

SRSL(Self Recovering Sustainable Liner)

Applicability of SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner) to the Landfill Final Cover System

1), Ohjung Kwon, 1), Min-Woo Seo, 2), Soojung Hong, 3), Junboun Park,
4), Sooyoung Park

1) , Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng. Dept., Seoul National Univ.

2) , Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng. Dept., Seoul National Univ.

3) , Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Eng. Dept., Seoul National Univ.

4) () , Director of R&D institute, NGS Co. Ltd.

SYNOPSIS : To prevent penetration of rainwater into the landfill site is the main purpose of the final cover in landfill sites. Conventional designs of landfill covers uses geotextiles such as geomembrane and GCL, and clay liners to lower the permeability of final covers of landfill sites. However, differential settlement and the variation of temperature in landfill sites cause the development of cracks or structural damage inside the final cover, and it is also difficult to obtain clay - the main material of the compacted clay liner in Korea. Thus the former final cover system that suggests geomembrane and GCL or compacted clay liner has several limitations. Therefore, an alternative method is necessary, and one of them is the application of SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner) material. SRSL is two different layers consist of individual materials that react with each other and form precipitates, and with this process lowers the permeability of the landfill final cover. SRSL generally is made up of two layers, so that when a internal crack occurs the reactants of the two layers migrate towards the crack and heal it by forming another liner.

In this study the applicability of SRSL material for landfill final cover was examined by performing ; (1) jar test to verify the formation of precipitate in the mixture of each reactants, (2) falling head test considering the field stress in order to confirm the decrease of permeability or prove that the hydraulic conductivity is lower than the regulations, (3) compression tests to judge weather if the strength satisfies the restricts for landfills, (4) freeze/thaw test to check the applicability of SRSL for domestic climate. In addition, the application of waste materials in the environmental and economical aspect was inspected, and finally the possibility of secondary contamination due to the waste materials was examined by performing elution tests.

Key words : SRSL material, landfill cover, hydraulic conductivity, compression strength, freeze/thaw test, elusion test

1. 서 론

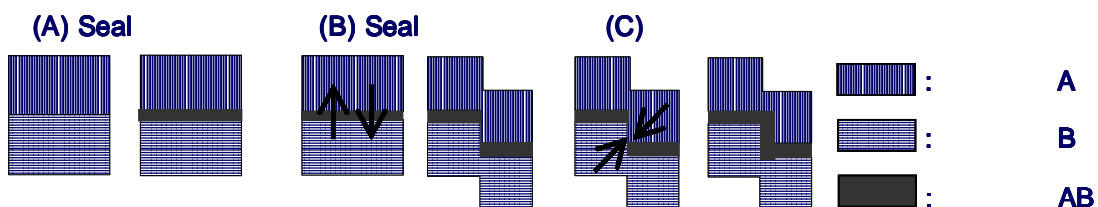
현대사회에서 산업의 발달로 인하여 폐기물에 대한 관리와 처리가 최근 중요한 문제로 부각되고 있다. 현재 우리나라의 경우 일반쓰레기 및 건설폐자원 등 상당량의 폐기물이 아직 매립에 의존하기 때문에 매립지의 건설 및 관리가 중요한 이슈로 대두되고 있다. 이러한 매립지의 건설, 관리의 여러 부분 중 본 연구에서는 매립지 최종복토층에 초점을 맞추려 한다.

최종복토층의 역할은 (1) 매립지 안으로 침투하는 우수를 차단해서 침출수의 양을 감소시키고, (2) 침출수와 매립지 가스로 인한 악취를 방지하며, (3) 매립지 식생을 회복하는 것이다. 특히 우수를 막는 것이 주목적이기 때문에 최종복토층을 구성하는 물질 중 지오멤브레인, GCL(Geosynthetic Clay Liner) 및 CCL(Compacted Clay Liner)의 투수계수가 10^{-6} cm/s 이하를 만족해야 한다. 그렇지만 지오멤브레인 및 GCL의 경우 찢김 현상 등 외부 충격에 파손될 가능성이 높고, CCL의 경우 매립지에서 발생하는 부등침하 및 기온의 변화로 인해 균열이 발생할 가능성을 배제하기 어려우며, CCL을 만들기 위한 점토재료 또한 국내에서는 부족한 것이 현실이다. 따라서 기존의 지오멤브레인, GCL 및 CCL을 이용한 차폐층 건설을 국내에서 적용하는 데에는 문제가 있으며, 새로운 대안이 요구되는데 그 중 하나가 SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner) 물질을 이용한 매립지 최종차단층 기술이다.

2. SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner) 물질의 정의

SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner)란 다른 재료인 2개의 층으로 구성된 차수층을 의미하며 상부층 물질에는 SiO_2 , CO_3^{2-} , 하부층 물질에는 CaO , OH^- 성분이 포함되어 있다. SRSL의 메커니즘은 각 층의 반응물질을 이용하여 각 층 사이의 공극을 채우는 침전물질을 형성하고 이러한 과정을 통해 매립지 최종복토층의 투수성을 저감시키는 과정이다.

SRSL의 각 성분이 2개의 층으로 나누어져 있기 때문에 균열이 발생하더라도 위, 아래층의 반응물질이 이동하면서 균열을 메운다. SRSL 물질의 메커니즘은 다음과 같다. 그림 1의 (A)와 같이 반응물질 A와 반응물질 B가 접촉하면서 AB층과 같이 새로운 불투수층을 형성한다. 여기서 그림 1의 (B)와 같이 전단파괴로 인한 균열이 발생하여도, 그림 1의 (C)처럼 다시 주변의 반응물질 A와 B가 새로운 반응물질 AB로 결합하면서 균열을 치유하고 균열부위에 불투수층을 재형성한다.



1. SRSL

그렇지만 외국에서 소개된 SRSL 재료의 국내가격이 고가이고, 그 장기거동에 대한 연구가 미흡한 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 현재 전량 매립되고 있는 폐자원 물질인 굴폐각, 폐석회 및 fly ash 등을 활용성을 검토하여 경제성을 높이고, 동결/융해 시험을 실시해 장기거동에 대한 안정성을 확보하고자 한다. 또한, 위에서 기술한 반응에 대해 효율을 더욱 높이기 위해 소다회 계열의 응집제를 첨가하여 SRSL 물질 형성을 촉진시키는 연구를 진행한다.

3. 실험 및 결과

3.1 Jar Test

본 시험은 SRSL 물질의 생성을 촉진하는 응집제의 효과 및 불투수성 침전물의 형성 과정을 확인하기 위한 시험으로써, 상부층 및 하부층 물질을 각각 일정량씩 물과 혼합하고 12~24시간 동안 완속교반을 수행한 후 용출과정을 통해 동일량의 상등액을 취해 교반, 혼합하여 육안으로 관찰하였다.

상부층 물질에는 #200 체를 통과한 규조토(상부층 첨가재 A) 및 SiO₂ 성분을 함유하고 있는 fly ash가 사용되었으며

하부층 물질에는 #325, #200 체를 통과한 소석회(하부층 첨가재 B) 및 CaO 성분을 많이 함유하는 굴폐각, 폐석회가 사용되었고(표 1 참조), 응집제(소다회)의 영향을 알아보기 위하여 case 1에는 응집제를 넣지 않았고 case 2에는 경소다회, case 3에는 중소다회를 주입하여 실험했다. 소다회의 양은 상부층 물질의 10%(wt %)를 사용하였다.

72시간 후의 결과를 살펴보면 응집제를 첨가할 경우 침전이 잘 일어나며, 규조토/소석회 결합물(2번, 5번) 및 fly ash/소석회 결합물(3번, 6번)이 침전이 잘 일어남을 확인할 수 있었다. 이 결과는 폐석회(8번, 9번) 및 굴폐각(11번, 12번)의 활용에서는 침전이 약간 일어나기는 하나, 순수한 Ca(OH)₂ 성분에 비해서는 그 효과가 떨어짐을 알 수 있다.

