

## 폐기물을 이용한 고화처리토의 차수효과

김인배<sup>†</sup> · Ben. Koopman\* · 안진선

한경대학교 환경공학과, \*플로리다대학교 환경공학과

# The Permeability Characteristics of Solidified Soil Using Wastes

Inbae Kim<sup>†</sup> · Ben. Koopman\* · Jinsun An

Dept. of Environmental Engineering, Hankyong National University

\*Dept. of Environmental Engineering Science, University of Florida

(Received Sep. 15, 2004/Accepted Nov. 16, 2004)

### ABSTRACT

Seaweed waste(SWW) was used to improve the liner effect in recycling of dredged soil as the landfill liner. It was found that the compressive strength became somewhat lower when SWW was added than that was when Ordinary Portland Cement(OPC) only was added. The permeability coefficient, however, became lower in this case, which showed the lowest permeability coefficient when the addition of SWW was one percent. Hence, to comply with the regulations for the compression strength and permeability coefficient of landfill liner, the addition of OPC should be over eight percent and that of seaweed waste one percent. The results of leaching test showed that the solidified material was not against the laws of waste control, so it is possible to use as the landfill liner and to expect sufficient economic effects because wastes such as dredged soil and seaweed can be recycled.

**Keywords:** dredged Soil, permeability coefficient, landfill liner, seaweed waste(SWW), Ordinary Portland Cement (OPC), Optimum Moisture Contents(OMC)

## I. 서 론

일반적으로 위생매립지의 차수설비에 이용되는 재료로는 Clay Soil, Flexible Membrane Liner, Soil Mixture 등이 사용되고 있으며, 매립지내로 유입되는 오수 및 지하수의 차단, 매립지내의 배수공에 의한 침출수의 집수 기능을 가져야한다. 특히 침출수의 유출입에 의한 토양오염, 지하수 오염 등의 제2차적인 환경오염을 방지시킬 수 있는 가장 중요한 설비로서 매립장의 지형조건, 폐기물의 성상, 매립방법 등에 따라 차수재의 선정 및 관리, 차수방법 등이 신중히 고려되어야 한다. 매립지 최종복토의 경우, 매립지의 이용목적에 따라 다르지만 점토·점토광물혼합토 등으로 45 cm 이상 투수계수  $10^{-7}$ cm/sec 이하로 복토하거나 점토·점토광

물혼합토 30 cm 이상 투수계수  $10^{-6}$ cm/sec 이하로 설치한 후 그 위에 두께 1.5 mm 이상 합성고분자차수막을 설치 해야 한다. 그러나 매립지의 차수·복토재는 주로 건설현장의 토사나 산토를 이용하고 있지만 환경 파괴, 비용 등의 문제로 매립지의 차수·복토재료를 확보하기가 곤란해져 가고 있다.<sup>2,3)</sup> 따라서 본 연구에서는 폐기물의 재활용을 목적으로 저수지내에 유입되어 퇴적된 토양, 즉 수로 및 농업용수의 확보를 위해 시행하고 있는 준설시 발생되어 재활용되지 못하고 단순히 버려지고 있는 고풍수질의 불량토사로서 건조시 미분말 상태로 분진 발생에 따른 동식물 생장저해 및 토양의 황폐화 등 제2차적인 환경오염 문제를 일으킬 수 있는 준설토사와 해양폐기물을 이용하여, 현재 매립지 차수공법으로 권장되고 있는 시멘트계 고화처리방법에 의해 고화재 및 해양폐기물 첨가량에 따른 투수 특성에 대하여 연구하고, 폐기물 관리법의 규정에 적합한 준설토사의 최종복토, barrir층 및 바닥 차수재료의 이용이 가능한 범위를 규명하고자 한다.

