

토목섬유 점토 차수재(GCL)와 지오멤브레인(GM)의 접촉 전단강도 평가

An Evaluation of Interface Shear Strength between Geosynthetic Clay Liner and Geomembrane

서민우*¹ Seo, Min-Woo 김동진*² Kim, Dong-Jin
박준범*³ Park, Jun-Boum 박인준*⁴ Park, Inn-Joon

Abstract

Geomembrane, compacted clay liner, and geosynthetic clay liner (GCL) are widely used to prevent leachate from leaking to adjacent geo-environment at a municipal solid waste (MSW) landfill. Interface shear strength between GCL and geomembrane installed at a landfill side slope is important properties for the safe design of side liner or final cover systems. The interface shear strength between two geosynthetics was estimated by a large direct shear test in this study. The shear strength was evaluated by the Mohr-Coulomb failure criterion. The effects of normal stress, hydration or dry condition, and a hydration method were investigated. The test results show that the interface shear strength and shear behavior varied depending up on the level of normal stress, the type of geosynthetic combinations, and a hydration method. When GCLs were sheared after being hydrated under 6kPa loading, the results were consistent with those published by other reserchers. Summaries of friction angles, normal stress and hydration condition is presented. These friction angles could be used as a reference value at a site where similar geosynthetics are installed.

요 지

폐기물 매립지에는 침출수가 외부로 유출되는 것을 방지하기 위해 지오멤브레인, 점토차수재 및 토목섬유 점토 차수재(GCL) 등이 널리 사용된다. 매립지의 사면에 설치되는 GCL과 지오멤브레인 사이의 접촉(interface) 전단강도는 사면에 설치되는 차수 및 최종 덮개시설의 안전한 설계를 위해 꼭 필요한 물성치로서, 본 연구에서는 대형 직접전단 시험기를 사용하여 두 종류의 GCL과 지오멤브레인 사이의 접촉 전단강도를 측정하였다. 본 논문에서는 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 이용하여 전단강도를 평가하였으며, 연직하중, 수화 및 건조상태, 수화조건 등이 전단강도에 미치는 영향을 알아보았다. 분석 결과 연직하중이나 수화 상태가 전단 거동 및 전단 강도에 미치는 영향은 하중의 크기와 토목섬유의 종류에 따라 다르게 나타났다. 6kPa의 하중을 가한 상태에서 수화를 시킨 후 실시한 전단 시험 결과는 기존의 문헌에 제시된 결과와도 잘 일치하는 모습을 보였다. 마지막으로 연직하중 및 수화조건에 따른 마찰각을 제시하여 유사한 토목섬유가 적용되는 현장의 설계시 참고자료로 활용할 수 있도록 하였다.

Keywords : Geomembrane, Geosynthetic clay liner, Hydration, Interface shear strength, Normal stress, Solid waste landfill

*1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., redsmw1@snu.ac.kr)

*2 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., dorong78@nowuri.net)

*3 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

*4 정회원, 한서대학교 토목공학과 전임강사 (Member, Full Time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Hanseo Univ.)

1. 서론

토목섬유 점토 차수재(geosynthetic clay liner, GCL)는 1986년에 미국에서 처음 사용된 이래로 매립시설의 점토 차수재(compact clay liner, CCL) 대용으로 널리 사용되는 토목섬유이다. GCL은 토목섬유 사이에 과립형 벤토나이트를 넣거나 벤토나이트를 토목섬유에 접착시키는 방식으로 구성된다(그림 1). GCL은 기존의 점토 차수층과 비교하여 매립지의 매립용량을 증가시키고 경사가 급하여 점토 차수재 시공이 불가능한 곳에 좋은 대안이 되고 있으며(정문경 등, 1998), 이러한 장점으로 인해 GCL의 사용량은 계속적으로 증가하고 있다(Koerner, 2000).

매립지의 바닥 차수재나 최종 덮개층으로 사용되는 GCL이 쓰러기 매립 중 혹은 매립이 완료된 후에 침출수, 지하수 혹은 우수 등으로 수화되면 전단강도가 감소하게 되어 안정성이 현저히 떨어진다고 알려져 있다(정문경 등, 1998). 이러한 구조적인 문제를 방지하기 위해서 GCL이 수화됨에 따른 GCL 내부(internal) 전단강도와 GCL과 인접한 토목섬유 혹은 지반 사이의 마찰특성의 변화에 대한 정확한 정보를 바탕으로 안전성 평가를 실시하여야 한다.

여러 연구(Eid와 Stark, 1997; Daniel 등, 1998; Fox 등, 1998)에 의하면 비보강(unreinforced) GCL은 수화시 내부(internal) 전단강도가 접촉(interface) 전단강도보다 낮은 값을 갖기 때문에 내부에서 파괴가 발생할 가능성이 있음이 확인되었다. 따라서 최근에는 비보강 GCL 대신 stitching이나 needle punching 등으로 내부를 보강한 보강(reinforced) GCL이 널리 사용되고 있다(Triplett과 Fox, 2001). 이렇게 내부 보강 GCL의 사용이 늘어감에 따라 이제는 토목섬유 사이(interface)가 파괴시 불안정한 면으로 작용하게 되어, GCL이 사용되는 매립지의 바닥 차수재 및 최종 덮개층의 안정성을 정확히 평가하기 위해서 인접한 토목섬유 사이의 접촉(interface) 전단강도를 중요하게 고려하게 되었다. 그러나 현재까지 국내에서는 이에 대한 연구가 미미하며, GCL이 설치되는

매립지 설계시 외국에서 연구한 자료를 인용하여 적용하고 있다.

GCL의 전단강도에 관련된 연구는 앞서 언급한 바와 같이 크게 GCL의 내부 전단강도와 GCL과 인접한 토목섬유와의 접촉 전단강도의 두 부분 나눌 수 있다. 현장과 실내에서 행해진 GCL의 내부 전단강도에 대한 연구(Gilbert 등, 1996; Fox 등, 1998; Daniel 등, 1998)에서는 GCL이 수화될 때의 내부 전단파괴의 가능성을 확인하고 GCL을 보강할 것을 제안하였다. 이러한 보강(reinforced) GCL과 인접한 토목섬유 사이(interface)의 접촉 전단 거동을 파악하기 위한 시험도 여러 연구자들에 의해 실시되었다. Triplett과 Fox(2001)는 변형된 인발(pull-out) 시험기를 이용하여 GCL과 지오멤브레인(geomembrane, GM) 사이의 접촉 전단강도를 측정하였으며, Gilbert 등(1996)도 대형 직접전단 시험기를 이용하여 GCL의 내부 및 접촉 전단강도에 대한 연구를 실시하였다. 국내에서는 신은철과 오영인(2000)에 의해 GCL과 GM 사이의 접촉 전단강도가 측정된 바 있다.

