

위생매립지 차수재로써의 부산석회 이용에 관한 연구

구자공·도남영·임재신·이상민*·김남돈**

한국과학기술원 토목공학과, *한국과학기술연구원 수질환경연구센터,

**동양화학공업(주) 환경팀

A study on using the lime sludge as a sanitary landfill liner

J. K. Koo, N. Y. Dho, J. S. Lim, S. M. Lee*, N. D. Kim**

*Dep. Civil Eng., KAIST, TaeJon, Korea., *Water Env. Res. Center, KIST, Seoul, Korea.,*

***Env. Division, Oriental Chemical Industries, Incheon, Korea.*

ABSTRACT

In this study, to examine the applicability of the lime sludge as a landfill liner, 1) the geotechnical characteristics of sludge, 2) the characteristics of migrations of contaminants, and 3) the characteristic of leaching in the batch leaching test are investigated.

As a result, the hydraulic conductivity(K) of the lime sludge was found out to have 10 times lower hydraulic conductivity than the maximum allowable hydraulic conductivity of the liner. Retardations of heavy metals(Cu, Pb) were found out to be higher than that of organic(phenol) due to the high pH(>11.0) of the lime sludge. As a result of the leaching test, the concentrations of Pb and Cu were found to be close to allowable limitation, so that they need to be kept in constant watch.

Key words : Inorganic waste sludge, geotechnical characteristic, contaminant migration, leaching test, hydraulic conductivity

요 약 문

본 연구에서는 위생매립지 차수재로써 부산석회의 이용방안을 검토하기 위하여 1) 부산석회의 지반 공학적 특성, 2) 오염물질 거동특성, 그리고 3) 용출특성을 살펴보았다. 연구결과 부산석회의 투수계수는 차수재의 허용 최대 투수계수(10^{-7} cm/s)보다 약 10배정도 낮은 투수계수를 보였다. 유기물(폐놀)과 중금속(Cu, Pb)에 대한 지연효과는 부산석회의 높은 pH(> 11)로 인해 중금속에 대한 지연효과가 더 큰 것으로 나타났다. 용출실험 결과 비록 규제치를 상회하지는 않았지만, Pb와 Cd이 제한 기준치에 근접한 농도를 나타내어 지속적인 관찰이 요구되는 물질로 나타났다.

주제어 : 부산석회, 지반공학적 특성, 오염물질 거동특성, 용출실험, 투수계수

1. 서 론

인구 증가와 산업 발달에 따른 폐기물 발생량의 증가로 인해 매립지의 확보가 점차 어려워지고 있는 실정에서 새롭게 만들어지는 매립지의 사용 연한 증가와 매립으로 인한 주변지역 오염을 최소화 하는 방안으로써 폐기물 재활용 방안은 적극적으로 고려되어야 한다.

부산석회는 석회석, 소금, 물을 반응(솔베이법)시켜 소다회(Na_2CO_3)를 생산하고 발생하는 무기성 슬러지로 연간 총발생량은 12만 톤이고, 91년 이전 침전지에서 침강, 분리시킨(라군법) 침전 슬러지 약 150만 톤과 92년 이후 가압 탈수공정을 거친 탈수 케이크 약 5만 톤이 야적 보관되고 있다. 부산석회의 재활용 방안으로는 흙과의 혼합에 의한 지반강화재¹⁾, 산성토양에 대한 토양개량제²⁾, 그리고 석회질 비료³⁾ 등 다양한 방향으로 진행되어 왔다. 이러한 무기성 슬러지의 경우 특정한 발생원으로부터 배출되며, 발생원 마다 거의 일정한 성상을 가지기 때문에 보다 다양한 재활용 기술의 개발과 같은 폐기물을 처리하면서 새로운 자원을 확보하려는 연구 노력이 절실히 요구되고 있다³⁾.

본 연구에서는 부산석회의 재활용 방안으로써

대부분 세립토⁴⁾로 구성되어 있는 부산석회의 특성을 고려한 위생매립지 차수재로의 이용방안을 검토해보고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 부산석회의 지반 공학적 특성, 오염물질 거동 특성, 그리고 용출실험을 통한 유해물질 용출특성을 살펴보고 이러한 결과를 바탕으로 부산석회의 위생매립지 차수재로써의 적절성을 검증하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 연구에 사용된 부산석회는 인천에 위치한 D 회사에서 소다회(Na_2CO_3)를 생산하는 과정에서 발생하는 부산물로써 대용량의 침전지에서 침강, 분리시킨 침전지 슬러지, 가압탈수공정을 거친 탈수케이크, 그리고 석회석이 노속에서 산화되고 남은 드래그로 구분될 수 있다. Table 1은 부산석회의 물리적인 특징을 나타내었다. Table 2는 부산석회의 주요성분 및 화학적 특성을 보여주고 있다.