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Environmental Engineering, Hankyong National University  
Tel: 82-31-670-5171, Fax: 82-31-670-5170  
E-mail : IMMGM@yaho.co.kr

**Table 1.** Physical and chemical propertise of dredged soil

Item	Specific Gravity	Ig. Loss (%)	Passing (%)				Cu	Cg	pH	NP	SM
			No. 4	No. 8	No. 30	No.100					
	2.70	2.02	49.0	43.2	23.1	0.17	15.5	0.3	6.6		

**Table 2.** Leaching of heavy metals of dredged soil

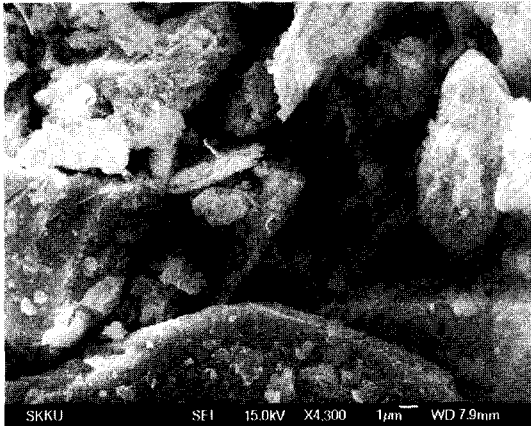
Item	Concentration (mg/l)						
	Cd	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Cu
	0.063	6.33	0.86	0.69	1.20	1.17	1.68

**Table 3.** Components of SWW

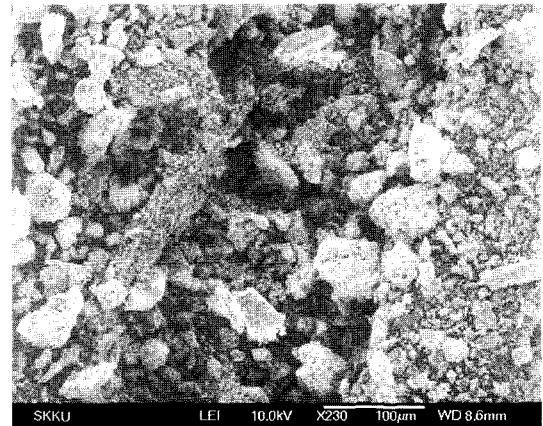
Item	Moisture content (%)	Ether Extract (g)	Ash (g)	Crude Protein (g)	Crude Fider (g)
	1.4	4.2	25.6	14.4	10.6

**Table 4.** Leaching of heavy metals of SWW

Item	Concentration (mg/l)						
	Cd	Ni	Pb	Zn	As	Hg	Cu
	ND	ND	0.02	0.33	1.24	ND	0.09



**Fig. 1.** SEM analysis of dredged soil.



**Fig. 2.** SEM analysis of SWW.

## II. 실험 및 방법

### 1. 폐기물시료 및 고화재

폐기물의 자원화를 목적으로 본 연구에 사용된 준설토사는 경기도 용인시의 L저수지 하류지역의 준설토사로서 물리·화학적성질은 Table 1과 같으며, 중금속 성분은 Table 2와 같다. Fig. 1은 준설토사의 SEM 사진이다. 준설토사의 화학성분 분석은 XRD(SINTAG XDS 2000, USA), SEM은 JEOL 6700F, JAPAN을 이용하였으며, 중금속 성분분석은 ICP(ICPS 1000IV, SHIMAJU, JAPAN)를 이용하여 폐기물관리법에 준하여 측정하였다.

해양폐기물은 우리나라 해안에서 발생되고 있는 폐해조류(SWW)로서 공시체 제작시 고화재 첨가량에 대한 중량비로 0.3%, 0.5%, 0.7%, 1.0%, 2.0%를 첨가하였으며, SWW성분은 ICP(GBC INTEGA XM, AUSTRALIA)에 의해 분석하였다. SWW분석표는 Table 3과 같으며, Table 4는 중금속 성분표이다. Fig. 2는 폐해조류(SWW)의 SEM사진이다.

고화재는 일반적으로 시멘트계 고화처리에 사용되고

**Table 5.** Optimun moisture contents (OMC)

SWW (%)	OPC (%)			
	5.0	8.0	12.0	15.0
0.0	8.90	11.75	12.04	12.13
0.3	10.40	12.03	12.10	12.21
0.5	11.07	12.22	12.25	12.34
0.7	11.17	12.52	12.87	12.94
1.0	12.18	13.13	14.53	14.57
2.0	12.26	13.02	13.91	13.95

있는 Ordinary Portland Cement(OPC)를 사용하였으며, 고화재의 첨가량에 따른 고화처리 효과를 알아보기 위해 고화재 첨가량을 시료의 중량비로 5%, 8%, 12%, 15% 첨가 하였으며, 페토사와 고화재 첨가량에 따른 최적함수량(OMC)을 측정하여 실험하였다. Table 5는

**Table 6.** Chemical composition of OPC (%)

Item	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	63.0	23.5	6.0	2.5	0.6	2.2	1.8	0.4

OMC표이며, Table 6은 본 실험에 이용된 OPC의 화학성분표이다.

