

연약지반상 고속철도 노반 축조시 지오셀 시스템의 효과

Reinforcement of Soft Soil Subgrade for High-Speed Railroad Using Geocell

김진만¹⁾, Jin-Man Kim, 조삼덕²⁾, Sam-Deok Cho, 윤수호¹⁾, Soo-Ho Yoon,
정문경¹⁾, Moon-Kyung Chung, 김영윤³⁾, Young-Yoon Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Div., KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, Research Fellow, Civil Eng. Div., KICT

³⁾ 보강기술(주) 기술연구소 소장, Director, E&S Eng. Co., Ltd.

SYNOPSIS : This paper presents the results of plate load test and dynamic load test performed to evaluate the performance of geocell where it is used to reinforce soft subgrade for high-speed railroad. Efficacy of geocell was observed in increase in bearing capacity of subgrade and reduction of thickness of reinforced sub-ballast. Plate load tests were carried out at four different places with varying foundation soil strength as a function of number of geocell layer, type of filler material, thickness of cover soil, and the presence of non-woven geotextile. Dynamic load tests were performed in a laboratory. The test soil chamber consists of, from the bottom, 50 cm thick clayey soil, one layer of geocell filled with crushed stone, 10 cm thick crushed stone cover, reinforced sub-ballast of varying thickness, 35 cm thick ballast. This configuration was determined based on the results of numerical analysis and plate load tests. For each set of the dynamic load tests, loads were applied more than 80,000 times. One layer of geocell underlying a 10 cm thick cover soil led to an increase in bearing capacity three to four times compared to a crushed stone layer of the same thickness substituted for the geocell and cover soil layer. Given the test conditions, the thickness of reinforced sub-ballast can be reduced by approximately 35 cm with the presence of geocell.

Key words : Geocell, Geosynthetics, railway, Reinforcement

1. 서 론

일반적으로 연약지반상의 고속철도의 구축은 연약지반을 치환하거나 개량하는 방법에 의해 수행되고 있으나 이들 전통적인 공법은 공기와 경제성에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 특히 연약지반상에 동하중이 가해질 때, 액상화 등으로 지반강도가 감소되어 철도 구조물이 파괴될 수 있으며 이러한 연약지반상의 철도 시공은 복잡한 기술적 문제의 해결을 요구하고 있다.

현재 연약지반위에 건설된 철도노반의 강화기술로서 각광받고 있는 것으로는 지오셀 시스템(geocell system)을 들 수 있다. 지오셀 시스템은 종래의 지반보강을 위해 지반/보강재의 마찰력 및 인발저항력을 이용하는 평면형태의 보강방법인 지오그리드(geogrid)와 같은 토목섬유(geosynthetics)에서 한 단계 더 진전된 것이다. 지오셀 시스템은 두께 1.2mm 이상의 합성수지판으로 벌집모양의 삼차원 형태로 제작된 토목섬유 보강재를 이용하여, 단위 셀(cell)안에 조립토를 채워 다짐함으로써 복합구조체의 강성 등 공학적 특성을 증대시켜 지반의 전단강도 및 지지력을 극대화시킨 방법이다(Intersol Engineering Inc.,

1997).

본 연구에서는 연약지반 구간 위를 통과하는 고속철도의 노반을 강화할 수 있는 지오셀 시스템에 대한 지지력 메카니즘을 분석하고 다양한 평판재하시험 및 동적 모형토조실험을 통하여 지오셀 시스템의 지지력 개선효과를 평가하고자 하였다.

2. 지오셀 시스템을 이용한 노반강화 기법

궤도를 지탱하고 있는 노반이 손상되면 선로기능의 마비 혹은 반복적인 선로의 보수작업이 필요하다. 노반의 손상은 크게 궤도와 노반의 원호활동파괴, 점진적 전단파괴, 과도한 소성변형, 압밀침하, 노반의 마멸(attrition)과 지속적인 세립토의 도상 간극으로의 혼입, 동결/융해에 의한 강도저하, 함수비 변화에 의한 팽창 및 수축에 의해 발생한다(ORE, 1970 ; Li and Selig, 1995). 이중 점진적 전단파괴 및 과도한 소성변형 등은 차량의 반복하중에 의한 대표적인 연약지반상 노반파괴의 형태이다.

그림 1에서는 지오셀 시스템의 지지력 개선 메카니즘을 보여준다. 그림 1에서 보듯이 지오셀 시스템은 평면형태의 지오그리드 보강재와 달리 두께 1.2mm 이상의 합성수지판으로 벌집모양의 삼차원 형태로 제작된 토목섬유 보강재를 이용하여 단위 셀(cell)안에 조립토를 채워 다짐함으로써 복합지반의 공학적 특성을 증대시켜 지반의 압축특성 및 지지력을 극대화시킨 방법이다. 지오셀 시스템의 지반보강은 외력에 대한 흙/지오셀의 마찰저항, 이웃한 셀의 수동저항, 셀의 원형응력 등에 의해서 이루어진다. 따라서 지오셀 시스템은 셀의 재질, 형태 및 크기, 속채움재의 종류 및 다짐도, 부직포 포설유무, 재하하중 등 지오셀 메카니즘에 영향을 주는 여러 인자들에 의해 영향을 받는다. 지오셀 시스템은 앞서 언급된 지오셀 메카니즘에 의해서 도상 및 보조도상의 횡방향 변위를 억제시킴으로써 위에서 언급된 노반파괴를 최소화시켜 연약지반상 철도지반 노반재로서의 그 활용성이 기대된다.

