

공극수 오염이 시멘트 고화처리된 사질토에 미치는 영향

The Influence of Pore Water Contamination on the Cement Treated Sandy Soil

유 찬*

Yu, Chan

Abstract

Laboratory experiments were carried out to investigate the influence of pore water contamination on the treatment effect of sandy soil which was solidified by Portland cement. In the experiments, setting time of hydraulic cement that was mixed with contaminated mixing water was measured using Vicat equipment and observed the tendency of setting process with the kind of contaminants, organic or inorganic components. It was shown that organic contaminants of the mixing water affect largely on the initial setting process of hydraulic cement and inorganics, especially heavy metals, did not affect on the initial setting process, otherwise it was appeared that setting time of the sandy soil that was contaminated with inorganic components was apparently faster than the sandy soil that did not include inorganic components even though organic concentrations was relatively low level (COD=200~300) in the mixing water. The results of unconfined compression strength test (UCST) were well consistent with the results of Vicat equipment test.

Keywords : Solidification, Pore water contaminantion, Cement, Unconfined compression strength, Sandy soil, Vicat equipment test

I. 서 론

최근 인류는 각종 오염으로 인해 심각한 환경문
제에 직면해 있으며, 산업화 과정에서 필연적이라

고 할 수 있는 환경 오염문제를 해결하기 위한 합
리적이고 효과적인 환경기술 개발이 절실히 요구되
고 있는 시점이다. 일반적으로 환경문제는 오염매
체를 중심으로 대기, 수질, 토양으로 크게 나눌 수
있으며, 대기와 수질은 오염발생 후 그 징후가 바
로 나타나기 때문에 상대적으로 대책수립이 신속하
고 용이할 수 있다. 그러나 토양은 다공질체의 특
성으로 인하여 오염발생 후 상당한 잠복기를 거친
후 그 영향이 나타나며, 또한 지하수의 흐름에 따

* 경상대학교 농업시스템공학부 농공학전공
전임강사(농업생명과학연구원)
Tel.: +82-55-751-5430
fax: +82-55-752-0884
E-mail address: chanyu@nongae.gsnu.ac.kr

라 주변 지반으로 오염이 광범위하게 확산되기 때문에 대책수립이 어렵고 어떤 경우에는 많은 경제적 부담이 발생하게 된다.

이러한 토양오염 문제에 대해서 외국에서는 1960년대 후반부터 공식적으로 오염 토양 및 지하수의 보전·정화방법에 대한 연구가 시작되어 최근에 이르기까지 수많은 공법이 개발되어 실용화되어 왔다. 그러나 아직까지 믿을 수 있고 효과적인 대책공법의 개발이 이루어지지 못하고 있는 것이 현실이다. 우리나라는 지난 1994년 토양환경보전법이 제정되면서 토양과 지하수의 환경보전에 대한 관심을 높이고, 쓰레기 매립장 주변이나 폐금속 광산 그리고 유티저장시설 등에서 토양오염의 심각성은 널리 알려져 있다. 또한 오염 토양의 정화 및 오염확산방지를 위한 각종 대책공법들이 실용화 단계에 있으나 아직은 대부분의 기술들이 개발단계이거나 실증시험단계에 있는 것으로 보이며, 외국에서 도입되는 기술들은 오염성분이나 지질적인 특성 등에 따라서 적용성에 차이가 있으므로 국내에 도입·적용하는 경우에 경제적·시간적 문제점을 가지고 있다. 따라서 국내 여건에 맞는 환경기술의 개발이 빨리 이루어져야 하겠다.

미국의 경우에는 여러 가지 오염복원 공법이 개발되어 적용되어 왔지만 그 중에서 안정화/고형화(stabilization/solidification)공법의 적용성과 효과가 매우 높은 것으로 알려져 있다. 물론 현장외(ex-situ) 처리방법이 일반적이었지만 최근에는 현장내 혹은 원위치(in or on-situ) 처리방법이 많이 적용되고 있다(U.S. EPA, 2001). 특히 현장내나 원위치 안정화/고형화 공법은 우리나라에서는 1980년대 초부터 연약지반의 지지력 증가 혹은 침하량 감소를 목적으로 주로 사용하여 왔던 천층이나 심층 고화처리공법과 시공장비나 시공방법 면에서 유사한 특징이 있다(Al-Tabbaa & Evans, 1997; Bell, 1993; Day & Ryan, 1995; Hermanns-Stengele, 1997; Tatsuoka et al., 1996). 우리나라에서도 최근에는 쓰레기매립장, 방