본 논문에서는 대형 직접전단 시험기를 이용하여 국내에서 사용되고 있는 대표적인 두 종류의 GCL(그림 1)과 GM 사이의 접촉 전단강도를 측정하였으며, 또한 GCL을 건조 상태와 습윤 상태로 나누어 실험을 실시하여 각 조건에 따른 거동 특성과 강도 변화를 알아보았다. 본 연구 결과는 GCL이 설치되는 국내 매립지의 설계시 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 전단강도 실험

2.1 재료 및 시험 방법

본 실험에는 국내에서 생산된 2mm 두께의 지오멤브레인(GM)과 두 종류의 GCL(그림 1)이 사용되었다. GM은 표면이 매끄러운 GM(S-GM)과 표면이 거친 GM(T-GM)을 이용하였다. 두 종류의 GCL은 각각 GCL(A), GCL(B)로 구분하였다. GCL(A) 내부에 포함된 과립형(granular) 벤토나이트의 액성한계와 소성한계는 각각 484%, 45%였으며, GCL(B)에 포함된 접착제와 점토 mixture의 액성한계와 소성한계는 각각 453%, 45%였다. 두 종류의 GCL에 포함된 벤토나이트는 액성한계는 약간 차이를 보였지만 소성한계는 거의 동일한 값을 나타냈다. 표 1은 본 실험에 사용된 두 종류 GCL의 특성을 정리한 표이다.

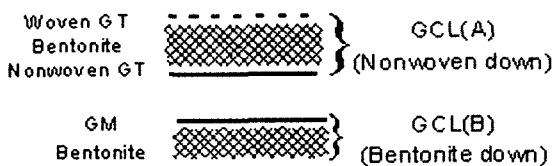


그림 1. 본 연구에 사용된 GCL 종류

표 1. 사용된 토목섬유 차수재 특성

이름	설명	두께 (또는 면적당 무게)
S-GM	표면이 매끄러운 GM	2.0 mm
T-GM	표면이 거친 GM	
GCL(A)	점토가 부적포와 직포 사이에 needle punching 됨	7.0 mm (4,100g/m ²) (부직포:340g/m ² , 직포:170g/m ²)
GCL(B)	점토가 접착제로 GM에 부착됨	8 mm (GM : 2mm)* (6,650g/m ²)

* GCL 하부에 있는 GM의 두께

2.2 수화 시간 결정을 위한 예비 실험

GCL(A)는 팽창성이 뛰어난 Na-벤토나이트가 두개의 지오택스타일(GT) 사이에 위치하는 형태의 GCL이다. Na-벤토나이트가 수화됨에 따라 나타나는 팽창 특성 (swelling)은 GCL의 내부 및 접촉 전단강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데, Leisher(1992)는 수화시 하중 조건과 포화용액에 따른 내부 전단강도의 변화에 관한 연구를 통해 하중을 가한 상태에서 수화를 시켰을 때 큰 강도가 나타남을 확인하였다. 매립지에서 GCL이 수화되는 상황을 모사하기 위해 여러 연구자(Fox 등, 1998; Frobel 등, 1998; Triplett과 Fox, 2001)들은 직접 전단시험 이전에 GCL(A)를 수화시킬 때, 전단시험시 가해지는 연직 하중과 동일한 하중을 가한 상태에서 수화를 시킬 것을 제안하였다. 그러나 이러한 방법은 기존의 직접전단 시험기에 특수한 장치를 추가하거나 하중을 가한 상태에서 수화를 시키기 위한 추가적인 장치를 필요로 하게 된다. 또한 수화시에도 많은 시간이 요구되기 때문에, 수화 시간을 단축시키기 위한 여러가지 방법이 시도되고 있다(Fox 등, 1998). 본 연구에서도 기존 문헌에서 제시된 것과 다른 수화 방법을 택하여 수화를 시킨 후 전단시험을 실시하였으며, 발표된 자료와의 비교를

통해 본 연구의 결과를 검증하였다.

GCL(A)의 경우, 전단 시험기 밖에서 (1) 하중을 가하지 않은 상태(free swelling, FS)로 수화 (2) 일정한 하중 (6kPa)을 가한 상태로 수화(constrained hydration, CH)를 시킨 후, 전단시험을 실시하였다. 수화시간은 접촉 전단강도가 일정해지는 수화시간을 측정한 후, 그 시간 이상 수화를 시킨 후 전단시험을 실시하였다. 그림 2에 제시된 결과를 통해 free swelling(FS) 조건에서 수화를 시킨 경우 6일(144시간) 이상에서는 접촉 전단강도가 일정해짐을 관찰할 수 있었다. 따라서 본 실험에서는 예비실험 결과와 Daniel 등(1998)이 적용한 수화 시간을 참고로 10일 동안 수화를 시킨 후 전단시험을 실시하였다. 시험이 완료된 후에는 GCL(A) 내부 점토의 함수비를 측정하였다.