Table 1. Physical characteristics of the lime sludge⁵⁾

kinds of sludge		Physical characteristics of the waste
Total generation	<u>12 mil. ton/yr.</u> Quantity of dumped waste	
Drag	50 mil. ton	<ul style="list-style-type: none"> ● residue of limestone after oxidation. ● looks like sand in appearance. ● grey color.
Dewatered cake	5 mil. ton	<ul style="list-style-type: none"> ● residue of limestone after the reaction with NaCl dissolved in the seawater; mostly lime(CaO). ● nearly white color. ● fine particle.
sedimented sludge	150 mil. ton	<ul style="list-style-type: none"> ● the same material with dewatered cake. ● settling material in lagoon.

Table 2. Chemical compositions of the lime sludge⁵⁾

compositions(unit : wt %)	Dewatered cake	settling sludge
CaCO ₃	23	13
CaO	8	6
MgO	8	4
CaCl ₂	3	9
CaSO ₄	5	6
Al ₂ O ₃ /Fe ₂ CO ₃	3	5
other(sand)	7	5
water content	43	53
pH	11.96	11.30
exchangeble cation(meq/100g)		
K ⁺	3.7	2.1
Ca ²⁺	128	118
Mg ²⁺	48	35
Na ⁺	93.4	24.6

2.2 실험방법

위생매립지 차수재로써 부산석회를 활용하기 위해서는 슬러지의 수리전도도(hydraulic conductivity, K)가 10^{-7}cm/s인 조건을 만족해야

한다. 이외에도 Table 3에 나타난 바와 같은 지반 공학적인 측면⁶⁾, 침출수에 의한 주변지역의 오염정도를 파악할 수 있는 오염물질 거동특성의 규명과 무기성 슬러지내의 유해물질 용출특성이 조사되어야 한다.

Table 3. Required conditions for hydraulic conductivity of liner⁶⁾

Percent by dry weight passing sieve number 200	≥ 39 to 50 percent
Plastic index	≥ 7 to 10 percent
Percent of gravel(percent by dry unit weight retained on a No. 4 sieve)	≤ 20 to 50 percent
Maximum particle size	25 to 50 mm

2.2.1 지반 공학적 특성실험

입도분포시험(KSF-2302), 액성한계 시험(KSF-2303), 소성한계 시험(KSF-2304), 다짐시험(KSF-2312), 일축압축시험(KSF-2314) 그리고 삼축압축시험기를 이용한 수리전도도 측정 실험을 수행하였다.

(1) 삼축압축시험기를 이용한 수리전도도 측정 실험

부산석회가 매립지의 차수재로 이용되었을 경우 쓰레기 하중으로 인한 압밀(consolidation)과 수리전도도(hydraulic conductivity, K)의 변화가 있을 수 있다. 이러한 점을 고려하여 삼축압축시험기를 이용하여 수리전도도 실험을 수행하였다. 이때 등방향 구속응력은 수도권 매립지 설계하중(0.9 ton/m²) 근거로 하여 계산된 응력(2.4 kg/cm²)을 가하였다. Carpenter⁶⁾ 등은 실내 실험시 수리전도도에 영향을 주는 인자에 대한 연구를 근거로 하여 시료의 직경 대 높이 비를 0.5 -1.0사이를 유지시킬 것과, 시료의 포화정도를 나타내는 B값(B=Δu/Δσ_v)은 0.94이상의 값을 요구한다고 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 시료의 크기를 직경 3.7 cm, 높이 4.4 cm로 제작하였고, 약 일주일간 포화시킨 후 B 값이 0.94 이상에 도달한 후 수리전도도 실험을 수행하였다.

2.2.2 오염물질 거동 특성 실험

오염물질의 거동에 영향을 미치는 가장 중요한 기작(mechanism)으로는 이류현상(advection), 수리동역학적분산(hydrodynamic dispersion),

그리고 지연현상(retardation)이 있다. 매우 작은 수리전도도(<10⁻⁷ cm/s)를 갖는 매립지 차수재의 경우 분산(dispersion)이나 이류(advection)에 의한 오염물질 이동 현상에 비해 확산(diffusion)에 의한 이동과 이를 저지하는 물리화학적 흡착에 의한 지연현상이 오염물질의 거동에 지배적인 기작(mechanism)이다^{10), 11), 12), 14)}. 오염물질(Pb, Cu, 페놀)의 흡착 및 확산특성에 대한 연구는 부산석회를 매립지 차수재로 이용하기 위해 필수적으로 요구된다. 실내 등은 흡착 실험을 통해 얻을 수 있는 결과는 일반적으로 잘 알려진 Langmuir, Freundlich 또는 선형 흡착모델을 이용해 보정함으로써 식(1)에서 중금속 오염물질의 이동속도를 감소시키는 지연지수(retardation factor, R)를 구하는데 이용할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_{app} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - \frac{u_s}{R} \frac{\partial c}{\partial z} \quad (1)$$