표 1. Jar test에서의 번호

성분	규조토 (SiO ₂)	플라이 애쉬
#325 Ca(OH) ₂	2	3
#200 Ca(OH) ₂	5	6
폐석회	8	9
굴폐각	11	12

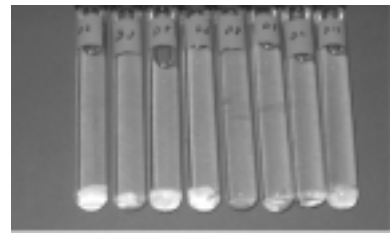
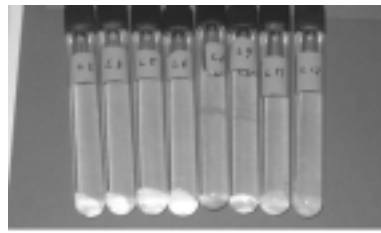
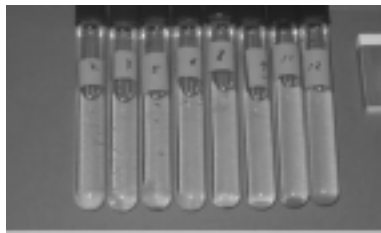


그림 2. Jar test 결과(Case 1) 그림 3. Jar test 결과(Case 2) 그림 4. Jar test 결과(Case 3)

또한, 본 실험에서 생성된 침전물질을 활용해 SEM 분석을 수행한 결과 기존의 연구(Van der Slot, 1996)에서 생성된 물질과 동일한 결과를 확인할 수 있었다.

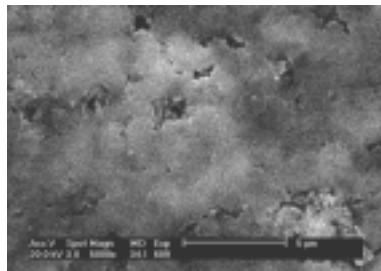


그림 5. 본 연구에서의 SRSL 물질 SEM 사진

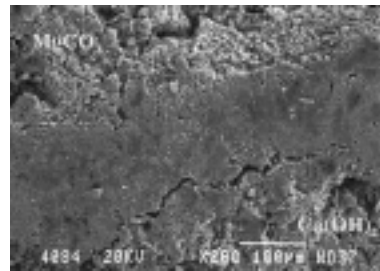


그림 6. 기존 문헌에서의 SRSL 물질 SEM 사진

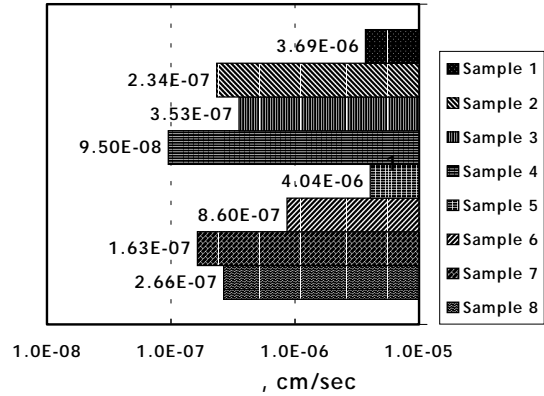
3.2 투수시험

본 연구에서 가장 중요한 인자는 투수계수이다. 투수시험은 연성벽체 투수시험기를 이용해 기본 실험을 완료하였다. 기존 문헌에 의하면(산업자원부, 2002) 상부층에 규조토 성분이 8%(wt %), 하부층에 Ca(OH)₂ 성분이 12% 이상이 포함되어 있을 경우 낮은 투수 성능을 유지할 수 있다고 한다. 따라서 이러한 성분비를 이용한 투수실험 뿐만 아니라, 폐자원을 혼합하였을 경우 및 각 층의 투수성을 낮추기

위한 벤토나이트 혼합시료에 대한 투수실험을 병행하였다. 시료는 SRSL 물질, SNU soil, 및 폐자원 물질을 혼합하고 각 혼합시료별 최적함수비 및 최대건조단위중량과 동일하게 시료를 넣고 투수실험을 진행하였으며, 배합종류는 표 2에 나타내었고 결과는 그림 7에 나타내었다. 또한, 실제 시공 시 바닥차수층의 설계 기준치인 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 이하의 투수계수를 모든 층에 만족하기 위해 벤토나이트 추가시험을 실시하였으며, 배합종류는 표 3, 결과는 그림 8에 나타내었다.

2. 가

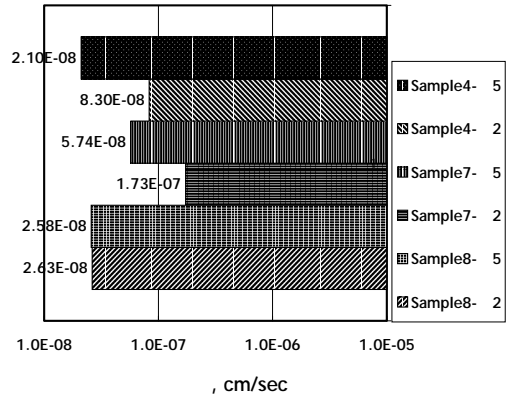
Sample 1	(가 A [] 8%) + (10%)
Sample 2	(가 A 8%)+ (10%)
Sample 3	(10%) + (가 B [] 10%)
Sample 4	(가 A 8%) + (가 B 12%)
Sample 5	(10%)
Sample 6	(10%)
Sample 7	(가 B 12%)
Sample 8	(가 A 8%)



7. 가

3. 가 가

Sample 4 - 5	(가 A 8% + 5%) + (가 B 12% + 5%)
Sample 4 - 2	(가 A 8% + 2%) + (가 B 12% + 2%)
Sample 7 - 5	(가 B 12% + 5%)
Sample 7 - 2	(가 B 12% + 2%)
Sample 8 - 5	(가 A 8% + 5%)
Sample 8 - 2	(가 A 8% + 2%)



8.

그림 7에서 굴폐각을 첨가한 경우를 제외하고 모든 경우에 있어서 최종차단층 투수계수의 설계기준이 되는 $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 이하의 투수계수를 모두 만족하였다. 폐석회의 경우 sample 2에 비해 sample 6의 투수계수가 낮게 나왔으며, 굴폐각의 경우 sample 1 및 5의 결과에서 기준투수계수를 만족하지 않는 결과를 나타내었다. 이는 jar test 결과와의 비교를 통해 SRSS 물질이 형성되지 않음을 확인할 수 있다. 또한 sample 4의 경우 규조토 및 소석회만의 투수계수에 비해 각각 64.3%, 41.7%의 투수계수 감소가 발생하였으며, 이는 SRSL 물질이 형성되어 투수계수를 감소시킨 것으로 판단할 수 있다.

투수계수의 감소를 위해 벤토나이트를 2~5%를 혼합할 경우, 소석회에 벤토나이트 2%를 첨가한 시료를 제외하고 바닥차수층 설계기준까지 만족하였다. 규조토의 경우 벤토나이트 2% 및 5% 혼합 시 각각 투수계수가 90.1%, 90.3% 감소하였으며, 소석회의 경우 2% 혼합 시 거의 차이가 없었으며, 5% 혼합 시 64.8%, 혼합시료의 경우 각각 12.5%, 77.9% 감소하였다.

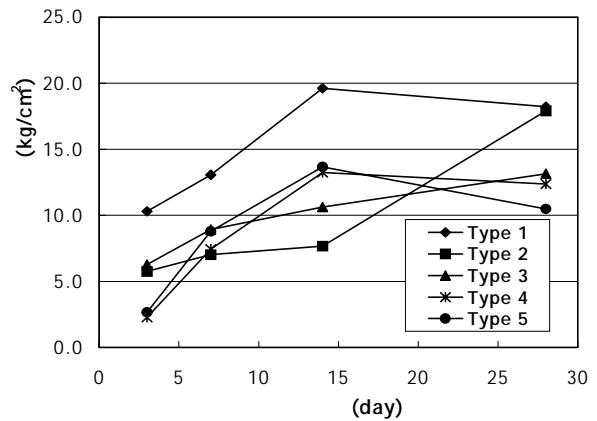
3.3 강도시험

일축압축강도시험은 시료를 원통형의 공시체(직경 5cm, 높이 10cm)로 제작하여 측압을 받지 않은 상태에서 축하중을 가하여 해당 시료의 강도를 결정하는 방법이며, 실제 시공 시 작업차량에 대한 주행성 확보 및 차단층의 안정성에 대한 제반 문제점들을 발생시키지 않은 중요한 설계 요소가 된다. 다짐시험에서 구한 배합비 및 최적함수비를 기준으로 표 4와 같은 모델들에 대해 3층 다짐을 하였으며 혼합층에 대하여는 층마다 3층 다짐을 하였다. 간극비와 다짐 에너지를 일정하게 하기 위하여 타격횟수와 함수비, 공시체 부피를 일정하게 하여 강도를 측정하였다. 초기강도와 재령 7일 강도, 14일 강도, 28일 강도를 시험하여 그 결과를 그림 9에 나타내었다.

