

《原著》

## MgO 기반 고화제를 이용하여 처리한 중금속 오염 준설토의 고형화/탄산염화 특성

황경엽 · 서정윤 · 판 광 후이 호앙 · 안준영 · 황인성\*

부산대학교 사회환경시스템공학부

### Characteristics of Solidification/Carbonation in the Heavy-Metal-Contaminated Sediment Treated by MgO-Based Binder

Kyung-Yup Hwang · Jeong-Yun Seo · Hoang Quang Huy Phan · Jun-Young Ahn · Inseong Hwang\*

School of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

#### ABSTRACT

A novel MgO-based binder was developed and applied to treat the anoxic sediment that was collected from Seonakdong river, Korea and was contaminated with heavy metals. The treated sediment was evaluated by measuring compressive strength, expansion, leaching of heavy metals and storage characteristics for CO<sub>2</sub>. Initially, an optimal blending ratio of lime (L)/fly ash (FA)/blast furnace slag (BFS) that was to be mixed with MgO was screened to be L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>. Long-term strengths of the sediments that were treated by various mixtures of MgO and L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub> were then evaluated and the blending ratios between 4 : 6 and 6 : 4 were found optimal, which yielded a compressive strength of 4.09 MPa. On this basis, the optimal MgO-based binder was selected to be a 5 : 5 mixture of MgO and L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>. The good performance of the MgO-based binder was believed to be due to the formation of Mg (OH)<sub>2</sub>, which filled the micropores and also increased the density of the solidified matrices. The MgO-based binder exhibited an average stabilizing capacities for heavy metals of 92.9%, which was similar to or higher than that of Portland cement. It was found that 69.1 kg of carbon dioxide could be sequestered after 365 days of curing when treating a ton of anoxic sediments.

**Keywords :** MgO, Sediment, Heavy Metals, Solidification, Carbonation

#### 1. 서 론

최근 국내의 하천과 연안에서 수질환경 개선을 대상으로 하는 준설토가 지속적으로 증가하고 있고 하수관거 내 침전되어 있던 오염물질도 수질악화에 영향을 미치고 있는 사실이 밝혀지면서 이를 대상으로 하는 준설토사업도 증가하고 있다. 그러나 발생량이 급증하고 있는 하천 및 해양 준설토의 처리/처분과 관련된 지침 부재로 인해 현장에서는 많은 어려움이 발생하고 있다. 국내외 보고에 의하면 퇴적토의 경우 중금속에 의한 오염사례가 많은 것이 특징이다(Lee and Yoo, 2000; USEPA, 2005; Hwang et al., 2007). 준설토 중 미세토는 상대적으로 중금속 오염도와 함수율이 높기 때문에 매립처분이 용이하지 못하

며, 기존의 처리 대안 중 해양투기도 국제적인 규제로 인하여 불가능해져 효과적인 처리방법에 대한 요구가 증대되고 있다. 미세토의 경우 오염물질 흡착능이 강하기 때문에 세척과 같은 방법으로는 재활용이 가능한 농도까지 오염물질을 저감시키기 어려우며, 저감 후에도 처분이 용이하지 못한 단점이 있다. 반면 미세토를 고화처리 할 경우 빠른 시간 내에 오염 물질의 용출률을 현저하게 낮출 수 있으며, 미세토의 입경 및 강도와 같은 물성도 개선할 수 있기 때문에 매립지 복토재 및 기층재 등으로 처분이 용이하게 된다.

고화처리를 위해 대표적으로 사용되는 재료는 Portland cement(PC) 이다. PC는 일반적인 환경에서는 상당히 우수한 고화성능을 보인다. 그러나 준설토 미세토의 경우 혐

\*Corresponding author : ihwang@pusan.ac.kr

원고접수일 : 2013. 1. 4 심사일 : 2013. 1. 29 게재승인일 : 2013. 1. 29  
질의 및 토의 : 2013. 4. 30 까지

기성 상태로 존재하는 경우가 많으며, 혐기성 분해반응으로 생성된 황화물의 농도가 높은 경우가 많다. 황화물의 경우 퇴적토 내에 있는 중금속과 쉽게 결합하여 중금속의 용해도를 낮추는 긍정적인 역할을 한다(Allen et al., 1993). 그러나 황화물이 산소와 접하게 될 경우 급격하게 산화되면서 중금속을 용출시킬 수 있으며 동시에 pH도 낮아지게 한다(Hwang et al., 2011). 이러한 특성을 가진 미세 준설토를 PC를 이용하여 고화 처리할 경우 수화반응의 부산물로 결정화되는 정도가 높은  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 다량 생성 되지만 산에 의해 결정화물의 형태가 쉽게 변형되는 것으로 알려져 있어 황화물의 산화로부터 우수한 성능을 기대하기는 어려운 가능성이 높다(Hossein and William, 2003; Kang et al., 2008). 그러나 PC에 fly ash(FA)나 blast furnace slag(BFS)와 같은 산업부산물이면서 Supplementary Cementitious Materials(SCMs)로 사용될 수 있는 고화제를 혼합한 경우 결정형보다는 무정형의 알루미니규산염이 형성되어 치밀하면서 연속적인 모체를 형성하여 강도도 향상시키면서 산저항성도 PC를 단독으로 사용한 것보다는 우수한 것으로 나타났다(Puertas and Fernández-Jiménez, 2003; Kang et al., 2008) 더불어 SCMs 사용은 세계  $\text{CO}_2$  배출량의 5~6% 정도를 차지하고 있는 PC 산업의 문제를 해결할 수 있는 방법이기도 하다(Worrell et al., 2001; Sterfanovic et al., 2010; Rodrigues and Joekes, 2011). 최근에는 저탄소 성격의 SCMs를 개발함과 동시에 이러한 고화제를 이용하여  $\text{CO}_2$ 를 저장하는 탄산염화 반응에 대한 연구 또한 활발하게 진행되고 있다(Schneider et al., 2011; Vandeperre and Al-Tabbaa, 2007; Mo and Panesar, 2012).

MgO는 주로 천연광물인  $\text{MgCO}_3$ 를 소성시켜 제조하며,  $\text{CO}_2$ 를 저장할 수 있고 PC와 혼합시 강도를 향상시킬 수 있어 최근 주목받고 있는 물질이다.  $\text{MgCO}_3$ 의 소성은 PC의 경우보다 절반정도 낮은 온도인  $750^\circ\text{C}$ 에서 이루어지기 때문에 시멘트 생산공정의  $\text{CO}_2$  배출량의 절반 정도에 기여하고 있는 가열 연료의 사용을 줄일 수 있어 에너지와  $\text{CO}_2$  배출 절감 효과가 뛰어나며, 이후 MgO를 이용한 고형화 등의 공정에 사용될 경우  $\text{CO}_2$ 를 고정하는 탄산염화 반응을 상온에서 유도할 수 있다는 장점이 있다(Park and Fan., 2004; Maroto-Valer et al., 2005, Gerdemann et al., 2007; Vandeperre and Al-Tabbaa, 2007; Torres-Rodriguez and Pfeiffer, 2011). MgO를 이용하여 PC를 부분적으로 대체한 경우 MgO가 수화 되면서 팽창되는 특성으로 인하여 PC 수화반응의 단점인 수축 현상을 방지하여 단독 사용한 경우보다 뛰어난 강도,

탄성계수, 강성, 인장성 등의 물성 특성도 향상되는 것으로 보고되고 있다(Kasselouris et al., 1985; Gao et al., 2007; Vandeperre and Al-Tabbaa, 2007; Liska and Al-Tabbaa, 2009). 이는 MgO의 수화반응에 의해 생성된  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 가 PC의  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 대체하면서 pozzolan 물질과 반응하여 talc와 같은 Magnesium-Silicate-Hydrates (M-S-H)계 물질을 형성했기 때문으로 알려진 바 있다(Wunder et al., 2001; Liska and Al-Tabbaa, 2008). MgO는 대기로부터 고화체내 공극수로 용해된  $\text{CO}_2$ 와 반응하여 nesquehonite( $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), dypingite( $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), artinite( $\text{Mg}(\text{OH})_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )와 같은 탄산염화 광물을 형성하여  $\text{CO}_2$ 를 저장하는 기능을 수행할 수도 있고 미세 구조와 강도도 향상시킬 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Mo and Panesar, 2012).

이러한 배경으로 MgO와 PC 또는 SCMs를 혼합하는 고화제의 개발은 매력적인 과제라고 할 수 있다. 본 연구의 목적은 MgO와 SCMs인 fly ash, blast furnace slag를 혼합하여 PC와 유사한 성능을 발휘할 수 있는 MgO 기반 고화제를 개발하고 준설토를 처리하면서  $\text{CO}_2$ 를 저장할 수 있는 기술을 개발하는 것이다. 먼저 MgO 기반 고화제를 개발하기 위해 MgO와 SCMs를 PC와 유사한 화학조성이 되도록 여러 가지 비율로 혼합한 고화제를 이용하여 미세토를 처리한 후 장기적인 강도특성을 평가하였다. 다음으로는 고화특성을 파악하기 위해 처리된 미세토의 장기 팽창 및 수축 특성과 중금속 안정화 정도를 평가하였다. 마지막으로 탄산염화 특성을 pH 변화와 TGA(Thermogravimetric Analyzer)/DSC(Differential Scanning Calorimetry)를 이용하여 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료 및 시약

실험에 사용한 준설토는 서낙동강의 최하류인 녹산 지점에서 채취했는데 해당 지점은 본 연구진이 지속적으로 국내 하천에 있는 퇴적토를 모니터링 해온 결과 중금속 농도가 가장 높은 곳이다(Lee et al., 2009; Shin et al., 2009). 준설토의 입경 분포는 모래가 47%, 실트 38%, 점토 15%로 나타났다. 준설토는 #200 체로 선별하여  $75 \mu\text{m}$  이하의 미세토만을 실험에 이용하였다. 준설토내 황화물을 Allen et al.(1993)이 제안한 AVS(Acid Volatile Sulfide) 분석법과 Canfield et al.(1986)이 제안한 CRS(Chromium Reducible Sulfide) 분석법을 이용하여 정량한 결과 AVS 농도는  $198.4 \mu\text{mol/g}$ , CRS 농도는  $202.2$

μmol/g으로 나타났다. 이는 많은 연구자들이 혐기성 퇴적 토라고 보고하고 있는 40~212 μmol/g의 AVS 농도 범위 내에 들며, 비교적 높은 혐기성 상태의 퇴적토로 판단되었다(Simpson et al., 2000; Lee et al., 2001, Kelderman and Osman, 2007). 고화제로는 MgO(Yufeng, Ching), PC(Tongyang cement & energy, Korea), lime(Junsei, Japan), FA(Samchenpo coal-fired power plant, Korea), BFS(POSCO, Korea)를 이용하였다. 중금속 분석을 위해 사용한 주요 시약은 HNO<sub>3</sub>(Merck, Germany), HClO<sub>4</sub>(Merck, Germany), HF(Merck, Germany)이며, 모든 실험에 사용한 시약은 ACS(American Chemical Society) 등급이다.

**2.2. 실험방법**

**2.2.1. 최적 MgO 기반 고화제 선정**

첫 번째로 PC를 대체하여 MgO와 혼합 가능한 binder를 선별하기 위하여 자경성(self-hardening property)이 없는 FA와 BFS에 lime을 주입하여 알칼리 활성화 반응을 유도함과 동시에 PC가 가지고 있는 CaO 63%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 23%, SiO<sub>2</sub> 5%와 유사한 화학조성이 될 수 있도록 lime/FA/BFS의 배합비를 조절한 다양한 고화제를 제조하여 그 성능을 평가하였다. Table 1에 나타난 바와 같은 다양한 배합비의 고화제와 함수율 40%의 미세 준설토를 혼합하여, 직경 50 mm, 길이 100 mm의 공시체를 제작하였다. 이때, 주입한 고화제의 양은 준설토의 건조 무게 대비 30%였다. 공시체는 28일 동안 양생하였으며, 7일과 28일

제의 일축 압축강도를 측정하여 그 성능을 평가하였다.

첫 번째 실험에서 최적 강도를 보인 lime/FA/BFS 고화제에 MgO를 Table 2에 나타난 바와 같이 2:8~8:2의 비율로 혼합하고 주입량을 미세 준설토의 건조 무게대비 10%, 20%, 30%로 변화시켜 1년 동안 장기 압축강도를 측정하여 최적의 MgO 기반 고화제를 선정하였다. 강도성능을 비교하기 위해 PC를 대조군으로 사용하였으며, PC의 경우 우수한 강도를 보일 수 있는 함수율 30%의 미세 준설토와 혼합하여 실험하였다. 실험은 23 ± 1.5°C의 실온에서 수행되었다.

**2.2.2. MgO 기반 고화제의 장기 성능평가**

선정된 MgO 기반 고화제를 이용하여 미세 준설토를 처리한 후 장기거동 및 탄산염화능을 측정하였는데, 전술한 방법과 동일하게 직경 50 mm, 길이 100 mm의 공시체를 제조하여 사용하였다. 먼저 MgO 기반 고화제의 장기 안정성 실험을 위해 최적 조건인 함수율이 40%인 미세 토에 MgO 기반 고화제를 30% 혼합하여 양생시킨 후 3, 7, 14, 28, 180, 365일 동안 양생시켰다(23 ± 1.5°C, 50~60 RH). 고화처리된 준설토의 팽창 및 수축 특성을 양생기간 동안 측정하였고 PC, lime/FA/BFS, MgO, PC/MgO 고화제와 비교하였다. 팽창은 아래의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{팽창}(\%) = (L_1 - L_0) \times 100\% / L_0 \tag{1}$$

**Table 1.** Blending ratios of lime, fly ash and blast furnace slag. Water/binder = 0.4

Binder	Major contents (%)			
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Lime/FA/BFS	L <sup>a</sup> <sub>0.6</sub> - FA <sub>0.3</sub> - BFS <sub>0.1</sub>	66.0	18.9	7.78
	L <sub>0.5</sub> - FA <sub>0.2</sub> - BFS <sub>0.3</sub>	64.2	20.7	8.78
	L <sub>0.5</sub> - FA <sub>0.1</sub> - BFS <sub>0.4</sub>	67.7	19.1	8.24
	L <sub>0.4</sub> - FA <sub>0.1</sub> - BFS <sub>0.5</sub>	62.3	22.5	9.78
	L <sub>0.4</sub> - FA <sub>0.2</sub> - BFS <sub>0.4</sub>	58.8	24.2	10.3
	L <sub>0.3</sub> - FA <sub>0.1</sub> - BFS <sub>0.6</sub>	56.9	26.0	11.3
	L <sub>0.2</sub> - FA <sub>0.1</sub> - BFS <sub>0.7</sub>	51.5	29.5	12.9

a: Lime

**Table 2.** Experimental design for the selection of the optimal MgO-based binder

Binder	Water content of the fine sediment (%)	Binder dosage (%)	Blending Ratio	Mass (g)		
				Water	Binder	Sediment
PC	30	10, 20, 30	only	300	150	500
MgO + lime/FA/BFS <sup>a</sup>	50	10, 20, 30	2:8, 4:6, 6:4, 8:2	500	150	500

<sup>a</sup>L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>

식 (1)에서  $L_0$ 는 양생전 공시체의 길이이고,  $L_1$ 은 양생후 공시체의 길이이다.

MgO 기반 고화제의 중금속 용출 저감능을 USEPA method 1311의 TCLP(Toxicity Characteristics Leaching Procedure)를 이용하여 평가하였고, lime/FA/BFS, PC와 비교하였다. 실험에 사용한 시료는 고화 처리 전의 미세 토와 처리 후 양생 14일과 28일 쯤의 시료이며, 9 mm 이하의 입경을 가지도록 파쇄한 것을 이용하였다. 시료와 추출 용매를 1 : 20의 비율로 혼합하여 end-over-end 교반기에서  $30 \pm 2$  rpm으로  $18 \pm 2$ 시간 동안 교반한 후 여과한 여액을 분석하였다. 추출 용매는 시료의 pH가 5 이상이기 때문에  $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OOH}$ 를 이용하여 pH가  $2.88 \pm 0.05$ 이 되도록 제조한 TCLP #2 용매를 이용하였다(USEPA, 1990).

MgO 기반 고화제의 탄산염화능은 pH 변화와 TGA/DSC 분석을 통해 평가하였다. pH 변화를 측정하기 위해 양생 7, 14, 28, 180, 280일째의 시료를 150  $\mu\text{m}$  이하의 입경을 가지도록 파쇄 하였고, 시료와 탈이온수의 비율이 1 : 5가 되도록 혼합한 후  $\text{CO}_2$ 가 녹아들어가지 않도록 밀폐하여 5분 동안 교반하였다. 교반한 시료를 1시간 동안 방치하였고 개봉 즉시 용액의 pH를 측정하여 탄산염화에 의한 pH 변화를 확인하였다. 양생 28일째와 365일째의 시료는 75  $\mu\text{m}$  이하의 입경을 가지도록 파쇄한 후 TGA/DSC 분석을 통해 생성된 수화물과 탄산염화물을 구분하고 해당 물질을 정량하였다.

### 2.2.3. 기기분석

압축강도는 3일부터 최대 365일까지 양생시킨 공시체를 일축강도 측정기를 이용하여 측정하였다(YUL-OT, Yeon Engineering, Korea). 압축강도 측정 방법은 ASTM-C-109-90(Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars)을 따랐다.

미세 준설토내 중금속 농도(Cu, Cd, Zn, Ni)는 혼합산인  $\text{HNO}_3/\text{HClO}_4/\text{HF}$ 를 이용하여 추출한 용액을 flame atomic absorption spectrometry(AAnalyst 200, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 분석하였다. TCLP 추출액은 inductively coupled plasma mass spectroscopy(Elan DRC-e, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 분석하였다. 모든 중금속 분석은 중복시료를 이용하였으며, 중복시료간의 상대편차는 5% 이내였다. 분석의 정확성을 검증하기 위해 NRC(National Research Council of Canada)에서 구입한 퇴적토 표준물질인 PACS-2를 이용하여 회수율을 측정하였으며 그 값은 92~120% 사이로 나타났다.

탄산염화를 평가하기 위해 실시한 pH 측정은 pH 전극

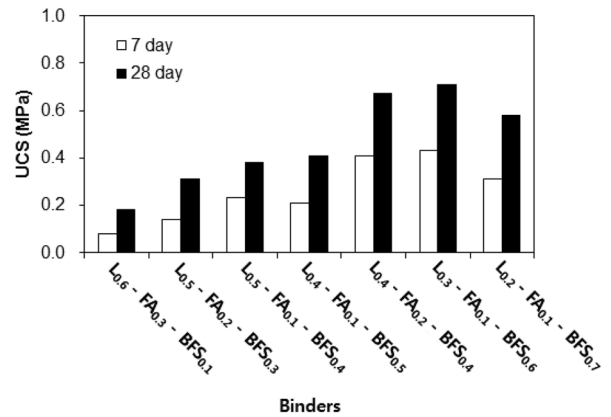


Fig. 1. Compressive strengths of various binder mixtures with lime, fly ash and blast furnace slag. UCS: Unconfined Compressive Strength, L: Lime, FA: Fly ash, BFS: Blast furnace slag.

(9157 BN model, Orion Res., USA)이 장착된 다항목 측정기(Orion 4-star plus, Thermo Scientific, USA)를 보정한 후 시료와 탈이온수를 1 : 5로 혼합하여 반응시킨 용액에 주입한 후 60초 이내에 읽었다. 탄산염화를 정량하기 위해 TGA(TA Instruments SDT Q600, USA)를 이용한 분석을 실시하였다. 시료는 75  $\mu\text{m}$  이하로 파쇄하여 분석에 사용하였다. TGA의 온도 상승 조건은 10/min 이었고 측정 구간은 800°C까지 였다.  $\text{N}_2$  조건에서 분석하였으며, 가스 유량은 50 mL/min이었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. MgO 기반 고화제 개발

Lime, FA, BFS를 이용하여 미세 준설토를 처리할 경우 최적 강도를 발현할 수 있는 혼합비율을 찾아내고자 실시한 실험의 결과를 Fig. 1에 나타내었다. PC와 유사한 화학조성을 가질 수 있도록 제조한 lime/FA/BFS 혼합 고화제의 경우 전반적으로 lime의 함량이 증가할수록 낮은 강도를 보였으며, lime의 함량이 0.2~0.4의 비율로 혼합되었을 경우 우수한 강도를 보이는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 lime의 함량이 증가할수록 강도가 낮게 나타난 원인을 lime에 의한 초기 수분 손실에 의한 것으로 판단했다. Lime은 수화반응 속도가 빠르기 때문에 단시간에 높은 pH에 도달하면서 FA와 BFS의 알칼리 활성화 반응을 유도할 수 있으나 그 양이 많을 경우, 알칼리 활성화된 FA와 BFS가 수화반응에 참여할 수 있는 충분한 수분이 남아 있지 않게 된다. 이러한 원인으로 인하여 lime의 적절한 비율로 판단되는 0.2~0.4의 경우 높은 pH를 유지하면서도 FA와 BFS가 수화반응에 참여하여 lime과 Ca-

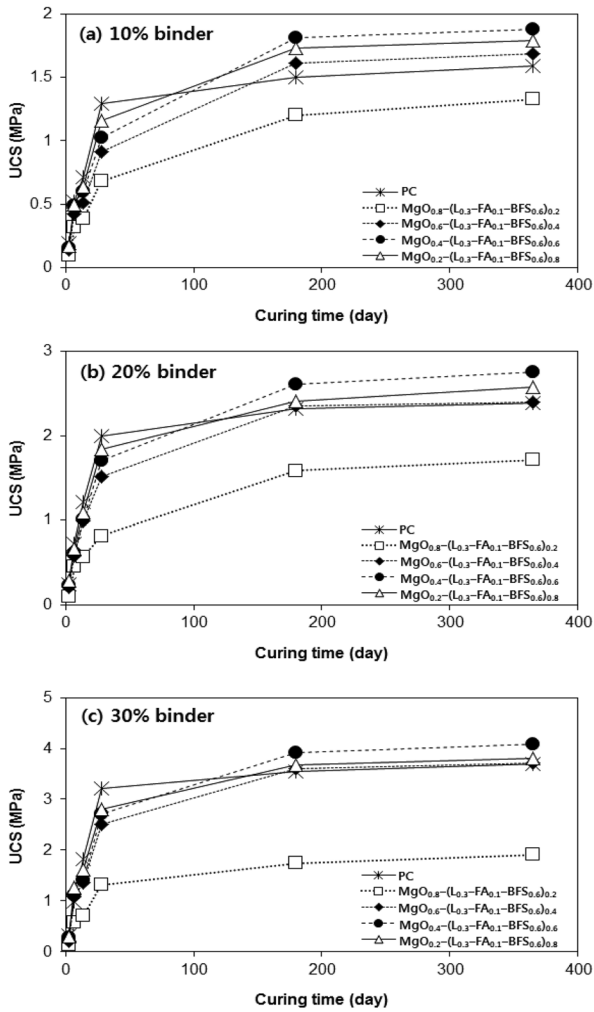


Fig. 2. Long-term compressive strength of the MgO-based binder. UCS: Unconfined Compressive Strength, L: Lime, FA: Fly ash, BFS: Blast furnace slag.

Al-Si gel을 형성했을 가능성이 높고 이로 인해 미세공극이 발생하는 것을 감소시켜 압축강도를 향상시킨 것으로 판단된다(Van Jaarsveld et al., 1998; Xu and Van Deventer, 2002). 가장 우수한 강도를 보인 조건은 L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>이며, 7일 강도가 0.43 MPa, 28일 강도가 0.71 MPa로 가장 낮은 강도를 보인 L<sub>0.6</sub>-FA<sub>0.3</sub>-BFS<sub>0.1</sub>보다 28일 강도가 4배 높은 것으로 나타났다.

Fig. 2는 Fig. 1의 결과 중 최적으로 선정된 L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>에 MgO를 2: 8~8: 2의 비율로 혼합한 고화제를 미세토 무게 대비 10, 20, 30%를 주입한 후 365일 동안 장기 강도 변화를 살펴본 것이다. 전반적으로 28일까지의 강도는 대조군으로 사용한 PC가 상대적으로 높은 강도를 보였으나 180일 부터는 MgO<sub>0.2</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.8</sub>, MgO<sub>0.4</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.6</sub>, MgO<sub>0.6</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.4</sub>

고화제가 PC의 강도를 초과하는 것으로 나타났다. 고화제 주입량이 10%인 경우 28일까지의 강도는 MgO를 혼합한 고화제 중 MgO<sub>0.2</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.8</sub>이 1.16 MPa로 가장 우수한 강도를 보였으나 PC의 1.29 MPa보다는 낮았다. 180일 이후 부터는 MgO<sub>0.4</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.6</sub>이 가장 우수한 강도를 보였으며, 365일 후에는 1.88 MPa로 PC의 1.59 MPa보다 높았다. 고화제 주입량이 20%인 경우에도 MgO<sub>0.4</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.6</sub>가 양생 365일 후에 2.75 MPa로 PC의 2.38 MPa보다 높게 나타났다. 고화제 주입량이 30%인 경우도 동일한 현상을 보였으며, MgO<sub>0.4</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.6</sub>이 4.09 MPa로 3.70 MPa를 보인 PC보다 높았다. MgO<sub>0.4</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.6</sub> 고화제는 가장 낮은 강도를 보인 MgO<sub>0.8</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.2</sub> 고화제보다 365일 후의 강도가 1.4~2.1배 높은 것으로 나타났다.

양생기간 동안 압축강도 증가 정도를 평가하기 위해 반응 속도상수(K)를 적용하여 모사해본 결과 유사 이차반응으로(pseudo-second-order reaction) 잘 표현되는 것으로 나타났다. 이를 통해 고화제 주입량이 10%일 때보다 30%를 주입했을 경우가 반응속도가 빠른 것을 알 수 있었다. 가장 우수한 반응 속도를 보인 것은 PC이며, 주입량 30%일 경우 K값이 0.00240 hr<sup>-1</sup>로 나타났다. 다음으로 빠른 반응을 보인 것은 MgO의 함량이 적은 MgO<sub>0.2</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.8</sub> 고화제였으며, 주입량 30%일 경우 K값이 0.00212 hr<sup>-1</sup>로 나타났다. 가장 느린 반응을 보인 고화제는 MgO의 함량이 가장 많은 MgO<sub>0.8</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.2</sub>이었으며, 주입량 30%일 경우 K 값이 0.000911 hr<sup>-1</sup>로 MgO<sub>0.2</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.8</sub>에 비해 2배 이상 느린 것으로 나타났다. MgO의 주입량이 많을수록 반응 속도가 느린 원인은 PC와 lime/FA/BFS보다 MgO의 수화속도가 느리기 때문인 것으로 판단된다(Gao et al., 2008).

결과적으로 MgO를 혼합한 고화제의 경우 PC에 비해 상대적으로 반응속도가 느린것에 반해 MgO의 혼합비율이 적절한 것으로 판단되는 MgO<sub>0.2</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.8</sub>, MgO<sub>0.4</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.6</sub>, MgO<sub>0.6</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.4</sub>의 경우 장기적으로는 PC보다 우수한 강도를 보일 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 MgO의 수화에 의해 생성된 Mg(OH)<sub>2</sub>의 팽창 특성으로 인하여 발생하는 미세공극의 채움 효과와 lime/FA/BFS 고화제의 pozzolan 물질과 반응하면서 Magnesium-Silicate-Hydrates(M-S-H)계 물질을 형성했을 가능성이 높기 때문으로 판단된다(Wunder et al., 2001; Gao et al., 2008; Liska and Al-Tabbaa, 2008). 더불어 MgO의 탄산염화 반응에 의해서 생성된 MgCO<sub>3</sub>와 같은 광물도 조밀한 미세 구조와 강

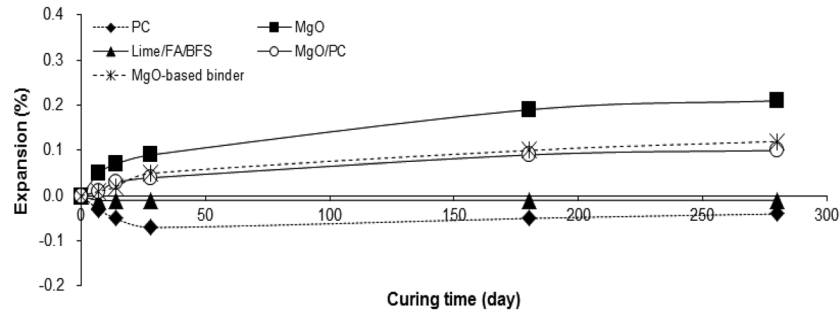


Fig. 3. Expansion characteristics of the sediments treated with various binders.

도 향상에 기여하였을 것으로 판단된다(Mo and Panesar, 2012). 본 연구에서는 장기 강도와 차후 MgO의 탄산염화에 의한 CO<sub>2</sub> 저장능을 고려할 경우 MgO와 L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>의 혼합 비율이 4:6~6:4 사이가 가장 우수한 성능을 보일 수 있을 것으로 판단되어 MgO<sub>0.5</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.5</sub> 고화제를 MgO 기반 고화제로 선정하였다.

### 3.2. 고화처리된 준설토의 팽창 특성

개발한 MgO 기반 고화제를 30% 주입하여 미세 준설토를 처리한 후 280일 동안 팽창 특성을 Fig. 3과 같이 파악해 보았다. 팽창 특성 비교를 위해 PC, lime/FA/BFS, MgO, MgO/PC 고화제를 이용하였다. Lime/FA/BFS 고화제는 Fig. 1에서 선정된 L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>이며, MgO/PC는 1:1의 비율로 혼합한 것이다. PC의 경우 양생 초기에 지속적으로 부피가 감소하는 현상을 보이며, 28일째가 -0.071%로 최대 수축률 보였다. 반면 MgO는 양생 180일까지는 비교적 빠른 속도로 부피가 팽창하는 것을 볼 수 있으며, 280일까지 0.21%의 팽창률을 보였다. Lime/FA/BFS 고화제를 이용한 경우 수축되는 현상은 미미한 것으로 나타났다. MgO/PC의 경우 부피가 팽창하는 MgO의 특성으로 인해 PC의 단점인 수축 현상을 보완하는 결과를 보였고 280일 동안 최대 0.10%의 팽창률을 보였다. MgO 기반 고화제 역시 수축현상은 나타나지 않았으며, 최대 0.12%의 팽창률을 보였다. 이러한 결과는 전술한 바와 같이 혼합된 MgO가 지속적으로 수화화 탄산염화 반응을 하면서 생성된 Mg(OH)<sub>2</sub>와 MgCO<sub>3</sub>가 미세 공극을 채우면서 부피를 팽창 시켰기 때문으로 판단된다. 과도한 팽창의 경우 오히려 균열을 발생시켜 강도를 감소시킬 수 있으나 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 양생 365일까지 압축강도를 측정한 결과 강도가 지속적으로 향상되었고 균열은 발견할 수 없었기 때문에 MgO 기반 고화제의 장기 강도 결과를 제시하지는 않았지만 팽창현상이 강도에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단되었다.

### 3.3. 중금속 용출 저감능

미세토를 처리하고 14일과 28일이 경과한 후 TCLP 실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 저감능은 lime/FA/BFS와 PC를 이용하여 미세토를 처리한 경우와 비교하였다. TCLP 결과는 통상적으로 mg/L의 단위를 사용하여 표현하나 본 연구에서는 용출농도의 비교를 위해 처리토의 단위질량당 용출된 중금속의 양(mg/kg)으로 단위를 변환하여 나타내었다.

고화제로 처리하기 전의 미세토에서 용출된 초기 농도는 Cd 0.13 mg/kg, Cu 1.15 mg/kg, Ni 2.00 mg/kg, Zn 34.2 mg/kg으로 각각 나타났다. Cd와 Zn은 총 농도 대비 각각 11.8%와 12.7%의 높은 용출률을 보였으나 TCLP 기준이 존재하는 Cd의 경우 기준인 20 mg/kg(1 mg/L)를 초과하지는 않았고, Cu와 Ni은 비교적 낮은 4.02%와 5.49%의 용출률을 보였다. 고화제를 이용하여 처리한 미세토에서 중금속 용출 저감능을 살펴본 경우 Cd은 양생 28일까지 지속적으로 용출 농도가 감소하는 것을 볼 수 있으며, MgO 기반 고화제로 처리한 경우 양생 14일까지 가장 우수한 성능을 보였다. 초기 농도대비 양생 28일 후 용출 농도가 감소한 비율은 PC가 85.9%로 가장 낮았으며, lime/FA/BFS와 MgO 기반 고화제는 100%로 나타났다. Cu의 경우 PC가 용출 저감능 100%로 가장 우수한 성능을 보였으나 양생 14일째까지는 MgO 기반 고화제의 용출 저감능이 4.2배 우수한 것으로 나타났다. Ni의 경우 양생 14일째까지는 MgO 기반 고화제가 타 고화제에 비해 3~4배 우수한 용출 저감능을 보였으며, 28일 후에는 PC와 거의 동일한 84.1%의 용출 저감능을 보였다. Zn 역시 MgO 기반 고화제가 양생 14일까지는 가장 우수한 성능을 보였으며, 양생 28일 후에는 모든 고화제가 97% 이상의 우수한 용출 저감능을 보였다. 전반적으로 lime/FA/BFS 고화제 만으로는 PC보다 우수한 중금속 용출 저감능을 보이지는 못했다. 반면 MgO 기반 고화제의 경우 PC보다 월등히 높은 초기 용출 저감능을 보였고, 28일

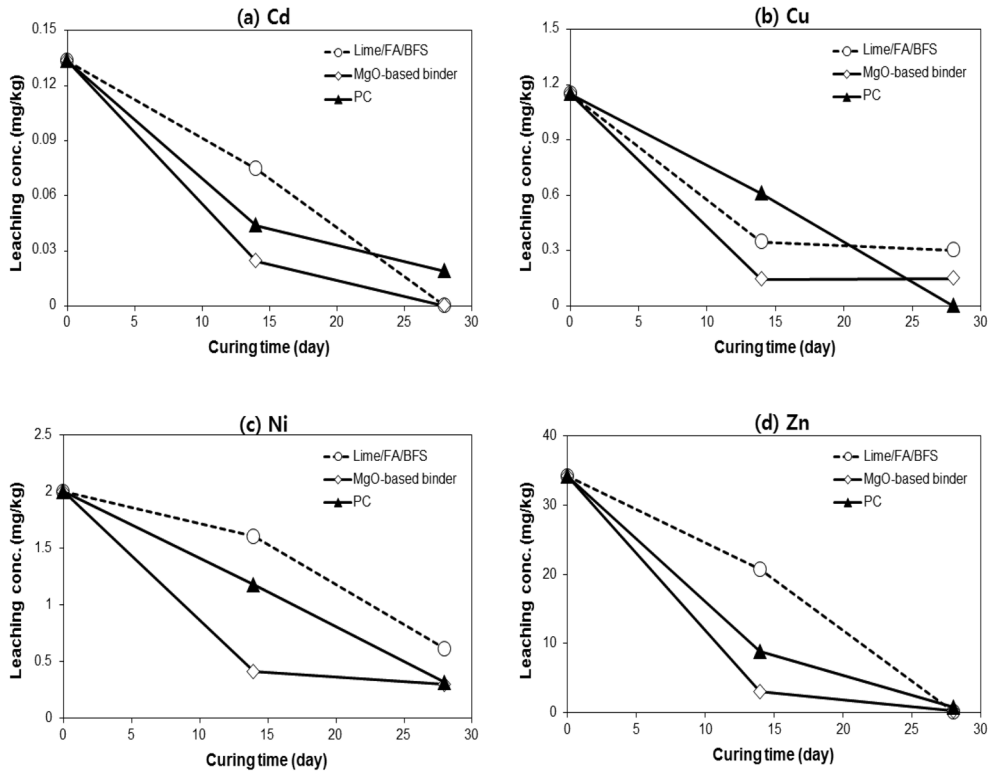


Fig. 4. Leaching of heavy metals from the sediments treated with the various binders.

후에는 비슷하거나 다소 우수한 성능을 보였다. 이러한 원인은 MgO 기반 고화제 내의 MgO가 lime/FA/BFS와 반응하면서 생성된 Calcium-Silicate-Hydrate(C-S-H), M-S-H와 같은 물질이 중금속을 용출이 용이하지 못한 상태로 만들 수 있었던 것으로 판단되며, 혼합된 MgO의 pH가 상대적으로 낮아 높은 pH에서 중금속이 용출될 수 있는 단점을 보완한 것과 MgO의 수화로부터 기인한 팽창현상으로 인해 미세공극이 감소했기 때문으로 판단된다.

3.4. 탄산염화 평가

먼저 MgO 기반 고화제를 미세토에 30% 주입하여 처리한 후 탄산염화 반응에 의한 pH 변화를 파악하기 위해 280일 동안의 pH 변화를 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 미세토는 AVS 농도가 198.4 μmol/g, CRS 농도가 202.2 μmol/g 으로 높은 혐기성 상태이다. 이러한 미세토는 아래 식 (2), (3)과 같이 물과 접할 경우 황화물이 산화되면서 pH가 저하되는 현상이 발생하기 때문에 탄산염화에 의해서 pH가 저하되는 식 (4)~(6)와 같은 현상과 구분하여야 한다. 본 실험은 탄산염화와 황화물의 산화에 의해 저하되는 pH를 구분하기 위해 미세토에 lime/FA/BFS, MgO, MgO/PC, MgO 기반 고화제를 각각 30% 주입한

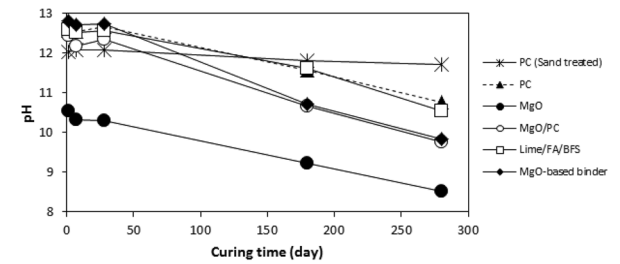
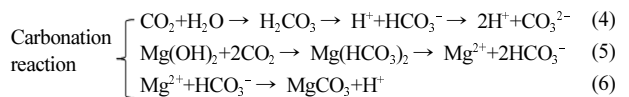
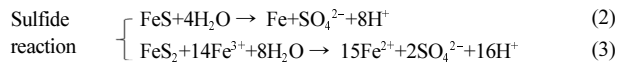


Fig. 5. pH changes in the sediment treated with the various binders.

것과 황화물이 존재하지 않는 표준사에 PC를 30% 주입하여 처리한 것을 비교하여 평가하였다.



혐기성 상태의 미세토에 의해 pH가 저하되는 현상을 파악하기 위해 표준사와 PC를 혼합하여 처리한 경우의 시료를 대조군으로 사용하였으며, 이 경우 초기 pH 12.1에서 280일 후의 pH가 11.7로 크게 낮아지지는 않았다.

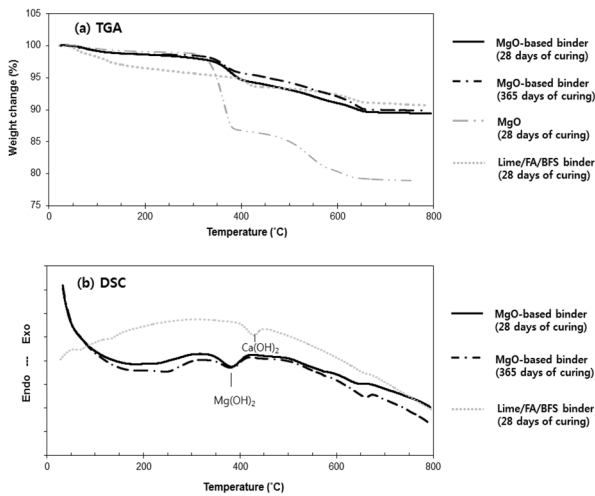


Fig. 6. TGA/DSC results of the sediment treated with MgO-based binder.

그러나 혐기성 상태의 미세토에 탄산염화 반응이 적을 것으로 판단되는 lime/FA/BFS와 PC를 혼합하여 처리한 경우 초기 pH 12.6을 양생 28일까지 유지하였고 280일 후에는 pH가 각각 10.6, 10.8로 감소하였다. 미세토 처리를 MgO 기반 고화제와 MgO/PC로 하였을 경우에는 초기 pH가 각각 12.8과 12.5에서 280일 경과 후 pH 9.82와 9.75로 감소하였다. MgO만을 이용한 경우 초기 pH 10.6에서 280일 경과 후 pH 8.51까지 감소하였다. 미세토를 처리한 경우 전반적으로 양생 28일까지는 초기 pH를 비교적 잘 유지하다가 감소하는 현상을 보였다. 황화물 중 AVS의 경우 산화속도가 비교적 빨라 초기에 pH를 저하시킬 수도 있으나 초기 28일 정도까지는 수화반응도 활발한 시기이기 때문에 pH를 유지할 수 있었던 것으로 판단된다. 반면 장기적으로 pH가 감소한 원인은 탄산염화에 의한 것과 고농도로 존재하는 CRS가 천천히 산화기 때문인 것으로 판단되었다. MgO가 혼합된 고화제의 경우 MgO가 혼합되지 않은 고화제보다 pH가 1 정도 낮은 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 MgO의 탄산염화 반응에 의해  $MgCO_3$ 가 형성되었기 때문으로 판단되었다.

Fig. 6은 미세토에 MgO 기반 고화제를 30% 주입하여 처리한 후 양생 28일과 365일 동안 생성된 수화물과 탄산염화 물질을 파악하고 정량하기 위해 실시한 TGA/DSC 분석 결과를 보여준다. 동일한 조건으로 MgO와 lime/FA/BFS 고화제를 이용하여 미세토를 처리한 후 양생 28일째의 시료에 대해서 실시한 TGA/DSC 분석 결과도 비교분석을 위해서 나타내었다. MgO의 경우 TGA 결과만 나타내었다. 타 연구자들이 MgO의 수화물과 탄산염화물을 TGA 분석을 통하여 연구한 보고 자료에 따르면 brucite

( $Mg(OH)_2$ )는 300~500°C에서 magnesite( $MgCO_3$ )는 500~800°C에서 열분해 되는 것으로 나타났다(Kumari et al., 2009; Xing et al., 2010). 본 연구에서도 MgO를 이용하여 미세토를 처리한 경우 350~400°C와 500~650°C에서 열분해가 일어나는 것이 관찰되어 brucite와 magnesite가 생성된 것으로 판단되었다. Lime/FA/BFS 고화제의 경우는 Table 1의 oxide 분석결과에서는 CaO를 상당량 함유하고 있는 것으로 보여지나 주입한 lime 외에 FA와 BFS 내에 존재하고 있는 Ca 성분은 CaO가 아니라 주로 akermanite( $Ca_2Mg(Si_2O_7)$ )와 미량의 calcite( $CaCO_3$ ) 등의 광물에 존재하는 것으로 알려져 있다(Duchesne and Reardon, 1999; Camargo Valero et al., 2009). Lime/FA/BFS 고화제를 이용하여 미세토를 처리한 경우 300°C 이내의 온도 구간에서 열분해가 관찰되었는데 기존의 연구 자료를 종합해 볼 때 C-S-H인 것으로 판단되며, 이후 410~450°C에서 관찰된 변화는 타 연구자가 보고한 portlandite( $Ca(OH)_2$ )의 열분해 온도인 430~450°C와 거의 일치하기 때문에 주입한 lime에 의해 portlandite가 생성된 것으로 판단된다(Rothon, 2003).

MgO 기반 고화제를 이용하여 미세토를 처리한 후 양생 28일째와 365일째의 시료에서 300°C 이내의 온도구간에서 관찰된 변화는 lime/FA/BFS 고화제에 의해 생성된 C-S-H와 혼합 주입된 MgO와 lime/FA/BFS 고화제가 반응하여 생성될 수 있는 M-S-H의 분해로 인한 가능성이 높은 것으로 판단된다. 무게변화는 Fig. 6(a)에서 양생 28일째는 1.69%, 양생 365일째는 1.86%로 나타났다. 그 다음 변화가 관찰된 온도 구간은 350~400°C 사이였으며, 이는 MgO만을 이용하여 미세토를 처리한 시료에서 brucite의 열분해로 판단된 온도 구간과 동일하기 때문에 본 시료에서도 brucite의 분해 반응 때문에 발생한 것으로 판단된다. 양생 28일째의 시료에서 brucite의 분해에 의한 무게변화는 4.21%였으며, 양생 365일째 시료에서는 3.08%로 brucite의 무게 변화량이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 MgO에서 brucite로의 전환율이 62.3%에서 45.6%로 감소한 것을 의미한다. Lime/FA/BFS 고화제를 이용하여 미세토를 처리한 경우 410~450°C 사이에서 미미하지만 portlandite가 열분해 되는 것을 확인할 수 있었으나 MgO 기반 고화제를 이용하였을 경우에는 변화를 확인할 수 없었다. 이러한 원인은 전술한 바와 같이 lime/FA/BFS 고화제에 혼합되어 있는 순수한 lime의 양이 MgO 기반 고화제에서는 상대적으로 적기 때문으로 판단된다.

Fig. 6(b)의 DSC 결과를 보면 500~650°C 사이에서 열



량의 변화가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 MgO만을 이용한 실험에서 magnesite의 열분해 구간으로 판단된 500~650°C의 온도범위와 동일하기 때문에 MgO 기반 고화제에서도 magnesite가 형성된 것으로도 판단할 수 있으나, Fig. 6(a)의 TGA 결과를 보면 MgO만을 이용한 실험에서 보여진 바와는 달리 400~650°C 구간에서 곡선의 급격한 하강 없이 지속적으로 무게가 감소하고 있어 동일한 magnesite라고 명확히 판단할 수는 없었다. 양생 28일째의 시료보다 양생 365일째의 시료가 더 낮은 pH를 보이고 있고, 양생 365일째의 시료에서는 상대적으로 brucite의 양이 적으며 400~650°C 사이에서 열분해가 일어난 무게는 높기 때문에 brucite의 탄산염화는 진행된 것으로 판단되며 MgO 실험에서 발견된 magnesite와는 다른 형태의 MgCO<sub>3</sub> 혹은 다른 탄산염화 물질이 생성된 것으로 판단된다. Fig. 6(a)를 통해 확인한 무게 변화는 양생 28일째는 4.45%였고 양생 365일째는 6.91%로 증가했다. 400~650°C까지의 무게 변화가 MgCO<sub>3</sub>에 의한 것으로 가정할 경우 MgO에서 MgCO<sub>3</sub>로의 전환율은 26.0%에서 41.9%로 증가 했으며, MgO의 수화반응에 의해 생성된 brucite가 시간이 지나면서 CO<sub>2</sub>와 반응을 하여 MgCO<sub>3</sub>로 전환된 것 때문으로 판단되었다. MgO 기반 고화제를 이용하여 1 ton의 미세토를 처리할 경우 28일 동안 44.5 kg, 365일 동안에는 69.1 kg의 CO<sub>2</sub>를 저장할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 중금속 오염 준설토의 고화처리와 CO<sub>2</sub> 저장을 동시에 수행할 수 있는 MgO 기반 고화제를 개발 하였고 압축강도, 부피팽창, 중금속 안정화능, CO<sub>2</sub> 저장능을 이용하여 고화제의 성능을 평가하였다. 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

1. MgO와 lime, fly ash, blast furnace slag의 최적 혼합비를 결정하는 실험을 통하여 MgO와 lime/FA/BFS(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)의 혼합비가 4 : 6~6 : 4일 경우 가장 우수한 강도를 발현할 수 있는 것으로 나타났다. 미세토 질량대비 30%의 고화제를 주입하여 처리한 시료의 365 일 강도가 PC로 처리한 경우의 3.70 MPa보다 높은 3.72~4.09 MPa로 나타나 그 성능이 우수한 것으로 판명되었고, MgO 기반 고화제는 MgO<sub>0.5</sub>-(L<sub>0.3</sub>-FA<sub>0.1</sub>-BFS<sub>0.6</sub>)<sub>0.5</sub>로 선정하였다.

2. MgO 기반 고화제의 팽창특성을 280일 동안 살펴본 결과 PC의 단점인 수축현상은 나타나지 않았으며, 최대

0.21%의 팽창률을 보였다. 팽창원인은 혼합된 MgO가 지속적으로 수화반응을 하면서 생성된 Mg(OH)<sub>2</sub>가 미세 공극을 채웠기 때문으로 판단되었고 이로 인하여 장기적으로 강도가 향상될 수 있었던 것으로 사료된다.

3. MgO 기반 고화제의 중금속 용출저감능은 양생 14 일째까지는 PC보다 월등이 우수하였고 28일 후에는 92.9% 이상의 중금속을 안정화시킬 수 있는 것으로 나타나 PC와 유사하거나 다소 우수하였다.

4. MgO 기반 고화제를 이용하여 미세토를 처리한 경우 280일 동안 pH가 12.8에서 9.82까지 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 탄산염화와 황화물의 산화가 pH 감소에 기여하는 것을 확인하였다. 처리토의 탄산염화 결과 MgCO<sub>3</sub> 혹은 MgO의 또 다른 탄산염화 물질이 존재하는 것으로 판단되었고 1 ton의 준설토를 처리할 경우 365일 동안 저장할 수 있는 CO<sub>2</sub>의 양은 69.1 kg으로 계산되었다.

#### 사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- Allen, H.E., Gongmin, F., and Baoline, D., 1993, Analysis of acid-volatile sulfide (AVS) and simultaneously extracted metals (SEM) for the estimation of potential in aquatic sediments, *Environ. Toxicol. Chem.*, **12**, 1441-1453.
- Camargo Valero, M.A., Johnson, M., Mather, T., and Mara, D.D., 2009, Enhanced phosphorus removal in a waste stabilization pond system with blast furnace slag filters, *Desalination and Water Treatment*, **4**, 122-127.
- Canfield, D.E., Raiswell, R., Westrich, J.T., Reaves, C.M., and Berner, R.A., 1986, The use of chromium reduction in the analysis of reduced inorganic sulfur in sediments and shales, *Chem. Geol.*, **54**, 149-155.
- Duchesne, J. and Reardon, E.J., 1999, Lime treatment of fly ash: characterization of leachate composition and solid/water reactions, *Waste Management*, **19**(3), 221-231.
- Gao, P., Lu, X., Geng, F., Li, X., Hou, J., Lin, H., and Shi, N., 2008, Production of MgO-type expansive agent in dam concrete by use of industrial by-products, *Build. Environ.*, **43**, 453-457.
- Gerdemann, S.J., O'Connor, W.K., Danlin, D.C., Penner, L.R., and Rush, H., 2007, Ex situ aqueous mineral carbonation, *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 2587-2593.

- Hossein, R. and William, B., 2003, Alkali Ash Material: A novel fly Ash-based cement, *Environ. Sci. Technol.*, **37**(15), 3454-3457.
- Hwang, K.-Y., Park, S.-Y., Back, W.S., Jung, J.-H., Kim, Y.-H., Shin, W.S., Lee, N.J., and Hwang, I., 2007, Speciation and leaching potential of heavy metals in sediments of Nakdong River, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, **21**(1), 113-122.
- Hwang, K.-Y., Kim, H.-S., and Hwang, I., 2011, Effect of resuspension on the release of heavy metals and water chemistry in anoxic and oxic sediments, *Clean - Soil, Air, Water*, **39**(10), 908-915.
- Kang, H.-Y., Park, S.-S., and Han, S.-H., 2008, Acid corrosion resistance and durability of alkali-activated fly ash cement-concrete, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **30**(1), 61-68.
- Kasselouris, V., Ftikos, C., and Parissakis, G., 1985, On the hydration of MgO in cement pastes hydrated up to 8 years, *Cement Concrete Res.*, **15**, 758-764.
- Kumari, L., Li, W.Z., Vannoy, C.H., Leblanc, R.M., and Wang, D.Z., 2009, Synthesis, characterization and optical properties of Mg(OH)<sub>2</sub> micro-/nanostructure and its conversion to MgO, *Ceramics Int.*, **35**, 3355-3364.
- Lee, C.-H. and Yoo, H.-J., 2000, A Study on the Development of Environmental Standards for Sediments, Korea Environment Institute.
- Lee, N.J., Lee, S.-H., Kim, I.-K., Hwang, I., and Yu, K.K., 2009, A Survey of Contamination in the West-Nakdong River Basin and Establishment of a Water Quality Improvement Program, Korean Ministry of Environment.
- Liska, M. and Al-Tabbaa, A., 2008, Performance of magnesia cements in pressed masonry units with natural aggregates: Production parameters optimisation, *Constr. Build. Mater.*, **22**, 1789-1797.
- Liska, M. and Al-Tabbaa, A., 2009, Ultra-green construction: reactive magnesia masonry products, *Proceedings of the ICE-Waste and Resource Manag.*, **162**(4), 185-196.
- Maroto-Valer, M.M., Fauth, D.J., Kuchta, M.E., Zhang, Y., and Andresen, J.M., 2005, Activation of magnesium rich minerals as carbonation feedstock materials for CO<sub>2</sub> sequestration, *Fuel Process. Technol.*, **86**, 1627-1645.
- Mo, L. and Panesar, D.K., 2012, Effects of accelerated carbonation on the microstructure of Portland cement pastes containing reactive MgO, *Cement Concrete Res.*, **42**, 769-777.
- Puertas, F. and Fernández-Jiménez, A., 2003, Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes, *Cement Concrete Compos.*, **25**, 287-292.
- Rodrigues, F.A. and Joeke, I., 2011, Cement industry: sustainability, challenges and perspectives, *Environ. Chem. Lett.*, **9**, 151-166.
- Rothon, R.N., 2003, Effects of Particulate Fillers on Flame Retardant Properties of Composites, in: R.N. Rothon (Ed.), Particulate Filled Polymer Composites, 2nd ed., Rapra Technology Ltd, Shrewsbury, 263-302.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., and Bolio, H., 2011, Sustainable cement production-present and future, *Cement Concrete Res.*, **41**, 642-650.
- Shin, W.S., Hwang, I., Kim, Y.-H., Shin, H.-S., Oh, J.-E., Hur, J., and Park, J.-H., 2009, Preliminary Monitoring of River and Lake Sediments(II), Korean Ministry of Environment.
- Torres-Rodriguez, D.A. and Pfeiffer, H., 2011, Thermokinetic analysis of the MgO surface carbonation process in the presence of water vapor, *Thermochim. Acta*, **516**, 74-78.
- USEPA, 1990, Toxicity Characterization Leaching Procedure (TCLP), EPA Method 1311, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USEPA, 2005, Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Site, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC.
- Van Jaarsveld, J.G.S., Van Deventer, J.S.J., and Lorenzen, L., 1998, Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerised FA, *Metall. Mater. Trans.*, **29**, 283-291.
- Vandeperre, L.J. and Al-Tabbaa, A., 2007, Accelerated carbonation of reactive MgO cements, *Adv. Cem. Res.*, **19**, 67-79.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., and Meida, L.O., 2001, Carbon dioxide emissions from the global cement industry, *Annu. Rev. Energ. Env.*, **26**, 303-329.
- Wunder, B., With, R., and Gottschalk, M., 2001, Antigorite: Pressure and temperature dependence of polysomatism and water content, *Eur. J. Mineral.*, **13**, 485-495.
- Xing, Z., Hao, Q., Ju, Z., Xu, L., and Qian, Y., 2010, Synthesis of MgCO<sub>3</sub> microcrystal sat160 starting from various magnesium sources, *Mater. Lett.*, **64**, 1401-1403.
- Xu, H. and Van Deventer, J.S.J., 2002, Geopolymerisation of multiple minerals, *Miner. Eng.*, **15**, 1131-1139.