

개량혼합토를 이용한 폐기물 매립지 차수층의 중금속 고정능력에 관한 연구

노 회 정¹ · 이 재 영^{2*}

¹국립환경연구원 토양환경과, ²서울시립대학교 환경공학부

A study on the fixation of heavy metals with modified soils in the landfill liner

¹Hoe-Jung Noh, ²Jai-Young Lee

¹*Soil Environment Division, National Institute of Environmental Research*

²*Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul*

ABSTRACT

The authors selected the modified soil method, and then performed the geotechnical and environmental laboratory test, and evaluated whether the modified soil liner could be accepted as a barrier layer in landfill.

Unlike the results of the natural soil(CL), those of the hydraulic conductivity test of stabilized soil met the standard value. According to these results, the optimal mixing ratio of a mixture(cement : bentonite : stabilizing agent) was 90:60:1 with mass ratio(kg) for 1m³ with soil, and it was possible to use poor quality bentonite, B② because of a little difference from results with high quality bentonite, B①.

The Cation Exchange Capacity(CEC) of the modified soil was increased about 1.5 times compared with the natural soil; however, the change of CEC with a sort of additives was not detected. In order to observe the change of the chemical components and crystal structures, the natural and the modified soils with the sorts of additives were measured by the XRF(X-Ray Flourescence Spectrometer) and SEM, but there was no significant change.

* Corresponding author : leejy@uos.ac.kr

원고접수일 : 2002. 3. 2 게재승인일 : 2002. 5.27

The artificial leachate with the heavy metals (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} 100mg/L) was passed through the natural soil and modified soils in columns. In the natural soil, Cd^{2+} and Zn^{2+} were identified, simultaneously the pH of outflow was lower, and then came to the breakthrough point. The removal efficiency of the natural soil was showed in order of following: $Pb^{2+} \approx Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$. On the other hand, modified soils were not showed the breakthrough condition like the result of the natural soil. The modified soil with the lower quality bentonite, B②(column3) was more stable with respect to chemical attack than that with the higher bentonite, B①(column2) because the change range of outflow pH in column3 was less than that of outflow pH in column2. In addition, the case of adding the stabilizing agent(column4) was markedly showed the phenomena.

Key Words: Barrier layer, Bentonite, Cement, Column, Heavy metal, Hydraulic Conductivity, Landfill, pH, Modified soil

요약문

본 연구에서는 점토차수재의 대체물질로서 매립지 현장토에 첨가재(시멘트, 벤토나이트 고화제)를 혼합하는 방법인 개량혼합토 공법을 대상으로 하여, 토목·환경적인 연구로서 차수/강도 효과 및 회분식/컬럼식 테스트를 통한 중금속의 고정능력에 관한 평가를 수행하였다.

지반공학적 연구(투수계수/압축실험)를 실시한 결과, CL 계열의 현장토(CL)에 첨가재(시멘트, 벤토나이트: 팽윤도로 구분하여 고품위 벤토나이트 B①, 저품위 벤토나이트 B②, 고화제)를 혼합함으로써 폐기물 매립지의 법적 기준($1 \times 10\text{-}7\text{cm/sec}$ 이하)을 만족하였다. 또한 개량혼합토 제조시 시멘트:벤토나이트:고화제=90:60:1의 비율이 가장 적합하였으며, 팽윤도로 구별된 저품위 벤토나이트(B②)의 사용가능성을 보여주었다.

첨가재의 종류에 따른 개량혼합토(column2, 3, 4)의 양이온교환능력(Cation Exchange Capacity, CEC) 측정 결과, 현장토와 비교하여 약 1.5배 정도 CEC가 증가한 것을 확인할 수 있었으나, 첨가재에 따른 큰 차이점은 보이지 않았다. 화학구성과 결정구조의 변화를 살펴보기 위한 XRF와 SEM 측정 결과, 첨가재에 따른 고화토의 결정구조의 큰 변화 양상을 확인할 수 없었다.

컬럼을 사용하여 중금속(Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} 100mg/L)을 혼합한 인공침출수를 현장토(column1)와 첨가재의 종류에 따른 개량혼합토(column2, 3, 4)에 적용시킨 결과, 현장토의 경우, 유출수의 pH가 감소됨과 동시에 Cd^{2+} 와 Zn^{2+} 가 유출되어 거의 파과점까지 도달하였으며, 현장토의 중금속 고정능력은 $Pb^{2+} \approx Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$ 순으로 나타났다. 개량혼합토의 경우, 동일한 시점에서 column1에서 보여졌던 파과 현상은 나타나지 않았고, 팽윤도가 높은 B①(column2)보다 저급의 B②(column3)를 첨가한 개량혼합토가 화학적으로 훨씬 안정함을 보여주었으며, 시멘트, 벤토나이트와 함께 보조적으로 고화제(column4)를 첨가했을 경우, 이러한 결과가 한층 더 두드러진다.

