

## 지오텍스타일 백으로 보강된 철도노반의 정적거동 분석

### Static Behavior of Reinforced Railway Roadbed by Geotextile Bag

신은철<sup>†</sup> · 이동연\*

Eun-Chul Shin · Dong-Hyun Lee

#### Abstract

In this study, a large-scale laboratory model test, 2-D and 3-D numerical analyses were conducted to verify the reinforcement effect by utilizing geotextile bag on the railway roadbed. Static loading which simulated train load was applied on the geotextile bag-reinforced railway roadbed and also unreinforced railway roadbed. Computer program named Pentagon which is a part of FEM programs was used in the numerical analysis. Based on the results of laboratory test, 2-D and 3-D numerical analyses, the effect of load distribution and settlement reduction was found to be depending on the geotextile characteristics, tensile strength of geotextile, and interface friction angle between geotextile bags. In general, the result of 2-D and 3-D numerical analyses shows lower value than that of laboratory test. Also, the result of 3-D numerical analyses shows lower value than that of 2-D numerical analyses because of its stress transfer effect.

**Keywords :** Geotextile bag(지오텍스타일 백), Railway roadbed(철도노반), Numerical analysis(수치해석), Static behavior(정적거동)

## 1. 서 론

지오텍스타일 백 공법은 지오텍스타일 백 내에 기계적, 수리학적 방법을 통하여 모래 또는 준설토 등의 토사를 채워 구조물을 형성하는 공법이다. 지오텍스타일 백 공법은 개발 초기에는 흥수조절 및 재해복구 등의 해안·호안 구조물로서 주로 사용되어 졌으며, 이후 1970년대 해일에 의한 제방의 긴급복구를 위하여 사용된 것을 시작으로 지속적인 발전이 이루어져 왔다[1]. 이러한 지오텍스타일 백 공법을 유실된 철도노반에 적용할 경우 규격화된 재료이고, 품질관리 및 시공의 규격화가 가능해져 그 동안 선로복구와 유지보수에 사용된 방법보다 빠르고 신뢰성있는 철도노반을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 지오텍스타일 백으로 보강된 철도노반 보강효과를 확인하기 위해 실대형 실험과 동일조건하에서 2-D, 3-D 수치해석을 실시하였으며, 선정된 지오텍스타일 백 축조노반위에 모사열차하중을 고려한 하중을 재하하여

무보강 노반과 비교하여 토큅과 침하량을 실대형 실험결과와 비교분석함으로써 지오텍스타일 백으로 보강된 축조노반의 거동특성 및 보강효과를 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실대형 토조 및 재하장치

대상노반의 조성 및 모사열차 반복하중의 재하는 종합궤

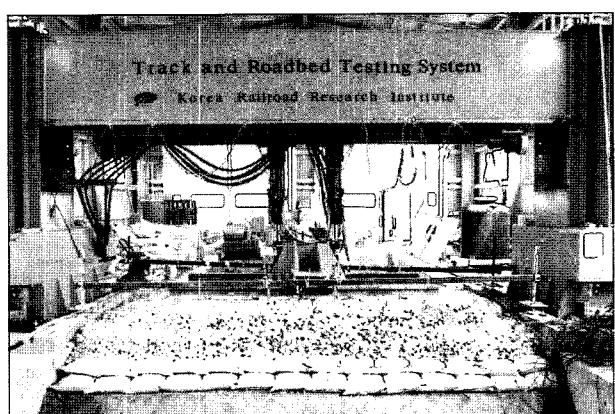


Fig. 1. 종합궤도노반 실험장치 전경[2]

\* 책임저자 : 정희원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수  
E-mail : ecshin@incheon.ac.kr  
TEL : (032)770-8466 FAX : (032)770-8460  
\* CTC(주) 전무이사, 인천대학교 토목환경시스템공학과 대학원, 박사과정수료

도노반 실험장비에 의해 수행하였다[2]. Fig. 1은 종합궤도 노반 실험장치의 전경을 나타낸것이고 Table 1은 하중재하장치의 제원을 나타낸다. 시험노반의 조성에 활용된 토조의 제원은 15m(길이)×5m(폭)×3m(깊이)로 평면변형 조건에서의 실제현장을 모사할 수 있도록 하였다.

이러한 실대형시험은 실제현장의 철도노반 상황을 모사하고, 현장계측에서 오는 문제점을 해결하도록 실내에서 시험을 수행할 수 있는 장점이 있다.

## 2.2 철도노반재료 및 지오텍스타일 백

일반적으로 철도노반의 재료는 양질의 자연토로서 노반분니가 발생하지 않고, 진동이나 유수에 있어서도 안정해야 하며 열차하중을 지지할 수 있는 강도가 요구된다. 본 시험에서는 통일분류법상 200번체 통과량이 5%미만인 SP시료를 노반재료로 사용하였다(Table 2 참조).