**2. 공시체 제작**

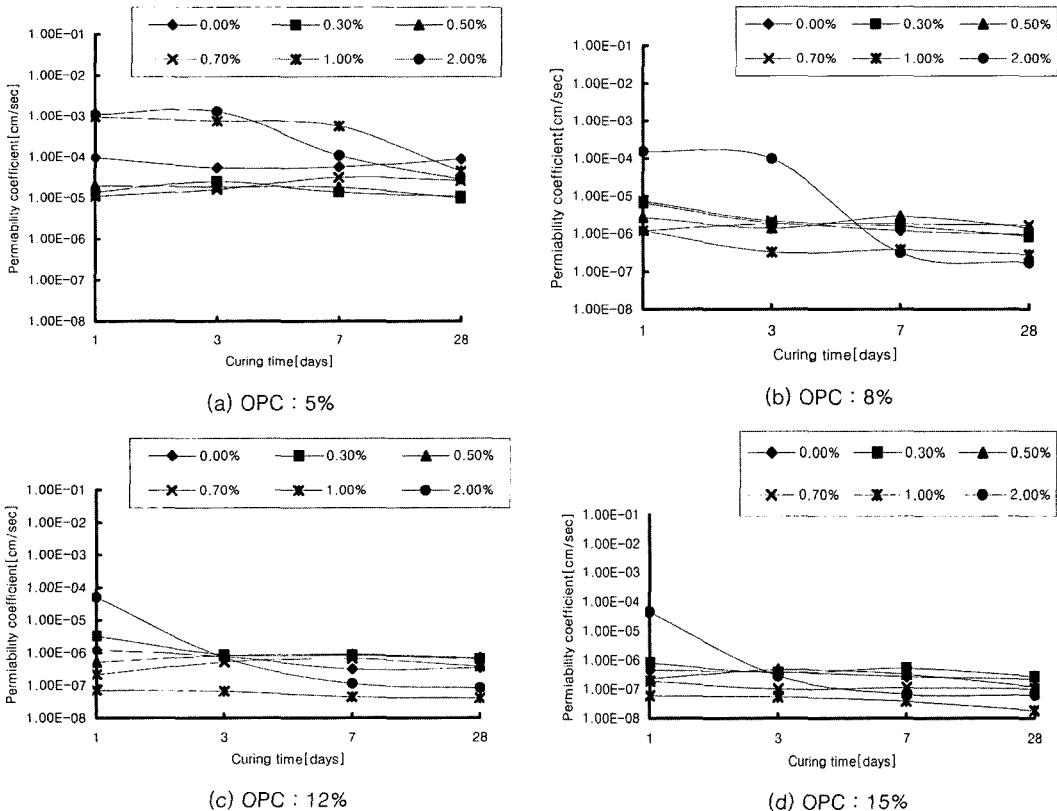
실험에 사용된 폐토사는 110±5°C의 건조로에서 3일간 완전히 건조시킨 후 방냉시킨 시료를 사용하였으며, SWW는 건조시 탄화를 방지하기 위해 50°C 이하의 건조로에서 완전건조 후 마쇄시킨 시료를 사용하였다. OPC는 폐토사의 건조중량비에 대한 5%, 8%, 12%, 15% 넣었으며, SWW는 중량비로 OPC의 0.3%, 0.5%, 0.7%, 1.0%, 2.0%의 비율로 배합하였다. 함수량은 폐토사와 OPC 및 SWW 배합에 따른 최적 함수량 상태, 즉 다짐을 하였을 때 건조밀도가 최대가 되는 함수량으로 교반기에서 교반시켜, 시료와 수분의 혼합이 잘 되도록 하기위해 수분이 증발되지 않도록 약 30분

간 방치한 후 공시체를 제작하였다. 공시체 제작은 JSF T-811-1990 방법으로 하였으며, 다짐시험 방법은 일본 시멘트협회 표준 시험방법(CAJS-1991)인 “시멘트계 고화재에 의한 안정처리토의 시험방법”으로 다짐하여 밀봉양생 하였다.<sup>11)</sup>