여기서, c = concentration of the solute in the liquid(ML⁻³)

D_{app}(=D_h / R) = apparent dispersion coefficient

D_h=hydrodynamic dispersion in the direction of transport(L²T⁻²)

u_s = seepage velocity(LT⁻¹)

R = retardation factor

$$= 1 + \frac{\rho_b}{n} K_p$$

ρ_b= dry bulk density of the soil(ML⁻³)

n = porosity of the soil
 K_p = partitioning coefficient

(1) 등온흡착실험

풍건된 부산석회를 #40 체를 통과 시킨 후 증류수로 세척하여 멸균(autoclaving)한 후 다시 dry oven으로 150°C에서 건조하여 사용하였다. 부산석회에 대한 납(Pb), 구리(Cu), 그리고 페놀 각각의 오염물에 대한 등온흡착특성을 보기 위해 2g의 부산석회를 30 ml glass vial에 취한 후 0, 5, 10,

15, 20, 25 mg/L의 각 오염물질 20 ml를 glass vial에 주입하였다. 25°C에서 18시간 동안 혼합 후 15 ml씩 분취하여 300rpm으로 15분간 원심 분리하여 그 상등 액을 검액으로 사용하여 기체 크로마토그래피(Gas Chromatography)와 원자흡수분광법(Automic Absorption Spectrophotometer)로 분석하였다. Table 4와 Table 5는 각각 기체 크로마토그래피와 원자흡수분광법의 분석조건이다.

Table 4. Operating conditions of the GC-FID

	Phenol
Solvent	methylene chloride
Column	HP-5(25m × 0.32mm × 0.52um film thickness)
Detector	FID
Oven Temperature	100°C(2min) -- 7°C/min -- 250°C(5min)
Injector Temperature	200°C
Detector Temperature	300°C
Carrier gas N2	N2(99.999%)
GC Mode	Hewlett Packard 5890 II

Table 5. Standard conditions of AAS analyses

element	wavelength (mm)	HC lamp current (mA)	slit width (nm)	type of flame	Fuel gas flow rate (l/min)
Cu	217.9	4	0.1	air-C ₂ H ₂	2.6
Pb	283.3	5	0.1	air-C ₂ H ₂	2.0

(2) 실내 주상 실험

(가) 실험장치

시료를 Fig. 1과 같이 직경 7cm, 길이 10cm의 크기로 제작한 칼럼(column)에 충전하고, 질소가스로 가압시켜 상향류 흐름을 유지하도록 하였다. 주상 시험기의 주변장치는 유기물의 흡착을 방지하기 위해 모두 스테인레스 스틸(stainless steel)과 테프론(teflon)재질로 사용하였다.

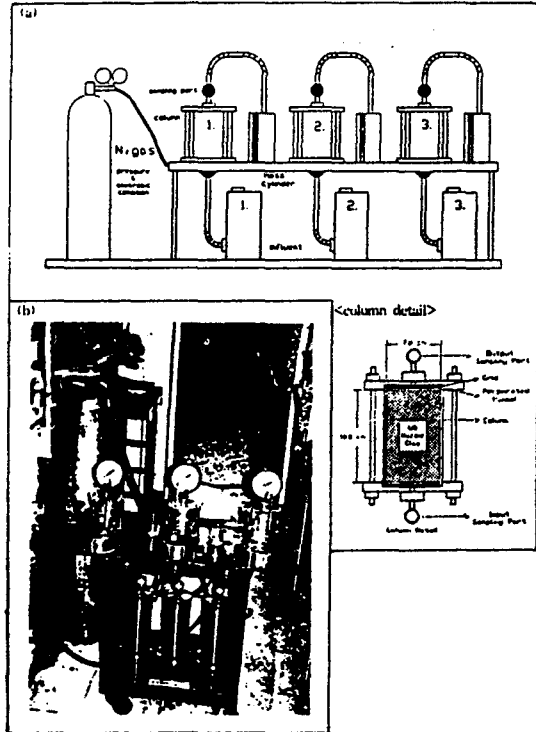


Fig. 1. Schematic diagram of the column test equipment (a) overall diagram (b) photograph of the equipment

(나) 실험방법

칼럼의 유속은 1.4×10^3 cm/sec를 유지하였다. 걸보기 분산계수(apparent dispersion coefficient)를 구하기 위해 비반응성 물질로서 chloride(초기농도 1000mg/l)를 사용하였으며, 시간에 따른 정규화된 농도(C/C_0)를 보정함으로써 Cu, Pb, 페놀(각각 1000 mg/l)에 대한 걸보기분

산계수(Apparent dispersion coefficient)를 구하였다. 페놀은 Table 4와 같은 조건에서 가스 크로마토그래피를 이용하였고, 납과 구리는 Table 5에 따른 조건에서 원자흡수분광법을 이용하여 분석하였다. Cl-는 Chloride electrode(Orion)로 측정하였다.

2.2.3 용출실험

본 실험은 부산석회 자체에서 용출되는 오염물질에 의한 주변환경에 주는 영향을 보기 위해 증류수, 해수 및 산성수에 대한 용출실험을 수행하였다. 용출 용기는 500 ml media bottle을 이용하여 1:16 (시료: 용출액)의 비율로 넣은 후 200회/분의 진탕 속도로 용출 하였다(Fig. 2 참조). 시료의 선택은 triple로 하였고, 9.21 mm 체를 통과한 시료만을 사용하였다. 이와 같이 처리한 슬러지를 80°C dry oven에서 24시간 건조시켜 수분을 모두 증발시킨 후 사용하였다. Table 6 는 해수에 의한 용출영향을 보기 위해 제작한 인공해수의 성분이다.

Table 6. Compounds of artificial sea water for leaching test

Compounds	Weight of Compounds
NaCl	23.497
MgCl ₂	4.981
Na ₂ SO ₄	3.917
CaCl ₂	1.102
KCl	0.664
NaHCO ₃	0.192
KBr	0.096
Subtotal	34.45
H ₂ O	965.55

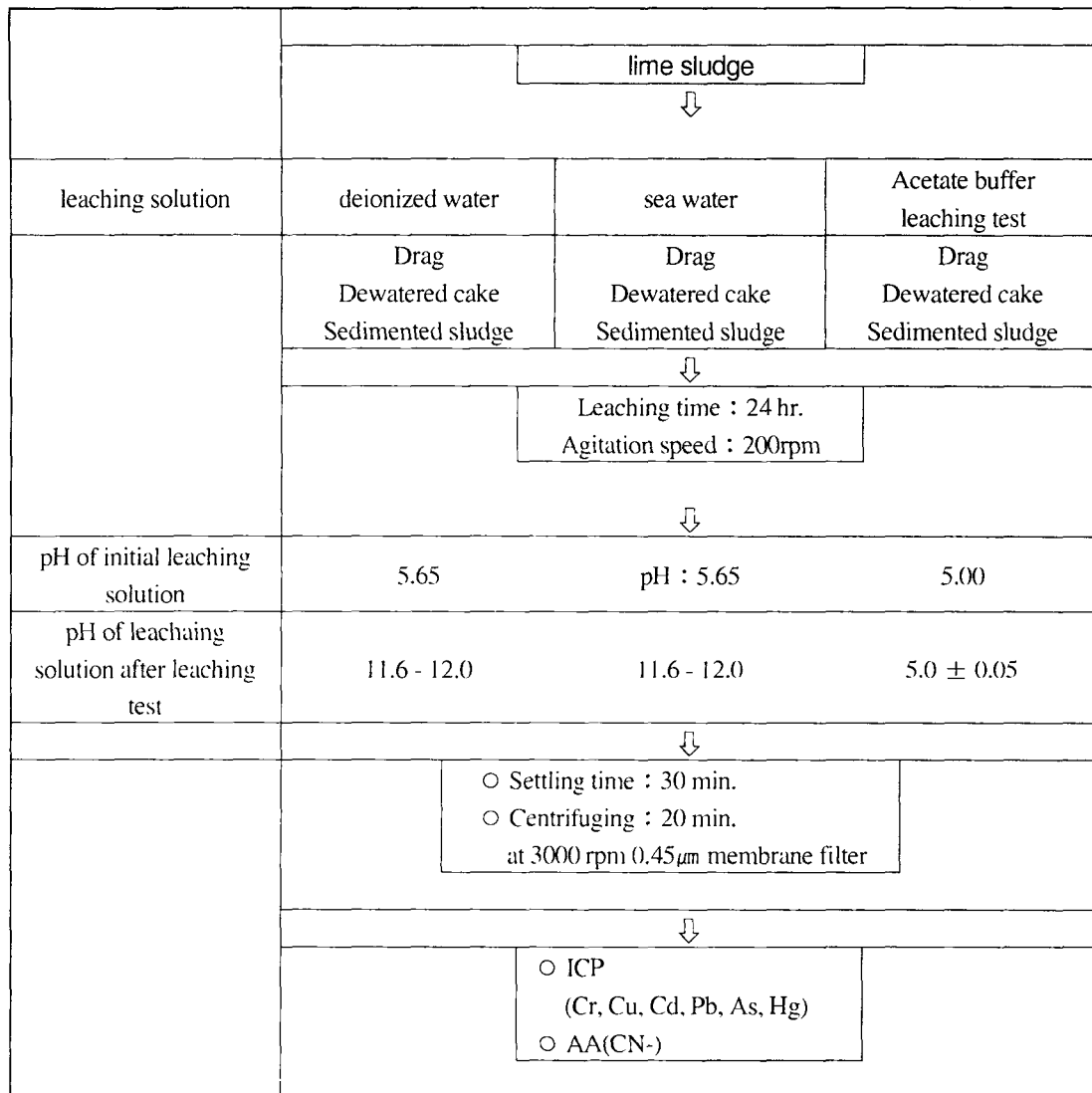


Fig. 2. Procedures for the leaching test.

3. 결과 및 고찰

3.1 부산석회의 지반 공학적 특성

부산석회의 입도분포 실험 결과 #200체 통과 백분율은 100%이며, 이러한 결과는 차수 재의 투수성을 만족하기 위한 조건인 #200체 통과 백분율 \geq

39~50%을 만족하는 것으로 나타났다. 액소성실험 결과 액성한계(liquid limit, w_L) 113.5%, 소성한계(plastic limit, w_p) 35.5%, 그리고 액성한계와 소성한계의 차를 나타내는 소성지수(plasticity index, PI)는 78%로 나타났다. Fig. 3은 다짐실험 결과이다. 부산석회의 최적함수비(Optimum

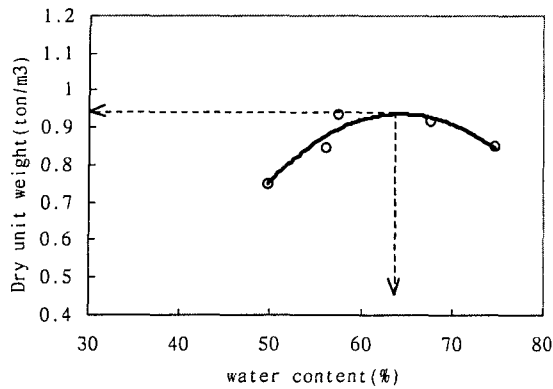


Fig 3. Compaction curve for lime sludge

Moisture Content, OMC)는 64%로 나타났고, 최적함수비에서의 건조단위중량은 0.93 ton/m³으로 측정되었다.

Fig. 4는 일축압축실험 결과이다. 최적함수비의 건조측과 습윤측에서의 비배수 전단강도는 각각 1.9 kg/cm² 과 0.3 kg/cm² 으로 나타났다. 부산석회의 경우 최적함수비의 습윤측에서 급격한 강도 감소를 나타낸다. Daniel⁹⁾ 등이 제안한 허용영역 (acceptable zone) 방법에 의하면, 매립지 차수재의 경우 최적함수비의 ±2%영역에서 다짐을 수행하여야 하고, 다진 후 건조단위 중량은 최대 건조단위중량의 96 - 98% 영역에 들어야 한다. 따라서 최적함수비에서 다소 건조측으로 다짐을 수행하는

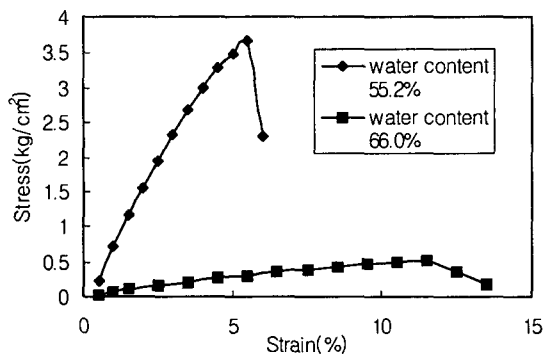


Fig. 4. Unconfined strength test results for lime sludge

것이 부산석회를 차수재로 이용하는데 있어서 보다 합리적인 방법이라 사료된다. 시료의 포화정도를 나타내는 B값이 0.94이상이 될 때까지 약 1주일 간 포화시킨 후, 정수두(=118 cm)에서 약 50시간 동안 통과한 유량을 이용하여 수리전도도(K)를 산정하였다. 부산석회의 수리전도도는 5.57×10^{-8} cm/s로 계산되었으며, 차수재의 허용 최대 수리전도도(= 10^{-7} cm/s)를 만족하는 결과를 얻었다.

3.2 오염물질 거동 특성

3.2.1 등온흡착실험 결과

일반적으로 오염물의 흡착제에 대한 흡착특성을 나타내는데 이용되는 모델로는 선형흡착모델, Langmuir 모델 그리고 Freundlich 모델이 있다.

선형흡착모델 : $q_e = K_L C_e$

Langmuir 모델 : $q_e = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e}$

Freundlich 모델 : $q_e = K_N C_e^{1/n}$

여기서, q_e = solid phase concentration at equilibrium(mg/g)

C_e = solution phase concentration at equilibrium(mg/L)

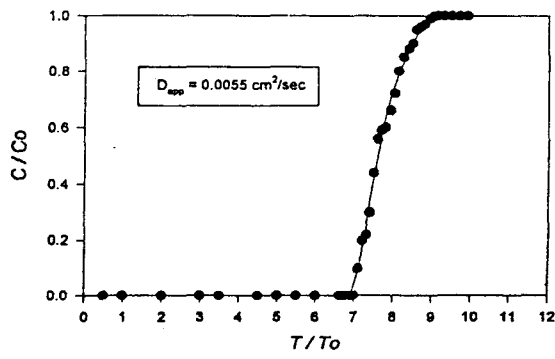
Q_0 = sorbed solute concentration on the sorbent corresponding to complete monolayer coverage

b, K_L, n, K_N = constant

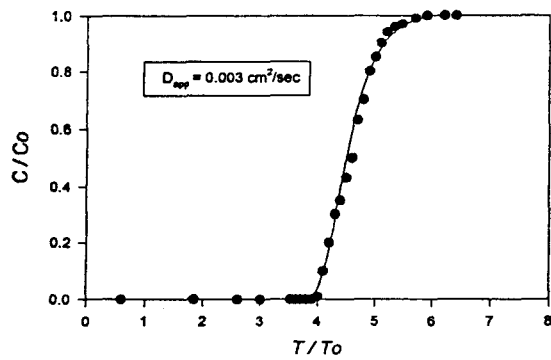
Table 7은 부산석회에 의한 납(Pb), 구리(Cu), 페놀(phenol)에 의한 흡착실험 결과를 선형, Langmuir, 그리고 Freundlich 모델에 의해 보정한 결과를 보인 것이다. 부산석회에 의한 납, 구리, 페놀에 대한 흡착실험 결과 실험을 수행한 농

Table 7. Sorption isotherm test results for Cu, Pb, and Phenol

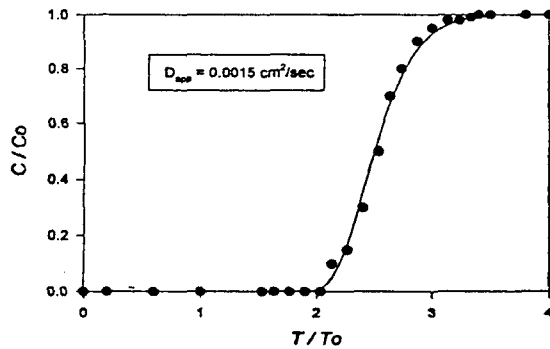
	선형		Langmuir			Freundlich		
	K_L	R^2	Q_0	b	R^2	K_L	n	R^2
Cu	2.1554	0.8304	56.179	0.097	0.9813	5.779	0.6542	0.9589
Pb	1.8181	0.7867	56.818	0.0838	0.9722	6.9622	0.5493	0.929
Phenol	0.2616	0.6265	10.66	0.09909	0.9987	1.80868	0.4375	0.9574



(a)



(b)



(c)

Fig 5. Breakthrough curve for a) Cu b) Pb c) Phenol

도범위에서는 Langmuir 모델이 이들 오염물에 대한 흡착특성을 가장 잘 나타냄을 알 수 있다.

단일층(monolayer)에 대한 최대 흡착량을 나타내는 Q_0 값의 경우 납과 구리에서 각각 56.818과 56.179로 페놀에 대한 값 10.66에 비해 약 5배정도 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 부산석회의 높은 pH로 인해(11.5 -12.4) 중금속 이온들이 OH나 CO_3^{2-} 이온들과의 착화합물을 형성하여 침전되거나 이동성이 낮아진데 기인한 것으로 사료된다. 가장 상관성이 좋은 Langmuir 모델을 이용하여 산정한 각 오염물질별 지연지수(retardation factor, R)는 구리, 납, 페놀에 대하여 각각 15.33, 12.6, 2.23으로 산정되었다.

3.2.2 실내 주상실험 결과

구리, 납, 페놀에 대한 식 (1)을 이용한 겉보기 분산계수 D_{app} (apparent dispersion coefficient) 를 구한 결과를 Fig. 5와 Table 8에 나타내었다. 흡착에 의한 지연 효과는 등온흡착실험에서 예상한 대로 유기물질 보다는 중금속의 지연효과가 커서 구리(7.5), 납(4.4), 페놀(2.5)의 순으로 지연 효과가 크게 나타났다. 실내주상실험으로 구한 지연 지수의 값은 등온흡착실험 결과로부터 산정된 지연 지수에 비해 다소 낮은 값을 줌을 알 수 있다. 이러한 결과는 각 실험간 오염물질과 흡착제간의 접촉면적의 차이와 흐름조건(flow condition)의 차이에서 오는 결과이다.^{7, 13)} 다시 말해서, 등온흡착 실험의 경우가 실내주상실험에 비해 낮은 soil : solution비를 가지고 있고 용액의 흐름이 없는(no flow)조건에서 진행되기 때문에 실내주상실험으로

Table 8. Apparent dispersion coefficient and retardation factor

Contaminants	Cu	Pb	Phenol
$D_{app}(\text{cm}^2/\text{sec})$	5.5×10^{-3}	3.0×10^{-3}	1.5×10^{-3}
Retardation Factor	7.5	4.4	2.5

부터 구한 지연지수에 비해 상대적으로 큰 지연지수 값을 준다.

3.3 용출실험 결과

부산석회 시료를 알카리수(pH 10)와 산성수(pH 5)의 용출용매를 사용하여 용출실험을 수행한 결과, 용출후 용출액의 pH가 11.5 - 12.5의 범위로 상승하였다. 결과적으로 국내 표준용출법상 용출용매를 pH 6내외의 약산성으로 해서 이상적인 강우의 pH를 모사 하는 방법은 부산석회의 지나친 알칼리도로 인해 모두 강알칼리 조건에서 실험을 수행한 것이나 마찬가지로 되었다. 이로 인해 실질적인 매립지내의 산성조건을 반영할 수 없다고 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 용출액의 pH를 5로 일정하게 유지하면서 용출을 수행하기 위해서 기타조건은 같게 유지하면서 0.5N 아세트산으로 용출액의 pH를 5로 유지하면서 용출을 수행하였다. 각 용출방법에 따른 부산석회의 중금속 용출실험 결과와 국내 환경오염 공정시험법상의 유해성 판정기준은 Table 9에 나타내었다.

Table 9. Comparison of extracted amount of heavy metals by each methods

Contaminants	Waste	Test Method	Extracted Amount (mg/L)	Regulation Limit (mg/L)
Cr	Drag	Distilled Water	0.20	1.5
		Acetate buffer	0.20	
		Sea Water	0.27	
	Sedimented Sludge	Distilled Water	0.20	1.5
		Acetate buffer	0.33	
		Sea Water	0.20	
	Dewatering Cake	Distilled Water	0.20	1.5
		Acetate buffer	0.40	
		Sea Water	0.20	

Contaminants	Waste	Test Method	Extracted Amount (mg/L)	Regulation Limit (mg/L)
Cu	Drag	Distilled Water	0.20	3.0
		Acetate buffer	1.50	
		Sea Water	0.20	
	Sedimented Sludge	Distilled Water	0.20	3.0
		Acetate buffer	1.30	
		Sea Water	0.23	
	Dewatering Cake	Distilled Water	0.20	3.0
		Acetate buffer	0.90	
		Sea Water	0.23	
Cd	Drag	Distilled Water	0.10	0.3
		Acetate buffer	0.10	
		Sea Water	0.10	
	Sedimented Sludge	Distilled Water	0.10	0.3
		Acetate buffer	0.30	
		Sea Water	0.20	
	Dewatering Cake	Distilled Water	0.10	0.3
		Acetate buffer	0.30	
		Sea Water	0.20	
Pb	Drag	Distilled Water	0.20	3.0
		Acetate buffer	0.83	
		Sea Water	0.50	
	Sedimented Sludge	Distilled Water	0.20	3.0
		Acetate buffer	0.90	
		Sea Water	0.50	
	Dewatering Cake	Distilled Water	0.20	3.0
		Acetate buffer	0.90	
		Sea Water	0.50	
As	Drag	Distilled Water	0.005	1.5
		Acetate buffer	0.005	
		Sea Water	0.005	
	Sedimented Sludge	Distilled Water	0.005	1.5
		Acetate buffer	0.005	
		Sea Water	0.005	
	Dewatering Cake	Distilled Water	0.005	1.5
		Acetate buffer	0.005	
		Sea Water	0.005	
	Drag	Distilled Water	0.002	0.005
Acetate buffer		0.002		