한편 GCL(B)는 GCL(A)와는 다른 방식으로 수화시간을 결정하였다. GCL(B)는 GCL(A)와 달리 점토부분이 직접 GM과 접촉하기 때문에 벤토나이트의 강도 특성이 접촉전단강도에 지배적인 영향을 미치게 된다. Daniel 등(1993)은 함수비에 따른 벤토나이트의 강도 변화를 측정하여 함수비가 증가함에 따라 강도가 급속히 감소하다가 함수비 50%에 이르는 점에서 강도가 일정해진다고 발표하였다. 따라서 본 실험에서는 GCL(B)를 하중을 가하지 않은 상태로 수화를 시켜 함수비가 50% 이상 되는 시간을 측정하여, 시험시 그 시간 동안 수화를 실시하는 것으로 하였다. 시험결과(그림 3) 5분 정도의 수화시간에도 쉽게 GCL(B)의 점토 함수비가 50%을 보임을 확인할 수 있었으며, 본 시험에서는 오차를 고려하여 10분 동안 수화를 실시한 후 전단을 실시하였다. 시험 후에는 GCL(B)에서도 점토의 함수비를 측정하여 함수비를 확인하였다. GCL(B)의 경우 일반적으로 GCL(B)의 점토부분 상부에 GM이 위치하기 때문에 점토 부분이 두개의 GM으로 둘러싸이게 되어 건조상태라고 가정을

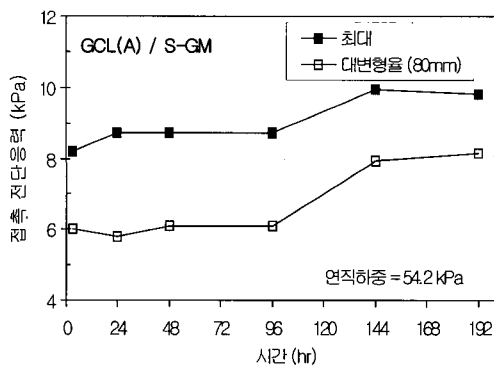


그림 2. 수화 시간에 따른 접촉 전단강도의 변화 (하중을 가하지 않은 상태)

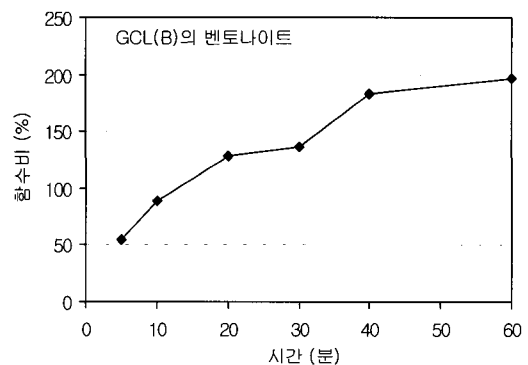


그림 3. 수화 시간에 따른 벤토나이트의 함수비 변화

하고 설계를 실시하는데(Daniel 등, 1998), 본 시험에서는 GCL(B)의 점토부분이 수화되는 경우 수화로 인한 강도 감소 정도를 정량적으로 평가해 보고자 하였다.

2.3 직접 전단 시험

전단강도는 대형 직접전단 시험기(그림 4; 서민우 등, 2002)를 이용하여 측정하였으며, 사용된 토목섬유의 크기는 GCL은 30cm×35cm, GM은 30cm×45cm였다. 시험 중 접촉하는 전단면은 30cm×30cm로 일정하게 유지되도록 하였다. 재료는 각각의 크기로 절단하여 양 끝을 대형 직접전단 시험기 상하 상자에 clamp로 고정시킨 후, 연직하중을 가하였다. 전단은 80mm의 변위가 발생할 때까지 실시하였으며, 이 때의 전단강도를 '대변

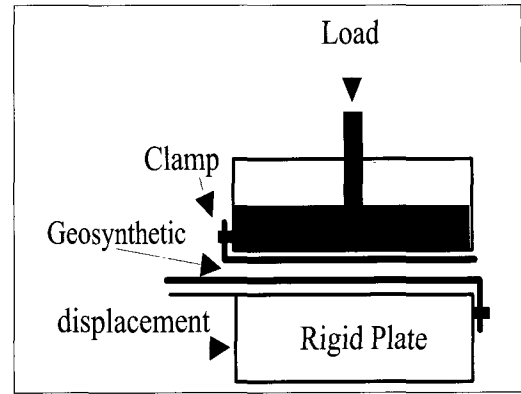


그림 4. 시험기의 구조 (서민우 등, 2002)

형률 전단강도' 라고 하였다. GCL(A)/GM의 시험의 경우 GCL(A)의 부직포(nonwoven geotextile) 부분과 GM이 접촉하도록 하였으며, GCL(B)에서는 GCL의 점토

표 2. GCL(A)/GM의 접촉 전단강도 시험 항목 및 결과

Interface	습윤상태	연직 하중 σ_n , (kPa)	최대 전단강도 τ_p , (kPa)	대변형률 전단강도, τ_1 , (kPa)	최종 함수비(%)	τ_1 / τ_p (대변형률/최대)
GCL(A) / S-GM	건조	6.3	1.5	1.3	-	0.87
		31.2	7.4	6.8	-	0.92
		54.2	11.9	10.1	-	0.85
		100.0	17.8	14.3	-	0.80
		145.9	31.9	21.8	-	0.68
	수화(FS*)	6.0	2.8	2.4	281.6	0.86
		44.0	9.7	8.2	224.3	0.85
		62.0	10.9	9.3	214.0	0.85
		101.0	16.1	14.1	-	0.88
		147.0	19.4	16.2	201.1	0.84
	수화(CH**)	6.0	2.4	2.0	130.0	0.83
		44.0	8.3	5.9	116.5	0.71
		62.0	12.2	9.4	127.0	0.77
		101.0	18.2	12.6	141.7	0.69
		147.0	24.4	15.0	134.2	0.61
GCL(A) / T-GM	건조	6.0	8.7	5.7	-	0.66
		44.0	30.4	17.1	-	0.56
		62.0	49.8	20.2	-	0.41
		101.0	61.5	27.1	-	0.44
		147.0	91.7	50.7	-	0.55
	수화(FS*)	6.0	9.7	5.8	236.6	0.60
		44.0	19.1	8.8	-	0.46
		62.0	28.8	18.0	274.4	0.63
		101.0	54.3	25.4	191.5	0.47
		147.0	64.2	30.7	183.1	0.48
	수화(CH**)	6.0	10.8	6.3	141.0	0.58
		44.0	31.0	16.7	136.9	0.54
		62.0	51.8	24.2	150.5	0.47
		101.0	59.0	26.9	147.1	0.46
		147.0	86.7	43.8	122.0	0.51