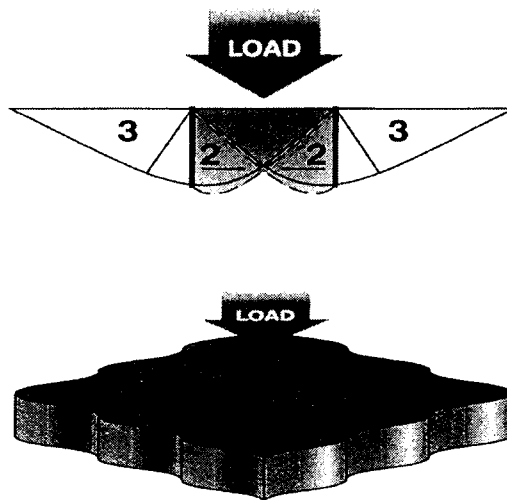


그림 1. 지오셀 시스템의 지지력 개선 메카니즘

3. 시험개요

본 연구에서는 개량·미개량 연약지반에서 수행된 다양한 형태의 평판재하시험 결과를 토대로 지오셀 시스템의 속채움 종류 및 지오셀 층수, 복토층 두께, 원지반 강성도의 변화, 부직포 포설 등에 따른 보강효과 등을 규명해 보고, 이를 양질의 성토재로 치환된 지반과 비교해 봄으로써 고속철도 노반재로서 지오셀 시스템의 적합성을 평가하고자 하였다.

본 연구 대상 현장은 인천시 영종도내의 “인천 국제신공항 제 1공구 A-4지역 부지조성 공사현장”의

연약지반 개량(A 현장) 및 미개량(B 및 C 현장) 연약지반 3곳과 안산 신도시 2단계 확장단지 조성공사내 미개량 연약지반(D 현장) 1곳을 선정하였다. 이때 지오셀 시스템의 부직포 포설에 따른 보강효과 평가를 위한 평판재하시험은 미개량 지반인 영종도의 C 현장과 안산 신도시 D 현장에서 부직포 포설 지오셀 단면에 대해 수행되었으며, 사용된 흙시료는 표 1과 같다. 또한, 표 2에서는 본 연구에서 수행된 실험종류 및 내용을 보여주며, 이때 보강재인 지오셀은 프레스토사의 표준형인 모델명 GW 8298 (2440×6090×200mm)을 사용하였다. 한편, 동적 모형실험은 철도차량과 같은 동적하중에 대한 강화노반 두께 변화에 따른 지오셀 시스템의 거동 분석을 통해 고속철도 노반재로서 지오셀 시스템의 적합성을 평가하고자 그림 2 및 표 3과 같이 수행하였다. 이때 동적 모형토조실험은 재하하중의 크기를 한국형 고속전철모형(KHST)의 운중 및 침목의 하중분담률 50%를 고려하여 반복재하횟수 80,000회 이상, 진동수 3Hz, 재하하중 4.26 kg/cm²의 정규화된 정현파(Signwave) 상태에서 입도조정층 포설두께를 변화시켜 가며 수행하였다.

표 1. 흙시료의 공학적 특성

시료종류	평가항목	비중	소성지수	흙분류	현장함수비 (%)	다짐시험	
						γ_{dmax} (g/cm ³)	O.M.C (%)
S-1 시료		2.59	NP	SW	11.8	2.12	5.65
S-2 시료		2.63	NP	SW	11.0	1.99	13.00
S-3 시료		2.66	2.77	SM	12.2		
G-1 시료		-	NP	GW	-	-	-
G-2 시료		-	NP	GW	-	2.14	6.70
G-3 시료		-	NP	GW	-	1.97	8.15
C-1 시료		-	8.80	CL	30.2	1.73	15.10
C-2 시료		2.59	14.52	CL	20.3	1.69	14.70

주) 표에서 언급된 흙분류는 통일분류법에 근거하여 수행하였음.

표 2. 수행한 평판재하시험의 종류와 내용

보강형태	실험항목	변화인자	변화값
지오셀보강	속채움 종류 및 다층효과	원지반 조건	미개량 및 개량지반 (영종도 현장)
		속채움 종류	화강풍화토, 쇄석
		지오셀 층수	1층, 2층
	복토층 효과	원지반 조건	미개량 및 개량지반 (영종도 현장)
		속채움 종류	화강풍화토
		지오셀	1층
		복토층 두께	5, 10, 20, 30, 40 cm
	부직포 포설 효과	원지반 조건	미개량 지반 (영종도 및 안산 현장)
		속채움 종류	화강풍화토, 쇄석
		지오셀	1층, 2층
		복토층 두께	10 cm
	비보강	치환지반 효과	원지반 조건
흙 종류			화강풍화토
복토층 두께			0, 25, 50, 75, 100 cm

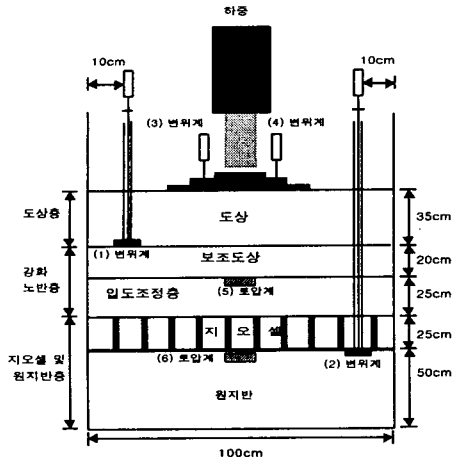


표 3. 수행한 동적 모형토조실험의 종류와 내용

실험목적	변화인자	변화값	
모형 토조 실험	도상	35cm	
	강화노반	보조도상	20cm
		입도조정층	55cm, 45cm, 35cm, 25cm
	복토+지오셀층	10+20cm	
	연약층	50cm	

그림 2. 동적 모형토조실험의 실험단면도
(입도조정층 두께 25cm인 경우)

4. 시험결과 분석 및 평가

4.1 지오셀 시스템의 평판재하시험 결과 및 분석

본 절에서는 다양한 종류의 현장 평판재하시험을 수행하여 지오셀 시스템의 속채움 종류 및 다층효과, 복토층 효과, 원지반 강성도 효과, 부직포 포설효과 등의 영향 정도를 일반 화강토 치환지반과 비교·분석하여 연약지반상 고속철도 노반강화 기법으로써 지오셀 시스템의 적합성을 평가하고자 하였다.

