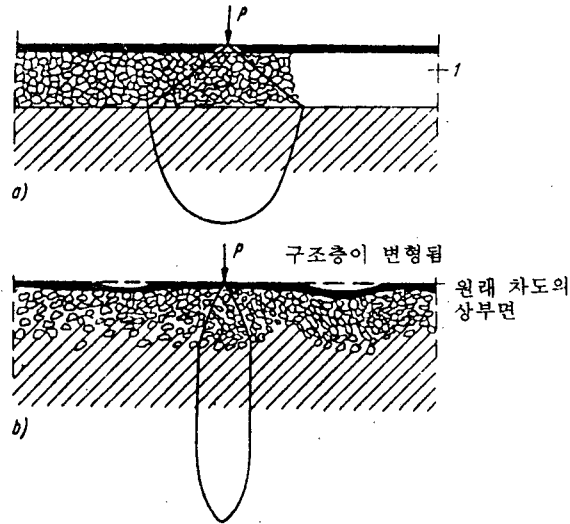


그림 6. 동상에 예민한 기초 지반위에서 수년간의 응력작용에 따른 자갈지지층 a와 b를 갖는 하나의 도로상태
 a) 고정된 자갈층에서의 하중분포
 b) 수년간의 교통 왕래후의 하중분포

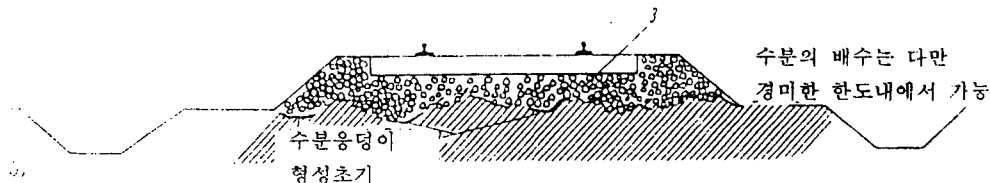


그림 7. 동상에 예민한 기초 지반에서 레일의 상부면과 하부구조 기면 사이의 간격의 변화에 대한 도해적 표시

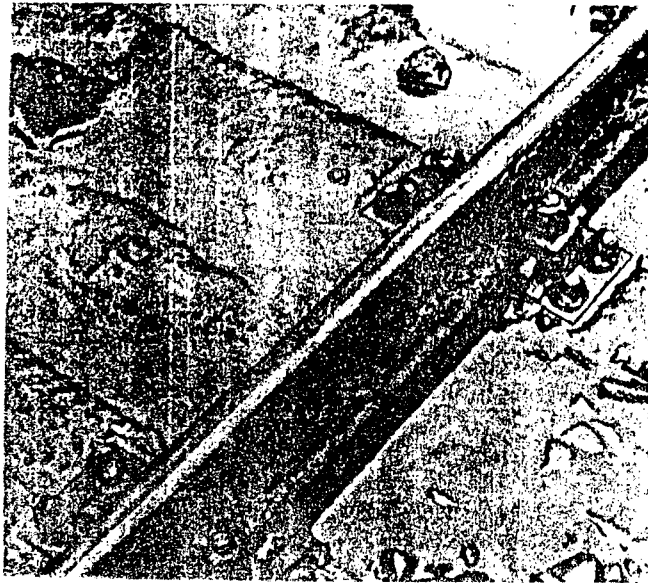


그림 8. 철도선로위의 지지력 손상에 대한 전형적 표시로서 진흙 투성이가 된 침목부위



그림9. 연약화된 하부구조에서 도상의 불규칙한 침몰은 선로의 변형을 초래

이와 같이 해로운 동상작용들은 원지반면과 노반층 혹은 동상보호층 사이에 하나의 토목섬유를 포설하면 줄일 수 있으며, 이 경우에는 특별히 추가적인 분리 및 필터 기능을 갖는 보강재가 추천되어 진다. 추가적인 분리 및 필터기능을 갖는 보강재로는 복합포가 우선시 되며, 이 복합포는 하나의 부직포성분과 하나의 높은 인장력의 지오그리드 혹은 직포성분이 결합되어 적조되었다.