사능폐기물, 그리고 광산 폐기물의 처리에 사용된 경우가 있다(Yu et al., 2002). 따라서 그 동안의 고화처리 장비와 시공기술을 활용하여 오염토양에 대한 대책공법으로 이용한다면 그 효용성이 매우 클 것으로 예상된다. 그러나 고화 처리공법의 효과는 토양의 광물구성뿐만 아니라 공극수의 화학적 성질에 영향을 받으며, 특히 유기성분은 초기 응결·경화과정에서 처리효과를 저하시키는 것으로 알려져 왔다(Croft, 1967; Day et al., 1997; Gotoh, 1996; Huttunen & Kujala, 1996; Kujala et al., 1996; Schwarz & Krizek, 1995, 1996; Vipulanandan et al., 1995; Vipulanandan & Wang, 1997). 그러나 Al-Tabbaa & Moore (1996) 등에 따르면 유기성분인 메틸렌블루(methylene blue)의 경우에는 농도가 증가함에 따라서 시멘트의 응결시간이 단축되어 시멘트의 고결 과정에 영향을 주지 않는 것으로 나타나 아직까지 오염성분에 따른 명확한 이론이 정립되어 있지 못한 실정이다. 그러나 이러한 문제점의 해결을 위해서 각각의 모든 오염성분을 대상으로 한 연구는 현실적으로 어려움이 있고, 실제 적용에 있어서는 다양한 성분들이 농도차이를 가지고 혼재되어 현장의 특성을 설계와 시공에 반영할 수 있는 현실적인 방안의 모색이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 고화처리공법이 오염토양의 복구에 효과적으로 적용될 수 있고 한편으로는 일반 건설현장에서 공학적인 측면에서 고화처리 효과를 제고시키기 위하여 사질토를 대상으로 공극수의 오염도에 따른 보통 포틀랜드 시멘트의 고화처리 효과를 알아보기 위하여 그 구성성분이 확연하게 차이가 나는 일반상수(tap water), 생활오수 그리고 폐기물 매립장의 침출수를 배합수로 사용하여 현장에서 발생 가능한 오염상황을 가정한 실내 실험을 수행하였다. 실험에서는 초기 응결시간과 양생기간에 따른 시료의 강도실험을 실시하여 그 결과를 비교·분석하였다.

II. 재료 및 실험방법

1. 실험재료

시험에 사용된 토양 샘플은 일반적으로 투수계수가 커서 오염물질의 이동이 용이한 사질토를 대상으로 하였으며, 시료는 한국산업규격(KS F)에 정해진 절차에 준해서 물리적 성질을 파악하기 위한 시험이 실시하였다. 그 시험결과는 Table 1과 같고 입도분포는 Fig. 1과 같다.

또한 시료중의 중금속함유량을 분석하여 Table 2에 제시하였으며, 중금속 성분의 농도가 토양환경보전법상(Ministry of Environment, 2002)의 가지역의 우려기준 이하인 것으로 나타났다. 실험에서는 일반적인 토양오염형태를 실내에서 모사하기 위하여 2가지 종류의 폐기물 매립장의 침출수(Leachate-A, Leachate-B)와 정화조에서 채취

한 생활오수(waste water)를 시멘트의 배합수로 사용하였다. 각각의 배합수의 개략적인 화학적 특성을 파악하기 위한 분석(Dongwha tech., 2003)을 실시하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 2 The Concentration of heavy metal in the sandy soil (Unit: mg/kg)

Soil	Cr	As	Cd	Pb	Cu	Hg	Organic
Silty sand	1.000	5.000	N.D.	12.000	N.D.	N.D.	4.42 %

Table 3 Characteristics of leachates used

Item	Waste water	Leachate A	Leachate B	Unit
pH	7.77	8.76	8.91	-
COD	220.00	820.00	1100.00	mg/L
BOD	182.00	285.00	585.00	"
Cr	0.001	1.02	N.D.	"
As	N.D.	0.22	1.33	"
Cd	N.D.	0.03	0.08	"
Pb	N.D.	0.44	0.25	"
Cu	0.05	0.03	21.48	"
Hg	N.D.	0.005	N.D.	"