(1) 속채움 종류 및 다층효과의 영향

그림 3에서는 연약지반상의 평판재하시험에 의한 지오셀 속채움 종류 및 포설층수별 하중강도-침하량 관계곡선을 나타낸다. 그림 3에서 보듯이 A 현장(개량지반)의 경우, 원지반층은 0.6kg/cm^2 정도의 하중강도에서 극한지지력을 보이는 반면에 지오셀 보강지반은 극한 지지력 형태없이 하중강도 변화에 따른 선형적인 침하특성을 나타내었다. 또한, 이러한 경향은 원지반이 미개량된 B 현장에서도 유사하게 나타난다. 그림 3을 이용하여 산정된 시험대상지반의 변형계수(E_{v1})는, A 현장의 경우 원지반 9.9kg/cm^2 , 지오셀 보강지반 $71.8\sim 82.3\text{kg/cm}^2$ 정도로 평가되어, 지오셀 보강지반은 원지반에 비해 속채움 종류 및 다층효과에 의한 7.3~8.3배의 지반보강효과가 있는 것으로 평가되었다. 이러한 지오셀 시스템의 보강효과는 지오셀의 보강원리(마찰력저항, 원형응력, 수동저항 등)에 의해 원지반의 지지력이 급격히 개선된다는 것을 보여주는 것이다.

한편, 표 4에서는 속채움 종류 및 포설층수별 지오셀 보강지반의 지반반력계수(K_{30}) 및 변형계수(E_{v1}) 값을 나타낸다. 표 4에서 보듯이 지오셀 시스템의 다층에 의한 지지력 개선 효과는 지반반력계수(K_{30})의 경우 화강토에서 22%, 쇄석에서 20%로, 반면에 변형계수(E_{v1})의 경우 화강토에서 13%, 쇄석에서 3%로 상당히 작게 평가되었다. 이때 지반반력계수(K_{30}) 및 변형계수(E_{v1})의 증가율 차이는 계산시 고려되는 침하량 범위의 차에 기인한다. 따라서 지오셀 다층효과는 재하된 외력이나 상재하중이 지오셀 다층 포설 지반의 최상단층에서 충분히 분산되어 다음층이 분담해야 할 하중이 급격히 작아짐으로써 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 경제성을 고려한 효율적인 지오셀 시스템의 포설은 각층의 하중분담률 및 최대 재하하중을 충분히 반영하여 결정해야 할 것으로 판단된다.

또한, 표 4와 그림 3에서 보듯이 채움재 종류별 지오셀 시스템의 지반보강효과는 쇄석의 지지력이

화강풍화토에 비해 오히려 작은 경향을 나타낸다. 이러한 원인은 재하용력의 토체내 전달이 화강풍화토에 비해 우수한 쇄석의 경우 하중재하에 따른 연약한 원지반층으로의 쇄석 관입에 의한 영향인 것으로 판단된다.

이상과 같은 지오셀 시스템의 속채움 종류 및 다층효과를 고려해 볼 때 지오셀을 이용한 고속철도의 노반 시스템은 지반반력계수 K_{30} 이 7kg/cm^3 인 것만을 고려하면 속채움재 화강풍화토, 포설층수 2층으로 하는 것이 바람직하나, 표 3.5에서 보듯이 지오셀의 다층에 따른 변형계수(E_{v1})의 미미한 차이를 고려할 경우 속채움재 화강풍화토, 포설층수 1층 등 모든 실험대상 단면이 가능할 것으로 판단된다.

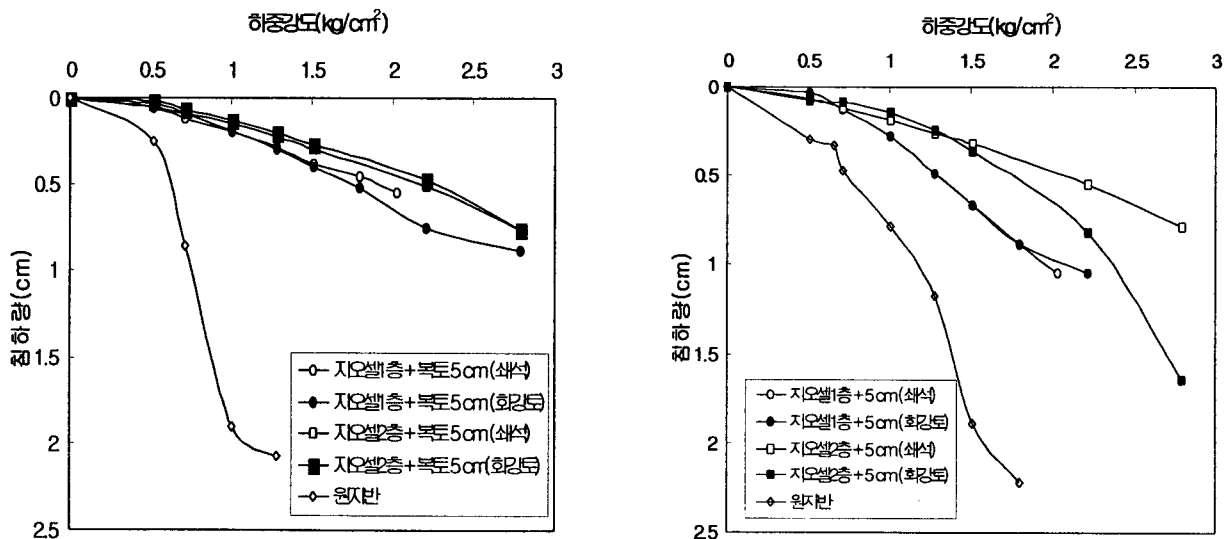
표 4. 속채움 종류 및 포설 층수별 K_{30} 및 E_{v1} 값 (A 현장)