지오텍스타일 백의 형상은 경제성 측면을 고려하여 포대형으로 제작하고, 적정크기는 시공성을 고려하여 66cm×44cm로 제작하였으며, 채움도 변화에 따른 지오텍스타일 백의 인장변형 거동을 고려하여 90% 채움도로 시험을 수행하였다. Table 3은 선정된 지오텍스타일 백의 공학적인 특성을 지오텍스타일 부분과 채움재 부분으로 나누어 정리한 것이다.

Table 1. 하중재하장치의 제원[2]

항 목	내 용
성능 및 특성	<ul style="list-style-type: none"> <li>최대동적하중 : 250kN/AActuator</li> <li>가진 진동수 : 0~100Hz</li> <li>동적변위 : ± 100mm</li> <li>유압펌프용량 : 3000psi</li> </ul>
주요 구성품	<ul style="list-style-type: none"> <li>동적 재하 장치 용량 : 25 tonf</li> <li>유압조정장치</li> <li>하중 및 변위 계측기</li> <li>중앙 계측 장치</li> <li>자동 제어 조절 장치</li> </ul>

Table 2. 철도노반 재료의 공학적 특성

비 중	최대건조 단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	최적 함수비 (%)	내부 마찰각 (°)	점착력 (tonf/m <sup>2</sup> )	흙의 분류 (USCS)
2.64	2.01	10.2	38	2.5	SP

Table 3. 지오텍스타일 백 및 채움재의 공학적 특성

구분	지오텍스타일 백(PP)			채움재(모래)		
	최대 인장강도 (tonf/m)	유효입경 (D <sub>90</sub> , mm)	신장을 (%)	비중	최대건조 단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	투수 계수 (cm/sec)
값	4.0	0.188	16	2.61	1.68	5.0×10 <sup>-1</sup>

## 3. 실험단면조성 및 실험하중

### 3.1 노반조성 및 계측기 설치

실대형실험에서는 토압계, 침하판 및 변위계 등과 같은 계측기를 설치하여 계측을 실시하였으며, 실험단면으로는 무보강 단면과 지오텍스타일 백을 2층 및 4층으로 보강한 단면을 조성하였다.

노반의 높이는 총 2m로서 노반하부의 기초층은 앞서 기술한 바와 같이 충분한 다짐을 실시한 후, 상부에 PV1~PV5의 토압계를 설치한다. 토압계는 무보강 단면도인 Fig. 2에 나타난 바와 같이 궤도의 중심부로부터 각각 1.32m간격으로 설치되었다. 이후 유효높이 20cm간격으로 흙을 포설하여 다짐을 실시하면서 단면을 형성하고, 기초층으로부터 1m, 2m높이에 각각 PV6~PV9, PV10~PV12의 토압계를

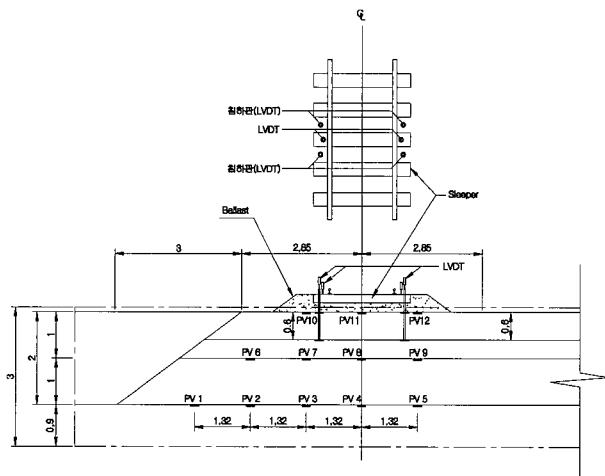


Fig. 2. 무보강 실험 단면[2]

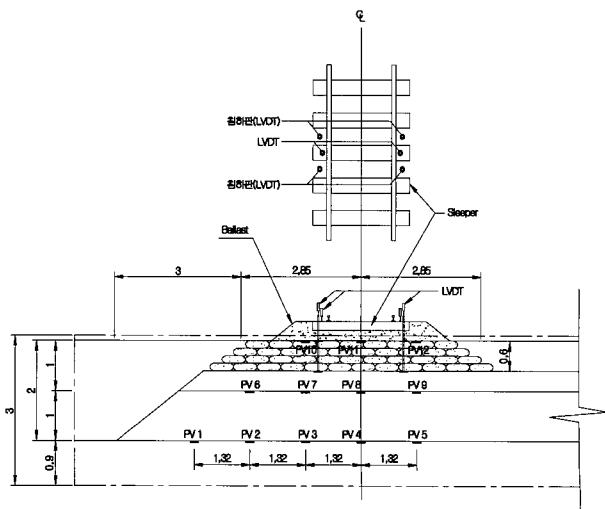


Fig. 3. 지오텍스타일 백 4단 실험단면[2]