Table 1 Physical properties of soils

Soil type	W _n (%)	G _s	Passing 74μm (%)	LL (%)	PI (%)	USCS
Clayey sand	7.6	2.65	30.3	30.5	8.0	SC

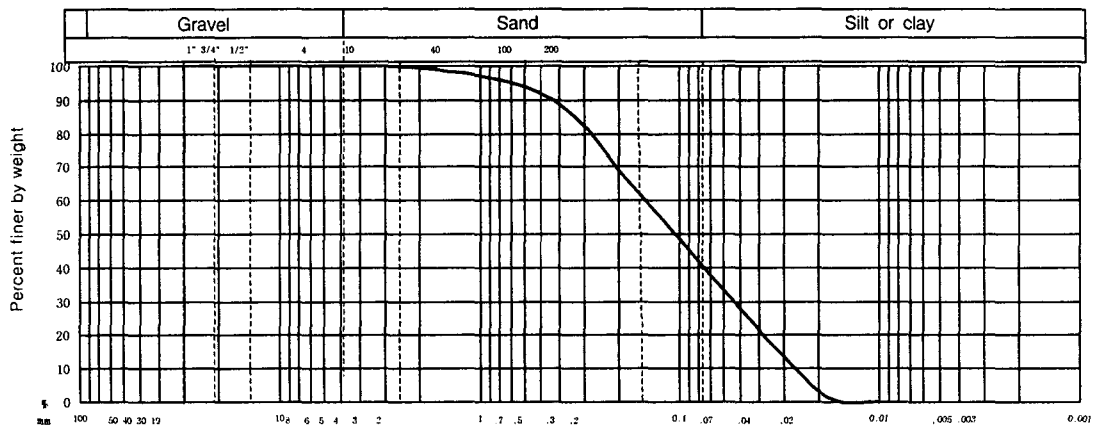


Fig. 1 Grain-size distribution of silty sand

생활오수의 경우에는 중금속성분은 미량의 Cr과 Cu만이 검출되었을 뿐 다른 성분은 검출되지 않았으며, 한편 COD 혹은 BOD는 침출수 내의 상대적인 유기성분의 함유정도를 추측하는데 이용할 수 있는데, Table 3에서 침출수 A의 COD는 820 그리고 침출수 B는 1100으로 유기물의 함량이 높은 것으로 나타났다. 또한 침출수의 성분중에서 무기성분인 중금속의 농도도 높은 것으로 나타나고 있으며, 두가지 침출수 모두 pH 는 8.76, 8.91으로 알칼리성을 나타내고 있었다. 강도 실험시에는 COD 820인 침출수 A를 증류수와 1:1로 희석하여 COD 410으로 가정하여 배합설계에서 사용하였으며, 일반 상수에 대해서는 별도의 성분분석을 실시하지 않았다.

2. 배합방법

실내 배합설계에서는 배합표에 따라서 재료를 계량하여 모르타르 믹서로 2분간 혼합해서 P.V.C.관(높이 110 mm, 직경 55 mm)으로 제작한 몰드에 투입하여 한쪽 끝을 비닐로 싸고 고무줄로 묶어서 공시체의 함유비가 변화되지 않도록 하였다(Chungang Univ, 1996). 이때 시멘트의 첨가량은 흙 시료의 건조중량의 7%, 10% 그리고 13%로 하였으며, 시멘트는 배합수와 1:1의 비율로 섞어 슬러리 상태로 만들어 혼합하고 자연상태에서 교반·혼합되는 경우를 가정하여 별도의 다짐은 실시하지 않았다. 배합 약 6시간 후에 시료추출기로 추출하여 습윤양생기에 넣고 온도 23°C, 상대습도는 95% 이상 유지되도록 양생하여 재령 3, 7, 14 그리고 28일의 일축압축강도시험을 변형속도 2mm/min의 속도로 실시하였다. 각각의 조건에 대하여 샘플 5개씩 실험하여 그 값을 평균하였다. 배합수는 앞서 언급한 두 종류의 침출수와 생활오수 그리고 일반 상수를 사용하였다.