시험 결과 28일 강도를 기준으로 type 1 및 type 2 시료의 강도가 가장 큰 것으로 나타났으며 플라이애쉬가 첨가된 시료의 강도는 낮은 것으로 나타났다. 그렇지만 플라이애쉬의 경우 초기에는 낮은 강도를 발현하지만 플라이애쉬의 고결화작용으로 인해 재령일수가 증가할수록 강도가 증가하였다. 2층 다짐의 경우 상대적으로 낮은 강도를 나타내었는데 이는 다짐 시 2층을 나누어 다짐으로써 일축강도시험 시 나뉜 층의 균열 때문인 것으로 판단된다. 발현된 강도를 살펴보면 실제 매립지 설계 시 제안하는 목표 강도 5kg/cm^2 은 7일 경과 후 모든 경우 만족하였고 일반적인 매립장 설계 시 기준이 되는 재령 28일 강도는 모두 10 kg/cm^2 이상의 높은 값을 보여줌으로써 현장 적용 시, 강도발현 상에는 별다른 문제점이 없을 것으로 판단된다.

표 4. 강도시험에서의 첨가재 배합

시료번호	첨가재 배합비
Type 1	상부층 첨가재 A(8%, 규조토)
Type 2	하부층 첨가재 B(12%, 소석회)
Type 3	상부층 첨가재 A(8%) + 하부층 첨가재 B(12%)
Type 4	플라이애쉬(10%)
Type 5	플라이애쉬(10%) + 하부층 첨가재 B(12%)



9. model

3.4 동결/융해 시험을 통한 국내 기후의 적용성 검토

본 시험은 우리나라 겨울철의 특징인 삼한사온 현상으로 동결/융해가 일어나 최종차단층에 균열이 발생할 수 있는 가능성에 대해, 최종차단층의 안정성 및 차수성능의 변화를 확인하여 설계 및 시공에 적용될 수 있는 지침을 위한 기초자료를 얻고자 실시하였다. 본 시험은 한국표준협회에서 발행한 KS F 시험규정에 의해 실시하였다. 다져진 흙-시멘트 혼합물에 대한 동결융해시험규정(KS F 2332)에서는 동결 24시간(-23°C) 및 융해 24시간(21°C) 총 48시간을 1 cycle로 한다.

시험에서 수행된 시료는 표 5에 정리하였으며, 모든 공시체의 함수비는 균일하게 13%로 고정하였다.

기존 문헌에 따르면 자연 상태 또는 다져진 점토의 투수계수는 일반적으로 $10^{-7} \sim 10^{-10}\text{cm/sec}$ 정도이고 동결/융해를 받으면 약 10^{-6} 정도의 order를 나타낸다고 알려져 있다.(Othman 등, 1994) 그리고 동결시의 온도에 따른 투수계수의 변화는 -1°C 이하이면 온도 범위에 따른 투수계수의 변화는 미미한 것으로 보고되고 있다.(Othman과 Benson, 1993) 또한 동결/융해 반복회수는 처음의 동결/융해 작용을 받았을 때가 가장 크고 3회에서 10회까지는 근소한 변화를 보이며, 동결/융해에 대한 영향을 알아보는 것은 3~5회의 동결/융해의 반복으로 충분하다고 한다.(Chamberlain 등, 1990; Othman과 Benson, 1993;

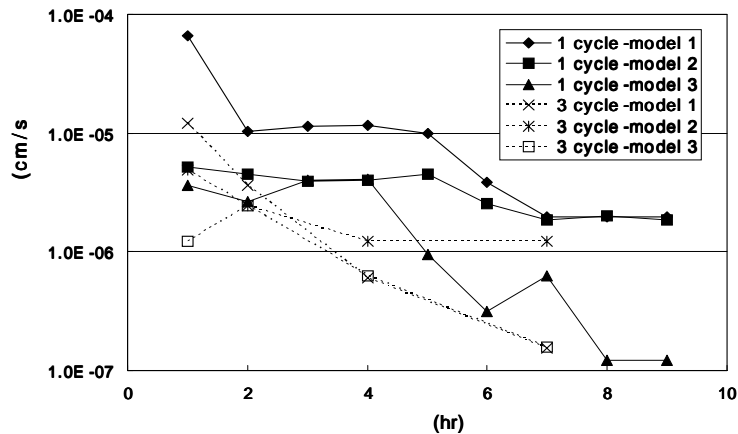
Othman 등, 1994) 따라서, 본 연구에서는 1, 3, 5 cycle 반복 시 나타나는 투수계수 및 재령별 강도의 변화를 통해 균열발생을 통한 SRSL 물질의 균열치유능력을 확인하였다.