를 매설하였다. 침하판은 연직변위량을 계측하기 위해서 노반면 상단으로부터 0.6m깊이와 노반면 최상단에 설치하였다. 노반이 완료되면, 도상자갈을 30cm 포설한 후, 궤광을 부설한다. 완성된 지오텍스타일 백 4층 단면의 단면도와 전경은 Fig. 3과 같다.

### 3.2 실험하중 조건

열차하중은 차량특성, 운전조건, 곡선제원, 열차의 속도 등으로부터 결정된다. 정하중은 예상차량의 정적 윤중값을 이용하는 것으로 하며, 이 경우 차량 중량을 축수로 나눈 것을 정적 축중, 나아가 정적 축중을 1/2로 한 것을 정적 윤중으로 한다. 본 연구에서는 국유철도 건설규칙에 정한 표준 활하중인 LS22하중을 사용하였다.

충격하중의 산정은 활하중에 충격계수( $i$ )를 곱하여 구하며, 정확한 충격하중은 현장에서 계측하여 구해야 하나, 각 선로별 편차가 크므로 기존의 제안식을 사용하였다. 본 연구에서는 일본의 장대레일구간에서 적용되고 있는 충격계수( $i$ )를 적용하여 산정한 결과 충격계수는 1.6을 사용하였다.

충격하중의 증분을 고려하여 계산한 결과 설계윤중은 14.3 tonf으로 결정하였으며, 이 윤중의 약 40%까지 증가된 20 tonf의 윤중을 4tonf씩 단계별로 재하하였다. 수치해석에서도 실대형시험 하중조건과 동일하게 하여 해석하였다.

## 4. 수치해석

### 4.1 모델링 및 경계조건

지오텍스타일 백을 활용한 노반강화 효과를 확인하기 위하여 실대형 실험에서 실시한 무보강단면, 지오텍스타일 백 2층과 4층 보강단면과 동일하게 모델링 하였다. 또한, 실험 시 계측 결과와 동등하게 비교하기 위하여 계측기 위치를 감안하여 유한요소망을 만들었다.

지오텍스타일 백은 실제 크기와 동일한 크기로 사각형 모양으로 모델링하고 인터페이스 요소를 적용하도록 하였다. 지반-지오텍스타일 백 및 지오텍스타일 백-지오텍스타일 백의 인터페이스는 무시할 만한 두께의 그라우트 재료로 모델링하였으며, 인터페이스의 전단거동은 인터페이스 전단강성  $K_{bond}$ 으로 이루어진 Spring-Slider 시스템으로 표현하였다.

수치해석에 사용된 요소들은 지오텍스타일 백의 형태와 하중조건을 고려하여 2차원 해석에서는 2절점 트러스요소를 사용하였고, 3차원 해석에서는 얇고 휨작용을 받는데 적합한 판 형태의 4절점 Shell요소를 적용하였다. 또한, 노반 및 도상, 침목등의 지반요소는 4절점 solid 요소를 적용하였고 레일은 2절점 frame 요소를 적용하였다.

해석의 경계조건은, 상부지표면은 자유경계조건, 측면 및 하부 경계는 각각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위 경계조건을 적용하였다.

### 4.2 입력변수 및 해석과정

지오텍스타일 백의 입력변수는 두께  $t_G$ , 탄성계수  $E$ , 포아송비, 단위중량  $\gamma_t$  가 있으며, 각각의 입력변수는 해석조건에 따른 변수를 제외하고는 기존의 연구문헌[3,4] 고찰을 통하여 설정하였다(Table 4 참조). 해석에 적용한 지오텍스타일 백의 두께는 2.0mm, 밀도는 1,350kgf/m<sup>3</sup>를 사용하였으며 지반의 물성치는 직접전단 시험결과와 Hunt(1984)에 의해 제안된 일반적인 범위의 값을 사용하였고 인터페이스의 물성치는 대형 직접전단실험에서 측정된 결과치를 적용하였다(Table 5 참조).

수치해석의 전체적인 과정은 총 3가지 경우(무보강, 2층보강, 4층보강)의 해석조건에 대하여 각 단계별로 상이하게 적용하였으며 다음 순서와 같다.