부직포성분은 무엇보다도 분리 및 필터 작용을 보장한다. 또한 동상 보호층과 그리고 원지반간의 장기적이고 안정적인 분리를 통해 해빙기의 불리한 조건들 하에서도 지속적으로 뒤엉킴과 그리고 해로운 입자간의 전위를 방지하게 된다. 이로 인해 동상보호층의 특성이 변하지 않게 되고, 지지시스템에서는 장기간에 걸쳐 하나의 분명한 층 분리가 유지되어진다. 그밖에 해빙기에 발생하는 수분은 토목 섬유에 배수 작용(배수기능)에 의해 보다 빨리 배수되어지므로, 이에 따라 지지력의 증강이 이루어진다.

높은 인장력을 갖는 지오그리드 또는 직포성분은 하중을 효과적으로 분포시키고 변형들을 방지하게

하는 보강기능에 우선적으로 귀속되어진다. 이로 인해 해빙기 동안의 원지반의 일시적인 지지력의 감소는 어느 정도 극복되어진다. 그 결과 이와 같은 보강기능은 하부구조에서 하나의 균등하고 높은 지지력의 수준을 보장한다.

분리, 필터 및 보강작용의 크기에 따른 적합한 구분은 거의 불가능하고 그리고 반드시 필요하지도 않다. 이러한 작용들은 상호간에 영향을 미치고 그리고 일반적으로 자연스러운 현상이다. 중요한 것은 부분적으로 동상에 안전한 하부구조에서는 추가적인 분리 및 필터기능을 갖는 보강재에 의해 2차 적인 동해 작용을 줄일 수 있으며, 이것은 지지시스템의 장기적인 거동에 긍정적인 영향을 미친다.

철도선로에서 하부구조의 장기거동에 대한 토목 섬유유의 긍정적인 효과는 2개의 선로구간에서 총 12년이 넘는 장기적인 현장시험을 통해 입증되었다[5].

이 시험들의 결과에서 분리 및 필터재로 부직포를 사용한 선로구간에서는 동상 보호층과 원지반간의 뒤엉킴 현상이 일어나지 않은 반면, 부직포를 사용하지 않은 비교 구간에서는 동상보호층과 인접한 흙과의 사이에 뒤엉킴 현상이 나타나 있음이 확인되었다. 뒤엉킴 구역의 두께가 2년 후에 약 3cm, 5년 후에는 6~8cm 그리고 12년 후에는 약 6~10cm로 증가되었다. 이러한 뒤엉킴 지역은 증가된 세립자로 인해서 더 이상 무제한적으로 동상에 안전하지는 못하다[4].

지금까지의 고찰과 연구 조사들로부터 철도 하부구조에서 하나의 토목섬유유의 포설로 인해 각각의 동상의 발생에 따라 경미한 “부분적인 파손”이 예상되어 지고 그리고 동상보호층의 두께는 항상 유지할 수 있다는 결론을 도출하였다. 이것은 토목섬유유를 포설한 부분적인 동상안전의 경우에는 -동일한 “부분 파손”을 전제로 하고- 토목섬유유를 포설하지 않은 경우보다 더욱 자주 동상에 예민한 원지반에 동상의 발생이 허용될 수 있다는 것을 의미한다.

이러한 고찰의 토대하에 동상보호층의 필요한 두께를 측정하는 경우 추가적인 분리 및 필터기능을 갖는 높은 인장력의 토목섬유유를 고려하여 하나의 제안이 생겼다. 이에 따라 부분적인 동상안전을 측정하는 경우에는 모든 종류의 선로에서 동상보호층의 두께를 감소시킬 수 있게 되었다.

5. 토목섬유유를 사용한 동상보호층의 필요한 두께 산정

철도의 하부구조에서는, 만일 동상보호층의 정해진 최소두께가 예견되어 진다면, 동상에 대해 충분히 측정하지 않으면 안된다. 동상보호층의 최소두께는 독일 철도 “흙구조물 시방서(DS 836)”에 따라 동상 작용지역(I, II 또는 III), 선로의 종류와 그리고 속도와 연관되어 산정되어지며, 20cm보다 적어서는 안된다(표 2참조).