* FS : free swelling, 하중을 가하지 않은 상태에서 수화시킴

** CH : constrained hydration, 6kPa를 가한 상태에서 수화시킴

표 3. GCL(B)/GM의 접촉 전단강도 시험 항목 및 결과

Interface	습윤상태	연직 하중 σ_n , (kPa)	최대 전단강도 τ_p , (kPa)	대변형률 전단강도, τ_{11} , (kPa)	최종 함수비(%)	τ_{11} / τ_p (대변형률/최대)
GCL(B) / S-GM	건조	6.3	2	1.4	-	0.70
		31.2	11.7	8.5	-	0.73
		54.2	18.4	10.2	-	0.55
		100.0	30.2	14.7	-	0.49
		145.9	39	21	-	0.54
	수화	6.0	3.2	2.7	-	0.84
		44.0	6.0	4.7	101.0	0.78
		62.0	8.4	6.2	92.2	0.74
		101.0	10.0	8.7	72.3	0.87
		147.0	15.0	13.5	79.8	0.90
GCL(B) / T-GM	건조	6.0	6.2	5.7	-	0.92
		44.0	32.3	16.6	-	0.51
		62.0	37.9	17.1	-	0.45
		101.0	64.4	26.1	-	0.40
		147.0	86.8	39.6	-	0.46
	수화	6.0	4.9	3.2	95.4	0.65
		44.0	16.5	9.3	85.0	0.56
		62.0	19.4	10.1	72.6	0.52
		101.0	28.1	13.4	53.3	0.48
		147.0	38.3	14.7	57.6	0.38

부분과 GM을 접촉시켰다. 총 50회의 전단시험을 실시하였으며 시험 항목은 표 2와 표 3에 정리되어 있다. 한편 시험기가 시험 도중 고장이 나는 관계로 수리 전후에 하중 조건이 조금 변경되었다(표 2, 표 3 참고).

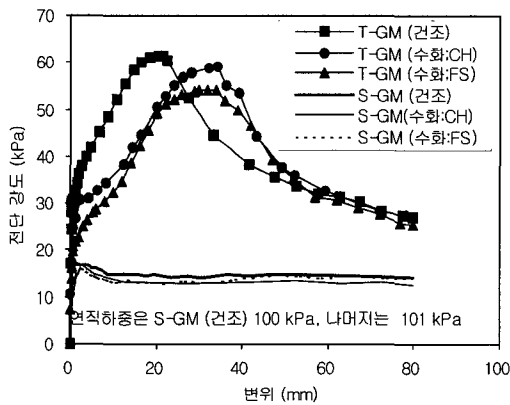
에서의 대변형률 전단강도(τ_{11}), 최종 함수비(수화시), 대변형률에서의 전단강도와 최대 전단강도의 비 등이 정리되어 있다.

3. 실험 결과 및 분석

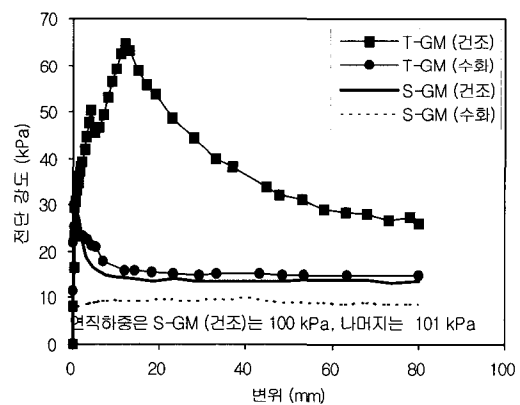
GCL 종류에 따른 전단시험 결과는 표 2와 표 3에 제시되어 있다. 각 표에는 최대 접촉전단강도(τ_p), 80mm

3.1 변위 및 전단강도 거동

변위에 따른 전단강도 거동은 GCL의 종류, GM의 종류, 그리고 수화 조건에 따라 각기 다른 모습을 보였다. 그림 5는 101kPa(건조 상태)의 S-GM은 100kPa)의 연직



(a) GCL(A)와 GM



(b) GCL(B)와 GM

그림 5. 변위와 전단 강도

하중에서 수화조건과 GCL 종류에 따른 GCL/GM의 전단 거동을 보여주고 있다. 연직하중에 따라 조금씩 다른 거동양상과 강도 특성을 갖기 때문에 그림 5에 제시된 결과가 모든 하중에서의 결과를 대표한다고 할 수는 없지만, 몇 가지 특징은 찾아볼 수 있었다.

GCL(A)/S-GM의 경우, 비교적 작은 변위(≤3mm)에서 최대값이 나타난 후 감소하는 모습을 보였으며, 최대 전단강도는 FS(free swelling)에서 가장 작은 값이 측정되었다. GCL(A)/T-GM은 비교적 큰 변위에서(8.7~30 mm) 최대점이 나타났으며, 최대 접촉 전단강도는 FS(free swelling) 조건에서 가장 작게 측정되었다. CH(constrained hydration) 조건에서 측정된 최대 전단강도는 건조상태와 비슷한 강도를 보였다. 두 가지 수화조건 모두 건조상태보다는 큰 변위에서 최대 전단강도가 발휘되었으며, 대변형을 전단강도는 건조와 수화조건에 상관없이 비슷한 값을 보였다(그림 5(a)).

한편 GCL(B)에서는 GCL(A)와는 다른 거동 양상을 보였다. 건조 상태의 T-GM은 비교적 큰 변위에서 최대점이 나타났으나, 수화 상태에서는 초기(1mm)에 최대값을 나타낸 후 강도가 감소하는 모습을 보였다. 이러한 현상은 수화로 인해 GCL(B)에 포함된 점토부분의 강도가 감소하여서 낮은 변위에서 쉽게 파괴되었기 때문으로 판단되었다. 또한 GCL(B)와 S-GM 사이의 접촉 전단강도의 경우, 건조상태에서는 수화상태의 T-GM에서의 거동과 비슷한 모습을 보였으며, 수화 조건에서는 특별히 강도가 감소하지 않고 일정한 값이 계속 유지되는 모습을 보였다.

3.2 접촉 전단강도 평가

표 2 및 표 3에 제시된 결과를 기초로 연직하중과 최

대 접촉 전단강도 관계를 Mohr-Coulomb 파괴 포락선을 적용하여 평가하였다. 식 (1)에 따라 마찰각과 점착력(겉보기 점착력)을 산정하였다(표 4).

$$\tau = \alpha + \sigma \tan \delta \quad (1)$$

여기서, σ : 연직응력(kPa), τ : 전단 응력(kPa), α : 겉보기 점착력(kPa), δ : 마찰각(°)

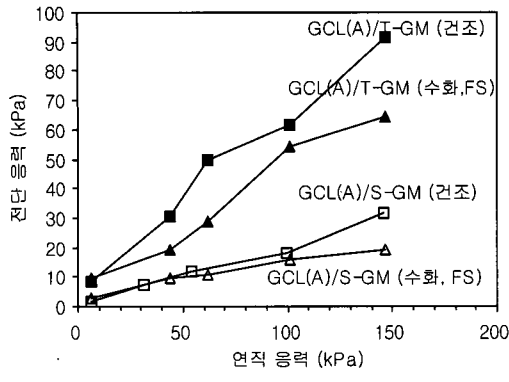
표 4를 살펴보면 GCL(A)와 GM 사이의 접촉 전단강도는 대부분 건조 상태에서 가장 크고, 그 다음으로 CH 조건에서의 수화, 그리고 FS 수화 조건에서 가장 작은 값을 보였다. 단지 예외적으로 S-GM과 GCL(A) 사이의 대변형을 수화조건에 상관없이 두 종류의 수화조건에서 비슷한 대변형을 전단강도를 보였다. 또한 GCL(A)와 T-GM과의 접촉 전단강도에서도 예외적으로 CH 조건에서 수화시킨 경우 건조조건보다도 더 큰 겉보기 점착력을 가지는 것으로 나타났다.

GCL(A)/GM의 결과 중에서 비교적 강도 감소가 크게 나타난 FS(free swelling) 조건과 건조 상태에서의 결과를 비교해 보았다(그림 6(a)). 그림 6(a)를 보면 GCL(A)/S-GM에서는 약 100kPa의 연직하중까지는 건조상태와 FS 수화 상태에서 비슷한 최대 접촉강도를 보이다가, 150kPa 부근에 가서는 차이가 크게 발생하였다. 반면에 GCL(A)/T-GM에서는 10kPa 이상의 모든 연직하중에서 수화로 인한 강도 감소가 크게 발생함을 확인할 수 있다.

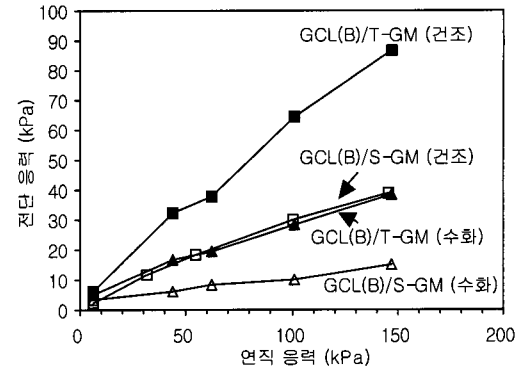
GCL(B)의 최대 접촉 전단강도의 경우(그림 6(b)), 6kPa를 제외한 모든 경우에서 수화로 인해 강도가 크게 감소하였다. 수화상태에서의 GCL(B)/T-GM의 최대 접촉 전단강도는 건조상태에서의 GCL(B)/S-GM 접촉 전단강도와 유사한 모습을 보였는데 이는 변위-전단강도(그림 5(b))에서의 경향과도 잘 일치하는 것이었다. GCL(B)/

표 4. 접촉 전단강도

Interface	습윤상태	최대 전단 강도			대변형을 전단 강도		
		마찰각(°)	점착력(kPa)	r ²	마찰각(°)	점착력(kPa)	r ²
GCL(A)/S-GM	건조	11.6	0.2	0.98	7.8	1.6	0.98
	수화(FS)	6.6	3.4	0.97	5.6	3.0	0.96
	수화(CH)	9.0	1.8	1.00	5.4	2.2	0.96
GCL(A)/T-GM	건조	30.0	7.0	0.98	16.8	2.4	0.95
	수화(FS)	22.8	4.9	0.96	10.8	4.0	0.95
	수화(CH)	27.6	10.3	0.97	14.1	5.5	0.96
GCL(B)/S-GM	건조	14.6	2.6	0.98	7.3	2.5	0.96
	수화	4.6	2.7	0.98	4.4	1.7	0.98
GCL(B)/T-GM	건조	29.7	4.4	0.99	13.1	4.3	0.98
	수화	13.0	4.8	0.99	4.5	4.5	0.90



(a) GCL(A)와 GM



(b) GCL(B)와 GM

그림 6. 수화에 따른 최대 접촉 전단강도의 변화

T-GM 사이의 접촉 전단강도는 수화로 인해 건조시의 46%의 강도감소를 보였다.

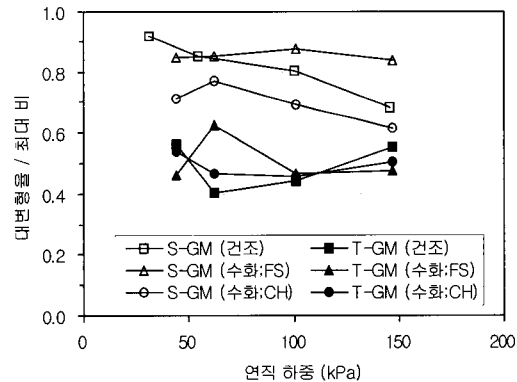
전체적으로 GCL(B)에서 수화시 강도감소가 크게 발생함을 확인할 수 있었다. 따라서, GCL(B)를 매립지의 사면 차수재나 덮개로 사용하는 경우, 사전에 현장에 설치되는 GCL을 대상으로 시험을 실시하여 강도를 평가한 후, 파괴에 대하여 안전하도록 설계를 실시하여야 한다. 또한 현장에서도 철저한 시공 관리를 통해 GCL(B)로의 수분 유입을 최소화하도록 해야 한다. 그러나 Daniel 등(1998)의 현장 시험 결과에서 알 수 있듯이 GCL(B)를 최종 덮개로 사용할 때 수화를 막는 것은 쉽지 않다.

3.3 최대 및 대변형률 전단강도

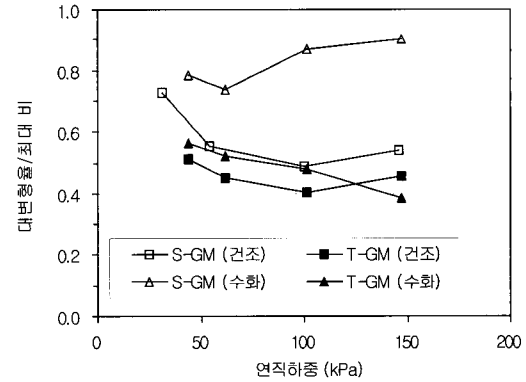
최대와 대변형률 혹은 잔류 전단강도 중에서 어떤 값을 설계에 적용하며 이 때 안전율을 어떻게 할 것인가는 현재도 계속적으로 논의되고 있는 주제 중의 하나이다. Filz 등(2001)은 최대값과 잔류값을 적용한 수치해석 결

과와 실제 매립지 파괴 사례와의 비교를 통해 실제로 interface에 유발되는 전단강도는 잔류 강도에 최대 전단강도와 잔류 전단강도 차의 10%에 해당하는 값을 더한 크기라고 제시하면서, 최대값은 현장을 과대 평가하며 잔류값의 적용은 보수적인 평가를 할 수 있다고 하였다. 또한 Swyka 등(2001)은 다양한 현장 경험을 바탕으로 매립지 설계시 GCL과 인접 토목섬유와의 접촉 전단강도는 잔류값을 적용한 후 1.25 이상의 안전율을, Daniel 등(1998)은 최대 전단강도에 안전율 1.5를 적용할 것을 각각 제안한 바 있다. 그러나 두 경우 역시 국내와 같이 급한 경사면을 가지는 매립지에는 적용하기 어려운 점이 있어 현장 시험 등을 통해 이 부분에 관한 향후 추가적인 연구가 필요하다.

이처럼 잔류 및 대변형률 강도는 최대강도와 마찬가지로 매우 중요한 항목이며, 본 실험에서도 80mm에서의 대변형률 강도를 측정된 후 최대값과의 비교를 하여 최대강도와 대변형률의 강도의 관계를 정량적으로 비교해 보았다(표 2, 표 3, 그림 7).



(a) GCL(A)/GM



(b) GCL(B)/GM

그림 7. 연직하중에 따른 대변형률 전단강도/최대 전단강도의 비

연직하중 6kPa의 결과를 제외한 나머지 하중에서 연직응력과 ‘대변형률에서의 전단강도/최대 전단강도’의 비는 그림 7과 같다. 본 시험에서 측정된 80mm에서의 값이 진정한 잔류상태의 전단강도를 나타내지 못하기 때문에 뚜렷한 경향을 발견하기는 어려웠지만, 수화상태와 토목섬유의 종류에 따라 몇 가지 특징은 발견할 수 있었다.

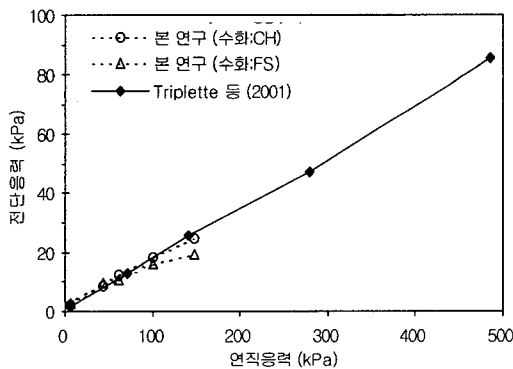
GCL(A)/GM의 경우, T-GM은 S-GM보다 훨씬 큰 강도 감소를 보였으며, 대변형률 전단강도/최대 전단강도의 비는 건조 및 수화조건에 상관없이 0.4에서 0.6 사이에 존재하였다. S-GM은 연직하중이 증가함에 따라 대변형률 전단강도/최대 전단강도의 비가 감소하는 경향을 보였으며, FS 조건의 수화시 가장 적은 감소를 보였다. GCL(B)와 GM 경우에도 T-GM에서 더 큰 강도감소를 보였으며, 수화상태의 S-GM에서 가장 적은 강도감소가 나타남을 확인할 수 있었다. 한편, 건조상태에서 GCL(B)/S-GM의 강도감소 정도가 GCL(A)보다 더 크게 나타났는데, 이러한 차이는 재료 구성의 특징으로 인해(그림 1) GCL(A)보다는 GCL(B)에서 접촉면(interface)에 미끄러운 벤토나이트 성분이 더 많이 존재하기 때문에 나타난 현상이라고 판단되었다.

3.4 수화 조건이 GCL(A)의 접촉 전단강도에 미치는 영향

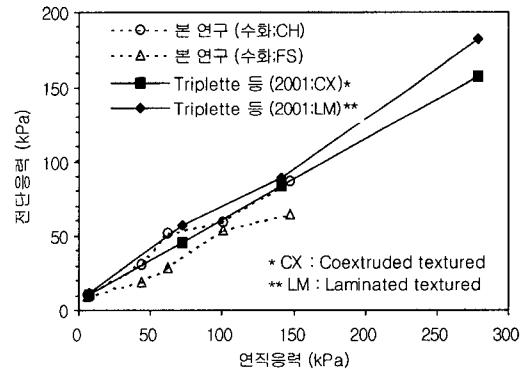
앞 절에서 설명한 바와 같이 GCL(A)의 수화/건조 상태 및 수화조건은 GM과의 접촉 전단강도 및 전단거동에 영향을 미친다. 수화 조건의 차이-수화시 하중 재하유무로 인한 전단거동의 차이는 3.1절의 그림 5(a)에 제시하였으며, 여기에서는 수화조건에 의한 전단강도 변

화를 기준에 제시된 문헌결과와의 비교를 통해 알아보았다(그림 8). 그림 8에 제시된 Triplett과 Fox(2001)의 비교자료는 전단시험시 가해지는 하중과 동일한 하중을 가한 상태에서 수화를 시킨 후에 시험을 실시하여 얻은 결과이다. 그림8을 보면 GM의 종류와 관계없이 본 연구 CH 조건에서의 결과와 문헌값이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 6kPa 정도의 하중을 가한 상태에서 수화를 시킨 후 시험을 실시하여도 기존의 결과-다른 수화방법을 취한 결과-와 유사한 경향을 얻을 수 있음을 보여주는 것이라고 할 수 있다. 이러한 비교를 통해 본 연구에서 적용한 것과 같이 기계 밖에서 일정한 하중을 가한 상태에서 수화를 실시하여도 현장 상태를 모사하는 신뢰성 있는 접촉 전단강도를 얻을 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 본 비교는 단지 한 개의 문헌과의 비교를 통한 것이기 때문에 향후 관련된 연구결과와의 더 많은 비교를 통해 보완할 필요가 있다.