- (1) 노반조성
- (2) 지오텍스타일 백 조성
- (3) 도상 및 침목, 레일 설치
- (4) 정하중 재하 및 해석
- (5) 출력분석

## 5. 2차원 정하중 수치해석 결과 및 분석

### 5.1 연직토압

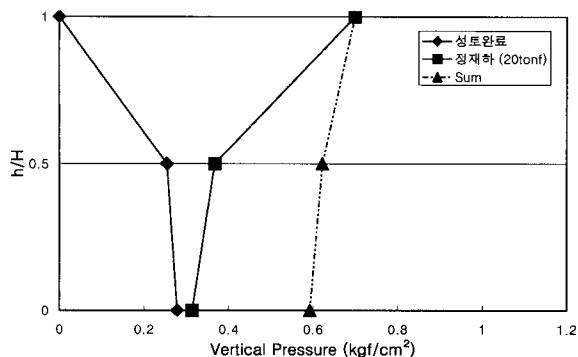
Fig. 4와 Fig. 5의  $h/H=0.0$ 은 노반 상단면을 나타내고,  $h/H=0.5$ 는 노반상단면하 1m지점을,  $h/H=1.0$ 은 노반하단면을 나타내는 것이다. 그림에서 보듯이 성토단계에서 발생한

Table 4. 유한요소해석의 입력 물성치

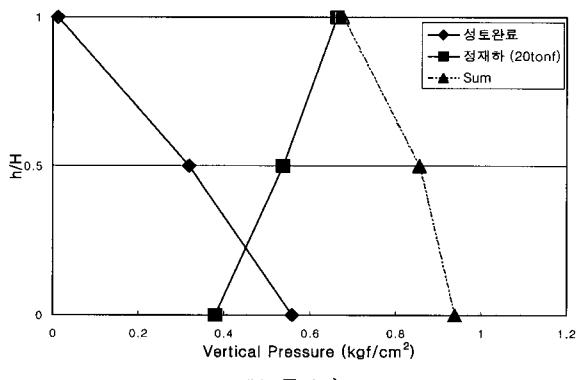
구분	치수(cm)	단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (tonf/m <sup>2</sup> )	포아송비
노반	140~200	2.15	3,060	0.3
기초	90	2.15	4,164	0.3
자갈도상	30	2.20	15,000	0.3
침목	260×30×20(h)	2.3	3,000,000	0.167
레일	60kg/m	7.85	21,000,000	-
지오텍스타일	15	1.35	700,000	0.25
채움재(모래)	15	1.68	4,164	0.3

Table 5. 인터페이스요소 입력 물성치

구 분	$K_{bond}$ (tonf/m/m)	$S_{bond}$ (tonf/m)	$S_{friction}$ (°)
지반-지오텍스타일 백	1020	0.42	30.4
지오텍스타일 백 -백	326	0.21	21.0

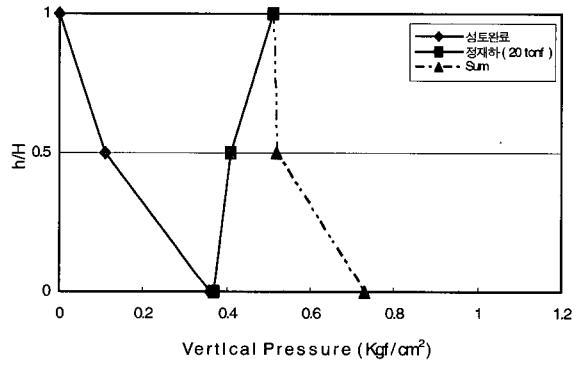


(a) 지오텍스타일 백 4단

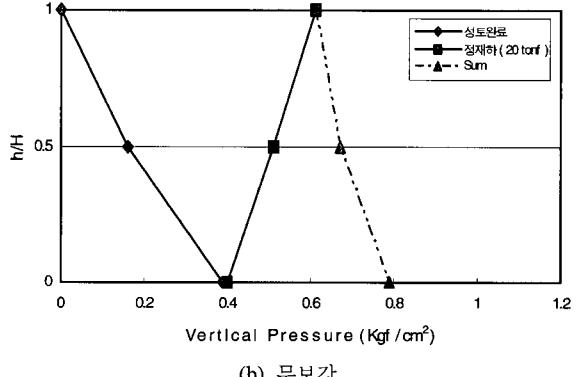


(b) 무보강

Fig. 4. 토총 심도에 따른 연직 토압분포도(실대형실험)