3. 응결시간의 측정

응결시간은 비카장치를 이용하여(KSF 5103) 측정하였으며, 모르타 믹서로 시료를 배합한 후 표준침이 25 mm 침입할때까지의 시간을 측정하여 응결시간을 정하였다. 배합수는 증류수, 생활오수, 침출수 그리고 각 중금속별 기준액을 증류수에 희석하여 사용하였다.

Ⅲ. 실험결과 및 고찰

토양의 오염은 오염성분이 토립자 표면에 흡착되어 있거나 아니면 공극사이에 오염성분이 독립적으로 존재하는 경우도 있지만, 수용성인 오염성분들은 공극수에 용해되어 토질을 오염시키는 경우도 있다. 이런 경우는 지하수 오염에 의해 토질이 오염되는 경우로 볼 수 있다. 일반적으로 흙에 시멘트를 첨가하면 개량토는 시간의 경과에 따라서 수화가 진행되어 흙 입자의 응집, 접착, 수분흡착이 이루어지고, 그 뒤에 더 시간이 경과하면 포조란반응이 시작되는데, 이때는 흙입자의 입단화, 고결·경화과정에 의해서 컨시스턴스가 변화한다(Croft, 1967; Japan ACI, 1994). 이런 반응이 원만히 진행될 수 있는 조건에서는 높은 처리토의 강도가 얻어지며, 그렇지 않은 경우는 매우 낮은 강도가 얻어진다.

1. 공극수의 오염과 초기응결시간의 변화

따라서 본 연구에서는 여러 가지 성분이 혼재되어 있는 공극수의 성분 및 농도가 처리효과에 미치는 영향을 보다 자세히 알아보기 위하여 응결시험방법(KSF-5103)에 준해서 비카장치를 이용한 시멘트의 응결시간을 측정하여 오염성분별 초기 양생과정에 미치는 영향에 대하여 관찰하였다.

Fig. 2는 일반 상수(TW), 침출수 B의 원수(LB 100%), 생활오수의 원수(WW 100%), 증류수

(DW) 그리고 침출수와 생활오수를 상수와 희석시켜서 일반상수에 생활오수 50%를 희석시켜 사용한 경우(WW 50%), 일반상수에 침출수 B 20%를 희석시켜 사용한 경우(LB 20%), 일반상수에 침출수 B 50%를 희석시켜 사용한 경우(LB 50%)에 대해서 시멘트의 응결실험을 실시한 결과를 정리한 것이다.

그림에서는 일반상수에 LB 20%의 경우가 응결시간이 가장 빠르게 나타났으며, 그 다음이 LB 50% 그리고 TW와 LB 100%의 순서로 응결시간이 빠른 것으로 나타났다.

전체적으로는 무기성분이나 유기성분의 함유량이 LB 100%, LB 50%, LB 20%, WW 100%, WW 50%, TW, DW의 순으로 높았으나 응결실험에서는 LB 20%, LB 50%, TW, LB 100%, WW 50%, WW 100%, DW의 순으로 응결시간이 빠르게 나타나서 오염성분의 함량간에 직접적인 관계는 쉽게 찾을 수 없었다.

따라서 오염성분을 크게 무기성분과 유기성분으로 구분하여 요소 실험을 별도로 실시하였다. 본

연구에서는 무기성분에 대해서는 토양환경보전법상의 중금속성분을 중심으로 각각의 성분의 상대적인 반응의 차이를 확인하기 위하여 증류수에 중금속 표준용액들을 50 ppm 희석시켜 시멘트와 혼합한 몰타르를 대상으로 응결시간을 측정하였다. Fig. 3은 그 결과를 정리한 것이며, 그림에서는 중금속 성분간에 응결시간의 차이가 있으며, 증류수만을 사용한 경우보다는 응결시간이 빠른 것으로 나타나 무기성분이 공극수에 포함된 경우에는 시멘트의 초기 응결시간에 큰 영향을 주지는 않으며, 납(Pb), 여러 가지 중금속 성분이 섞여 있는 혼합용액(complex) 그리고 크롬(Cr)의 경우에는 상대적으로 빠른 응결현상을 나타내었다.