지오셀 층수 \ 속채움 종류	1층		2층	
	K_{30} (kg/cm^3)	E_{v1} (kg/cm^2)	K_{30} (kg/cm^3)	E_{v1} (kg/cm^2)
화강풍화토	6.4	71.8	7.8	80.8
쇄 석	5.9	79.9	7.1	82.3

(2) 복토층의 영향

그림 4에서는 A 및 B 현장의 평판재하시험에 의한 복토두께별 하중강도-침하량 관계곡선을 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 지오셀 복합지반은 지반개량 정도에 상관없이 전술한 속채움 종류 및 다층효과의 재하실험결과와 유사하게 극한 지지력이 뚜렷이 관찰되지 않았으며 하중강도가 증가할수록 침하도 비례적으로 증가하였다.

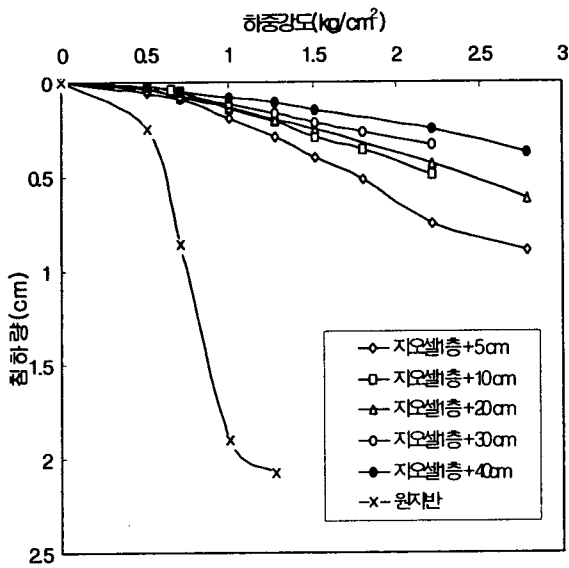
지오셀 시스템의 복토층 두께에 의한 지지력 개선 효과는 복토두께가 증가될수록 지지력 개선이 뚜렷하게 증가되는 경향을 나타낸다. 예로써, 복토두께 5cm를 기준으로 지반반력계수(K_{30})의 경우, 10cm에서 17%, 20cm에서 19%, 30cm에서 30%, 40cm에서 72% 정도로, 변형계수(E_{v1})의 경우, 10cm에서 36%, 20cm에서 43%, 30cm에서 103%, 40cm에서 141% 정도의 지지력 개선효과가 있는 것으로 평가되었다.



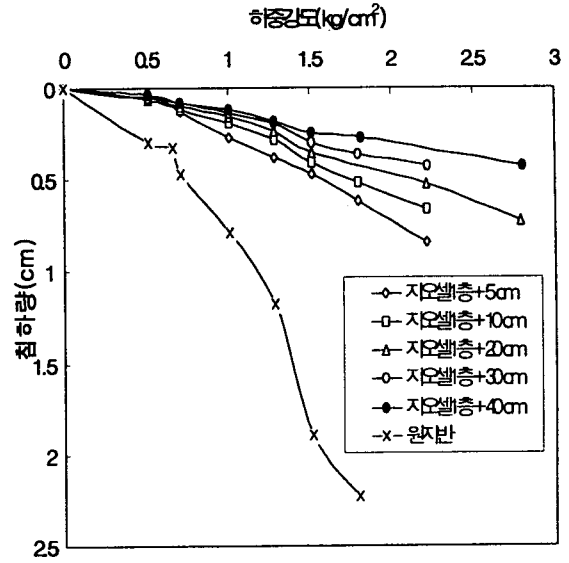
(a) A 현장 (개량 지반)

(b) B 현장 (미개량 지반)

그림 3. 속채움 종류 및 포설층수별 하중강도-침하량 관계곡선



(a) A 현장 (개량 지반)



(b) B 현장 (미개량 지반)

그림 4. 복토두께별 하중강도-침하량 관계곡선

이러한 지오셀 복토층에 의한 지반보강효과는 복토층 다짐에 의한 지오셀내 속채움재 다짐밀도 상승과 복토층에 의한 하중분산 효과가 복합적으로 나타난 결과이다. 따라서 효율적인 지오셀의 복토두께는 경제성을 고려하여 적용현장에 맞는 복토두께를 선정해야 할 것으로 판단된다. 따라서 앞서 언급된 지오셀 시스템의 속채움 종류 및 다층효과에서 복토 두께 5cm, 지오셀 1층 포설의 경우, 고속철도시방상의 규정인 K_{30} 이 7kg/cm^3 이상을 만족 못하는 경우에는 복토두께를 10cm로 하는 것이 바람직하다.

(3) 원지반의 강성도의 영향

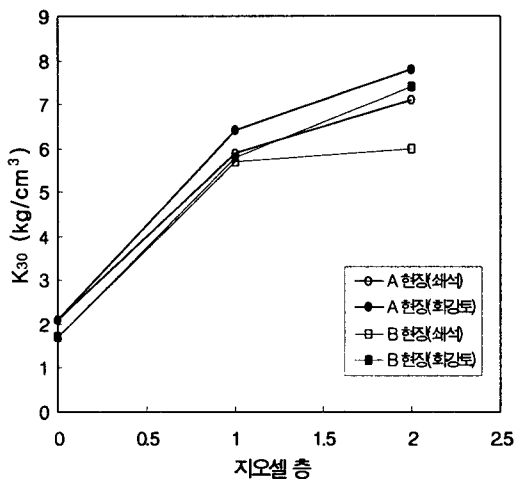
표 5에서는 평가항목별 지오셀 보강지반의 지반반력계수(K_{30}) 및 변형계수(E_{v1})값을 나타낸다. 또한, 그림 5에서는 원지반 강성도 차에 따른 항목별 지반반력계수(K_{30}) 관계 곡선을 보여준다. 그림 5에서 보듯이 지오셀 시스템의 지지력 개선정도를 지반반력계수(K_{30})를 이용하여 비교해 보면, 항목별로 A 현장의 경우 속채움 종류 및 다층효과에서 181~271%, 복토층 효과에서 257~424%로, B 현장의 경우 속채움 종류 및 다층효과에서 232~335%, 복토층 효과에서 253~376% 정도로 나타나 대체적으로 원지반 강성도가 작을수록 지지력 보강효과가 큰 것으로 평가되었다. 이러한 지반 강성도 차에 따른 지지력 개선 효과의 차이는 지오셀의 하중분산효과에 의해서 실제 원지반이 받아야 할 하중이 급격히 작아짐으로써 원지반이 연약할수록 그 개선효과가 두드러지기 때문인 것으로 사료된다.