(a) 지오텍스타일 백 4단



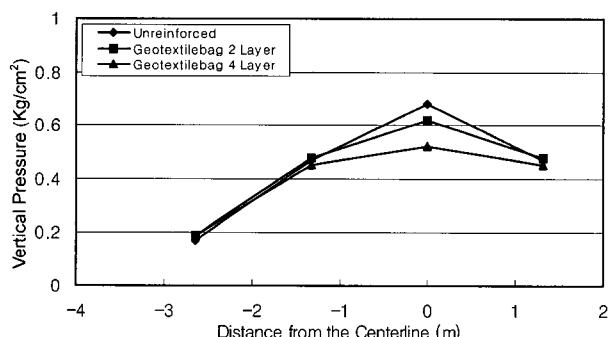
(b) 무보강

Fig. 5. 토총 심도에 따른 연직 토압분포도(수치해석)

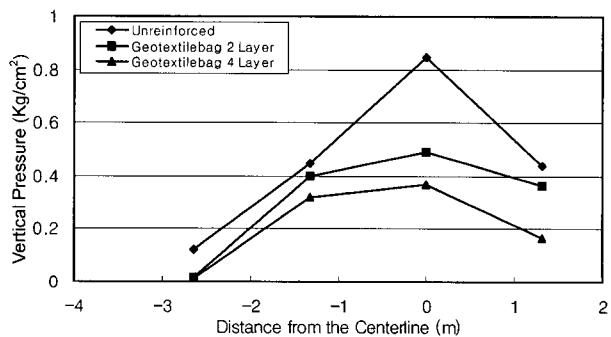
자중에 의한 토압과 모사열차하중 재하에 의한 토압증가량, 그리고 이들을 모두 고려한 실대형실험 및 수치해석의 연직 토압의 분포를 나타내었다. 전체적으로 노반면에서는 정하중에 의한 토압증가량이 지배적이고, 이하의 심도에서는 자중에 의한 영향이 지배적임을 알 수 있다. 노반면에서 계측된 토압의 경우, 무보강 단면과 지오텍스타일 백 4단 설치 단면의 결과는 유사한 반면, 심도가 증가할수록 토압의 증가분은 보강단면에서 현저히 감소함을 알 수 있다.

특히, 지오텍스타일 백이 설치된 심도 하단에서의 토압은 무보강단면의 동일심도에 비해 약 22~30%정도의 응력감소가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 지오텍스타일 백의 채움재의 입자 재배열에 따른 압축변형특성, 지오텍스타일 백의 인장특성 및 마찰특성에 의한 상부하중의 하중분산효과에 기인하는 것으로 판단된다.

특히, Fig. 6의 중심으로부터 이격거리에 따른 연직토압분포를 살펴보면, 실대형실험 및 수치해석결과 모두 무보강 단면이 가장 큰 값을 보이며 2단, 4단 설치의 순으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 지오텍스타일 백 채움재의 압축변형특성과 지오텍스타일 백 재료자체의 인장특성, 그리고 시공된 지오텍스타일백간의 접촉면에서 발생하는 불연속적인 거동에 의한 하중분산효과에 기인하는 것으로 판단된다.

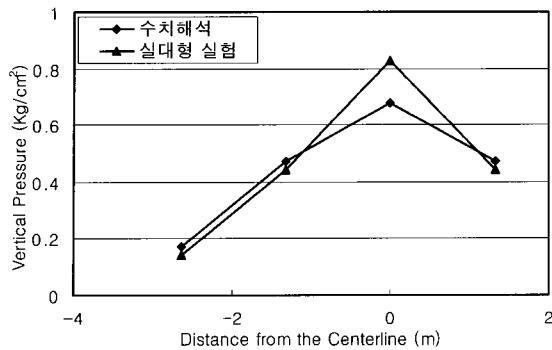


(a) 1.0m 지점(수치해석)

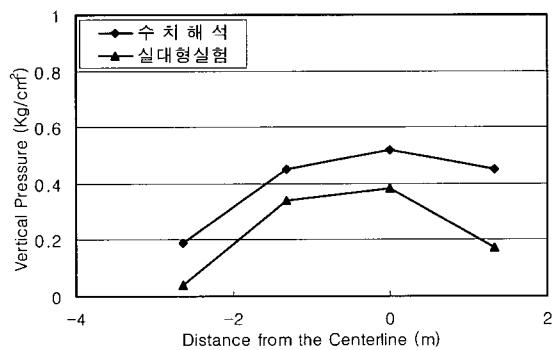


(b) 1.0m 지점(실대형실험)