주제어 : 차수층, 벤토나이트, 시멘트, 점토, 컬럼, 중금속, 수리학적 전도도, 매립지, pH, 개량혼합토

I. 서 론

일반적으로 매립지의 차수층으로 사용되는 물질로는

점토(Clay), Geomembrane, Geosynthetic Clay Liner(GCL), 또는 이들의 조합으로 나눌 수 있으며, 특히 다짐점토층은 두께에 대한 안전성(국내 폐기물관

리범상 50cm~1m)과 점토물질의 물리화학적 성질로 인한 오염물의 자연효과로 인하여 국내외 많은 매립지에서 많이 적용되고 있다. 그러나 국내 여건상 매립 공간뿐만 아니라 차수재로 사용될 양질의 점토 또한 부족하기 때문에 토목건설에서 연약지반의 고결을 위해 적용되는 토사-벤토나이트공법, 시멘트계 혼합공법 등을 응용, 매립장 부지 내 현장토에 여러 가지 첨가재들을 혼합하여 사용하는 사례가 늘고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 점토차수재의 대체물질로서 매립지 현장토에 첨가재(시멘트, 벤토나이트 고화제)를 혼합하는 방법인 개량혼합토 공법을 대상으로 하여, 토목·환경적인 연구로서 차수/강도 효과 및 회분식/컬럼식 테스트를 통한 중금속의 고정능력에 관한 평가를 수행하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 현장토 및 첨가재

본 연구에서 사용된 현장토는 한국산업규격(Korean Industrial Standards)을 기본으로 토질 실험을 실시한 결과 점토계열(CL)로 판별되었으며, 그 결과는 Table 1에 나타내었다.

개량혼합토를 제조하기 위하여 시멘트, 벤토나이트, 고화제가 첨가되며, 시멘트는 강도증진 효과가 큰 공장제품의 보통 Portland 시멘트를^{1,2)}, 첨가제는 실리카계열의 것을 사용하였다. 벤토나이트는 소성적/점성적이고 친수성이 강하여 토질공학적 지반개량재료로 많이 사용되며 보통 팽윤도에 따라 등급이 분류되므로^{3,4)}, 본 연구에서는 팽윤도에 따라 B①(15~20cc/2g), B②(5cc/2g)로 나누어 그 영향을 평가하였다.

2.2 개량혼합토 제조 및 투수계수/압축강도

개량혼합토를 제조하기 위한 현장토와 첨가제의 배합방법은 Fig. 1과 같으며, 투수계수와 압축강도 실험은 혼합재 종류, 배합비율, 양생기간(Table 2)에 따라 각각 KS F2322와 KS F2314 방법으로 측정하였다.

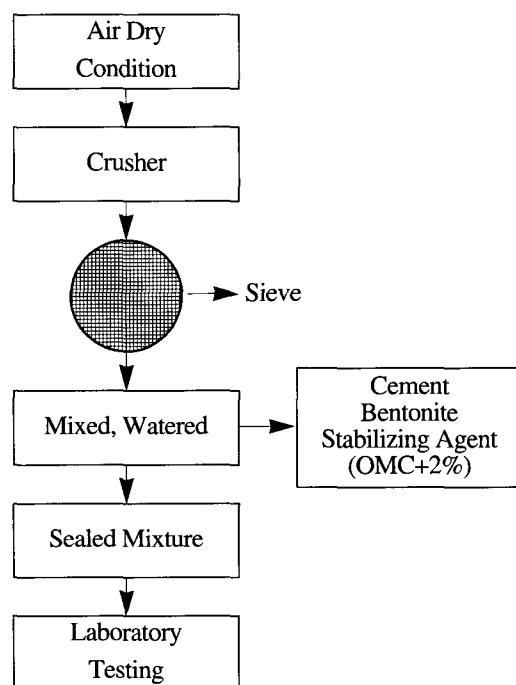


Fig. 1. The schematic flow chart of the production of modified soil

2.3 개량혼합토의 오염물 고정능력 실험

오염물의 고정능력을 평가하기 위하여 컬럼식 중금속 고정 시험기를 자체 제작하여 중금속 Pb²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ 각각 약 100mg/L으로 제조한 인공오염물을 이