**III. 결과 및 고찰**

**1. 투수계수 변화**

준설토사와 해양폐기물인 SWW를 이용하여, 현재 매립지 차수공법으로 권장되고 있는 시멘트계 고화처리 방법에 의해 고화재 및 SWW 첨가량에 따른 투수시험 결과는 Fig. 3과 같다. 투수시험은 변수위투수시험(variable head permeameter test)에 의해 수행되었으며, Fig. 3에서 보는바와 같이 OPC만을 사용한 경우 최종



**Fig. 3.** Variation of permeability coefficient according to SWW addition.

복토재나 차수재(투수계수  $10^{-7}$ cm/sec 이하)로 이용할 경우 양생일수 1일에서는 OPC첨가량이 15% 이상, 양생일수 3일, 7일, 28일에서는 OPC첨가량 12% 이상에서 차수재료의 사용이 가능한 것으로 나타났다. 고화보조재료 SWW를 0.3% 넣은 경우에는 OPC만 첨가한 경우와 마찬가지로 양생일수 1일에서는 OPC첨가량이 15% 이상, 양생일수 3일, 7일, 28일에서는 OPC첨가량 12% 이상에서 차수재료의 사용이 가능한 것으로 나타났으며, SWW를 0.5%, 0.7% 넣은 경우에는 양생일수에 관계없이 OPC첨가량 12% 이상에서 모두  $10^{-7}$  cm/sec 이상으로 차수재료의 이용이 가능한 것으로 나타났다. SWW를 1.0% 넣은 경우에는 양생일수 1일에서는 OPC첨가량 12% 이상, 양생일수 3일, 7일, 28일에서는 OPC첨가량 8% 이상에서 차수재료의 이용이 가능한 것으로 나타났다. 그러나 SWW 첨가량 2%의 경우 차수재료 이용되려면 장기 양생일수가 필요한 것으로 나타났다. 따라서 SWW 첨가에 따른 차수효과는 SWW 첨가량 1.0% 정도가 경제적이며, 가장 높은 차

수효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 압축강도 변화

고화처리된 시료의 압축강도는 폐기물의 물리·화학적 성질과 고화재의 혼합비율 및 양생일수 등에 따라 변화되며, 일반적으로 고화재 첨가량이 많을수록, 양생일수가 길수록 압축강도는 증가하며, 폐기물 첨가량이 많을수록 압축강도는 감소한다. 또한 고형화에 따른 압축강도의 증가는 처리된 시료의 압축성 및 투수성을 감소시키며, 오염물의 용해도를 감소시켜 준다.<sup>6,8)</sup> 고화처리에 의해 매립하는 경우 미국 환경청(Environmental Protection Agency)에서는 고화체의 압축강도를 3.5 kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 결정하고 있으며,<sup>4)</sup> 이는 매립지에서의 건설장비, 불투수성 복토재의 하중에 견딜수 있도록한 값이다. 한국 및 일본에서는 고화처리토의 압축강도 목표치를 고화처리에 의한 중금속용출 방지 및 악취방지를 위한 압축강도를 1.0 kgf/cm<sup>2</sup>, 운반성능개선 및 건설장비의 주행을 위한 압축강도를 0.5~1.5 kgf/cm<sup>2</sup>로 정하