5. / 가

	가
model 1	상부(첨가재 A[규조토] 8%), + 하부(첨가재 B[소석회] 12%)
model 2	(가 A+ 2%) + (가 B+ 5%)
model 3	(가 A 8%) + (가 B 10%)

3.4.1 동결/융해 시험을 통한 투수계수 변화

현재 1, 3 cycle에 대한 투수계수의 변화를 확인하였으며, 5 cycle에 대한 투수시험이 진행 중이다. 그림 10을 보면, 시간이 경과함에 따라 투수계수가 감소하는 경향을 보이며, 1 cycle의 model 3의 경우에는 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 에 근접하는 양상을 나타내었다. 따라서 투수시험을 통해, 동결/융해로 인한 미세 균열이 발생할 경우 SRSL 물질에 의한 균열치유효과를 확인할 수 있었다. 또한, 그림 10을 통해 동결/융해 반복정도에 따른 투수계수의 저감효과는 확인되지 않는다. 그렇지만, 짧은 투수계수 측정시간 등으로 인해 기준 투수계수인 10^{-6}cm/sec 이하로 떨어지지 않는 몇몇 시료가 존재하였다. 따라서 5 cycle 시료와의 투수계수 비교 및 추후 보완시험이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

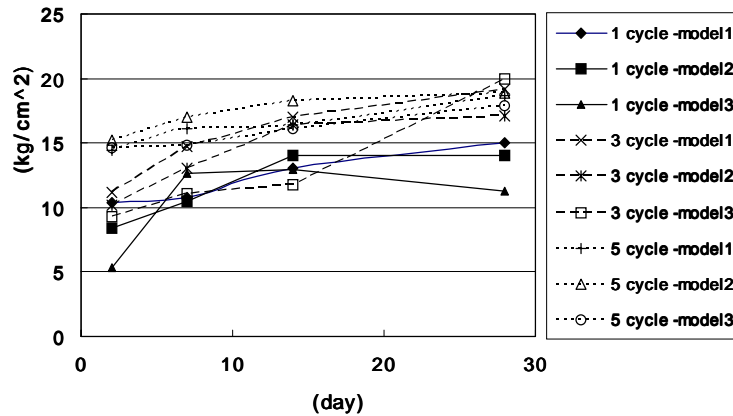


10. /

3.4.2 동결/융해 시험을 통한 일축압축강도 변화

동결/융해 반복시험을 통한 1, 3, 5 cycle에 대한 일축압축강도의 재령일별 변화를 그림 11에 나타내었다. 28일 강도를 기준으로 할 때 model 2의 경우 1 cycle의 강도(14.0kg/cm^2)에 비해 3, 5 cycle의 경우 각각 22% 및 35% 증가하는 경향을 보이며, model 1, 3의 경우도 유사한 양상을 나타낸다. 또한 재령기간의 경우에도 각 model의 초기 강도에 비해 28일 재령강도는 20.1%(5 cycle-model 3)에서 88.3%(1 cycle-model 3) 까지 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 동결/융해 반복시료에 대한 일축압축강도시험결과 발현된 강도는 동결/융해 반복 횟수가 많을수록, 재령기간이 길수록 증가하는 경향을 보인다. 그렇지만 동결/융해의 반복으로 인해 시료의 미세구조에 균열이 발생할 경우 강도가 증가하기는 힘들 것으로 판단하기 때문에 동결/융해의 반복이 재령시간의 증가로 이어진 것으로 사료된다.

또한, 모든 경우의 강도가 5kg/cm^2 이상 발현되기 때문에 겨울철의 동결/융해로 인한 최종차단층의 강도에 대한 영향은 없을 것으로 판단된다.



11. /

3.5 용출시험

SRSL 물질의 2차오염 여부를 확인하기 위해 용출실험을 수행하였다. 각 물질별로 시료 100g 증류수에 염산을 첨가하여 pH 5.8~6.3으로 한 용매를 시료:용매=1:10(W:V)의 비로 혼합하였다. 상온, 상압에서 200rpm인 진탕기를 사용하여 6시간동안 진탕한 후 GF/B filter paper로 여과하여 용출시험용 ICP(inductively coupled plasma, Shimadzu ICPQ 1000)

2

표 6. 용출시험결과 (단위 : ppm, ND : Not Detected)

	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
SNU soil	ND	0.0002	ND	0.0499	0.0455	0.0229	ND
Diatomite	ND	0.0343	0.2228	0.0278	0.0465	0.0122	ND
Fly ash	0.0494	0.0004	ND	0.1098	0.0457	0.0225	ND
Oyster shell	ND	0.0003	ND	0.0317	0.0477	0.0091	ND
최대 허용 기준 농도	1.5	3	-	0.3	0.3	3	0.005

4. 결론 및 향후 연구 계획

1. 기존 매립지 최종복토층의 문제는 균열로 인한 매립지 내로의 우수침투이며, 이 문제의 해결하기 위해 SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner) 물질의 사용성을 검토하였다.
2. SRSL 공법은 균열 발생 시 자가적인 균열치유 메커니즘을 통해 불투수층이 재형성되어 10^{-6} cm/s 이하의 투수계수를 유지할 수 있다.
3. 첨가된 반응물질과 폐자원의 침전효과를 입증하기 위한 jar test가 실시되었으며, 72시간 이후의 결과 규조토/소석회, fly ash/소석회 조합의 효과가 보다 증대되었음을 확인하였다.
4. 투수시험 결과, 각 층별의 투수계수를 바닥차수층 기준인 10^{-7} cm/s 이하로 유지하기 위해서는 시료에 일정량의 벤토나이트를 혼합할 필요성을 확인하였으며, SRSL 물질의 형성 시 투수계수를 보다 감소시킬 수 있는 것으로 사료된다. 강도시험 결과 모든 시료의 경우 강도기준을 만족하는 것을 확인하였다.

5. 동결/융해 반복 시료에 대한 투수시험을 수행한 결과 초기의 투수계수는 급격히 증가한 후 시간의 경과에 따라 투수계수가 감소하는 결과를 보여 SRSL 물질의 균열치유능력이 있음을 확인할 수 있었다. 그렇지만, 보다 정확한 결과를 도출하기 위해 장기간의 시험 등 보완시험이 요구되었다. 강도의 경우는 재령일수 및 동결/융해 반복횟수가 증가할수록 강도가 증가하는 양상을 보였으나, 동결/융해의 반복 또한 재령시간의 증가로 판단하였다.

6. 용출시험 결과 폐자원의 사용으로 인한 2차오염의 우려는 없는 것으로 판명되었다.

감사의 글

() NGS Co. Ltd.

참 고 문 헌

1. (2000), “ - ”
2. Chamberlain, E.J., Iskander, I., and Hunsiker, S.E.(1990), "Effect of Freeze -thaw on the permeability and macrostructure of soils", *Proc. Int. Symp. on Frozen Soil Impacts on Agric., Range and Forest lands*, Spokane, Wash., pp.145 -155
3. Cnubben, P.A.J.P. and van Zomeren, A.(2001), "Performance testing a self-forming and self-repairing seal", energy research centre of the Netherlands project report
4. Othman, M.A., and Benson, C.H.(1993), "Effect of freeze -thaw on the hydraulic conductivity and morphology of compacted clay", *Can. Geotech. J.*, 30(2), pp.236 -246
5. Othman, M.A., Benson, C.H., Chamberlain, E.J., and Zimmie, T.F.(1994), "Laboratory testing to evaluate changes in hydraulic conductivity of compacted clays caused by freeze -thaw: State -of -the -art", *Hydraulic conductivity and waste contaminant transport in soils, ASTM STP 1142*, ASTM, pp.227 -254
6. Van der Sloot, H.A. and Cote, P.L. (1996), "Method for sealing of a mass of waste", *United States Patent*, 5502268
7. Yoon, J. S., Moon, S. H., Kim, J. Y. and Chung, M.(2000), "Measurement of mass transfer parameters for VOCs in self-forming self-repairing liner materials", *Proceedings of th Korean Society of Environmental Engineerers Spring Conference*, Seoul, Korea, 31 -32