Table 1. The Geotechnical Basic Properties of Natural Soil(CL)

Soil Group	Specific Gravity	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Particle-Size Analysis			
				D ₁₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	Percent Passing the No.200 Sieve (%)	Cu
CL	2.67	30.5	21.6	0.0035	0.047	72.21	13.43

Table 2. The Classification of Modified Soil with Mixing Method

Soil ¹	Bentonite ² *	The Mixing Ratio(kg/m ²)***	The Curing Time(day)
CL	B①	60:40:1	7
	B②	120:40:1	14
		90:60:1	28

* Classified by United Classification System

** Swelling Grade (B①; 10~15cc/2g, B②; 5cc/2g)

*** Cement:Bentonite:Stabilizing Agent

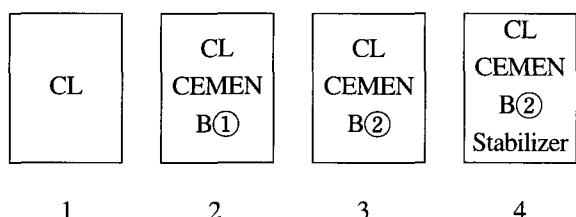


Fig. 2. The composition of modified soils with additives

용, 첨가재 종류별 개량혼합토의 장기간 중금속 고정 특성을 도출하고자 하였다.

대상물질은 현장토 CL(이하 1이라 명명)과 첨가재의 종류를 달리한 고화토 3종류(이하 순서대로 2, 3, 4라 명명, 시멘트, 벤토나이트, 고화제의 혼합비는 90:60:1로 동일)이고, 제작된 컬럼에 표준다짐방법으로 다짐되어 14일 동안 양생시켜 충분한 고화반응을 유도하였다. 첨가재 종류에 따른 개량혼합토의 분류는 Fig. 2에 나타내었다.

컬럼은 Fig. 3에서 보는 바와 같이, 내경 5cm, 높이 10cm의 몰드와 2L 용량의 용액 저장통으로 구성되며, 유체의 흐름 방향을 쉽게 변경할 수 있도록 설계되었다. 오염물의 기기에 대한 반응성을 배제하고 실험오차를 줄이기 위해 모든 재질은 SUS로 하였으며, 관은 테프론을 사용하였다. 컬럼 상하에 3.5mm SUS 재질의 다공성 여재를 두었으며, 탈이온수가 채워진 용액 저장통에 반응성이 없는 질소가스로 가압하여 탈이온수를 통과시켜 충분히 포화시킨 후, 용액 저

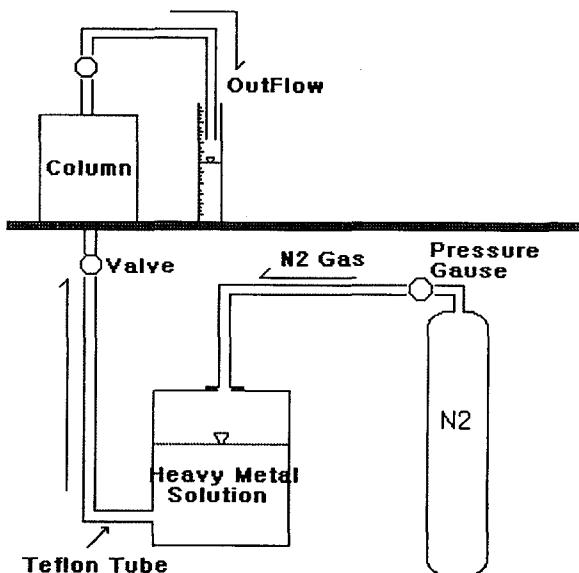


Fig. 3. The schematic diagram of the column tester

장통에 위에 언급한 인공오염용액으로 전환하여 실험을 실시하였으며, 유출액은 산처리 후 ICP로 위의 중금속 항목을 측정하였다.

또한 각 컬럼과 동일한 방법으로 첨가재를 혼합하고, 다짐한 후 14일 양생시킨 4종류의 다짐시료를 비교하기 위하여 염화바륨법과 암모늄아세테이트법을 이용한 양이온교환능력을 측정하였으며, X선 형광분석기(S-2700, HITACHI)와 전자주사현미경(ARL 940, ARL APPLIED LABORATORIES SA)을 통하여 그 변화 양상을 살펴보았다.