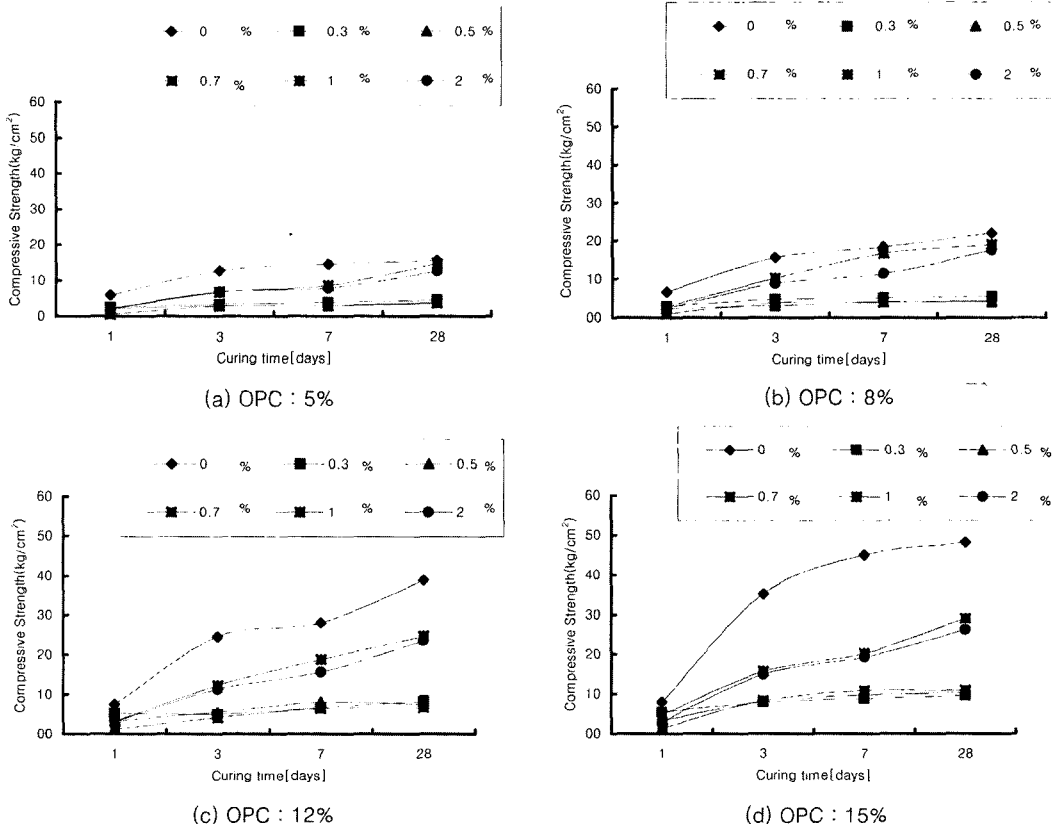


Fig. 4. Variation of compressive strength according to SWW addition.

고 있다. 우리나라의 수도권 매립지의 경우에는 고화처리에 의한 차수재로 이용할 경우 압축강도 5.0 kgf/cm<sup>2</sup>, 투수계수 10<sup>-7</sup> cm/sec 이하를 기준으로 하고 있으며, 복토재로 이용할 경우에는 압축강도 3.0 kgf/cm<sup>2</sup>, 투수계수 10<sup>-6</sup> cm/sec 이하를 기준으로 하고 있다. Fig. 4는 고화재로 OPC만 첨가한 고화체의 압축강도와 SWW를 첨가 하였을 때의 압축강도 분석표이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 SWW를 첨가한 경우 차수성과 경제성을 고려해 볼 때 SWW 첨가량 1%일 때가 가장 우수한 것으로 나타나 본 연구 결과에서는 OPC만 첨가한 경우와 SWW 첨가량 1%일 때를 비교 검토하고자 한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 OPC만을 첨가한 고화체의 압축강도는 한국, 일본 및 미국의 중급속용출 방지, 악취방지 및 건설장비의 주행을 위한 압축강도 기준을 상회하고 있다. 수도권 매립지 기준에 의한 차수재로 사용할 경우에는 중간복토를 하는 시점인 양생일수 7일 이상의 압축강도와 투수계수 값을 볼 때 OPC만을 첨가한 경우나 SWW를 첨가한 경우 모두 차수재로의 압축강도 기준치는 만족하고 있으나 투수계수치를 고려해 보면 OPC만을 첨가한 경우나 SWW를 첨가한 경우 모두 차수재로 사용하기 위해서는 OPC첨가량을 8% 이상 첨가해야 하는 것으로 나타났으며, 압축강도는 SWW를 첨가한 쪽이 OPC만을 첨가한 쪽보다 낮지만 차수성은 SWW를 첨가한 쪽이 매우 우수한 것으로 나타났다. 따라서 준설토를 시멘트계 고화처리에 의한 매립지의 최종복토재나 차수층으로 사용할 경우에는 OPC 첨가량을 8% 이상, SWW 첨가량을 1% 정도로 하는 것이 적당하다고 사료된다.

