

## 고화준설토의 역학적 특성과 식생 발아 특성

### Mechanical and Germination Characteristics of Stabilized Dredged Soil

이 미 지<sup>1)</sup> · 문 경 주<sup>2)</sup> · 윤 길 림<sup>3)</sup> · 음 현 미<sup>2)</sup> · 김 윤 태<sup>†</sup>

Miji Lee · Kyoungju Mun · Gillim Yoon · Hyunmi Eum · Yuntae Kim

Received: December 9<sup>th</sup>, 2013; Revised: December 20<sup>th</sup>, 2013; Accepted: January 28<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT :** In this paper, mechanical and germination characteristics of stabilized dredged soils were investigated to recycle dredged soil in eco-friendly manner such as waterfront construction. Non sintering binder (NSB), which was developed by using interchemical reactions between slag, high-calcium fly ash, alkali activator on the dredged marine clay, was added to dredged soil. Ordinary portland cement was also used for the comparison of two binders. Experimental tests such as flow test and unconfined compressive test were carried out to evaluate characteristics of stabilized dredged soil. Leaching test, pH measure, vegetation germination test were also conducted to consider environmental applicability. The unconfined compressive tests shows that unconfined compressive strength (UCS) also increases with the increase of curing time and mixed ratio. UCS of NSB mixtures were higher than those of OPC mixtures. Germination tests showed that germination and sprouting date are better in NSB mixture than OPC mixture. It can be explained that germination decreased as pH and 7-day strength increased.

**Keywords :** Dredged soil, Non sintering binder, Germination, pH, Recycling

**요 지 :** 본 논문에서는 준설토를 친수공간 조성과 같이 친환경적으로 재활용하기 위하여 고화준설토를 제작하였고, 역학적 특성과 식생 발아 특성을 분석하였다. 사용된 고화제는 고로슬래그 미분말을 기본재료로 고칼슘플라이애시 및 알칼리 복합 활성화제를 이용하여 제작한 고화제(Non Sintering Binder, NSB)이며, 비교·분석을 위해 포틀랜드 시멘트도 사용하였다. 고화준설토의 지반공학적인 개량 효과를 검토하기 위하여 유동성 시험, 단위중량 시험, 일축압축시험 등과 같은 다양한 실내 시험을 실시하고, 환경에 미치는 영향을 분석하기 위하여 중금속 용출과 식생 발아 실험을 실시하였다. 일축압축강도를 통하여 고화제의 함량이 증가할수록 모든 고화준설토의 강도가 증가하는 경향을 볼 수 있으며, NSB 고화준설토가 OPC 고화준설토보다 높은 강도를 나타냈다. 식생 발아 실험 결과 OPC 고화준설토보다 NSB 고화준설토에서 발아 시기와 발아율이 우수하게 나타났다. 고화준설토의 pH와 7일 강도가 클수록 발아율과 발아 시기는 감소하는 경향을 보인다.

**주요어 :** 준설토, 비소성 무기 고화제, 식생 발아, pH, 재활용

## 1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 지리적 요건으로 인해 연안 및 해양 개발에 대한 관심이 집중되었다. 대규모 신항만 건설, 선박의 대형화, 물류의 컨테이너화가 진행됨에 따라 해상 항로 유지, 오염해역 준설 등과 같은 연안 준설로 엄청난 양의 해양 준설토가 발생하고 있다. 그러나 준설토는 대부분 대규모 투기장에 단순 투기 및 매립에만 의존하고 있는 실정이다. 이러한 준설토의 단순 투기 및 매립은 연안환경 피해, 어장의 황폐화 및 갯벌의 파괴 등 다양한 영향을 미칠 뿐 아니라 오염된 준설토의 경우 중금속 용출 등으로 인한 2차 오염이 유발될 수 있으므로 친환경적인 준설토의 적극적인 재활용 방안이 절실하다. 준설토 활용에 대한

국외 연구 동향을 살펴보면 미국, 유럽, 일본 등과 같은 선진국에서는 이미 해양환경보호라는 측면에서 해양 준설토의 재활용에 대한 필요성을 실감하여 이에 대한 다양한 연구와 재활용이 활발히 진행되고 있다(Tang et al., 1996; Kikuchi & Yoshino, 1998; Hirasawa et al., 2000). 국내의 경우 준설토 재활용 기술을 위한 연구가 2000년도 초반부터 활발히 진행되어 왔으며, 주로 시멘트를 혼합한 준설토에 기포 또는 EPS를 혼합한 경량토의 적용성을 평가하기 위하여 역학적인 특성을 분석하거나 응력-거동 및 압축강도 특성을 분석하는 연구가 주로 수행되었다(Kim et al., 2002; Kim et al., 2006; Kim & Kang, 2008; Kim & Lee, 2002; Nam & Yun, 2004; Yun & Kim, 2002).