3. 실험결과

3.1 개량혼합토의 투수계수 및 압축강도

현장토 CL의 투수계수는 2.23×10^{-6} cm/sec로서, 기준치 1×10^{-7} cm/sec에 미치지 못했으나 첨가재를 혼합한 개량혼합토의 경우, Table 3에서 보는 바와 같이, 모든 배합조건에서 기준치를 만족하였으며, 배합비 90:60:1의 경우 가장 낮은 투수계수 결과를 보여주었다. 팽윤도가 다른 벤토나이트 첨가에 따라 투수계수와 압축강도에 차이를 보이고 있으나, 그 차이가 크지

Table 3. The Hydraulic Conductivity(Rigid-wall Permeameter) and Compressive Strength with the Modified Soil in Different Bentonites, Mixing Ratios and Curing Times

Soil	Bentonite	Mixing Ratio***	Hydraulic Conductivity(cm/sec)			Compressive Strength(kg/cm ²)		
			7days	14days	28days	7days	14days	28days
CL	B①*	60 : 40 : 1	8.03×10^{-8}	7.38×10^{-8}	7.91×10^{-8}	10.3	12.3	14.6
		90 : 60 : 1	1.24×10^{-8}	1.42×10^{-8}	1.29×10^{-8}	24.2	25.9	28.2
		120 : 40 : 1	4.55×10^{-8}	3.95×10^{-8}	3.55×10^{-8}	36.7	40.2	45.2
	B②**	60 : 40 : 1	9.31×10^{-8}	9.74×10^{-8}	9.79×10^{-8}	11.9	12.4	14.2
		90 : 60 : 1	5.47×10^{-8}	5.10×10^{-8}	5.24×10^{-8}	24.8	26.7	28.3
		120 : 40 : 1	6.24×10^{-8}	5.44×10^{-8}	5.97×10^{-8}	33.4	38.1	42.9

* Swelling Grade; B① 10-15cc/2g

** Swelling Grade; B② 5cc/g

*** Cement:Bentonite:Stabilizing Agent, kg/m³

않으므로 고화토의 재조시 저품위 벤토나이트의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

3.2 개량혼합토의 양이온교환능력

Fig. 4, Fig. 5는 각각 BaCl₂법과 NH₄OAc법에 의해 측정된 첨가재에 따른 개량혼합토의 양이온교환능력 측정 결과이다. 현장토(column1)에 비해 첨가재를 첨가한 column2~4의 개량혼합토의 경우, 시멘트의 영향으로 인하여 교환가능한 Ca²⁺의 양이 5배 이상 증가한 것으로 보인다. 현장토와 첨가재의 실험결과와 마찬가지로, 평윤도가 다른 벤토나이트인 B①과 B②

를 각각 첨가한 column2와 3의 경우, 다른 양이온들은 비슷한 결과를 나타냈으나, column2는 Na⁺이, column3의 경우는 Ca²⁺이 좀더 높게 측정되었으며, 이는 벤토나이트의 종류에 따른 차이로 생각된다. NH₄OAc법에 의해 측정된 결과, 현장토에 첨가재를 첨가함으로써 약 1.5배정도 CEC가 증가하였으며, B①을 첨가한 개량혼합토가 가장 높은 결과를 나타내었다. 그러나 Na 계열의 벤토나이트는 Ca 계열의 벤토나이트에 비해 화학물질이나 폐기물을 침출수에 접촉과 같은 화학반응에는 비교적 약하다는 단점이 있기 때문에^{5,6,7}, 이후 인공침출수의 접촉 실험을 통하여 구체적

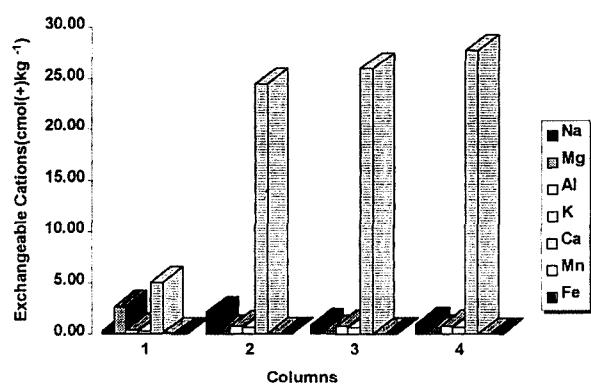


Fig. 4. The exchangeable cations in the modified soils with different additives(by BaCl₂)