한편 공극수 내의 유기성분의 농도와 처리효과와의 관계를 알아보기 위하여 공극수의 COD 값을 기준으로 응결실험결과를 재 분석하였다. Fig. 4는 공극수내에 유기성분과 무기성분이 모두 들어있던 침출수 B의 경우를 일반 상수의 COD를 '0'으로 가정하여 함께 분석한 결과로서 COD 200~400 정도에서 응결시간이 가장 빠른 것으로 나타났으며, 그 이후에는 다시 응결시간이 증가하는 경향을 나타내었다.

한편 Fig. 5는 공극수 내에 유기성분만이 주로 포함되어있던 생활오수의 경우를 일반상수와 함께 분석한 자료로서 일반상수의 응결시간이 가장 빠르게 나타났으며, COD 값이 증가하면서 응결시간도 함께 증가되는 경향을 나타내었다. 또한 COD의 수치를 비교해보면 침출수에서는 COD = 400에서 응결시간 134분 정도로 예상됐으나 생활오수의 경우에는 COD=200에서도 실제 응결시간은 300분 정도가 소요되어 COD 값은 1/2이었지만, 응결시간은 2배 이상 오래 소요되었다.

따라서 공극수나 배합수 내의 유기성분의 농도가 일정 이상이 되면 무기성분의 유무나 농도가 처리 효과에 영향은 미치는 것으로 판단되었다. 다만 실제 지반조건에서는 공극수 중에 오염성분이 단일 성분만이 존재하는 경우는 드물고 침출수나 생활오

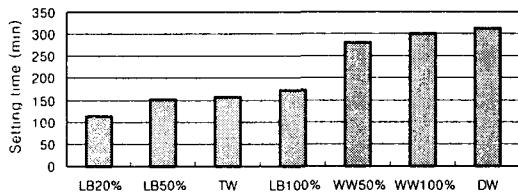


Fig. 2 Setting time of cement according to the concentration of leachate-B and waste water

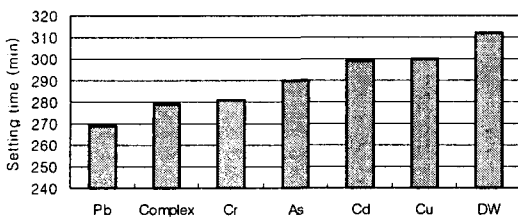


Fig. 3 Setting time of cement according to the heavy metal

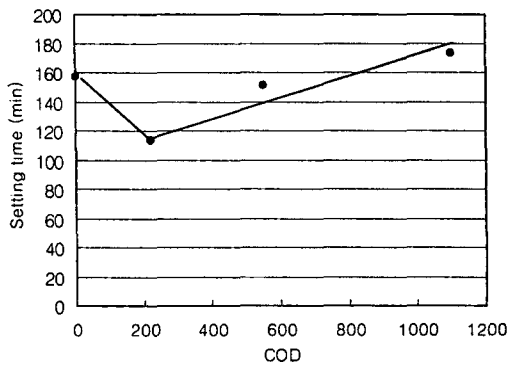


Fig. 4 The relationship of COD vs. setting time (for leachate-B)

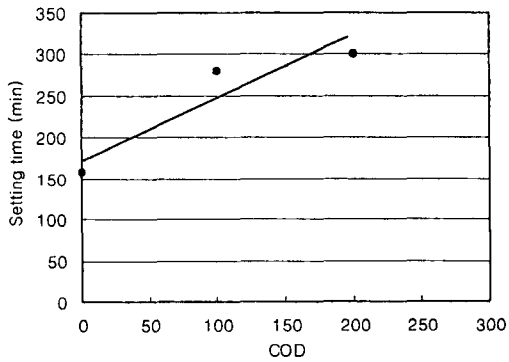


Fig. 5 The relationship of COD vs. setting time (for waste water)

수와 같이 여러 가지 성분이 혼재되어 있으므로 본 연구에서 제시한 COD의 수치와 무기성분의 유무를 확인하므로써 공사 시행전에 개략적인 적용성과악은 가능하리라 판단된다. 이러한 사실들은 중금속 성분등이 다량 포함되어 있는 산업쓰레기 매립장이나 폐광산 주변 오염지역에 대한 고화처리공법의 적용성이 좋았던 원인이었다고 판단되었다 (Yu et al., 2002).

2. 공극수의 오염과 고화처리 강도변화

본 연구에서는 공극수의 오염이 실제적으로 고화처리토의 강도에 미치는 영향의 정도를 알아보기

Table 4 Result of the unconfined compression test (Unit : kgf/cm²)

Samples	Curing days			
	3	7	14	28
C7% + TW	3.90	5.70	9.18	13.57
C10% + TW	10.50	13.90	14.05	23.80
C13% + TW	13.70	17.30	23.93	31.26
C7% + LA	11.80	13.70	18.08	22.10
C10% + LA	16.00	23.50	35.90	42.08
C13% + LA	21.30	28.80	41.40	54.51
C7% + LB	1.25	2.23	3.01	3.38
C10% + LB	2.10	3.54	3.78	4.04
C13% + LB	2.93	3.84	3.87	4.60
C7% + WW	2.36	3.68	4.46	5.50
C10% + WW	3.79	5.11	6.84	9.35
C13% + WW	4.92	7.05	10.03	13.87

* C : Cement, TW : Tap water, LA : Leachate-A, LB : Leachate-B, WW : Waste water

위하여 사질토를 대상으로 공시체를 제작하여 재령 3, 7, 14 그리고 28일에서 압축강도 실험을 실시하였다. 실험결과는 Table 4와 Fig. 6과 같다.

재령 28일을 기준으로 하였을 경우, 침출수 A를 배합수로 사용하고 시멘트 첨가량을 13%로 한 경우에 일축압축강도가 가장 큰 것으로 나타났으며, 침출수 B를 사용하고 시멘트 첨가량은 7%로 한 경우에서 일축압축강도가 가장 작은 것으로 나타났다.

Fig. 6(a)에서는 배합수로 일반상수(tap water)를 사용한 경우로서 일축압축강도는 시멘트의 첨가량이 클수록 또한 양생기간이 경과될수록 계속 증가하는 일반적인 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 6(b)의 유기성분이 일반상수보다는 높은 생활오수를 배합수로 사용한 경우에는 일반 상수보다는 일축압축강도가 낮은 것으로 나타났다. 한편 침출수 A를 사용한 경우인 Fig. 6(c)에서는 일축압축강도가 일반 상수나 생활오수를 사용했을 경우보다 상대적으로 매우 크게 나타나고 있는데, 이 원인은 응결시험결과로부터 배합수로 사용한 침출수