(4) 지오셀 시스템의 지반보강효과

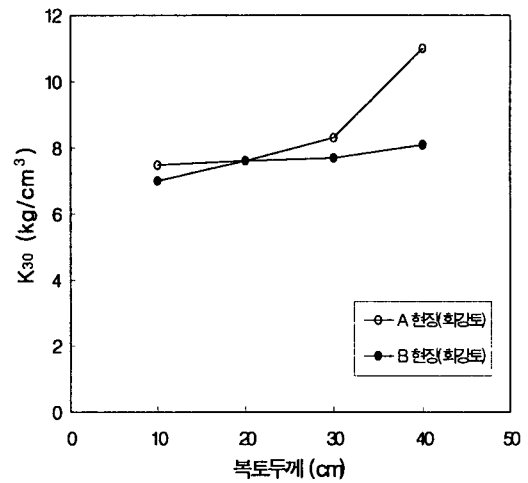
그림 6에서는 연약지반의 평판재하시험에 의한 치환두께별 하중강도-침하량 관계곡선을 나타낸다. 그림 6에서 보듯이 치환지반의 지지력은 복토두께가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 또한, 그림 7에서는 원지반 강성도 차에 따른 치환지반의 성토두께별 변형계수(E_{v1})값을 나타낸다. 그림 7에서 보듯이 변형계수(E_{v1})값은 원지반의 강성도차에 상관없이 흙 성토두께가 증가할수록 변형계수(E_{v1})가 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 한편, 표 3.7에서 보듯이 A 현장의 경우 속채움재 화강풍화토, 복토두께 5cm인 지오셀 1층 및 2층의 E_{v1} 값은 지오셀 1층인 경우 71.7kg/cm^2 으로, 지오셀 2층인 경우 80.8kg/cm^2 으로 평가되었다.

표 5. 강성도 차에 따른 항목별 K_{30} 및 E_{v1} 값

평가 항목		대상 지반		A 현장		B 현장		
				K_{30}	E_{v1}	K_{30}	E_{v1}	
속채움 종류 및 다층효과	지오셀1층+5cm(화강토)			6.4	71.7	5.8	49.0	
	지오셀1층+5cm(쇄석)			5.9	79.9	5.7	40.9	
	지오셀2층+5cm(화강토)			7.8	80.8	7.4	70.5	
	지오셀2층+5cm(쇄석)			7.1	82.3	6.0	79.6	
복토층효과	지오셀1층+10cm			7.5	94.0	7.0	71.4	
	지오셀1층+20cm			7.6	99.0	7.6	82.4	
	지오셀1층+30cm			8.3	141.3	7.7	107.2	
	지오셀1층+40cm			11.0	168.0	8.1	138.6	
원지반		-			2.1	9.9	1.7	22.9

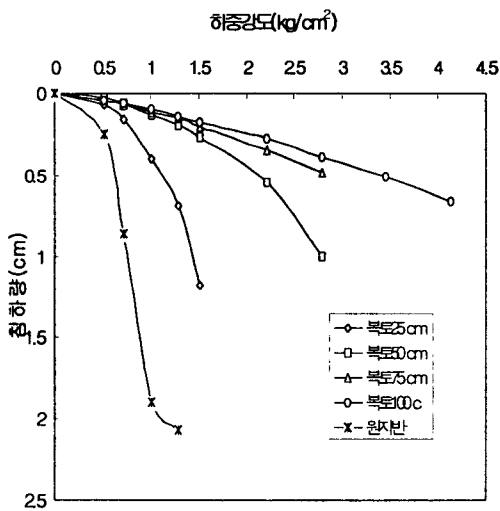


(a) 속채움 종류 및 다층효과

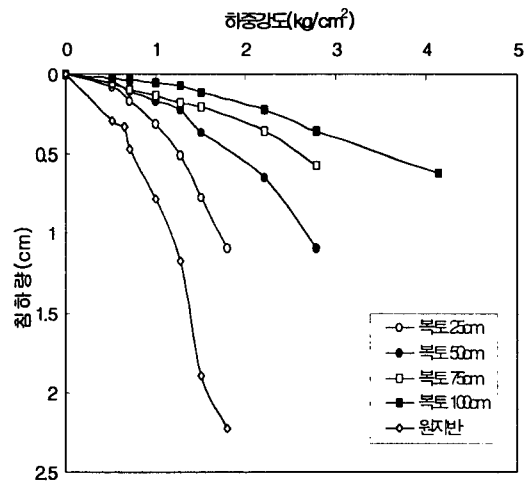


(b) 복토층 효과(화강풍화토)

그림 5. 강성도 차에 따른 항목별 K_{30} 관계곡선



(a) A 현장 (개량 지반)



(b) B 현장 (미개량 지반)

그림 6. 복토 두께별 하중강도-침하량 관계곡선

B 현장에서 속채움재 화강 풍화토, 복토두께 10cm, 지오셀 1층 포설 단면은 지반반력계수, K_{30} 에 의한 그림 7의 비보강 치환지반 단면과 비교하여 비보강 치환두께 75cm에 해당하는 것으로 나타나, 각각 45cm(60%)의 성토량 절감효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 이러한 지오셀 시스템의 성토단면의 절감 효과는 연약지반상 고속철도 성토체의 자중감소에 따른 역학적 안정과 시공규모 및 시공기간 단축 등에도 큰 기여가 기대된다.