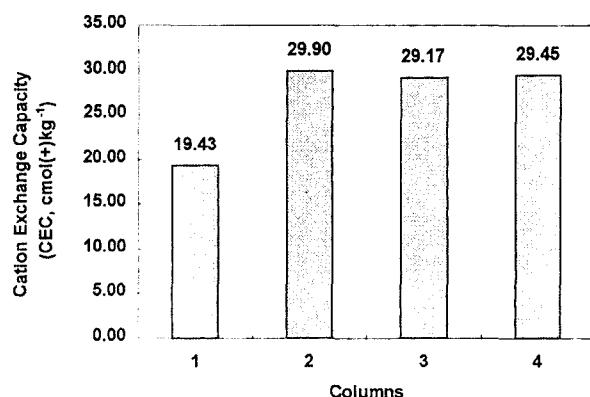


Fig. 5. The cation-exchange capacity(CEC) of the modified soils with different additives(by NH₄OAc)

인 연구가 요구될 것이다. 또한 고화제의 첨가 유무에 따른 column3과 4의 CEC 차이는 크게 나타나지 않았다.

3.3 개량혼합토의 SEM/XRF 결과

컬럼테스트의 예비실험으로서 첨가재의 혼합에 따른 토양의 화학구성과 결정구조의 변화를 살펴보기 위하여, XRF와 SEM으로 측정해 본 결과를 Fig. 6, Fig. 7에 각각 나타내었다.

Fig. 6에서 현장토(column1)와 비교해 볼 때, 첨가재의 첨가로 인하여 모든 개량혼합토(column2: CL1+시멘트+B①, column3: CL1+시멘트+B②, column4: CL1+시멘트+B②+고화제) 성분 중 CaO 함량이 7배정도 증가한 것을 제외하고는 그 변화가 거의 미비하였음을 알 수 있었다. 이는 개량혼합토 자체에서도 현장토의 함량이 90% 이상 차지하고 있기 때문으로 여겨지며, 이 결과를 통해 현장토 자체의 화학성분 또한 중요한 분률을 차지하는 것으로 고려된다.

SEM 결과 또한 XRF 결과와 마찬가지로 크기나 결정 모양에 있어 그리 큰 차이를 보여주지 않고 있다 (Fig. 7). 이렇게 벤투나이트, 시멘트, 반응수화물 등 의 구분이 용이하지 않은 것은 이들이 판상의 불규칙 다각형구조를 갖기 때문이라고 사료된다.

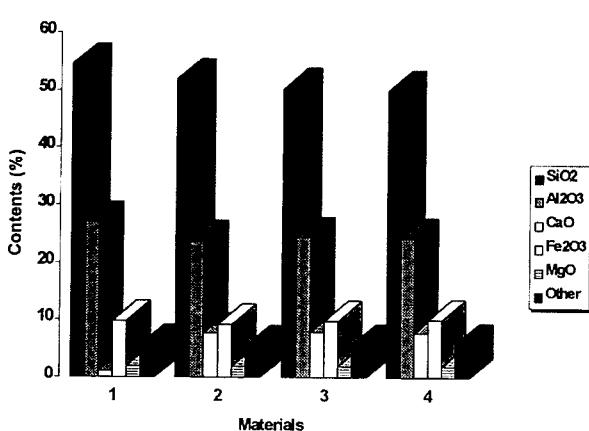


Fig. 6. The results of XRF with the natural soil(1) and modified soils(2, 3, 4)

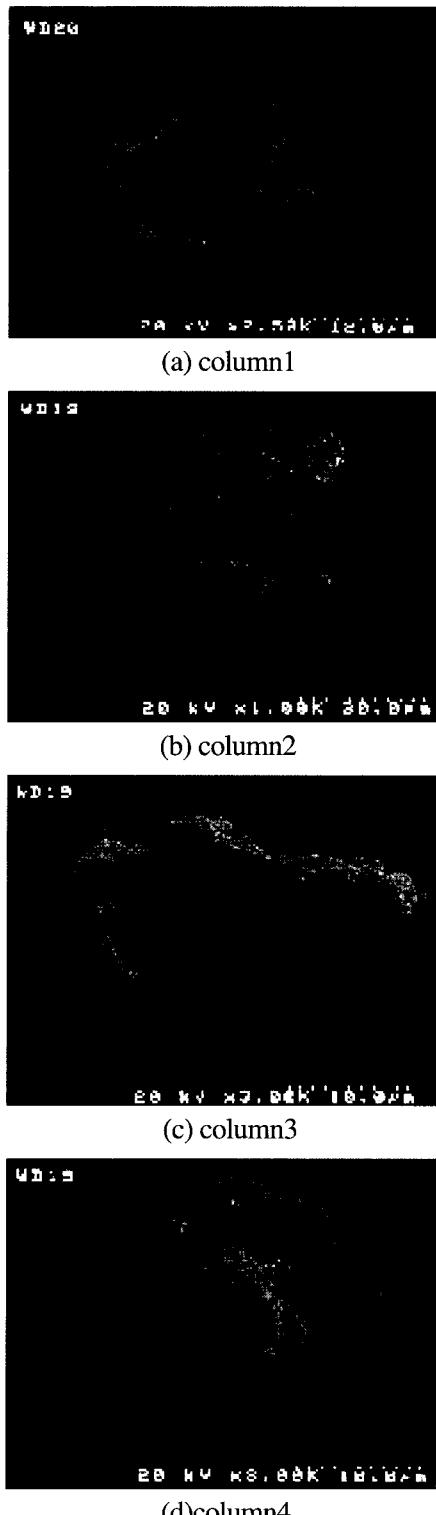


Fig. 7. The results of SEM with the natural soil and modified soils

3.4 개량혼합토의 중금속 고정능력 결과

100ppm의 Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} 를 혼합하여 제조한 인공침출수(pH 3.7~4.0)를 현장토와 첨가재를 달리한 개량혼합토 컬럼에 통과된 유출액의 중금속 농도와 pH 결과를 Fig. 8에서 나타내고 있다.

각 그림에서 x축은 pore volume을, 왼쪽 y축은 유출농도 C/C_0 를 유입농도 C_0 로 나눈 값을 나타내고 있다. 여기서 pore volume은 현장토와 개량혼합토 자체의 물성과 이들을 컬럼에 다진 후 무게와 부피를 측정한 후 계산하였으며, 현장토와 개량혼합토의 1 pore volume은 각각 약 132mL, 135mL으로 도출되었다. 오른쪽 y축은 유출액의 pH를 나타낸 것으로서, 중금속의 존재형태는 토양의 pH, 유기물, 토양의 염기포화도 등에 의해 영향을 받고 있으며, pH가 높을 경우 더 많은 양의 중금속이 고정될 수 있다^{8,9,10,11,12)}는 기준

의 논문을 통해 실험 진행동안 pH변화와 중금속과의 관계를 유추해 보고자 하였다.

컬럼 실험을 통한 현장토와 서로 다른 첨가재에 따른 개량혼합토의 중금속 고정능력에 대한 실험결과는 다음과 같다.

column1(CL)의 경우, 실험 진행 초기에는 어떠한 중금속도 유출되지 않고 있으며, pH 또한 토양의 원충작용(CL; pH 6.52)으로 인하여 유입수의 pH보다 높은 pH 5~6 정도 유지하였다. 그러나 실험이 계속 진행됨에 따라 유출수의 pH가 점차 감소됨과 동시에 Cd^{2+} 과 Zn^{2+} 이 유출되기 시작하였다(약 10 pore volumes). Pb^{2+} 과 Cu^{2+} 는 거의 30 pore volumes가 될 때까지 유출되지 않았으며, Cd^{2+} , Zn^{2+} 은 거의 파과 점까지 도달하였다. CL의 중금속 고정능력은 $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+}$ 순이며, 이는 중금속 혼합용액을 이용한 회분식 실험 결과와 같다.

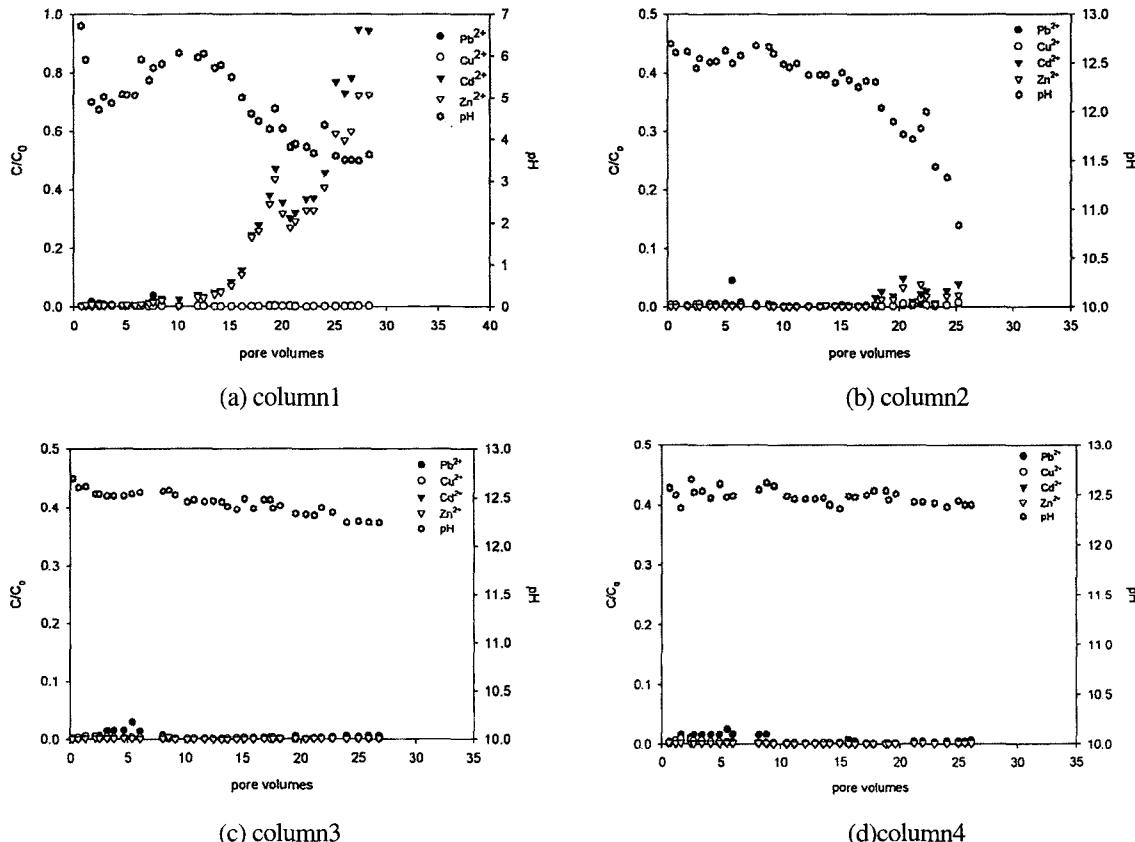


Fig. 8. The fixation of heavy metals with the natural soil and modified soils in columns

column2(CL+시멘트+B①)의 경우, 15 pore volumes까지는 일정한 pH(약 12.5)를 유지하고 있었으나, 그 이후부터 다른 개량혼합토 column과 비교할 때, pH 감소가 눈에 띄게 보여지고 있으며 이에 상응하여 column1과 마찬가지로 Cd²⁺, Zn²⁺이 유출되었다.

column3(CL+시멘트+B②)과 column4(CL+시멘트+B②+고화제)의 경우, 다른 column들과 비교해 볼 때, 어떠한 중금속도 유출되지 않았으며, 고화제를 첨가한 column4의 경우, column3에 비해 pH가 좀더 안정적으로 유지하고 있다. 이는 고화제의 역할이 강도 증진뿐만 아니라, 개량혼합토의 화학물질에 대한 안정성 또한 유지시켜줄 수 있는 것으로 생각할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐기물 매립지의 차수층에 널리 사용되는 점토의 대체물질로서 매립지 현장토에 따라 첨가재(시멘트, 벤토나이트 고화제)의 혼합비율을 달리하여 혼합하는 방법인 개량혼합토 공법을 대상으로 하여, 토목·환경적인 연구로서 개량혼합토의 차수/강도 효과 및 오염물 중 중금속의 고정능력을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 현장토 CL에 첨가재(시멘트, 벤토나이트, 고화제)를 혼합한 개량혼합토의 지반공학적 연구(투수계수/압축실험)를 통하여 폐기물 매립지의 차수층 적용성에 대한 가능성을 인정받을 수 있었다. 그리고 개량 혼합토 제조시, 시멘트:벤토나이트:고화제=90:60:1의 비율이 가장 적합하며, 팽윤도로 구별된 저품위 벤토나이트의 사용가능성을 보여주었다.

2. 컬럼을 통한 개량혼합토의 중금속 고정능력 테스트의 예비실험으로서 첨가재의 종류에 따른 개량혼합토(column2, 3, 4)의 양이온교환능력 측정 결과, 개량혼합토는 현장토와 비교하여 약 1.5배정도 CEC가 증가한 것을 확인할 수 있었으나, 첨가재 종류에 따른 차이점은 크지 않았다. 화학구성과 결정구조의 변화를 살펴보기 위한 XRF와 SEM 측정 결과, 첨가재에 따른 개량혼합토의 결정구조에 큰 변화 양상을 확인할

수 없었으며, 개량혼합토 제조시 공통의 첨가재로 사용된 시멘트로 인하여 현장토를 제외한 모든 개량혼합토에서 CaO 함량만이 약 8% 정도 상승하였다. 이는 현장토가 고화토의 90% 이상(중량비 기준)의 비중을 차지하기 때문인 것으로 사료되며, 개량혼합토 제조시 현장토 자체의 물성 또한 매우 중요한 작용을 할 것이라고 판단된다.

3. 컬럼을 사용하여 중금속(Pb²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ 100mg/L)을 혼합한 인공침출수를 현장토와 첨가재의 종류에 따른 개량혼합토(column2, 3, 4)에 적용시킨 결과, 현장토의 경우, 약 15 pore volumes 이후 유출수의 pH가 감소되었으며, 이에 수반하여 Cd²⁺와 Zn²⁺가 유출되어 30 pore volumes일 때 거의 폴라제까지 도달하였다. 현장토의 중금속 고정능력은 Pb²⁺ > Cu²⁺ > Zn²⁺ > Cd²⁺ 순이며, 이는 중금속 혼합용액을 이용한 회분식 실험 결과와 같은 양상을 보여주고 있다. 개량혼합토의 경우, 동일한 시점에서 column1에서 보여졌던 폴라제 현상은 나타나지 않았으며, 팽윤도가 높은 B①(column2)보다 저급의 B②(column3)를 첨가했을 때, 오염물에 대하여 화학적으로 훨씬 안정함을 보여 주었으며, 시멘트, 벤토나이트와 함께 보조적으로 고화제(column4)를 첨가했을 경우, 이러한 결과가 한층 더 두드러진다.

4. 이상의 결과를 통하여, 현장토에 첨가재를 첨가함으로써 개량혼합토의 양이온교환능력의 상승과 아울러 높은 pH로 인해 투수계수의 감소와 더불어 오염물로서 중금속의 고정능력 또한 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, 팽윤도가 높은 B①보다 저급의 B②를 첨가한 개량혼합토가 오염물에 대하여 화학적으로 훨씬 안정함을 보여 주었으며, 이 결과는 투수계수와 압축강도의 결과와 마찬가지로 개량혼합토에 팽윤도가 낮은 저급의 벤토나이트를 적용시킴으로써 시공단가를 저감시킬 수 있다는 근거로 제시될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 김창은, 이승규, 방완근, 1991, “시멘트를 이용한

- 중금속 이온의 고정화에 관한 연구”, 한국폐기물 학회지, 제8권 제1호, pp.53-64
2. 김용진, 1994, “자경성 폐기물을 이용한 중금속 함유 슬러지의 고형화에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문
 3. Mielenz, R. C., Schieltz, N. C. and King, M. E., 1955, “Effect of Exchangeable Cation on X-ray Diffraction Patterns and Thermal Behaviour of Montmorillonite Clay”, *Clays Clay Miner.*, 3, pp.146-173
 4. 임건택, 1998, “국내산 벤토나이트의 차수재로서의 공학적 특성”, 청주대학교 박사학위논문
 5. Center for Environmental Research Information Office of Research and Development, 1989, *Seminar Publication: Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure*, EPA/625/4-89/022, USEPA, Cincinnati, OH 45268, pp.11-16
 6. Sharma, Hari D. et. al., 1994, *Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills: Design and Evaluation*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp.60-223
 7. Gleason, M. H., Daniel, D. E., and Eykhot, G. R., 1997, “Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications”, *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, Vol. 123, No. 5, pp.438-445
 8. Anderson, P. R. and Christensen, T. H., 1988, “Distribution Coefficients of Cd, Co, Ni, and Zn in Soils”, *J. Soil Sci.*, 39, pp.15-22
 9. Basta, N. T. and Tabatabai, M. A., 1992, “Effect of Cropping Systems on Adsorption of Metals by Soils, II . Effect of pH”, *Soil Science*, Vol. 153, No. 3, pp.195-204
 10. Bunzl, K., Schmidt, W. and Sansoni, B., 1976, “Kinetics of Ion Exchange in Soil Organic Matter”, IV . Adsorption and Desorption of Pb²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺, and Ca²⁺ by Peat”, *J. Soil Sci.*, 27, pp.32-41
 11. Tsau-Don Tsai and P. Aarne Vesilind, 1998, “A New Landfill Liner to Reduce Ground-Water Contamination from Heavy Metals”, *J. of Environ. Eng.*, Vol. 124, No. 11, pp.1061-1065
 12. Tyler, L. D. and McBride, M. B., 1982, “Mobility and Extractability of Cadmium, Copper, Nickel, and Zinc in Organic and Mineral Soil Columns”, *Soil Sci.*, 134, pp.198-205