표 2. DS 836에 따른 동상보호층의 최소두께

선로 종류		노반층을 포함한 동상보호층의 최소두께			
		동상 작용 지역			
		I [m]	II [m]	III [m]	
신설 건설	간선의 연속된 본선 (도시철도제외)		0.50	0.60	0.70
	도시철도 및 지선의 연속된 본선		0.40	0.50	0.60
	그 밖의 선로		0.30	0.40	0.50
유지 보수	기존철도 선로	$v > 160\text{km/h}$	0.30	0.40	0.50
		$v \leq 160\text{km/h}$	0.30	0.25	0.30

표 2에서 보여준 값들은, 부분적인 동상안전의 경우에 설로의 의미, 하중 및 속도가 적으면 적을수록

동상에 예민한 원지반에 더욱 빈번히 동상이 허용될 수 있다는 가정하에 산정되어 졌다. 원지반과 동상 보호층 사이에 하나의 토목섬유를 포설할 경우에는 동상보호층의 필요한 두께를 최대한 10cm까지 줄일 수 있게 되었다. 그러나 이러한 감소는 다만 아래와 같은 전제조건하에서만 가능하다 :

- 기존 철도선로의 유지보수 및 확장
- 부분적인 동상안전
- 추가적인 분리 및 필터기능을 갖는 하나의 보강용 토목섬유의 적용과 그리고 독일 국유철도의 기술적인 공급조건들의 엄수
- 동상보호층의 최소두께 20cm 준수.

이러한 전제조건들을 이행하는 경우에는 표 3으로부터 동상보호층의 최소두께를 얻게 된다.

표 3. 토목섬유로 보강되었거나 보강되지 않은 기존 철도선로에서 동상보호층의 최소두께

속 도	동 상 작 용 지 역					
	I		II		III	
	A	B	A	B	A	B
$v > 160\text{km/h}$	30	20	40	30	50	40
$v \leq 160\text{km/h}$	20	20	25	20	30	20

주 : A - 토목섬유 비보강
 B - 추가적인 분리 및 필터기능을 갖는 토목섬유

6. 결 론

토목섬유는 지금까지 철도하부구조에서 노반층의 필요한 두께 측정시에는 우선적으로 고려되었으나, 동상보호층의 두께를 산정하기 위해서는 고려되지 못하였다. 이로 인해 지지력을 고려한 노반층 두께의 감소는 때로는 쓸모 없게 되었다.

따라서, 본문은 동상보호층의 필요한 두께 측정시 토목섬유의 고려에 대한 하나의 제안을 밑바탕에 깔고 있다. 이에 따라, 만일 주어진 전제조건이 충족되어 지고 그리고 추가적인 분리 및 필터기능을 갖는 토목섬유가 동상보호층 및 원지반 사이에 포설되어 진다면, 기존 철도의 유지보수 및 확장의 범위내에서 동상보호층의 최소두께를 약 10cm까지 줄일 수 있게 되었다.

이와 같은 연구결과는 독일에서 장기간에 걸친 현장 및 실내시험을 통해 얻은 결과이다.

우리 나라에서도 기존 철도선로에서 분니현상이 많이 발생되고 이로 인해 유지보수 비용이 많이 드는 점등을 감안할 때, 기존선로의 유지보수 대책공법의 일환으로 이 분야에 대해 좀 더 광범위한 연구가 수행되어지기를 바란다.

참고문헌

1. DS 836 der DB AG(1985년),“Vorschrift fuer Erdbauwerke”, Januar 1985
2. Koerber, Martinek, Die planumsverbesserung-technische Grundlagen, planung und Ausfuehrung. Elsner Taschenbuch, 1985. pp. 35-44.
3. Goebel, Lieberenz, Richter, “Der Eisenbahnunterbau, Eisenbahn”, Fachverlag Heidelberg, Mainz, 1996
4. Goebel, Lieberenz, Viel, “Beeinflussung des Tragverhaltens von Schichtsystemen durch Geokunsts - tofte”, Sonderheft 1997 der Zeitschrift “geotechnik”.

5. Lieberenz, "Erfahrungen bei der Anwendung von pnaumsschutzschichten mit Geotextilien", Eisenbahningenieur, 42.1991 3
6. Technische Lieferbedingungen "Geokunststoffe" der DB AG(TL 918039), 1997
7. "Empfehlungen fuer Bewehrungen aus Geokunststoffen -EBGEO-", Verlag Ernst und Sohn, 1997.
8. Geobel, Lieberenz, "Beitrag von Geokunststoffen zur Frostsicherung zur Eisenbahngleisen", Eisenbahningenieur. 49. 1998. 6
9. Goebel, Lieberenz, Floss, "Vorschlaege zur Bemessung des kunststoffbewehrten Tragsystems von Eisenbahnstrecken auf Frost und Tragfaehigkeit", 3 Informations -und Vortragveranstaltung ueber "Kunststoffe in der Geotechnik", 1993. Muenchen.
10. K. Johannes Klengel, "Frost und Baugrund", VEB verlag fuer Bauwesen, 1967.