한편 FS 조건, 즉 하중을 가하지 않은 상태로 수화를 시킨 후 전단 시험을 실시할 경우에는 강도가 다른 조건에서보다 작게 측정되었는데, 이러한 모습은 그림 6(a)에서 언급한 바 있으며 이에영(1999)는 그 이유로 FS(free swelling) 조건에서 수화를 시킨 후 연직하중을 가하면 압밀로 인해 간극수가 전단 접촉면에 매끄러운 막(slipping film)을 형성해 강도 감소를 유발하기 때문이라고 하였다. 이는 FS 조건에서의 최종 함수비가 CH에서의 함수비보다 훨씬 크게 나타난 결과와도 잘 일치하는 결과이다(표 2). 따라서 이러한 강도감소를 방지하기 위해서 현장에서는 쓰레기가 매립되기 이전에 GCL이 수화되지 않도록 주의를 기울여야 한다.

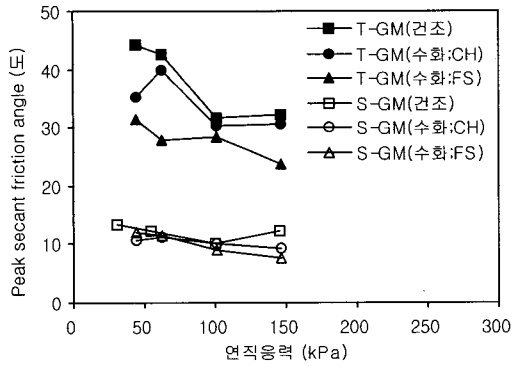


(a) GCL(A)/S-GM

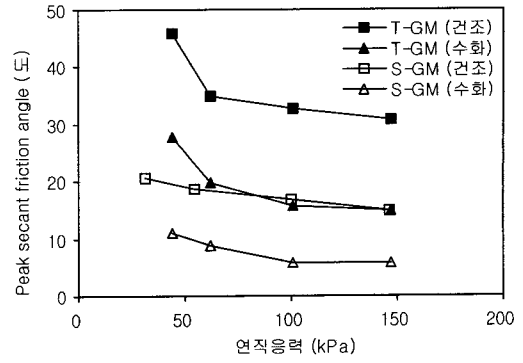


(b) GCL(A)/T-GM

그림 8. 수화조건에 따른 강도 변화 (문헌결과와 비교)



(a) GCL(A)/GM



(b) GCL(B)/GM

그림 9. 연직하중에 따른 마찰각의 변화

3.5 하중이 전단강도에 미치는 영향

접촉 마찰특성은 연직하중에 따라 변화하기 때문에, 매립지 설계시 토목섬유 사이의 접촉 전단강도는 현장에서 받게 되는 하중 범위에서 실시한 전단시험 결과를 적용해야 한다(서민우 등, 2002; Jones와 Dixon, 1998). 본 연구에서 실시된 시험 결과를 대상으로 하중에 따른 마찰특성의 변화를 평가하기 위해 연직하중과 접촉 전단강도의 비로 표시되는 secant 마찰각을 도입하여 그 영향을 분석하였다(Wasti와 Özdüzgün, 2001; 서민우 등, 2002). Secant 마찰각이란, 연직하중과 접촉 전단강도의 \tan^{-1} 값을 말한다. 그림 9를 통해 확인할 수 있듯이 GCL 종류에 상관없이 모든 경우에서 연직하중이 커짐에 따라 secant 마찰각은 감소하였으며, 특히 T-GM에서는 연직하중에 따른 각의 변화가 더 크게 나타났다. 이러한 경향은 점착력을 제외하고 마찰각만을 설계시 적용하는 경우 꼭 고려해야 하는 경향이라고 할 수 있다. 그림 9를 살펴보면 크기는 다르지만 GCL의 종류에 관계없이

수화로 인해 마찰각이 감소하는 모습을 확인할 수 있었는데, 단 GCL(A)/S-GM에서는 100kPa 이상의 연직응력에서만 그 효과가 나타났다. 그림 9에 제시된 마찰각의 범위는 연직응력의 범위와 함께 표 5에 다시 정리하였다. 이 표는 토목섬유가 받는 하중의 범위가 비슷하고 본 시험에 사용된 재료와 유사한 토목섬유를 적용하는 매립지의 설계시 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

GCL(A)에서는 문헌과의 비교 결과(그림 8) CH 조건의 값을 적용하는 것이 적당하다고 판단된다. 그러나, GCL(B)의 경우 일반적으로 GCL(B)의 점토층 상부에 불투수층인 GM이 다시 설치되므로 점토가 건조 상태라고 가정을 하여 설계를 실시하지만(Daniel 등, 1998), 본 연구 결과와 같이 벤토나이트 부분의 수화로 인한 강도 감소가 크게 발생하기 때문에 건조 상태로 가정하여 설계를 실시할 경우 현장 상황과 시공성 등을 고려하여 안전율 선택에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다. 따라서 표 5에 제시된 수화시 GCL(B)에 관한 결과는 수화로 인한 위험을 보여주는 결과 정도로만 활용될 수 있을 것이다. 단 수화시 GCL(B)의 최종 함수비는 현장에서 부득이하게 GCL(B)가 수화되었을 때 함수비를 알 수 있다면 이 때의 전단 강도를 가늠할 수 있는 지표이다.