Fig. 6. 중심으로부터 이격거리에 따른 연직토압분포도



(a) 무보강



(b) 4단보강

Fig. 7. 중심으로부터 이격거리에 따른 연직토압분포도

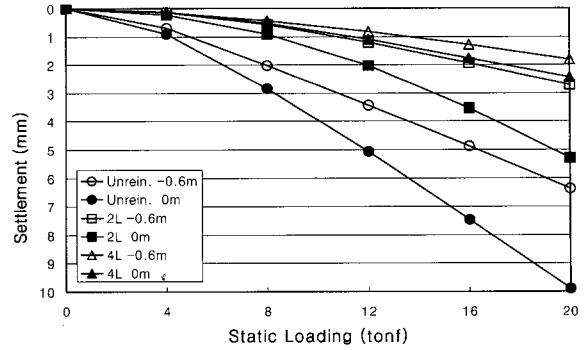
또한, Fig. 7에서 보는 바와 같이 수치해석 결과와 실대형 실험 결과를 비교한 결과 단면 중심에서 제일 크고, 이격거리에 따라 점점 감소하는 포물선 모양을 나타남을 알 수 있으며, 실대형 실험 결과가 수치해석 결과보다 약간 작게 나타남을 알 수 있다.

이는 채움재의 저항특성, 지오텍스타일 재료의 인장특성 및 마찰특성으로 인해 연직하중을 수평방향으로 분산시키는 효과를 수치해석시 충분히 발휘하지 못한 결과로 판단된다.

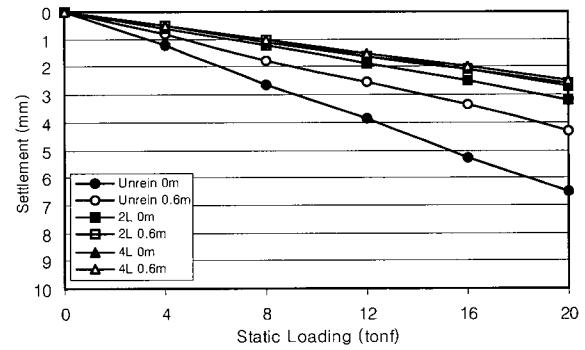
## 5.2 연직변위(침하량)

정직하중 재하에 따른 침하량을 Fig. 8에서 보여준다. 그림에 나타난 바와 같이 지오텍스타일 백으로 보강한 단면에서는 무보강 단면에 비해 상대적으로 작은 연직변위가 발생하는 것을 알 수 있으며, 또한, 지오텍스타일 백이 4단으로 설치된 단면이 2단으로 설치된 단면보다 침하가 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 지오텍스타일 백 내부채움재의 압축변형특성과 지오텍스타일 백 자체의 인장변형 특성을 고려할 때 지오텍스타일 백의 하중분담에 따른 침하저감 효과라 할 수 있다.

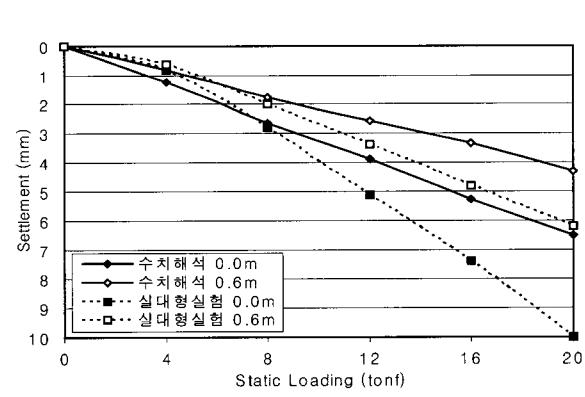
침하량은 Fig. 9와 같이 무보강 단면의 노반 상단면 0.6m 아래 지점의 실대형 실험 결과는 6.1mm, 수치해석 결과는



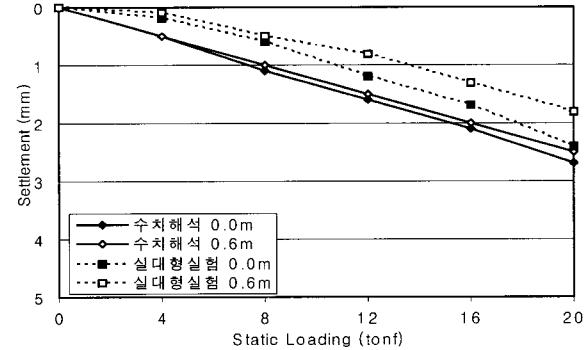
(a) 실대형실험



(b)수치해석



(a) 무보강



(b) 4단보강

Fig. 9. 하중재하에 따른 침하량

4.4mm로 상대적으로 작게 나타났으며, 지오텍스탈 4단 보강 단면에서는 실대형 실험 결과는 1.8mm, 수치해석 결과는 2.5mm로 나타나 지오텍스탈 백의 보강효과가 실대형 실험결과에서 약 25%정도 크게 나타났다. 이는 실대형 실험시 재하장비 영점조정, 계측기 측정 오차 및 기초 및 노반 다짐도 차이에 의한 실험오차 차이인 것으로 판단되며, 수치해석시에는 상부 하중재하시 지오텍스탈 백 내부의 채움재 입자의 재배열로 인한 응력분산효과를 반영하지 못하고 지오텍스탈 백의 마찰특성만 고려된 결과 차이인 것으로 사료된다.