### 3. XRD 및 SEM분석

폐기물 고화체의 강도발현은 폐기물의 물리·화학적 성질, 수분함량, 입도배합, 압축방법, 고화재첨가량 등에 따라 변화하며, 고화재 및 고화처리 대상폐기물에 함유되어 있는 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등의 혼합물에 의한 수화반응에 의해 이루어진다. 따라서 폐기물의 재활용시에는 이용목적에 따라 압축방법, 수분함량, 양생일수, 압축강도 규정 등의 재규정을 따라야 하며, 고화재 및 고화처리 대상폐기물에 함유되어 있는 혼합물에 의한 적절한 수화반응을 위해서는 폐기물의 화학적 성분분석에 따른 적정 고화재의 선정 및 첨가량 결정, 최적함수량, 압축방법 등의 고화처리 최적조건을 결정하여야 한다.<sup>8,10)</sup> Fig. 5는 양생일수 28일의 OPC첨가량에 따른 XRD분석 결과이다. 준설토는 토양분류상 NP, SM으로 Fig. 5에서 보는바와 같이 주성분이 SiO<sub>2</sub>임을 알 수 있으며, OPC첨가량이 많을수록 SiO<sub>2</sub> peak

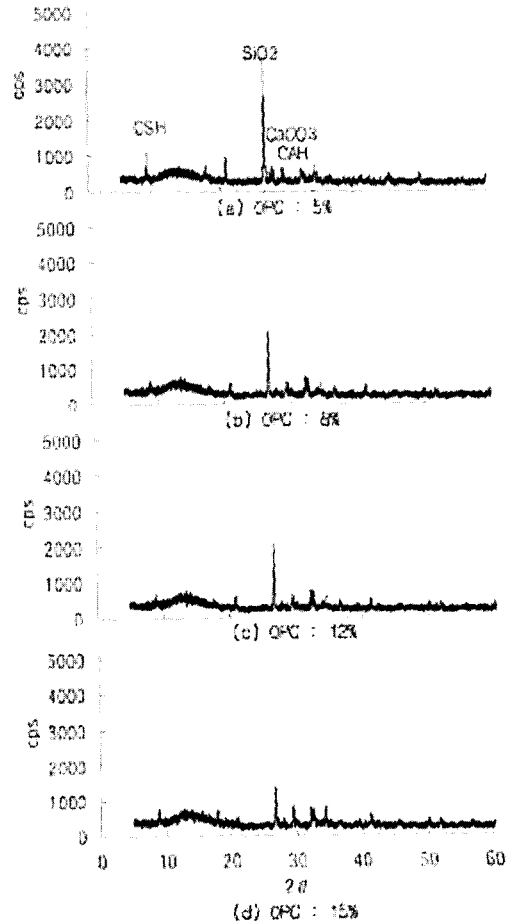


Fig. 5. XRD analysis of sample (28 day).

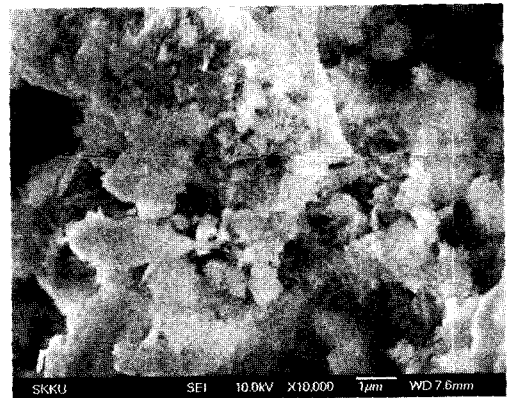


Fig. 6. SEM analysis of sample (28 day).

가 작아짐을 알 수 있다. 이는 XRD와 SEM에서 보는 바와같이 CaO가 주성분인 OPC첨가량이 많을수록 CSH계 수화물, CAH계 수화물, Ettringite, CaCO<sub>3</sub> 등

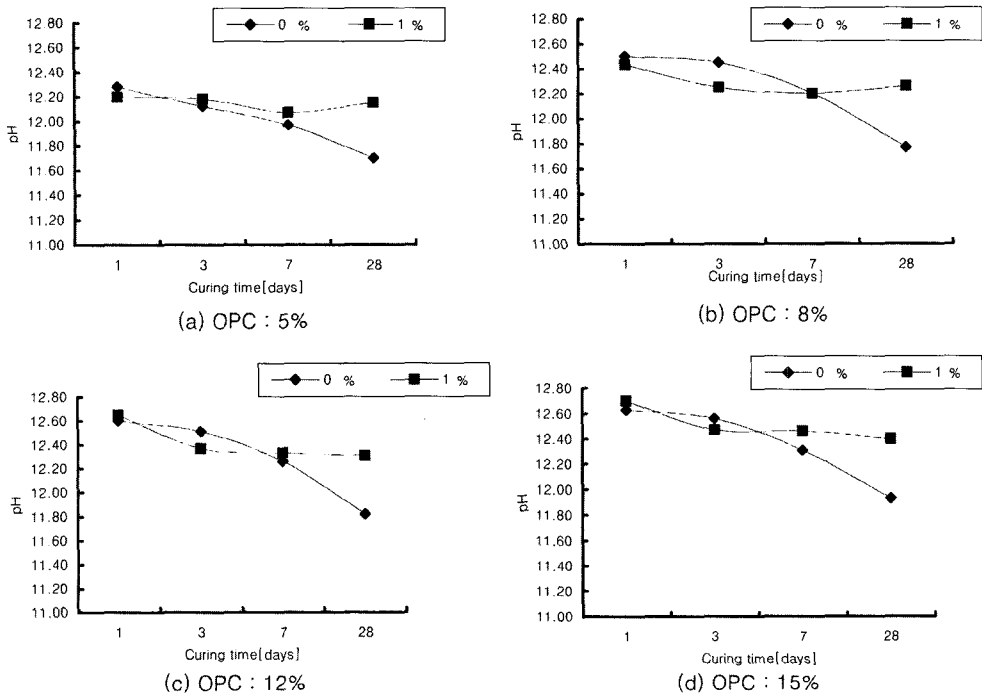


Fig. 7. Variation of pH.

의 수화물 생성에 의해 수화반응이 촉진되어 압축강도가 증가한 것으로 사료된다. Fig. 6은 양생일수 28일의 SEM사진이다.

4. pH변화

pH의 변화를 측정함으로써 고화체의 중금속 용출특성 및 수화반응의 진행상태를 분석해 볼 수 있다. pH 변화는 일반적으로 고화체의 혼합비율과 시료의 화학성분 및 양생일수에 따라 변화하며, pH 10이상의 강알카리성 분위기하에서 수화반응은 촉진되며, 고화체는 서서히 알카리 성분이 제거되면서 중성화되어 안정된다.<sup>8,11)</sup> Fig. 7은 준설퇴기물에 고화체로 OPC만을 첨가한 공시체와 차수효과가 가장 높은 SWW 첨가량 1% 일 때의 건조양생 기간에 따른 pH변화도이다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 고화체로 OPC만을 첨가한 경우 양생일수에 따라 pH값이 낮아지고 있다. 이는 고화처리과정 중 강도발현 효과가 낮아지고 있다는 것을 의미하며, SWW를 첨가한 경우에는 pH값의 변화율이 그다지 높지 않다. 이는 양생일수 28일 이후에서도 압축강도가 증가할 것으로 사료된다.

5. 중금속 용출시험

고화체의 용출시험은 폐기물 용출시험방법에 준하여

행하였으며, 용출액을 ICP로 측정하였다. Table 7은 중금속 분석 결과표이다. Table 7에서 보는 바와 같이 고화처리된 공시체는 폐기물관리법상 지정폐기물 용출기준을 만족하고 있어 준설퇴사와 SWW의 재활용은 문제가 없을 것으로 사료된다.

IV. 결 론

폐기물의 재활용을 목적으로 준설퇴사(dredged soil)와 폐해조류(SWW)를 이용하여, 현재 매립지 차수공법으로 권장되고 있는 시멘트계 고화처리방법에 의해 매립지 차수재료의 재이용을 위한 연구 결과 다음과 결론을 얻었다. (1) 양생일수가 증가함에 따라 OPC 첨가량이 많을수록 압축강도는 증가하였으며, 차수효과도 높게 나타났다. (2) 해양폐기물을 첨가한 경우에는 OPC만을 첨가한 경우보다 SWW첨가량이 많을수록 압축강도는 낮게 나타났지만, 투수계수가 낮아짐에 따라 OPC만을 첨가한 경우보다 차수효과는 높게 나타났으며, SWW첨가량 1%일 때 차수효과가 가장 높았다. 따라서 준설퇴사를 최종 복토재나 차수재료의 이용시, 수도권 매립지의 압축강도 및 투수계수 규정을 만족시키기 위해서는 OPC첨가량을 8% 이상, SWW 첨가량을 1% 정도로 하는 것이 가장 적당하다. (3) 처리·처분