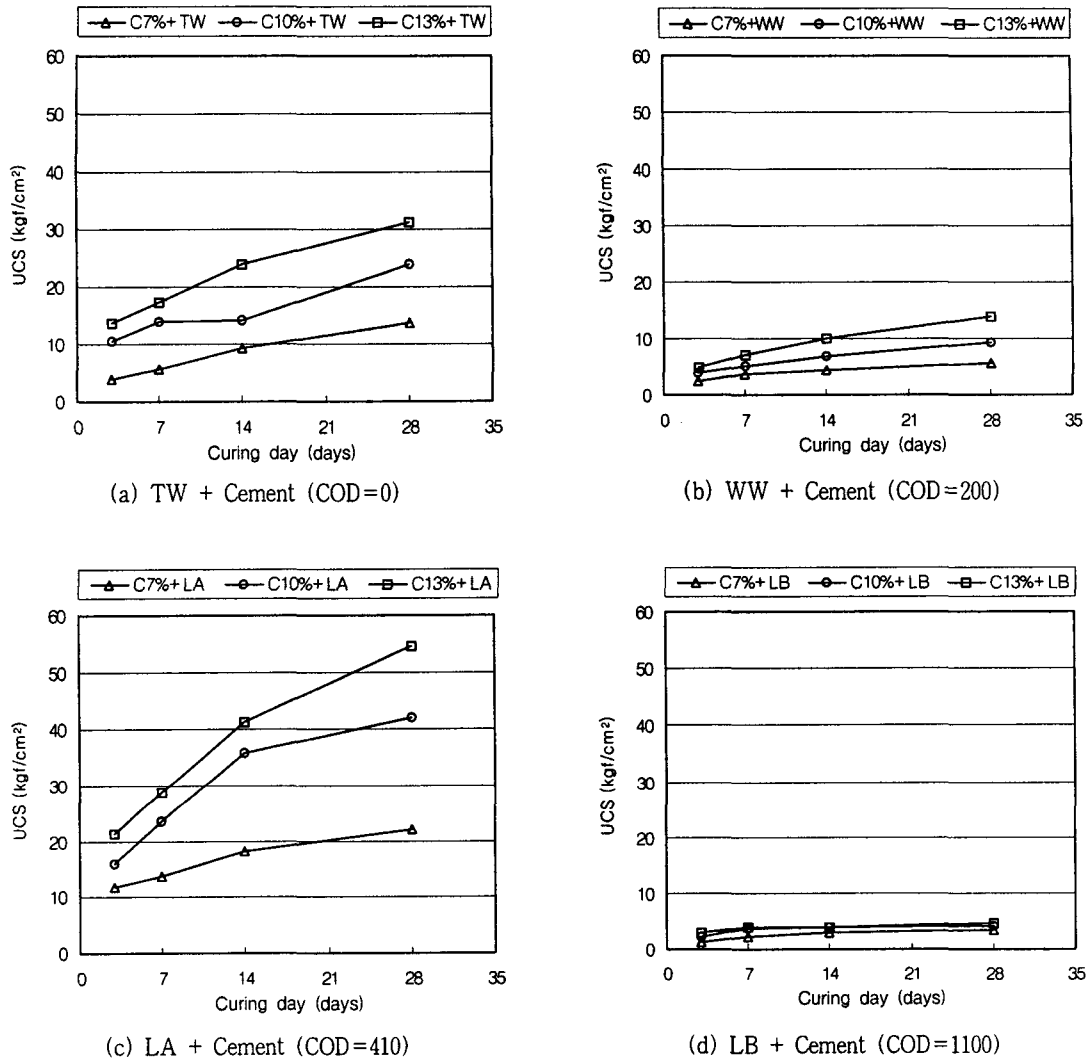


Fig. 6 The result of UCST with the curing day

A의 COD = 410 정도로서 초기 양생과정이 비교적 양호하게 진행되었고 무기성분들도 일반 상수보다는 많이 포함되어 있기 때문으로 판단되었다. 하지만 상대적으로 COD값(1100)이 높은 침출수 B를 사용한 Fig. 6(d)의 경우에는 일축압축강도가 다른 경우들보다 현저하게 낮은 것으로 나타나서 높은 유기성분의 농도가 강도발현에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞선 응결실험

에서의 결과들과도 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

토양 종류와 공극수의 구성성분과 농도에 따라서 고화처리의 효과는 다르게 나타날 수 있으며, 본 연구에서는 그 중에서 공극수의 오염성분과 농도가

포틀랜드 시멘트를 이용한 고화처리효과에 미치는 영향에 대해서 중점을 두고 실험을 실시하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 유기성분과 무기성분의 농도가 포틀랜드 시멘트의 응결시간에 미치는 영향을 알아보기 위한 응결실험에서는 공극수의 구성성분이 유기성분과 무기성분이 모두 존재하는 경우와 유기성분만이 존재하는 경우에 응결시간이 다른 것으로 나타났다.

2. 유기성분과 무기성분이 모두 존재하는 침출수 B의 경우에는 공극수의 COD 200~400 ppm 정도에서 포틀랜드 시멘트의 응결시간이 일반 상수를 사용한 경우보다 빠른 것으로 나타났다.

그러나 주 오염성분이 유기물이었던 생활오수의 경우에는 COD 200 ppm에서도 COD가 400 ppm이었던 침출수보다 응결시간이 늦은 것으로 나타났다. 따라서 공극수의 성분이 유기물이 대부분인 생활쓰레기 매립장주변의 오염토양의 처리에 고화처리공법의 적용시에는 주의를 요하는 것으로 판단되었다.

3. 중금속의 성분별로 실시한 응결실험의 결과에서는 납의 응결시간이 가장 빨랐으며, 그 다음이 크롬, 비소 등의 순으로 나타났다. 그러나 모든 중금속의 응결시간은 증류수만을 사용한 경우보다 빠르게 나타났다.

4. 공시체를 제작하여 강도실험을 실시한 결과에서는 COD 값이 410인 침출수 A를 사용한 경우에 일축압축강도가 가장 크게 나타났으며, 다음으로는 일반상수, 생활오수 그리고 침출수 B의 순서로 강도가 크게 나타나서 응결실험의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

References

1. Al-Tabbaa, A. and Moore, G. D., 1996, Preliminary studies of solidification and chemical fixation of liquid waste containing methylene blue, *Grouting and Deep Mixing*, Yonekura, Terashi & Shibazaki ed., Rotterdam, 727~732
2. Al-Tabbaa, A. & C. W. Evans, 1997, Medium term performance of stabilised/solidified contaminated soil-grout materials, Vol. 3, *XIV ICSMFE*, Hamburg, pp. 1941~1946
3. Bell, F. G., 1993, Stabilization of clay materials with cement and pulverized fuel ash, *11th SAG conference*, pp. 4~8
4. Chungang Univ., 1996, *A study on the shallow treatment of soft ground (II)*
5. Croft, J. B., 1967, The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization, *Geotechnique* 17, pp. 119~135
6. Day, S. R. and Ryan, C., 1995, Containment, stabilization and treatment of contaminated soils using in-situ soil mixing, *GEOENVIRONMENT 2000*, Vol. 2, pp. 1349~1365
7. Day, S. R., Zarlinski, S. J. and Jacobson, P., 1997, Stabilization of cadmium-impacted soils using jet-grouting techniques, *Proc. of the Conf. In Situ Remediation of the Geo-Environment*, Evans ed, Geotechnical Special Publication No. 71, ASCE, pp. 388~402
8. Dongwha Tech., 2003, *Standard method*
9. Gotoh, M., 1996, Study on soil properties affecting the strength of cement treated soils, *Grouting and Deep Mixing*, Yonekura, Terashi & Shibazaki ed., Rotterdam, pp. 399~404
10. Hermanns-Stengele, R., 1997, Waste deposit Encapsulation using Vertical Barriers, Vol. 3, *XIV ICSMFE*, Hamburg, pp. 1911~1914
11. Huttunen, E. and Kujala, K., 1996, On the stabilization of organic soils, *Grouting and Deep Mixing*, Yonekura, Terashi & Shibazaki ed., Rotterdam, pp. 411~414
12. Japan ACI, 1994, *Manual for ground improvement using cement like solidifying reagent -2nd Ed.-*, pp. 17~48

13. Kujala, K., Makikyro, M. and Lehto, O., 1996, Effect of humus on the binding reaction in stabilized soils, *Grouting and Deep Mixing*, Yonekura, Terashi & Shibazaki ed., Rotterdam, pp. 415~420
14. Ministry of Environment, 2002, *Soil Preservation Policy*
15. Schwarz, L. G. and Krizek, R. J., 1996, Anisotropy of Gasoline- Contaminated Sands Grouted with Microfine Cement, *Environmental Geotechnics*, Vol. 1, Masashi Kamon ed., Proc. of The 2nd Intl' Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, pp. 1067~1072
16. Schwarz, L. G. and Krizek, R. J., 1995, Grouting Gasoline-Contaminated Sand with Microfine Cement, *GEOENVIRONMENT 2000*, Vol. 2, pp. 1366~1380
17. Tatsuoka, F., Y. Kohata, K. Uchida, & K. Imai, 1996, Deformation and strength characteristics of cement-treated soils in trans-Tokyo bay highway project, *Grouting & Deep Mixing*, Yonekura, Terashi & Shibazaki ed., Rotterdam, pp. 453~459
18. Vipulanandan, C., Mamidi, H. B., Wang, S. and Krishan, S., 1995, Solidification/stabilization of phenol contaminated soils, *GEOENVIRONMENT 2000*, Vol. 2, pp. 1408~1421
19. Vipulanandan, C. and Wang, S., 1997, Solidification/stabilization of hexavalented contaminated soil, *Proc. of the Conf. In Situ Remediation of the Geoenvironment*, Evans ed, Geotechnical Special Publication No. 71, ASCE, pp. 362~373
20. U.S. EPA, 2001, *Treatment technologies for site cleanup : Annual status report(10th ed)*, Office of Solid waste & Emergency response, EPA-541-R-01-004
21. Yu, C., W. S. Han, S. Y. Kim, D. K. Chung, & M.B. Han, 2002, Protection of underground environment from contamination, *Proc. of '02 Dredging & Geoenvironmental Conf.*, pp. 17~29