(5) 부직포 포설 효과의 분석

지금까지 많은 연구자들은 지오셀 시스템이 연약지반상 철도노반에 적용될 경우, 철도차량의 반복재하에 의한 머드펌핑 방지를 위한 부직포 포설을 제안하고 있다. 본 연구에서는 연약지반상 고속철도 노반에서 부직포 포설 지오셀 시스템 적용 형태별로 평판재하시험을 수행하여 지오셀 시스템의 적합성을 평가하고자 하였다.

그림 8에서는 지오셀 시스템의 부직포 포설 유무에 따른 하중강도-침하량 관계곡선을 보여준다. 여기서 곡선 a는 부직포 무포설, 복토두께 10cm, 지오셀 1층의 미개량 연약지반인 B 현장의 시험결과를, 또한, 곡선 b 및 c는 부직포 포설의 동일한 시험단면인 C 및 D 현장의 평판재하시험 결과를 나타낸다. 그림 8에서 보듯이 부직포 무포설의 B 현장은 부직포 포설 C 및 D 현장에 비해 지지력 개선 효과가 상당히 큰 것으로 나타났다. 예로써 B 현장의 변형계수, E_{v1} 은 71.4 kg/cm^2 으로, C 및 D 현장의 E_{v1} 은 각각, 10.51 및 9.61 kg/cm^2 로 나타나, 부직포 포설에 따른 지오셀 시스템의 지지력 저하는 850% 및 930% 정도로 상당히 큰 것으로 평가되었다. 이러한 부직포 포설에 따른 지오셀 시스템의 지지력 저하특성은 부직포 포설 의한 직접적인 지지력 약화, 다짐에너지 흡수(스폰지 현상), 속채움 시료의 원지반 분리에 따른 골재치환효과 억제 등에 의한 복합적인 영향인 것으로 판단된다. 지오셀 시스템 부직포 포설의 역기능은 시공중에 발생되어, 다음에 4.2절의 동적 모형토조시험 결과에서 보듯이 고속철도 성토체로서의 기능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. 따라서 향후 이 분야에 대한 지속적인 연구 및 검토가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

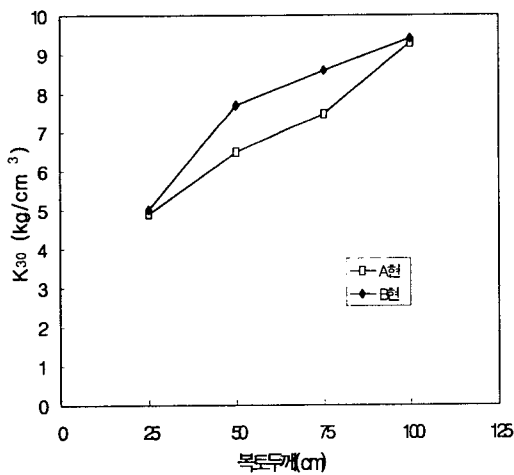


그림 7. 강성도 차에 따른 복토 두께별 E_v 관계곡선

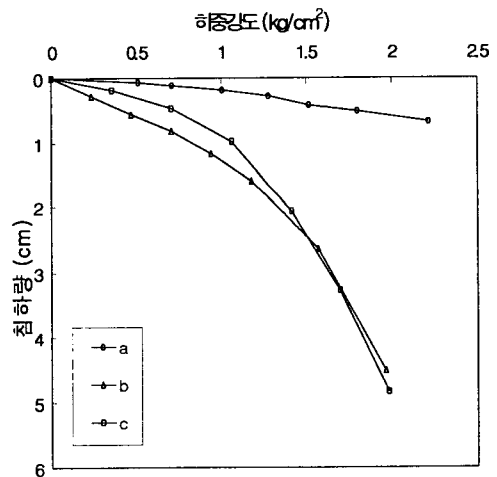


그림 8. 부직포 포설 유무에 따른 하중강도-침하량 관계곡선

4.2 동적 모형토조실험에 의한 지오셀 시스템의 효과 분석

(1) 동적 하중에 의한 지오셀 시스템의 침하 특성

표 6에서는 상부노반 및 원지반 형태에 따른 강화노반 형상을 보여준다. 표 6에서 보듯이 지오셀 시

시스템은 흙 돌기 지반과 같이 원지반의 지반반력계수, K_{30} 이 7kg/cm^3 이상 11kg/cm^3 미만으로 고철철도 시방조건에 못 미치는 지반조건이 현장에서 발생될 경우 연약지반상 고속철도의 노반강화기법으로 적용된다. 이때 강화노반의 시공두께는 보조도상층이 20cm, 입도조정층이 60cm 이다. 본 동적 모형토조실험에서는 앞서 언급하였듯이 입도조정층의 두께를 25, 35, 45, 55cm 정도로 변화시켜가며 침하 및 토압특성을 분석하여 지오셀 시스템의 지지력 개선 효과 및 강화노반 절감효과를 평가하고자 하였다. 그림 9에서는 동적 모형실험결과로 부터 입도조정층 두께별 반복재하에 따른 경계층별 침하량 및 총 침하량 관계곡선을 보여준다. 그림 9에서 보듯이 각 경계면에서의 침하특성은 반복재하 20,000 회까지는 침하량이 급격히 증가하다가 그 이후에는 일정해지는 경향을 보인다.