## 6. 3차원 정하중 수치해석 결과 및 분석

### 6.1 연직토압 및 침하량

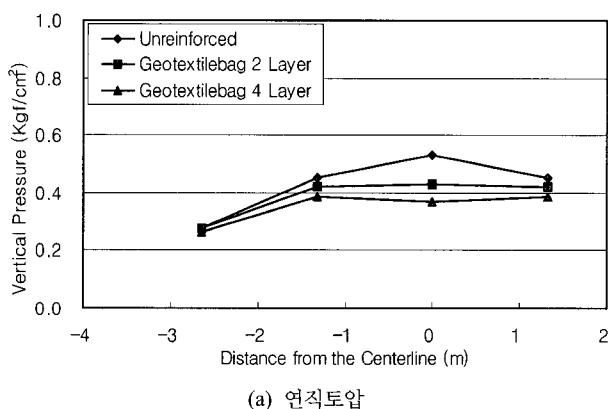
실대형 실험시의 하중조건과 동일하게 3차원 수치해석을 실시하여 2차원 수치해석 및 실대형 실험결과와 비교하였다.

Fig. 10(a)에서 보는 바와 같이 정하중 재하에 따른 연직토압분포 양상은 실대형실험 및 2차원 수치해석과 유사하게 단면중심에서 크고 이격거리에 따라 점점 감소하는 양상이 나타남을 알 수 있다. 지오텍스탈 백 4단 보강시 하중분산

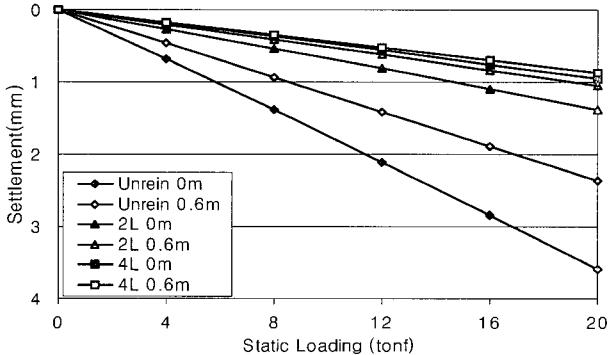
효과는 무보강대비 약 30% 정도로, 2차원 수치해석시 22%에 비해 약 8%정도 보강효과가 크게 나타났다. 이는 3차원 해석이 2차원 평면해석에서는 모사할 수 없는 종방향으로의 응력전이를 가능케하여 입체적인 응력분산에 의한 결과로 사료된다. Fig. 10(b)는 지오텍스탈 4단 보강시 지오텍스탈 백 보강효과를 확인하기 위해 노반면 상단 및 상단면 아래 0.6m지점의 결과를 나타낸 것이며 연직침하량도 하중분산 효과로 인한 침하 저감효과가 뚜렷한 것을 알 수 있다.

### 6.2 2차원 및 3차원 수치해석에 의한 연직침하량 비교

해석결과 Fig. 11에서 보는 바와 같이 노반상단면하 0.6m에서의 연직침하량은 무보강단면의 경우 2차원해석은 4.4mm이나 3차원 해석결과는 2.4mm로 침하량이 약 45% 정도 작게 나타났다. 지오텍스탈 백 4단 보강단면의 경우 2차원 해석에서는 2.5mm, 3차원 해석에서는 1.0mm 정도로 약 60% 정도 작게 나타남을 알 수 있어 3차원 해석결과가 2차원 해석결과보다 약 50% 이상 연직침하량이 작게 나타났다. 따라서, 연직토압 및 연직침하량 분석결과 3차원 해석 결과가 2차원 해석 결과보다 약 50%정도 작게 나타났으며, 이는 2차원 평면해석에서는 표현이 불가능한 종방향으로의 응력