그러나 준설토 재활용을 위하여 혼합되는 시멘트 또한

1) Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

2) CMD Group-Technical R&D Center

3) Korea Institute of Ocean Science & Technology

† Department of Ocean Engineering, Pukyong National University (Corresponding Author : yuntkim@pknu.ac.kr)

환경적으로 많은 문제가 제기되고 있다. 전 세계적으로 지구 온난화에 의한 이상기후가 자연재해를 불러일으키면서 지구 온난화에 대한 부정적인 인식이 확산되고 있다. 지구 온난화는 대기 중의 온실가스 농도가 증가하면서 유발되는 것으로 온실가스에는 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소화불화탄소류, 과불화탄소류, 육불화화황, 오존, 수증기 등이 있는데 1985년 세계기상기구(WMO)와 국제연합환경계획(UNEP)이 이산화탄소가 온난화의 주범임을 공식적으로 선언하였다. 이로 인해 전 세계적으로 이산화탄소의 배출량을 규제하기 위하여 교토의정서 가입국들에 한해 탄소배출권 거래 제도를 도입하였으며, 우리나라의 경우 2015년부터 이 제도가 도입될 예정이다. 시멘트 산업은 이산화탄소의 배출 원인 중 하나로 시멘트 생성 시 주원료인 석회석의 탄산칼슘이 고온(900~1,000 °C)에서 분해되어 생석회(산화칼슘)가 생성되며, 이때 이산화탄소가 발생하게 된다. 1톤의 시멘트를 제조하는 경우 약 0.8~1.0톤의 이산화탄소가 배출되며, 이렇게 배출된 이산화탄소는 온실가스 중 55%를 차지하는 전체 이산화탄소의 약 8%를 차지한다(Kim et al., 2012b). 향후 온실가스 감축은 시멘트 업계의 가장 큰 현안으로 등장할 것이며, 이에 대한 근본적인 대책이 요구된다. 따라서 천연자원 사용량 감소와 더불어 소성 공정을 거치지 않아 이산화탄소의 배출량이 시멘트의 약 10분의 1에 해당하는 새로운 개념의 비소성 무기계 바인더 개발이 세계적으로 많은 관심을 받고 있다.

따라서 본 논문에서는 해양환경오염 및 처리 등에 많은 문제를 안고 있는 준설토의 친환경적인 재활용 방안을 제시하고자 고로슬래그, 고칼슘플라이애시, 기타 자극제 혼합물을 기본재료로 제조된 비소성 무기 고화제(Non Sintering Binder, NSB)와 준설토를 혼합한 NSB 고화준설토를 제작하였다. 또한 NSB 고화준설토의 역학적 특성과 식생 발아 특성을 비교·분석하기 위해 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)를 동일한 배합비로 혼합하여 OPC 고화준설토를 만들었다. 고화준설토의 지반공학적 개량 효과 검토를 위해 유동성 시험, 일축압축시험 등 다양한 실내시험을 통해 역학적 특성을 알아보았고, 환경적인 영향을 검토하기 위해 중금속 용출 시험, 식생 발아 실험을 실시하여 고화준설토

의 친환경적인 적용성을 검토하였다.

## 2. 재료 특성 및 시험방법

### 2.1 재료특성

본 연구에서 사용된 준설토(Dredged Soil, DS)는 부산신항 배후부지에서 채취된 것으로 기본적인 물리적 특성은 Table 1과 같다. 비중은 2.5이며, 통일분류법(USCS)으로 분류한 결과 실트질 점토인 CL로 나타났다. 또한 준설토의 pH는 7.98로 중성에 가까운 약알칼리성을 띄고 있으며, 염분은 0.2%로 저염분의 상태를 나타냈다. 산업부산물을 활용하여 제작된 고화제는 고로슬래그 미분말을 기본재료로 고칼슘플라이애시 및 알칼리 복합 황산화제를 이용하여 제작되었다(Mun et al., 2010). Table 2는 산업부산물을 활용하여 제조된 고화제(NSB)와 포틀랜드 시멘트(OPC)에 대한 화학 성분 분석은 XRF(X-ray fluorescence) 실험을 통해 구하였다. 두 고화제 모두 주요 구성성분은 생석회(CaO), 실리카(SiO<sub>2</sub>), 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)이다. 포틀랜드 시멘트 생석회 함량이 NSB보다 더 높게 나타났고 실리카와 알루미늄은 NSB에서 더 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

식생 발아 실험에 사용된 통통마디는 함초라고도 불리는 염생식물(Fig. 1) 다른 종에 비해 발아 시기가 빨라 토양



Fig. 1. Salicornia herbacea

Table 1. Properties of dredged soil

Initial water content (%)	Specific gravity	Liquid limit (%)	Plasticity limit (%)	Plasticity index	Percent passing No. 200 sieve (%)	USCS	pH	Salinity (%)
49.5	2.5	38.2	21.8	16.5	82.7	CL	7.98	0.2

Table 2. Chemical properties of NSB and OPC

Type	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	SO <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)
NSB	45.4	29.8	10.2	7.3	4	1.1	0.8
OPC	62.4	21.58	4.78	2	2.8	3.3	1.3

염분, 시비조건, 온도 등의 여러 환경요인에 따른 생장 및 발아특성 연구가 여러 연구자에 의해 수행되었다(Kim et al., 2012a; Kim, 2013; Busan Green Environment Center, 2011; Lee et al, 2009; Jung, 2011; Jo et al., 2002). 선행 연구 결과를 종합한 결과 통통마디의 식생 발아 가능 조건은 pH가 약 5.7~9.26, 온도는 약 5~30 °C, 염분농도는 약 0~2.5 %로 나타났다. 그중에서도 저염(0~0.5 %), 고온(20~25 °C)에서 발아율이 좋은 것으로 보고되었다.

## 2.2 시험방법

각 고화준설토의 역학적 특성과 식생 발아 특성을 비교·분석하기 위해 준설토와 화강풍화토를 1:1의 무게비로 혼합한 시료에 고화제를 첨가하여 시료를 제작하였다. 다양한 배합비 및 양생일에 따른 유동성 시험, 일축압축시험 등의 역학적 실험과 배합조건에 따른 식생 발아 실험을 실시하였다. 혼합토의 적절한 유동성을 고려하기 위하여 예비실험 결과를 바탕으로 준설토의 초기 함수비를 65 %로 맞추고 준설토와 화강풍화토의 무게 대비 고화제를 각각 혼합하였다. NSB와 OPC 고화제의 배합 조건은 Table 3에 나타내었다. 또한 제작된 모든 공시체는 항온·항습 상태(20 ± 2 °C)에서 습윤양생을 실시하였다. 시험 시 제작된 공시체는 높이 100 mm, 직경 50 mm의 원통형 몰드를 이용하였으며, 일축압축시험 시 축 변형률은 1.0 %/min으로 하였다. 또한 모든 시험은 축 변형률이 약 11 %일 때 중지하였다.

또한 준설토와 고화제 종류에 따른 고화준설토의 증금속 용출에 따른 환경적인 영향을 분석하기 위하여 폐기물 공정

시험 방법(Standard Leaching Test, SLT)에 따른 용출시험을 실시하였다.

식생 발아 실험 시 배합조건은 일축압축시험의 조건과 동일하며, 발아 가능성을 확인하기 위하여 실시한 예비 실험 결과를 바탕으로 고화제의 함유량을 3 %, 6 %, 9 %로 선정하고, 20일까지 통통마디의 발아를 관측하였다. 모든 실험은 Culture chamber를 이용하여 항온·항습 상태(25 ± 1 °C, 40 ± 5 %)를 유지하였으며, 24시간 간격으로 관측을 실시하였다. 시험 시 제작된 공시체는 배수가 가능하도록 배수구멍이 있는 직육면체(가로 240 mm, 세로 170 mm, 높이 180 mm)를 이용하였으며, 씨앗을 1줄당 10개체씩 총 5줄로 50개체의 씨앗을 점파하여 파종하였다.

## 3. 시험 결과 및 분석

### 3.1 유동성 및 단위중량 특성

고화준설토의 고화제 함량 및 종류에 따른 유동성, 단위중량 특성을 알아보기 위해 흐름값 및 단위중량을 측정하였다. 흐름값 측정은 JHS A 313(직경 : 80 mm, 높이 : 80 mm)의 시험방법을 적용하였다. Fig. 2는 유동성 시험을 통해 구한 흐름값 측정 결과로서 고화제 종류에 상관없이 배합비가 3 %에서 12 %로 증가함에 따라 흐름값이 감소하였으며, 그 값의 범위는 전부 저강도 유동성 재료(Controlled Low Strength Material, CLSM)의 적정 범위인 200 ± 50 mm에 만족하는 것으로 판단된다. 전반적으로 NSB 고화준설토가 OPC 고화

Table 3. Mixing and test conditions of this study

Type	Mixed ratio (%)	Curing time (day)	Initial water content of dredged soil
NSB mixture	3, 6, 9, 12	7, 14, 28	65 %
OPC mixture	3, 6, 9, 12	7, 14, 28	

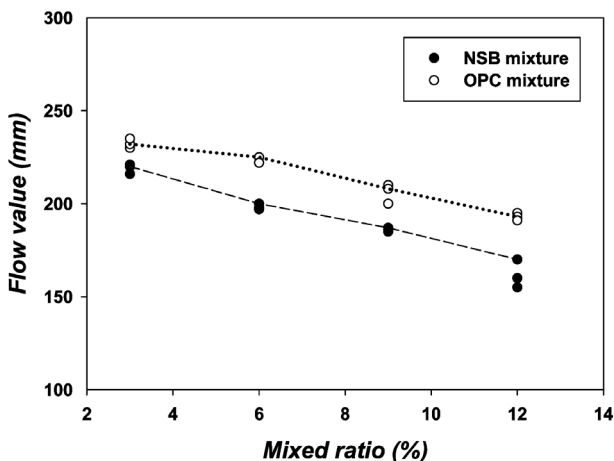


Fig. 2. Flow value with mixed ratio

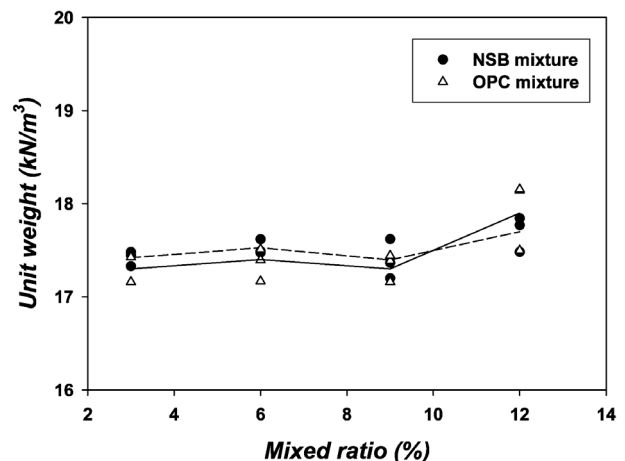


Fig. 3. Unit weight according to mixed ratio

준설토보다 작은 흐름값을 가진다.

Fig. 3은 소정의 몰드에서 콘크리트 구조물의 설계기준인 28일 양생 후 단위중량을 측정된 결과이다. 고화제의 배합비에 관계없이 단위중량 값은 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 이것으로부터 3%~12%의 고화제 함량은 단위중량에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 측정된 고화준설토의 단위중량은 기포나 EPS 등 경량성 재료를 혼합한 경량혼합토의 일반적인 단위중량의 범위인 10~12 kN/m<sup>3</sup>보다 크지만, 일반토사의 전체 단위중량보다 약간 낮은 값을 보였다.

### 3.2 압축강도 특성

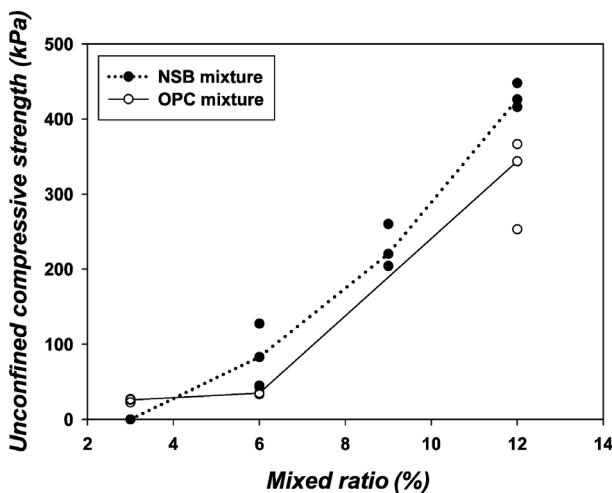
고화제의 함량과 종류에 따른 압축강도를 비교·분석하기 위해 28일 양생한 시편에 대해 일축압축시험을 수행하였다. 고화준설토의 압축강도 시험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 고화제 함량에 따른 고화준설토의 압축강도 특성을 나타낸다. 고화제 함량이 3%일 때 경화가 잘 이루어지지 않아 일축압축시험이 불가능하였다. 고화제 함량에 따른 고화준설토의 압축강도는 고화제 종류에 상관없이 함량이 증가할수록 강도가 선형적으로 증가한다. 고화제 종류에 따른 압축강도는 NSB 고화준설토가 OPC 고화준설토보다 더 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 고화제 함량이 12%일 때 고화준설토의 양생일에 따른 압축강도 특성을 나타내고 있다. 양생 기간에 따른 압축강도 시험 결과 NSB 고화준설토와 OPC 고화준설토의 양생일에 따른 강도 변화의 경향은 양생일이 지날수록 강도가 증가하는 것으로 유사하게 나타났다. 모든 양생일에서 NSB 고화준설토가 OPC 고화준설토보다 높은 강도를

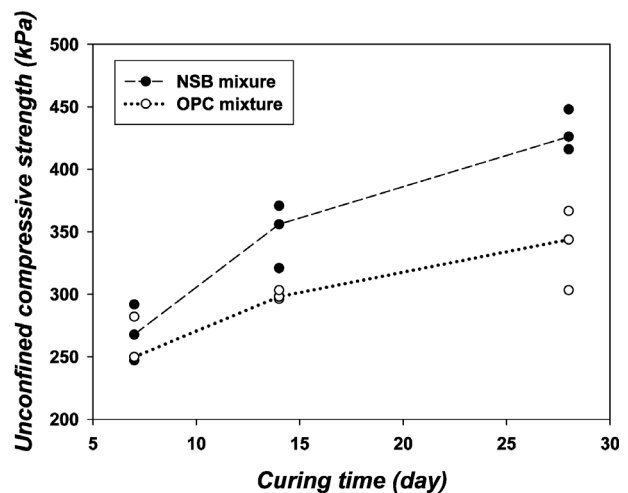
나타내며, 장기강도에서 우수성을 보였다. 이는 NSB 고화제의 주 화학반응인 포졸란 반응으로 인해 나타나는 특징으로, 포졸란 반응은 초기강도가 조금 떨어지는 경향이 있으나 장기재령강도는 증가하게 되는 특징이 있다(Gu et al., 1992). 본 연구에서 사용된 각 고화제에 함유된 실리카(SiO<sub>2</sub>)와 알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 성분이 포졸란(pozzolan) 반응을 일으키는 주성분이다. NSB 고화제는 산업부산물인 고로슬래그 미분말을 주재료로 고칼슘플라이애시와 알칼리 자극제가 혼합된 것으로 고로슬래그와 같은 비결정질 물질은 시멘트와는 달리 자체적으로 물과 접촉하여 수화반응을 일으키지 않지만, 알칼리 자극제를 첨가하면 수화물과 물이 반응하여 경화된다(Mun et al., 2010). 포졸란 반응식은 Eq. (1)과 Eq. (2)로 나타낼 수 있다.



활성형이 큰 무정형의 실리카와 알루미늄 성분이 수분이 존재할 때는 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 상온에서 화학·반응하여 규산칼슘수화물 C-S-H(CaO·SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O), 알루미늄칼슘수화물 C-A-H(CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2H<sub>2</sub>O) 등의 새로운 포졸란 반응생성물이 형성된다. 이러한 반응은 비교적 장기간에 걸쳐 다양한 점착성 물질을 생성하며, 이에 따라 토입자의 간극이 채워짐으로써 더 조밀한 구조로 된다(Lee et al., 2005). 이를 통해 산업부산물 기반으로 제작된 NSB 고화제는 기존 고화제인 시멘트와 비교하여 우수한 강도 발현을 보인다.



(a) UCS according to mixed ratio (%)



(b) UCS according to curing time (day)

Fig. 4. UCS with binders

### 3.3 중금속 용출 특성

Table 4는 고화제 함량이 12 %인 고화준설토의 고화제 종류에 따른 용출시험 결과를 나타내며, 이는 양생 3일에 실시하였다. Table 5는 중금속 용출 농도의 기준으로 각각 먹는 물의 수질기준(Drinking Water Quality, DWS), 수질오염물질의 배출허용기준(Water Pollutants Emissions, WPE), 침출수 배출 허용기준(Leachate Emissions, LE)을 나타낸다. 구리(Cu)와 아연(Zn)을 제외하면 일반적으로 먹는 물의 수질기준이 가장 낮은 허용기준치를 가진다.

Table 4를 통해 고화되지 않은 준설토 자체가 함유하는 망간, 철, 비소, 셀레늄 등과 같은 중금속 농도가 고화준설토에 비해 높은 것을 알 수 있다. 또한 Table 5에 표기되어 있는 중금속 허용기준에 따른 고화준설토의 중금속 함유량을 시각화하기 위하여 각 기준에 대한 시료들의 함유량을 Fig. 5와 같은 백분율로 나타내었다. Fig. 5(a)는 먹는 물의 수질기준(DWS)에 대한 시료의 용출시험 결과로서 모든 시료가 허용기준치 이하로 나타났다. 고화제를 첨가한 고화준설토는 크롬을 제외한 모든 중금속이 준설토보다 낮은 함량

을 가진다. 이는 고화제 혼합으로 인한 고결화가 중금속을 부착시켜 안정화되어 나타나는 현상으로 판단된다. 시멘트 독으로 알려진 크롬의 경우 허용기준치 이하를 나타내고 있지만, 고화제를 첨가한 고화준설토가 준설토보다 더 높은 크롬 함량을 가진다. 특히 OPC를 첨가한 고화준설토에서 높은 함량을 가지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 수질오염물질의 배출허용기준(WPE)에 대한 시료의 중금속 용출량

Table 4. Result of heavy metal concentration from leaching test (mg/L)

	Dredged soil	NSB mixture	OPC mixture
		12 %	12 %
Chromium (Cr)	0.0019	0.0024	0.0152
Manganese (Mn)	0.0380	0.0018	0
Iron (Fe)	0.2447	0.5382	0.4286
Copper (Cu)	0.0126	0.0546	0.2216
Arsenic (As)	0.0093	0.0076	0.0037
Selenium (Se)	0.0100	0.0062	0.0075
Cadmium (Cd)	0	0	0
Mercury (Hg)	0.0002	0	0
Lead (Pb)	0	0	0

Table 5. Permissible limits of heavy metal concentration (mg/L)

		DWS	WPE	LE
Chromium (Cr)	Total	0.05	0.5	0.5
	Cr <sup>6+</sup>	-	0.1	0.1
Manganese (Mn)		0.3	2	2
Iron (Fe)		0.3	2	2
Copper (Cu)		1	1	0.5
Zinc (Zn)		3	1	1
Arsenic (As)		0.01	0.05	0.1
Selenium (Se)		0.01	1	-
Cadmium (Cd)		0.005	0.02	0.02
Mercury (Hg)		0.001	0.001	0
Lead (Pb)		0.01	0.1	0.2

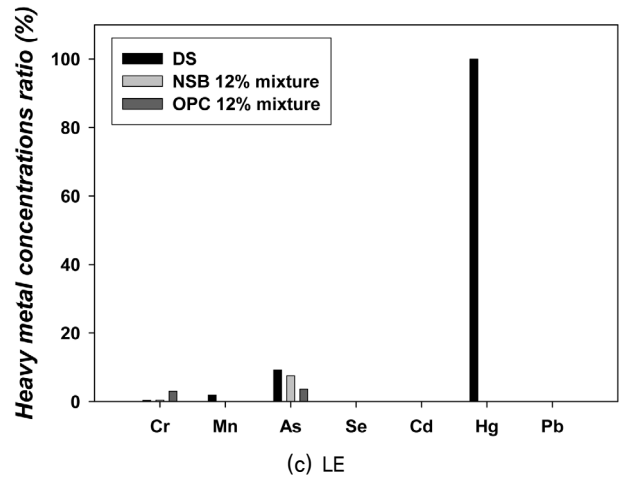
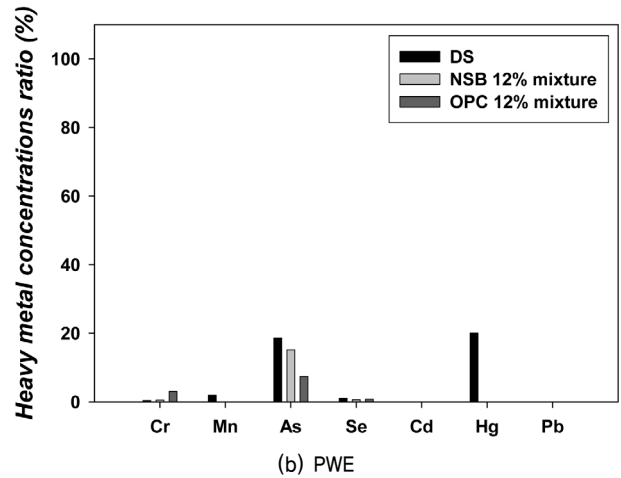
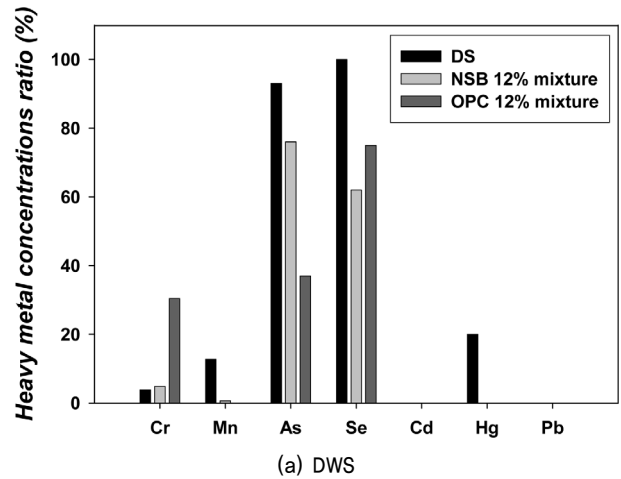


Fig. 5. Comparison of leaching test results with various standards

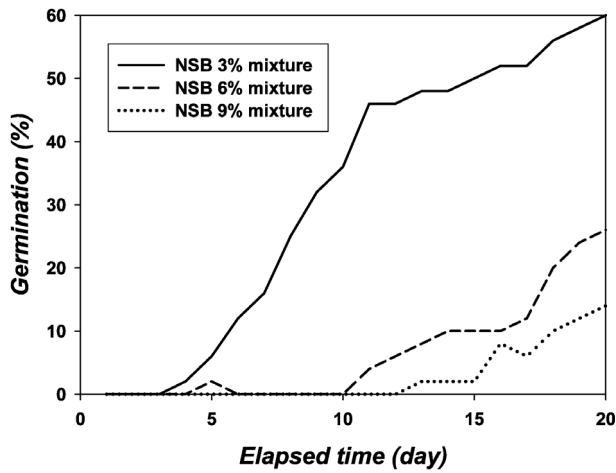
으로서 모두 허용기준치 이하로 나타난다. Fig. 5(c)는 침출수 배출 허용기준(LE)으로 수은이 불검출되는 것을 기준으로 하고 있어 수은이 소량 검출된 준설토의 경우를 제외하고는 모든 시료가 허용기준치를 만족한다. 이를 통해 고화준설토는 모든 기준의 허용기준치를 만족하며, 환경적으로 부정적인 영향을 주지 않아 친환경적인 것을 알 수 있다.

### 3.4 식생 발아 특성

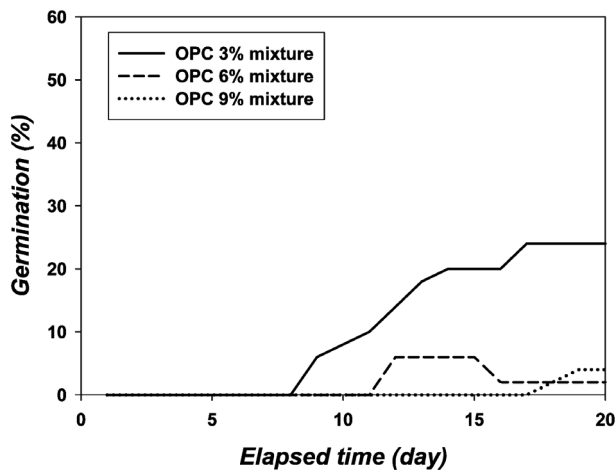
고화준설토에 대한 식생 가능성을 알아보고자 통통마디를 파종 후 경과일에 따른 식생 발아율을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 NSB를 혼합한 고화준설토의 발아율을 나타낸 것으로 고화제의 함량이 증가할수록 발아율이 낮아지고, 발아 시기가 늦어지는 것을 볼 수 있다. 고화제 함량이 3%에서 6%, 9%로 증가함에 따라 발아율이 약 50%씩 감소하는 경향을 보인다. Fig. 6(b)는 OPC를 혼합한 고화준설토의 발아율로 앞선 NSB를 혼합한 고화준설토와 유사한 경향을 나타내지만, 전체적으로 발아율이 NSB 고화준설토에 비

해 50% 이상 낮다. 동일함량에서 고화제 종류에 따른 발아율을 살펴보면 NSB 고화준설토가 OPC 고화준설토에 비해 발아율이 2배 이상 높고, 발아 시기 또한 2배 이상 빠른 것을 알 수 있다. NSB 고화준설토가 OPC 고화준설토보다 높은 발아율과 발아 시기를 보여 친환경적인 식생토로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

고화제의 함량과 종류에 따라 발아율과 발아 시기가 큰 차이를 보이는 것은 각 고화제의 pH와 강도 특성에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 7은 각 시료의 pH 및 강도와 발아율의 관계를 보여주고 있다. 고화제는 포졸란 반응을 일으키면서 수화물을 생성하여 시료를 pH 10의 강알칼리성으로 만드는 특징이 있다. Fig. 7(a)는 식생 발아 실험에 사용된 고화준설토의 pH에 따른 발아율을 나타낸 그래프이다. 고화제 함량에 따른 차이는 있을 수 있지만 본 연구에서 사용된 고화준설토의 전체적인 pH 범위는 8~11의 높은 알칼리성에 해당한다. 통통마디의 서식 가능 pH의 범위는 5.7~9.26으로(Kim et al., 2012a; Jo et al., 2002) pH가 높아질수

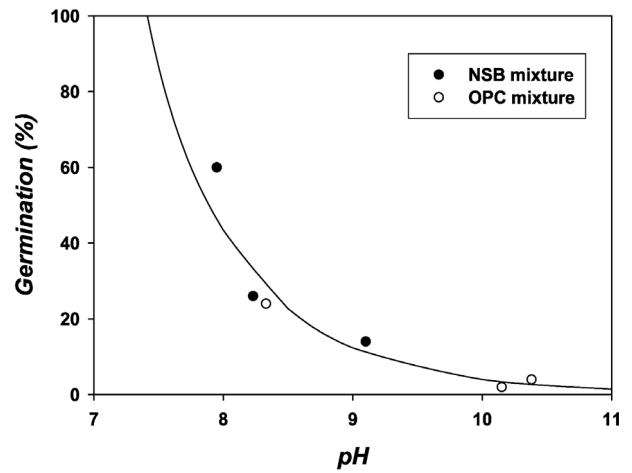


(a) NSB mixture

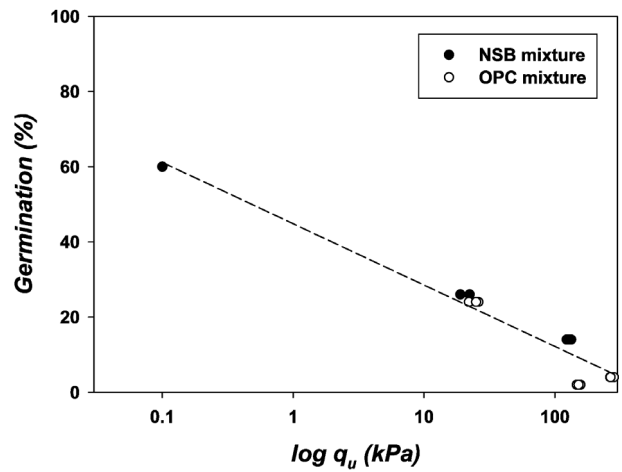


(b) OPC mixture

Fig. 6. Germination of stabilized dredged soil



(a) pH



(b) 7-day UCS (kPa)

Fig. 7. Variation of germination with pH and UCS

록 통통마디의 발아율이 현저히 감소한다. 고화제의 함량이 증가할수록 식생의 적용 가능성 또한 떨어지는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)는 고화준설토의 7일 강도와 발아율의 관계를 나타내고 있다. 앞선 식생 발아 실험을 통해 일반적인 발아는 4~10일 사이에 시작되는 것을 알 수 있다. 씨앗이 발아하여 지속적으로 성장하기 위해서는 뿌리의 부착이 중요한 요인으로 작용하며, 강도가 발아율에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 7일 강도가 증가할수록 비선형적으로 발아율이 감소하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 준설토를 경제적이고 친환경적으로 재활용하기 위해 산업부산물을 활용한 NSB 고화제를 혼합하여 고화준설토를 제작하였다. 또한 NSB 고화준설토의 역학적 특성과 식생 발아 특성을 비교·분석하기 위해 OPC 고화제를 혼합하여 OPC 고화준설토를 만들었다. 고화준설토에 대한 단위중량 분석, 유동성 시험, 일축압축시험 등 다양한 실내시험을 실시하여 역학적 특성을 분석하였으며, 환경적인 영향과 친환경성을 분석하기 위하여 중금속 용출 시험과 식생 발아 실험을 실시하였다. 본 연구에서 수행된 결과를 요약하면 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 고화준설토의 흐름값 측정 결과 배합비가 증가함에 따라 흐름값이 감소하는 경향을 보였으며, 그 값의 범위는 유동성 기준(200 ± 50 mm)을 만족하였다. 단위중량의 범위는 배합비에 관계없이 유사한 값을 보였으며, 이 값은 기포나 EPS 혼합토(10 kN/m<sup>3</sup>)에 비해 무거운 편이지만 일반적인 토사의 전체 단위중량보다 약간 낮은 값을 가진다.
- (2) 일축압축시험 결과 NSB 고화준설토와 OPC 고화준설토의 양생일에 따른 압축강도는 모든 양생일에서 NSB 고화준설토가 OPC 고화준설토보다 더 높게 나타났다.
- (3) 환경적인 영향을 분석하기 위하여 실시한 고화준설토 및 준설토에 대한 중금속 용출시험 결과, 준설토가 고화준설토보다 더 높은 중금속 용출량을 가진다. 이는 고화제의 고결화 반응으로 중금속 용출이 저감되기 때문이다. 시멘트 독성인 크롬은 고화제를 혼합한 시료에서 더 크게 용출되었으며, OPC 고화제에서 가장 크게 용출되었다. 고화준설토는 먹는 물의 수질기준, 수질오염물질의 배출허용기준 및 침출수 배출 허용기준을 만족하였다.
- (4) 식생 발아 실험 결과 고화제 함량이 3 %, 6 %, 9 %로 증

가할수록 발아율은 약 50 %씩 감소하고, 발아 시기 또한 느려짐을 보인다. 또한 동일한 고화제 함량에서 NSB 고화준설토가 OPC 고화준설토보다 2배 이상 빠른 발아 시기와 높은 발아율을 가진다. 또한 본 연구에서 사용된 고화준설토의 pH 범위는 8~11로 pH가 높아질수록 발아율은 감소하는 경향을 보였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2011-0029426)의 성과이며, 이에 깊은 감사를 드립니다. 또한 본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30 km 이상급 이송 기술 개발(12기술혁신E12)”의 연구성과의 일부임을 밝히며, 재정지원에 감사드립니다.

#### References

1. Busan Green Environment Center (2011), Halophytes habitat composition utilizing dredged soil of busan waters, Report of Busan Green Environment Center, pp. 1~79 (in Korean).
2. Gu, B. G., Kim, S. S., Kim, C. W. and Jang, K. J. (1992), New edition of civil engineering material, Daeung book publisher, pp. 245~346 (in Korean).
3. Hirasawa, M., Saeki, S., Kodama, S., Yakuwa, T. and Tsuchida, T. (2000), Development of light-weight soil using excavated sand and its application for harbor structures in cold regions, Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Proceedings of IS-Yokohama, Vol. 1, pp. 559~604.
4. Jo, Y. C., Lee, K. S., Chon, S. M. and Byun, D. S. (2002), Characteristics of growth and germination of salicornia herbacea L. for the soil salinity and manure condition, Journal of The Korean Society of Medical Crop Science, Vol. 10, No. 2, pp. 100~108 (in Korean).
5. Jung, J. H. (2011), Characteristics of seed germination in halophyte influenced by temperature, Master's thesis, Mokpo University, pp. 25~35 (in Korean).
6. Kikuchi, Y. and Yoshino, H. (1998), Permeability of lightweight soil made of dredged slurry mixed with air foam, Coastal Geotechnical Engineering in Practice, International Symposium on Coastal Geotechnical Engineering in Practice, Yokohama, Balkema, Lisse, Vol. 1, pp. 635~640.
7. Kim, J. S. (2013), Study on germination and growth characteristic of halophyte, Master's thesis, Mokpo University, pp. 1~55 (in Korean).
8. Kim, S. S. Kim, B. I., Han, S. J. and Shin, H. Y. (2002), Strength characteristics of sight-weighted soils mixed with EPS and dredged soils, Journal of The Korean Society For Railway, Vol. 5, No. 2, pp. 61~69 (in Korean).
9. Kim, S., Kim, T. K., Jeong, J. H., Yang, C. H., Lee, J. H., Choi, W. Y., Kim, Y. D., Kim, S. J. and Seong, K. Y. (2012a),

- Characteristics of vegetation on soils having different salinity in recently reclaimed saemangeumin region of Korea, *Journal of The Korean Society of Weed Science*, Vol. 32, No. 1, pp. 1~9 (in Korean).
10. Kim, Y. S., Yu, G. M. and Mun, K. J. (2012b), Strength characteristics of solidified soil with hardening agents made of industrial by-products, *Journal of The Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 13, No. 6, pp. 19~26 (in Korean).
  11. Kim, Y. T. and Kang, H. S. (2008), Mechanical properties of waste rire powder-added lightweight soil, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4C, pp. 247~253 (in Korean).
  12. Kim, Y. T., Kim, H. J. and Kwon, Y. K. (2006), Compressive strength characteristics of cement mixing lightweight soil for recycling of dredged soil in Nakdong river estuary, *Journal of The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 20, No. 1, pp. 7~15 (in Korean).
  13. Kim, Z. C. and Lee, C. K. (2002), Mechanical characteristics of light-weighted foam soil consisting of dredged soils, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 309~317 (in Korean).
  14. Lee, J. S., Ilm, B. S., Myeong, H. H., Park, J. W. and Kim, H. S. (2009), Soil environment analysis and habitat of halophyte for restoration in the salt marshes of southern and western coasts of Korea, *Journal of The Plant Resources Society of Korea*, Vol. 22, No. 1, pp. 102~110 (in Korean).
  15. Lee, Y. S., Cho, J. W., Yoo, J., Kim, S. H. and Chung, H. I. (2005), Original Paper : The reactivity of by-product pozzolans and engineering properties of soil stabilization agent, *Journal of Korean Society of Waste Management*, Vol. 22, No. 1, pp. 17~26 (in Korean).
  16. Mun, K. J., Park, W. C. and Kim, Y. S. (2010), Development of solidification treatment technology for dredged soil by non-sintered inorganic binder using recycled resources, *The Korean Geo-Environmental Society and Korean Geotechnical Society Joint Conference*, Seoul, pp. 119~128 (in Korean).
  17. Nam, J. M. and Yun, J. M. (2004), The improvement of surface layer using cement-hardening agents in dredged and reclaimed marine clay, *Journal of The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 18, No. 4, pp. 46~51 (in Korean).
  18. Tang, Y. X., Tsuchida, T., Shirai, A., Ogata, H. and Shiozaki, K. (1996), Triaxial compression characteristics of super geo-material cured underwater, *Proceedings of 31st Conference on Geotechnical Engineering*, May 25, Japan, pp. 2493~2494.
  19. Yoon, G. L. and Kim, B. T. (2002), Mechanical characteristics of light-weighted soils using dredged soils, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 75~83 (in Korean).