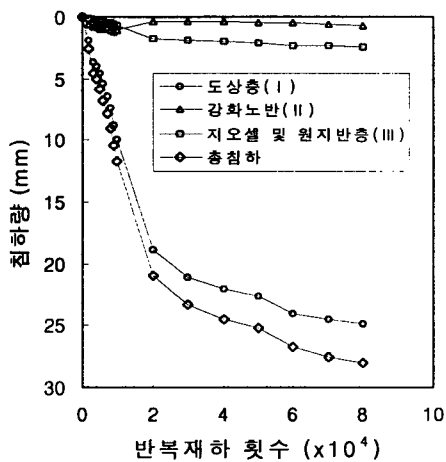
표 6. 상부노반 및 원지반 형태에 따른 강화노반 형상

구 분		강화노반(cm)		계(cm)	
		보조도상	입도조정층		
노상 조건	돌기	$7 \leq K_{30} < 11\text{kg/cm}^3$	20	60	80
		$K_{30} \geq 11\text{kg/cm}^3$	20	30	50
본바닥 및 각기	원지반	$7 \leq K_{30} < 11\text{kg/cm}^3$	20	75	95
		$K_{30} \geq 11\text{kg/cm}^3$	20	45	65
		원지반 압반	20	15~25	35~45

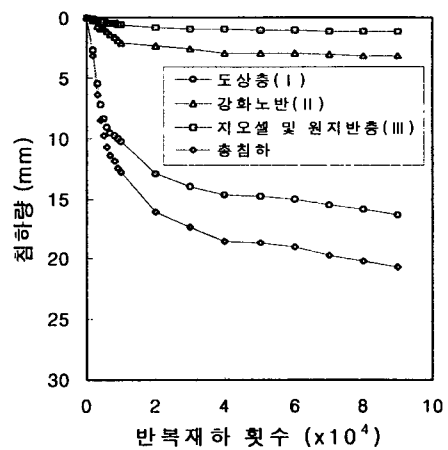
이러한 경향은 입도조정층의 두께 변화에 관계없이 모든 동적 모형토조실험 결과에서 보여지며, 그 원인은 반복재하 20,000 회에서 반복재하에 의한 각층 특히 도상층의 파쇄 및 입자배열에 의한 영향이 거의 사라지기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 각 경계층별 침하량 및 총 침하량은 그림 9에서 보듯이 도상층(I)의 경우 14.71~24.87mm로 51.8~88.8%, 강화노반층(II)의 경우 0.68~9.77mm로 2.4~34.4%, 지오셀 및 원지반층(III)의 경우 1.18~4.19mm로 5.7~14.9% 정도로 나타나, 반복재하에 따른 지오셀 보강지반의 침하는 도상층에서 대부분 발생되는 것으로 평가 되었다. 이러한 도상층의 집중된 침하는 도상층의 하중분산효과에 기인한 하부층 발생 수직응력의 감소와 동적하중 반복에 따른 도상층 입자의 마모 및 분쇄, 입자의 재배열에 따른 것으로 판단된다.

(2) 동적 하중에 대한 지오셀 시스템의 지지력 개선 효과

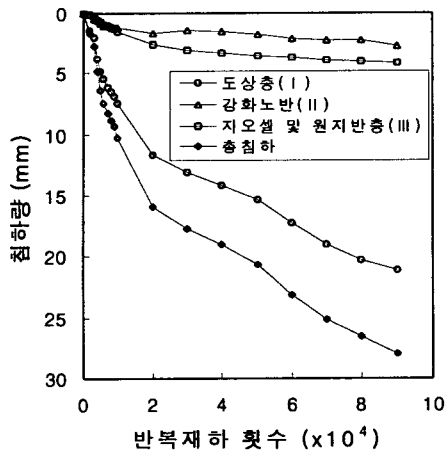
그림 10에서는 입도조정층 두께변화에 따른 반복재하횟수-침하량 관계곡선을 보여준다. 그림 10의 쇄석강화노반 60cm 및 80cm는 철도기술연구원에서 수행한 도상 20cm, 쇄석강화노반 60cm 및 80cm, 원지



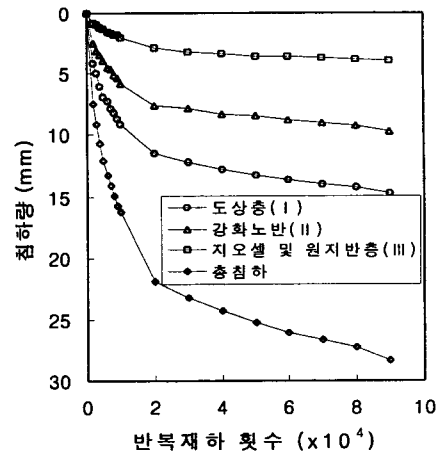
(a) 입도조정층 두께 25cm



(b) 입도조정층 두께 35cm



(c) 입도조정층 두께 45cm



(d) 입도조정층 두께 55cm

그림 9. 총 침하량 및 경계층별 침하량 관계곡선

반 두께 60cm 및 40cm 모형단면으로 수행된 동적 모형실험결과이다(한국철도기술연구원, 1999). 이때 원지반은 연약지반상에 구축된 지오셀 시스템과 달리 양질의 화강암질 풍화토로 지반반력계수, K_{30} 이 7kg/cm^3 이 되도록 조성된 지반이다.

그림 10에서 보듯이 입도조정층의 두께변화별 연약지반상 지오셀 시스템의 침하량은 20.68mm~28.39mm 정도로 양질의 원지반에 구축된 쇄석강화노반 80cm 보다 더 효과적인 것으로 평가 되었다. 또한, 조성된 모형토조실험의 연약지반은 현장지반의 지반반력계수, K_{30} 이 앞서 언급된 실험대상 현장에서 $1.7\sim 2.1\text{kg/cm}^3$ 정도인 것을 감안한다면, 지오셀 시스템은 지오셀 시스템의 보강원리인 흙/지오셀의 마찰저항, 이웃한 셀의 수동저항, 셀의 원형응력 등에 기인하여 동적 하중에 대한 지지력 개선 정도 역시 탁월한 것으로 평가된다. 또한, 입도조정층 두께 25cm 지오셀 실험단면은 비슷한 침하량을 보이는 양질의 화강암질 풍화토 지반, 입도조정층 두께 60cm의 실험단면과 비교해 볼 때 강화노반 절감효과가 35cm 정도있는 것으로 평가되었다. 그러나 지오셀 시스템의 강화노반 저감효과를 규명하기 위해서는 앞으로 추후 동적하중에 대한 다양한 연구가 더욱 수행되어야 할 것으로 판단된다.

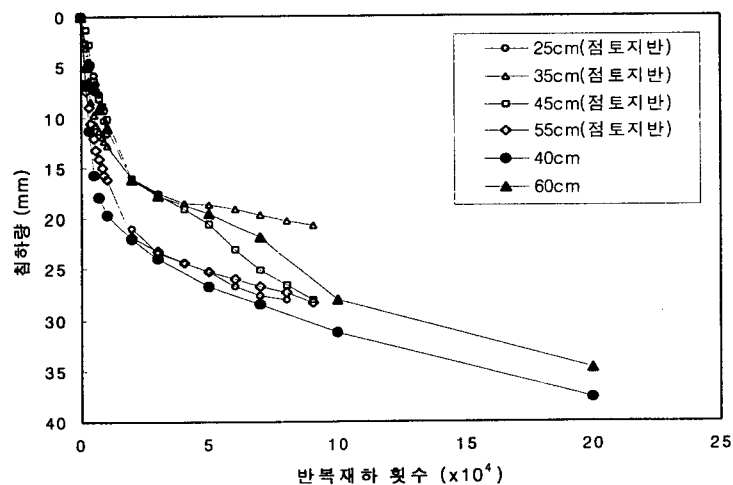


그림 10. 입도조정층 두께변화에 따른 반복재하횟수-침하량 관계곡선

5. 결 론

본 연구에서는 연약지반 구간 위를 통과하는 고속철도의 노반을 강화할 수 있는 지오셀 시스템에 대해 다양한 형태의 평판재하시험을 수행하여 속채움 종류 및 지오셀 층수, 복토층 두께, 원지반 강성도의 변화에 따른 보강효과 등을 규명하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지오셀 시스템의 다층효과는 상단 지오셀층의 하중분산 효과에 기인하여 화강풍화토에서 22%, 쇄석에서 20% 정도로 다층에 따른 지지력 개선이 상당히 작게 나타나, 경제적 측면에서 지오셀 1층 포설이 바람직할 것으로 판단된다.
- 2) 지오셀의 복토층 효과는 복토두께 5cm를 기준으로 지반반력계수(K_{30})의 경우, 10cm에서 17%, 20cm에서 19%, 30cm에서 30%, 40cm에서 72% 정도로 복토두께가 증가될수록 지지력 개선효과가 있으며, 고속철도시방상의 규정인 K_{30} 이 $7\text{kg}/\text{cm}^3$ 이상을 만족 못하는 지오셀 1층 포설 단면은 경제성을 고려하여 복토두께를 10cm로 하는 것이 바람직하다.
- 3) 지오셀의 원지반 강성도 효과는 지오셀의 하중분산효과에 의해서 실제 원지반이 받아야할 하중이 급격히 작아짐으로써 원지반이 연약할수록 그 개선효과가 두드러져 원지반 강성도가 작을수록 지지력 보강효과가 큰 것으로 평가되었다.
- 4) 지오셀 시스템은 화강풍화토 치환지반과 비교하여 복토두께 10cm, 지오셀 1층 포설의 경우 비보강 치환두께 75cm 정도의 동일한 지지력 특성을 보여 화강풍화토 지반의 60% 성토량 절감효과가 있는 것으로 평가되었다.
- 5) 연약지반과 속채움재의 혼합방지와 머드 펌핑 방지를 위해 사용된 지오셀 시스템의 부직포 포설 효과는 부직포에 의한 직접적인 지지력 약화, 다짐에너지 흡수(스폰지 현상), 속채움 시료의 골재 치환효과 억제 등의 복합적인 영향에 의해 변형계수, E_{v1} 값에 의한 비교에서 부직포 무포설 지오셀 지반에 비해 850%~930% 정도의 지지력 저하가 발생되나, 이러한 역기능은 시공중에만 발생되어, 고속철도 성토체 기능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.
- 6) 동적 모형토조시험결과, 입도조정층의 두께변화별 연약지반상 지오셀 시스템의 침하량은 20.68mm~28.39mm 정도로 양질의 원지반에 구축된 쇄석강화노반 80cm 보다 더 효과적인 것으로 평가되었으며, 입도조정층 25cm 지오셀 실험단면의 경우 양질의 화강암질 풍화토 지반, 입도조정층 두께 60cm의 실험단면과 비교해 볼 때 강화노반 절감효과가 35cm 정도 있는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. Intersol Engineering Inc.(1997), Load Support Applications, Manual for Design and Construction of Geoweb Cellular Confinement System, Presto Products Company.
2. Li, D., and Selig, E. T. (1995), "Evaluation and Remediation of Potential Realway Subgrade Problems under Repeated Heavy Axle Loads", Rep. No. R-884, Assoc. of Am. Railroads, Transp. Technol. Ctr., Pueblo, Colorado.
3. Office for Research and Experiments(ORE) (1970), "Repeated Loading of Clay and Track Foundation Design", Rep. No. D71/RP 12, ORE f the Int. Union of Railways, Utrecht, The Netherlands.
4. 한국철도기술연구원 (1999), 고속철도 토공 및 지반진동 저감기술개발, 3차년도 연차보고서.