표 5. 최대 secant friction angle 범위

Interface	수화 조건	마찰각의 범위(°)	연직응력의 범위(kPa)	평균 최종 함수비(%)
GCL(A) /S-GM	건조	10~13	31~146	-
	FS	8~12		230
	CH	9~11		130
GCL(A) /T-GM	건조	32~44	44~147	-
	FS	24~31		221
	CH	31~40		140
GCL(B) /S-GM	건조	15~21	31~146	-
	수화	6~11		86
GCL(B) /T-GM	건조	31~46	44~147	-
	수화	15~28		73

4. 결론

대형 직접전단 시험기를 이용하여 매립지의 차수재 및 최종 덮개에 사용되는 토목섬유 점토 차수재(GCL)와 지오멤브레인(GM) 사이의 접촉 전단강도를 건조상태와 수화상태로 나누어 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 변위에 따른 GCL/GM의 접촉(interface) 전단거동은 GCL과 GM의 종류, 수화 및 건조 상태에 따라 각기 다른 특성을 보였다. 즉, 각 조건에 따라 최대 강도, 최대 강도가 나타나는 변위, peak 이후의 강도 감소(softening)가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.
- (2) Mohr-Coulomb 파괴 포락선을 적용하여 각 조건에 따른 마찰각과 점착력을 평가하였다. 건조상태에서 가장 큰 강도를 보였으며, 두 종류의 GCL 모두 하중을 가하지 않은 상태에서 수화시킬 때 큰 강도감소를 보였다. 특히 GCL(B)는 수화로 인해 전단강도가 크게 감소하는 것으로 측정되었다. 따라서 GCL(B)가 설치되는 매립지 현장에서는 GCL(B)로의 수분 유입을 최소화하기 위해 주의를 기울여야 한다.
- (3) T-GM는 S-GM보다 더 큰 접촉 전단강도의 감소를 보였으며, 감소량은 접촉하는 토목섬유의 표면상태와 GCL의 종류 및 수화상태에 따라 각기 다른 값을 보였다. T-GM/GCL에서 대변형을 전단강도/최대 전단강도 비는 건조 및 수화조건에 상관없이 대략 0.4와 0.6사이 범위에 존재하였다.
- (4) 6kPa의 하중을 가한 상태에서 수화를 시킨 후 전단을 실시한 결과는 문헌에 제시된 결과와 잘 일치하였으나, 하중을 가하지 않은 상태에서 수화를 시킨 경우에는 문헌 값보다는 작은 값을 보였다. 따라서 쓰레기가 매립되기 이전에 GCL(A)가 수화되면 설계값보다 작은 강도가 발현되기 때문에 매립 이전에 GCL(A)가 수화되지 않도록 주의를 기울여야 한다.
- (5) Secant 마찰각은 연직하중이 증가함에 따라 감소하였다. 이 마찰각은 연직하중의 범위가 비슷하고 설치되는 재료가 본 시험에서 사용된 재료와 유사한 매립지의 설계시 좋은 참고자료로 활용될 수 있을 것이다. 본 연구 결과와 기존 문헌과의 비교 결과, GCL(A)에서는 CH 조건의 값을 적용하는 것이 적당하며, GCL(B)에서는 일반적으로 건조 상태로 가정하고 설계를 실시하지만 수화로 인한 강도 감소가 매우 크기 때문에 건조 상태와 수화 상태 중 어떤 값을 적용할 것인지 결정할 때에는 현장 조건과 시공성 등을 고려하여 매우 신중하게 결정해야 해야 한다.

1. 서민우, 박준범, 김운영 (2002), "지오펜브레인/지오텍스타일의 접촉 전단강도 평가", *한국지반공학회논문집*, 제18권, 1호, pp.79-89.
2. 신은철, 오영인 (2000), "폐기물 매립장에 사용되는 토목섬유의 마찰특성 및 안정해석에 관한 연구", *한국폐기물학회지*, 제17권, 제7호, pp.862-874.
3. 이애영 (1999), *폐기물 매립장 토목섬유 차수재의 접촉마찰특성 및 안정해석에 관한 연구*, 인천대학교 석사학위 논문.
4. 정문경, 정하익, 이용수, 최희철, 우재운 (1998), *폐기물 매립시설의 설계, 시공 기술에 관한 연구*, 한국건설기술연구원, 건설기술연구원 연구보고서(98-075).
5. Daniel, D.E., Koerner, R.M., Bonaparte, R., Landreth, R.E., Carson, D.A., and Scranton, H.B. (1998), "Slope stability of geosynthetic clay liner test plots", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, Vol.124, No.7, July, pp.628-637.
6. Daniel, D.E., Shan, H.Y., and Anderson, J.D. (1993), "Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner", *Proc. Geosynthetics '93, IFA, Int.*, St. Paul, Minn., 3, pp.1483-1496.
7. Eid, H.T. and Stark, T.D. (1997), "Shear behavior of an unreinforced geosynthetic clay liner", *Geosynthetics International*, Vol.4, No.6, pp.645-659.
8. Filz, G.M., Esterhuizen, J.J.B., and Duncan, J.M. (2001), "Progressive failure of lined waste impoundments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.* ASCE, Vol.127, No.10, pp.841-848.
9. Fox, P.J., Rowland, M.G., and Scheithe, J.R. (1998), "Internal shear strength of three geosynthetic clay liners", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, Vol.124, No.10, pp.933-944.
10. Frobel R.K., Sadlier, M.A., and Cowland, J.W. (1998), "Shear strength and deformation consideration for composite landfill liners in Hong Kong", *6th International Conference on Geosynthetics*, pp.411~416.
11. Gilbert, R.B., Fernandez, F., and Horsfield, D.W. (1996), "Shear strength of reinforced geosynthetic clay liner", *Journal of Geotechnical Engrg.*, Vol.122, No.4, pp.259-266.
12. Jones, D.R.V., and Dixon, N. (1998), "Shear strength properties of geomembrane/geotextile interfaces", *Geotextiles and Geomembranes*, 16, pp.45-71.
13. Koerner, R.M. (2000), "Emerging and future developments of selected geosynthetic applications", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, ASCE, Vol.126, No.4, pp.291-306.
14. Leisher, P.J. (1992), *Hydration and shear strength behavior of geosynthetic clay liners*, MSCE Thesis, Drexel University, Philadelphia, PA.
15. Swyka, M., Olsta, J., and Cotton, R. (2001), "Geomembrane/GCL composite final cover for a hazardous waste landfill", *Geosynthetics Conference*, Portland, Oregon, pp.859-870.
16. Triplett, E.J. and Fox, P.J., (2001), "Shear strength of HDPE geomembrane / geosynthetic clay liner interfaces", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.*, Vol.127, No.6, pp.543-552.
17. Wasti, Y., and Özdüzgün, Z.N. (2001), "Geomembrane-geotextile interface shear properties as determined by inclined board and direct shear box tests", *Geotextiles and Geomembranes*, 19, pp.45-57.

(접수일자 2002. 2. 25, 심사완료일 2002. 6. 10)