Contaminants	Waste	Test Method	Extracted Amount (mg/L)	Regulation Limit (mg/L)
		Sea Water	0.002	
Hg	Sedimented Sludge	Distilled Water	0.002	0.005
		Acetate buffer	0.002	
		Sea Water	0.002	
	Dewatering Cake	Distilled Water	0.002	0.005
		Acetate buffer	0.002	
		Sea Water	0.002	

4. 결 론

본 연구는 부산석회를 매립지 차수재로써 이용하기 위한 방안을 검토하기 위해 수행되어졌다. 부산석회의 지반 공학적 특성실험, 오염물질 거동특성실험, 그리고 용출실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 부산석회의 투수계수는 국내 매립지 차수재의 최대 허용 수리전도도인 10^{-7} cm/s보다 약 10배 정도 낮은 5.57×10^{-8} cm/s로 산정되었다. 일축 압축강도의 경우 최적함수비의 건조축과 습윤축에서의 강도는 각각 1.9 kg/cm^2 과 0.3 kg/cm^2 으로 나타났다. 이러한 결과로부터 부산석회를 차수 재료 사용할 시 최적함수비의 다소 건조축에서 다짐을 수행하는 것이 유리한 것으로 나타났다.
- 2) 대상 오염물질로 선정된 Cu, Pb, 폐놀에 대한 겔보기 분산계수(D_{app})를 구한 결과, Cu, Pb, 그리고 폐놀 각각에 대한 D_{app} 는 5.5×10^{-3} , 3.0×10^{-3} , 그리고 1.5×10^{-3} cm²/s로 나타났다. 흡착에 의한 지연 효과는 유기물질 보다는 중금속의 지연효과가 커서 Cu(7.5), Pb(4.4), 폐놀(2.5)의 순으로 지연 효과가 크게 나타났다.
- 3) 해수, 증류수, 산성수에 대한 부산석회의 용출 특성은 Table 9에서와 같이 모두 유해성 판단 기준이하를 나타내어 중금속 용출에 대한 유해

성은 안전한 것으로 사료된다. 단 Pb과 Cd이 제한 기준치에 근접한 농도를 나타내어 비록 규제치를 상회하지는 않지만 감시대상이 요구되는 물질로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 신은철, "부산석회를 활용한 연약지반 안정처리 기술개발에 관한 연구". 시립인천대학교 연구보고서, 1996.
- 2) 류순호, "간척지 특성과 부산석회의 이용". 서울대학교 농과대학 연구보고서, pp1~18(1995).
- 3) 오동규, 이재상, 전병화, 서영준 "소다회 부산슬러지를 이용한 석회질 비료의 제조", 한국폐기물학회, 8(2), pp135~143(1991).
- 4) 신은철, 오영인, 김남돈 "부산석회의 토질역학적 특성에 관한 연구", KGS spring '96 National Conference, Seoul, Korea, pp32~37 (1996).
- 5) 동양화학공업주식회사, "부산석회 재활용 가치", 1996.
- 6) Carpenter, G. W. and Stephenson, R. W., "permeability testing in the triaxial cell." Geotechnical Testing Journal, 9(1), pp3~9(1986).
- 7) Cherry, J.A., Gillham, R.J., and Quirk, J.P., "Contaminants in groundwater : chemical

- processes.”, Studies in geophysics, groundwater contamination. National Academy press, Washington, D.C., pp 46~64(1984)
- 8) Daniel, D. E., “Case histories of compacted clay liners and covers for waste disposal facilities.” Proceedings of the 3rd Int. Conf. on case histories in geotechnical Eng., St. Louis. pp1407~1425 (1993).
- 9) Daniel, D. E., and Wu, Y. K., “Compacted clay liners and covers for arid sites.” J. of Geotechnical Eng. 119(2), pp223~237(1993).
- 10) Freeze, R.A. and Cherry. J.A., “Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs”. N.J., (1979).
- 11) Lo, I. M. “The role of organic attenuation in saturated clay barrier system,” Wat. Sci. Tech., 33(8), pp145~151(1996).
- 12) Rowe, R.K. and Booker, J.R., “1-D pollutant migration in soils of finite depth” . J. of Geotech. Eng., ASCE. 111 pp 479-499(1985).
- 13) Shackelford, C.D. and Redmond, P.L., “Solute breakthrough curves for processed kaolin at low flow rates” . J. of Geotechnical Engineering. 121(1), Jan., pp 17~27(1995).
- 14) Shackelford, C.D.,” Contaminant transport. Geotechnical Practice for Waste Disposal” . Edited by David E. Daniel, Chapman & Hall, London, pp33-66(1993).