Table 7. Leaching of heavy metals

Curing time (days)	SWW (%)	OPC (%)	Concentration (mg/l)							
			Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	
1	0	15	ND	0.034	0.115	0.303	ND	ND	0.125	
3		12	ND	0.033	0.162	0.083	ND	ND	0.018	
		15	ND	0.028	0.075	0.107	ND	ND	0.016	
7		12	ND	0.029	0.102	0.067	ND	ND	0.030	
		15	ND	0.030	0.074	0.060	ND	ND	0.002	
28		12	ND	0.084	0.120	0.081	ND	ND	0.001	
		15	ND	0.079	0.084	0.047	ND	ND	0.002	
1		1.0	12	ND	0.084	0.161	0.088	ND	ND	0.016
			15	ND	0.078	0.091	0.071	ND	ND	0.011
3			8	ND	0.069	0.154	0.119	ND	ND	0.085
	12		ND	0.062	0.127	0.118	ND	ND	0.020	
7	15		ND	0.049	0.084	0.045	ND	ND	0.016	
	8		ND	0.068	0.176	0.064	ND	ND	0.017	
28	12		ND	0.052	0.134	0.052	ND	ND	0.025	
	15		ND	0.040	0.080	0.029	ND	ND	0.010	
28	8		ND	0.042	0.128	0.048	ND	ND	0.038	
	12		ND	0.041	0.096	0.025	ND	ND	0.030	
28	15	ND	0.038	0.095	0.012	ND	ND	0.011		
	Dredged soil		6.330	1.680	0.690	1.200	0.063	1.170	0.860	
SWW			ND	0.054	0.193	0.042	ND	ND	0.029	
Allowable limit				3.0		1.5	0.3	0.005	3.0	

이 곤란한 준설펀기물은 매립지 차수재료의 이용이 충분 가능하며, 준설펀사 및 SWW를 매립지 차수재료 재이용함으로서 환경오염을 감소시킬 수 있으며, 폐기물 배출량을 감소시킴에 따라 매립지 수명을 연장시킬 수 있다. 또한 고화제는 용출시험결과 폐기물관리법상 지정폐기물에 해당되지 않으므로 차수재료의 재이용이 가능하며, 고화재 및 고화보조재의 첨가량을 조절함으로써 폐기물의 신속적인 차수재료의 이용이 가능하므로 충분한 경제성도 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한경대학교 2003년도 학술연구 조성비의 지원에 의한 것임.

## 참고문헌

1. 김인배, 이현주, 안진선 : 페콘크리트를 이용한 시멘트

- 벽돌로의 재활용. 폐기물학회지, 6(1), 22-28, 1999.
2. Michael, D. L., Phillip, L. B. and Jeffrey, C. E. : Hazardous Waste Management, McGraw-Hill, Inc, 641-646, 1994.
3. 김인배 외 : 최신폐기물, 신광문화사, 2002.
4. William, C. A. : Innovative Site Remediation Technology Vol. 4 STABILIZATION/SOLIDIFICATION, Springer, 1994.
5. US EPA : Lining of Waste Impoundment and Disposal Facilities, pp.448, 1983.
6. 이현주, 김인배 : 천연 Pozzolan을 이용한 도금슬러지의 재활용(II). 폐기물학회지, 14(5), 403-411, 1997.
7. 嘉門雅史 : 廢棄物のセメント系固硬化材による有効利用について, 第23回 土質工學研究發表會, pp. 1879-1880, 1988.
8. 김인배, 이현주 : 고유산염계 고화재에 의한 탈수슬러지의 고형화 효과. 폐기물학회지, 13(1), 41-46, 1996.
9. 岡田 清 : セラミクスのキヤラクタリゼ-ション 技術 X線回折,セラミクス, 19(11), 982-991, 1984.
10. 日本セラミクス協會 : セラミクス工學 핸드ブック, 技報堂.
11. セメント協會 : セメント協會標準試驗方法, 1990.