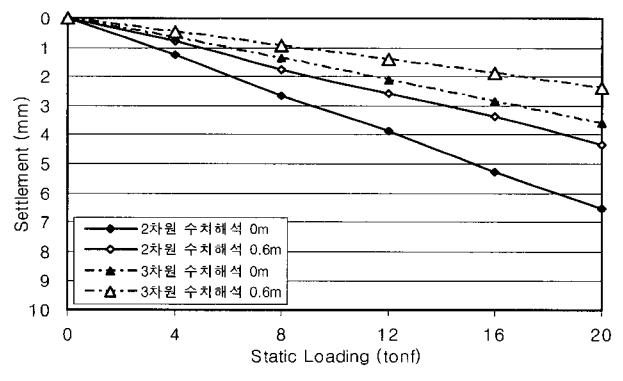


(a) 연직토압

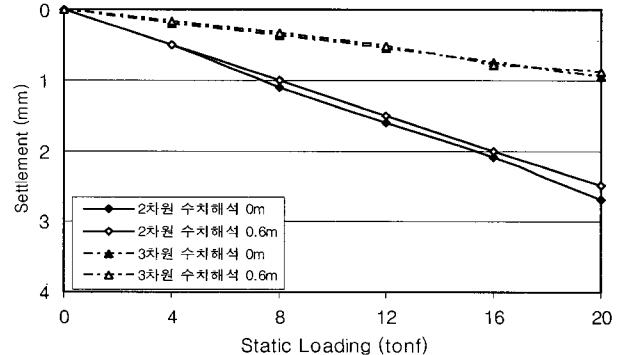


(b) 연직침하량(4단 보강시)

Fig. 10. 3차원 정하중 해석결과



(a) 무보강



(b) 4단보강

Fig. 11. 연직침하량 비교

전이효과로 판단된다. 그러나 열차하중은 이동하중이므로 2차원 해석결과가 3차원 해석결과보다 보수적인 설계임을 나타내는 것으로 실무적용시에는 2차원 해석결과를 적용하여도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

## 7. 결 론

이 논문에서는 지오텍스타일 백으로 축조된 노반거동특성 및 보강효과를 평가하고자 열차하중과 운행주기를 모사한 실대형 실험조건과 동일한 조건에서 수치해석을 실시하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 정적하중하에서 유한요소 수치해석을 실시하여 축조노반의 토압 및 연직침하량을 비교분석한 결과 지오텍스타일 백을 보강한 단면이 무보강단면에 비해 보강효과가 매우 크게 나타났으며, 실대형 실험결과와 유사한 경향을 나타남을 알 수 있었다.
- (2) 실대형실험과 2차원 정하중 유한요소해석을 비교분석한 결과 연직토압 및 침하량이 매우 유사한 경향을 나타내나 수치해석결과가 실대형실험보다 전반적으로 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 정하중 수치해석의 경우는 지오텍스타일 내부의 채움재 입자의 재배열로 인한 상부하중의 응력분산효과를 반영하지 못하고, 마찰특성만 반영된 결과로 사료된다.
- (3) 2차원 정하중과 3차원 정하중 유한요소해석을 비교분석한 결과 3차원 해석결과가 2차원 해석결과보다 연직토압은 약 8%, 침하량은 약 50%정도 작게 나타남을 알 수 있었다. 이는 종방향 구속조건 변화에 의한 응력전이 효과로 사료되며, 2차원 해석결과가 3차원 해석결과보다 보수적인 설계임을 나타내는 것으로 실무적용시에 2

차원 해석결과를 적용하여도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

- (4) 유한요소 수치해석결과 지오텍스타일 백을 보강한 단면이 무보강 단면에 비해 정하중 2차원인 경우 약 22%, 정하중 3차원인 경우 약 30%의 하중감소효과가 나타남을 알 수 있었다. 이는 지오텍스타일 백 채움재의 압축변형특성과 지오텍스타일 백 자체의 인장특성 및 마찰특성에 의한 상부하중의 하중분산효과로 사료된다.
- (5) 향후 본 공법의 활용성을 증대시키기 위해서는 상부하중에 의한 지오텍스타일 백 및 내부채움재 입자의 거동특성에 대한 미시적 관점에서의 세밀한 거동분석에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. Heibaum, M. H. (1999), "Coastal Scour Stabilization Using Granular Filter in Geosynthetic Non-woven Containers", Geotextile and Geomembrane, Vol.17, pp.341-352.
2. 한국철도기술연구원 (2003), "강우로 인해 유실된 선로복구를 위한 토목섬유 콘테이너의 실용화 기술개발", 산·학·연 공동연구 최종보고서, pp.46-92, 145-176.
3. 한국토목섬유학회지 (2004), "토목섬유를 이용한 철도 연약노반 보강기술", Vol.3, No.3, pp.16-19.
4. Hunt, R. E. (1984), "Geotechnical Engineering Investigation Manual", McGRAW-HILL, pp.198-203.
5. Annual Book of ASTM Standards(2002), Geosynthetics.
6. Esveld, C. (2001), Modern Railway Track 2nd edition, MRT-Productio.
7. Koerner, R.M (1997), Designing With Geosynthetics, pp.113-115, pp.436-449.
8. Selig, E. T. and Waters, J. M. (1994), Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford.