

알칼리 활성화된 고로슬래그 페이스트의 물리화학적 특성 및 이산화탄소 흡수능 평가

Physicochemical Characteristics and Carbon Dioxide Absorption Capacities of Alkali-activated Blast-furnace Slag Paste

안해영	Ahn, Hae Young	정회원 · 세종대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : silverjiin@naver.com)
박철우	Park, Cheol Woo	정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr)
박희문	Park, Hee Mun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 (E-mail : hpark@kict.re.kr)
송지현	Song, Ji Hyeon	세종대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : songjh@sejong.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : In this study, alkali-activated blast-furnace slag (AABFS) was investigated to determine its capacity to absorb carbon dioxide and to demonstrate the feasibility of its use as an alternative to ordinary Portland cement (OPC). In addition, this study was performed to evaluate the influence of the alkali-activator concentration on the absorption capacity and physicochemical characteristics.

METHODS : To determine the characteristics of the AABFS as a function of the activator concentration, blast-furnace slag was activated by using calcium hydroxide at mass ratios ranging from 6 to 24%. The AABFS pastes were used to evaluate the carbon dioxide absorption capacity and rate, while the OPC paste was tested under the same conditions for comparison. The changes in the surface morphology and chemical composition before and after the carbon dioxide absorption were analyzed by using SEM and XRF.

RESULTS : At an activator concentration of 24%, the AABFS absorbed approximately 42g of carbon dioxide per mass of paste. Meanwhile, the amount of carbon dioxide absorbed onto the OPC was minimal at the same activator concentration, indicating that the AABFS actively absorbed carbon dioxide as a result of the carbonation reaction on its surface. However, the carbon dioxide absorption capacity and rate decreased as the activator concentration increased, because a high concentration of the activator promoted a hydration reaction and formed a dense internal structure, which was confirmed by SEM analysis. The results of the XRF analyses showed that the CaO ratio increased after the carbon dioxide absorption.

CONCLUSIONS : The experimental results confirmed that the AABFS was capable of absorbing large amounts of carbon dioxide, suggesting that it can be used as a dry absorbent for carbon capture and sequestration and as a feasible alternative to OPC. In the formation of AABFS, the activator concentration affected the hydration reaction and changed the surface and internal structure, resulting in changes to the carbon dioxide absorption capacity and rate. Accordingly, the activator ratio should be carefully selected to enhance not only the carbon capture capacity but also the physicochemical characteristics of the geopolymer.

Keywords

blast furnace slag, alkali-activator, carbon dioxide absorption, absorption capacity, calcium hydroxide

Corresponding Author : Song, Ji Hyeon, Professor
Department of Civil Engineering, Sejong University,
#209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 143-747, Korea
Tel : +82.2.3408.3819 Fax : +82.2.3408.4332
E-mail : songjh@sejong.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)

Received Feb, 23, 2015 Revised Feb, 24, 2015 Accepted Mar, 9, 2015

1. 연구배경 및 목적

1.1. 연구배경

최근 전세계적으로 온실가스 증가와 기후변화 문제에 대한 관심이 급증함에 따라 주요 선진국들은 기후변화 협약을 체결하고 온실가스 감축을 위해 노력하고 있다. 우리나라도 온실가스 감축을 위해 배출량 저감 목표를 세우고 목표 달성을 위한 정부차원의 정책과 규제를 도입하고 있으며 관련 산업분야에서도 온실가스 저감기술을 적극적으로 개발하고 있다(Ministry of Environment, 2013).

온실가스의 주요 배출원은 에너지, 산업공정, 농업, 폐기물 부문으로 크게 구분이 되며, 이중에서 에너지 부문에서 배출되는 온실가스 양이 전체의 85%로 대부분을 차지한다. 특히 에너지 부분에는 건설업, 에너지 산업 및 수송이 세부 분야로 포함되며, 수송 부문에서 배출되는 이산화탄소(CO₂)는 2011년 기준으로 84.3백만톤/년이다. 시멘트 생산 부분은 산업공정의 광물산업 세부 분야에 포함이 되며, 2011년 이산화탄소 배출량은 23.6백만톤/년이다(Ministry of Environment, 2013).

도로 포장 및 관리의 주재료인 시멘트는 주요 CO₂ 발생원으로 보통 포틀랜드시멘트(ordinary portland cement, OPC) 1톤 생산 시 0.7~1.0톤의 CO₂를 배출하며, 이는 인류가 발생시키는 CO₂ 배출량의 약 8% 수준이다(Duxson et al., 2007). 따라서 시멘트 사용량을 줄여 이산화탄소 배출량을 저감하기 위한 방안들이 다각도로 추진되고 있다. 특히 산업부산물을 활용하여 OPC의 일부 혹은 전체를 대체 사용하는 알칼리 시멘트 및 무시멘트 재료 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Fernando et al., 2008). 무시멘트 콘크리트 분야에서 연구가 되었던 분야는 크게 결합재(binder), 활성화제, 양생조건의 3분야로 나눌 수 있다(Wang et al., 1994).

기존 무시멘트 콘크리트 분야에서 주로 시멘트 대체로 사용되는 결합재(binder)는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말, 실리카 흙 등이 포함된다(Fernández and Palomo, 2005). 플라이애쉬는 무시멘트 콘크리트 분야에서 시멘트 대체물로서의 활용가능성에 대해 가장 먼저 연구되었다. 그러나 플라이애쉬를 활용한 콘크리트는 양생 시의 온도조건에 매우 민감하여 상온에서는 수화생성물이 잘 형성되지 않아 강도발현이 어렵다(Tho-in et al., 2012). 실리카 흙은 고성능 감수제와 혼합하여 사용할 경우 고강도 확보가 가능하다. 반면, 실리카 흙의 전세계 연간 생산량이 적고 국내에서는 생

산되고 있지 않아 소재 확보가 어렵다(Lim et al., 2010). 고로슬래그 미분말을 바인더로 활용한 콘크리트는 보통 포틀랜드시멘트를 활용한 콘크리트에 비해 초기 강도가 저조하나, 양생기간이 늘어날수록 압축강도는 크게 증가한다(Yang et al., 2010). 또한 고로슬래그 콘크리트는 OPC를 활용한 콘크리트에 비해 염해 저항성이 뛰어나고 탄산화가 촉진되는 경향이 있다(Huanhai et al., 1993). 본 연구에서는 고로슬래그 미분말을 결합재(binder)로 선정하여 시멘트 일부 혹은 전체를 대체한 무시멘트 페이스트의 이산화탄소 흡수능을 평가하고 물리화학적 특성을 확인하고자 하였다.

고로슬래그와 플라이애쉬 등은 고온에서 생성되어 화학적으로 안정적이고 수경성이 없기 때문에 물과 혼합하기 위해서 활성화제 투입이 필요하다. 기존의 무시멘트 콘크리트 분야에서는 각 산업부산물 입자의 활성화를 위해 다양한 활성화제에 관한 연구가 진행되고 있다(Fernandez-Jimenez et al., 2002). 현재까지 연구를 통해서 활성화 효과가 높은 것으로 확인된 것은 수산화나트륨, 규산나트륨, 탄산나트륨, 수산화칼슘 등의 알칼리 금속을 포함하고 있는 활성화제이며(Yang et al., 2008), 주로 이 활성화제들을 단일 혹은 두가지 이상의 종류를 혼합하여 사용하고 있다(Fernández and Palomo, 2005). 본 연구에서는 수산화칼슘을 고로슬래그 입자를 활성화시킬 활성화제로 선정하고 수산화칼슘 투입농도에 따른 영향을 확인하기 위한 연구를 수행하였다.

OPC 대신 산업부산물을 사용하여 시멘트 생산공정 시의 발생하는 이산화탄소 배출량을 줄이는 수동적인 온실가스 저감방안 이외에도 능동적으로 이산화탄소를 포집저감하는 탄소포집저장(Carbon capture and storage, CCS) 방법을 적용할 수 있다. 현재까지 개발된 탄소포집 방식으로는 습식법, 건식법, 흡착법 등이 있으며 본 연구와 같은 무시멘트 콘크리트 분야에서는 건식탄산화법을 사용하여 대기 중의 탄소를 포집할 수 있다(Rao et al., 2002). 건식탄산화법은 대기 중의 이산화탄소가 콘크리트 내부에 침투하여 클링커 내부에 존재하는 알칼리 이온과 반응하여 탄산칼슘을 생성함으로써 이산화탄소의 포집저장이 가능하다(Lee, 2011). 특히 국내에서 10만km 이상인 도로의 포장과 관리에 탄소포집저감형 기술을 도입하면, 수송 부문에서 배출되는 온실가스를 능동적으로 포집격리하여 주요 저감원으로 활용할 수 있다(Jang et al., 2013).

현재까지 무시멘트 콘크리트 분야에서 탄소 저감을

위해 연구된 분야는 시멘트 사용량을 줄임으로써 시멘트 생산 시에 발생하는 CO₂ 배출량을 줄이는 수동적인 탄소 저감에 치중되어 있다. 시멘트 대체용으로 연구 및 활용은 되고 있으나, 이들 소재를 활용한 콘크리트의 이산화탄소 흡수에 관해서는 아직 밝혀진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 재료 사용량을 줄임으로 인한 탄소저감과 동시에 산업부산물을 이산화탄소 흡수제로 활용함으로써 능동적인 탄소저감을 동시에 얻고자 한다.

1.2. 연구목적

본 연구에서는 시멘트 사용량 저감으로 얻을 수 있는 수동적 탄소저감과 활성화시킨 고로슬래그가 이산화탄소를 흡수함으로 인한 능동적 탄소저감을 모두 만족하는 탄소흡수용 도로재료를 개발하고자 한다. 특히, 활성화제 투입량에 따른 알칼리 활성화 고로슬래그 페이스트의 이산화탄소 흡수능을 정량화하고 물리화학적 특성을 분석하고자 한다.

2. 연구 재료

2.1. 고로슬래그 및 시멘트

본 연구에서는 바인더로 고로슬래그 미분말(blast furnace slag, BFS)과 보통 포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였으며 각 소재의 화학적 특성을 Table 1에 제시하였다. 고로슬래그의 분말도는 3,700cm²/g, 비중 2.87로 KS F 2563 규정을 기준으로 3종에 해당하며 OPC의 분말도는 3,400cm²/g, 비중 3.15 로 1종에 해당한다.

Table 1. Chemical Composition of Ordinary Portland Cement(OPC) and Blast Furnace Slag(BFS)

		OPC	BFS
Chemical compositions	SiO ₂ (%)	20.0	23.7
	Al ₂ O ₃ (%)	5.1	13.0
	Fe ₂ O ₃ (%)	2.8	0.5
	SO ₃ (%)	2.4	2.8
	CaO (%)	61.9	46.2

2.2. 활성화제

고로슬래그를 입자의 수경성 확보를 위해 분말형 수산화칼슘(Ca(OH)₂) (Sumchun, Korea)을 사용하였다. 활성화제 투입비율에 따른 이산화탄소 흡수능 변화를 확인하기 위해 수산화칼슘을 결합재(binder) 중량 대

비 6~24%까지 투입하였다. 활성화제의 투입중량비는 수산화칼슘 노르말농도 3~12N를 기준으로 하여 선정하였다.

3. 실험방법

3.1. 실험 변수 및 배합

본 연구에서는 활성화시킨 고로슬래그를 사용한 페이스트를 제조하여 이산화탄소 흡수능 및 물리화학적 특성을 분석하였고, 이를 OPC를 활용한 페이스트의 이산화탄소 흡수능 결과와 비교하였다. 활성화제인 수산화칼슘은 결합재(binder) 중량 대비 6, 12, 24%의 비율로 투입하고 2분간 건비빔하였다. 이후 고로슬래그 중량 대비 50% 비율의 증류수를 투입하고 1분간 혼합한 뒤 상온에서 24시간 양생시켰다. 이 때 투입한 수산화칼슘의 노르말농도는 3, 6, 12N이다(Fernandez-Jimenez et. al., 1998). 양생이 완료된 페이스트는 분쇄한 후 입자 크기를 1~4mm 범위로 균질하게 혼합하여 이산화탄소 흡수능을 측정하였으며 화학적 조성은 기기분석법으로 정량화하였다.

Table 2. Composition of Mixtures Used in This Study

Sample code	Binder (g)		Activator (g)	Water (g)	Activator/binder (%)	Water/binder (%)
	OPC	BFS	Ca(OH) ₂			
S0 AB24	100	0	24	50	24	50
S100 AB6	0	100	6	50	6	50
S100 AB12	0	100	12	50	12	50
S100 AB24	0	100	24	50	24	50

3.2. 이산화탄소 흡수능 평가

이산화탄소 흡수능(carbon dioxide absorption capacity) 평가를 진행한 반응조는 직경 1cm 크기의 아크릴 제질 원통형으로 제작하였으며 위에서 기술한 입자상 페이스트를 반응조 내부에 충전하였다. 이산화탄소 흡수능 반응조 내부로 150L/min 유량의 질소 가스를 통과시켰으며 Fig. 1과 같이 질소 가스에 이산화탄소 농도가 5,000ppm이 되도록 혼합한 뒤 입자상 페이스트 분말을 통과하도록 하였다. 이산화탄소 흡수능 평가는 총 120분간 수행하였으며 유입되는 이산화탄소 농

도와 반응기를 통과한 후 배출되는 이산화탄소 농도를 각각 측정하였다. 이산화탄소 농도의 측정은 이산화탄소 측정기(Li-COR INC. USA)를 이용하였으며, 이 측정기는 이산화탄소가 820nm 파장의 적외선을 흡수하는 성질을 이용하여 이산화탄소 농도를 정량화 한다.

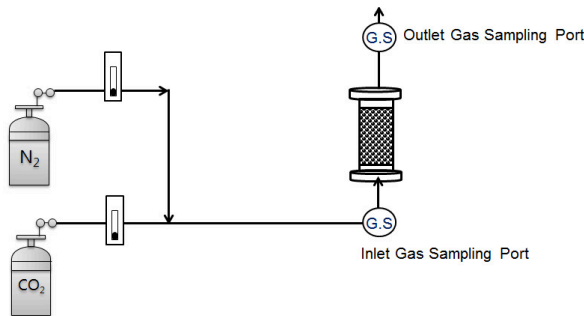


Fig. 1 Schematic of the Carbon Dioxide Absorption Experiment

3.3. SEM(scanning electron microscope) 분석

알칼리 활성화된 고로슬래그와 OPC 생성수화물의 형상을 확인하기 위해서 각 입자상 페이스트의 표면을 SEM으로 분석하였다. 또한 동일한 결합재(binder) 조건에서 이산화탄소 흡수 실험 전후의 페이스트 표면의 변화를 동일 배율로 분석하였다. SEM 분석에 사용한 페이스트 시료는 양생이 끝난 후 대기 중의 이산화탄소와의 반응을 방지하기 위해 질소 충전한 튜브에 넣어서 보관하였고, 이산화탄소 실험에 사용한 페이스트도 실험 종료 후 동일한 조건으로 보관하였다. SEM 분석 시료는 백금으로 1분간 코팅 후 HITACHI사의 S-4700(Japan)으로 15kV 조건에서 3,000배율로 표면을 분석하였다.

3.4. XRF(X-ray fluorescence) 분석

XRF 기기를 사용하여 고로슬래그 및 OPC를 사용한 페이스트의 수화생성물 성분을 분석하였다. 특히 이산화탄소 흡수반응 전후에 따라 페이스트 내부의 화합물의 변화량을 확인하기 위해 각 시료별 이산화탄소 흡수 실험 전후의 입자상 페이스트의 화학적 특성을 비교하였다. XRF 분석용 시료는 본 연구에서 제조한 입자상 페이스트를 미분쇄하여 분말형태로 제조한 뒤 SEM 시료와 동일한 조건에서 보관하였다. XRF 분석은 Rigaku사의 ZSX-100e(Japan)을 사용하였으며 화합물의 정량분석을 위해 EZS001XNV 프로그램을 활용하였다.

4. 실험결과

4.1. 이산화탄소 흡수량 및 초기 반응속도

Table 3은 활성화제 투입량에 따른 각 페이스트의 이산화탄소 흡수량 측정 결과이다. 활성화제가 고로슬래그 중량 대비 12% 투입된 경우 (S100AB12) 페이스트 질량(kg)당 약 38g의 이산화탄소가 흡수되었다. 고로슬래그 중량 대비 24%의 활성화제가 투입된 경우 (S100AB24) 흡수제 질량당 이산화탄소 흡수량은 42 g 이었다. 동일한 활성화제 투입 조건에서 OPC 만을 사용한 페이스트(S0AB24)의 이산화탄소 흡수량과 고로슬래그를 사용한 페이스트(S100AB24)의 흡수량은 현저한 차이가 있었다. 기존의 연구에 따르면 고로슬래그 콘크리트의 수화생성물은 주로 에트린자이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$), 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)이며 (Ahn et. al., 2004), 기존 OPC를 활용한 콘크리트의 경우 칼슘실리케이트 수화물이 주로 생성이 되는 것으로 알려져 있다(Moon and Shin, 2005). 또한 칼슘실리케이트 수화물도 바인더 및 첨가 활성화제 종류에 따라서 생성되는 클링커의 구조가 달라지게 되며 (Lee et. al., 2012, Palomo et. al., 1990) 이에 따라 이산화탄소 흡수량의 차이가 나는 것으로 판단된다.

Table 3. Amount of Carbon Dioxide Absorbed onto Pastes at Different Activator Ratios

Sample code	Amount of CO ₂ absorbed (g-CO ₂ /kg-absorbent)
S0AB24	0.5
S100AB6	18±1
S100AB12	38±7
S100AB24	42±2

활성화제가 고로슬래그 중량대비 6% 투입된 페이스트(S100AB6)에 비해 활성화제가 12% 투입된 페이스트(S100AB12)의 이산화탄소 흡수량은 2배 가량 증가하였으나, 활성화제가 24% 투입된 페이스트(S100AB24)의 이산화탄소 흡수량은 약간 증가하였다. 따라서 동일한 결합재(binder) 조건에서 활성화제 투입농도 증가에 따라 페이스트의 이산화탄소 흡수량 증가율은 감소한 것으로 나타났다. 활성화제 투입농도가 높은 조건에서 이산화탄소 흡수량 증가폭이 감소하는 이유를 확인하고자 각 활성화제 투입농도 별로 이산화탄소 흡수반응 속도상수를 아래 Eq. (1)을 통해 구했다.

$$\frac{c}{c_0} = e^{-kt} \quad (1)$$

여기서, c 는 페이스트를 통과한 후의 배출된 이산화탄소 농도(ppm), c_0 는 페이스트에 유입되기 직전의 이산화탄소 농도(ppm), k 는 이산화탄소 흡수속도상수 (min^{-1}), t 는 반응시간(min)을 나타낸다. Eq. (1)을 적용하여 산정한 이산화탄소 흡수속도상수를 활성화제 투입농도 별로 Fig. 2에 나타내었다.

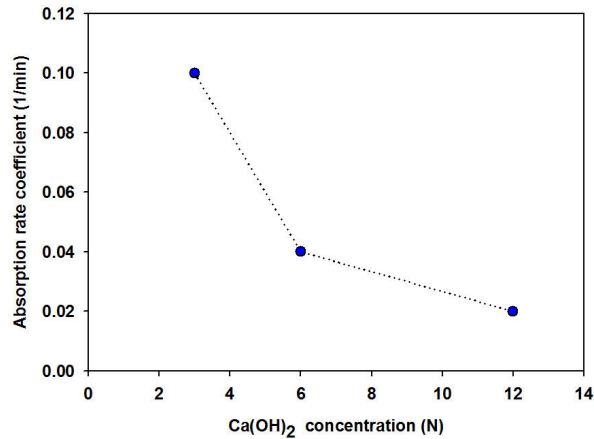


Fig. 2 Carbon Dioxide Absorption Rates as a Function of Activator Concentration

일반적으로 콘크리트 탄산화 과정은 외부의 이산화탄소가 콘크리트의 내부로 침투하여 페이스트 중의 콘크리트 수화반응 결과물인 수산화칼슘 및 다양한 클링커와 반응하여 탄산칼슘이 되는 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 2003). 기존 연구 결과와 비교했을 때, 이산화탄소 흡수 반응속도가 감소된 것은 수산화칼슘 투입량이 증가함에 따라 페이스트의 수화반응이 촉진되어 내부 공극률이 감소하며, 이에 따라 대부분의 이산화탄소 흡수 반응이 페이스트 표면에서의 반응으로 종결되었기 때문인 것으로 판단된다 (Ma et al., 1995).

4.2. 이산화탄소 흡수 전후의 페이스트 표면 변화

SEM으로 관찰한 표면 특성을 비교해 보면 (Fig. 3), OPC를 사용한 페이스트와 고로슬래그를 사용한 페이스트 표면 수화반응물의 종류와 모양이 크게 달랐다. 기존 연구를 통해서 OPC가 아닌 고로슬래그, 플라이애쉬를 사용한 페이스트의 경우 포졸란 반응에 의한 OPC의 수화반응과 다른 반응이 일어나는 것으로 알려져 있다 (Palomo et al., 1990).

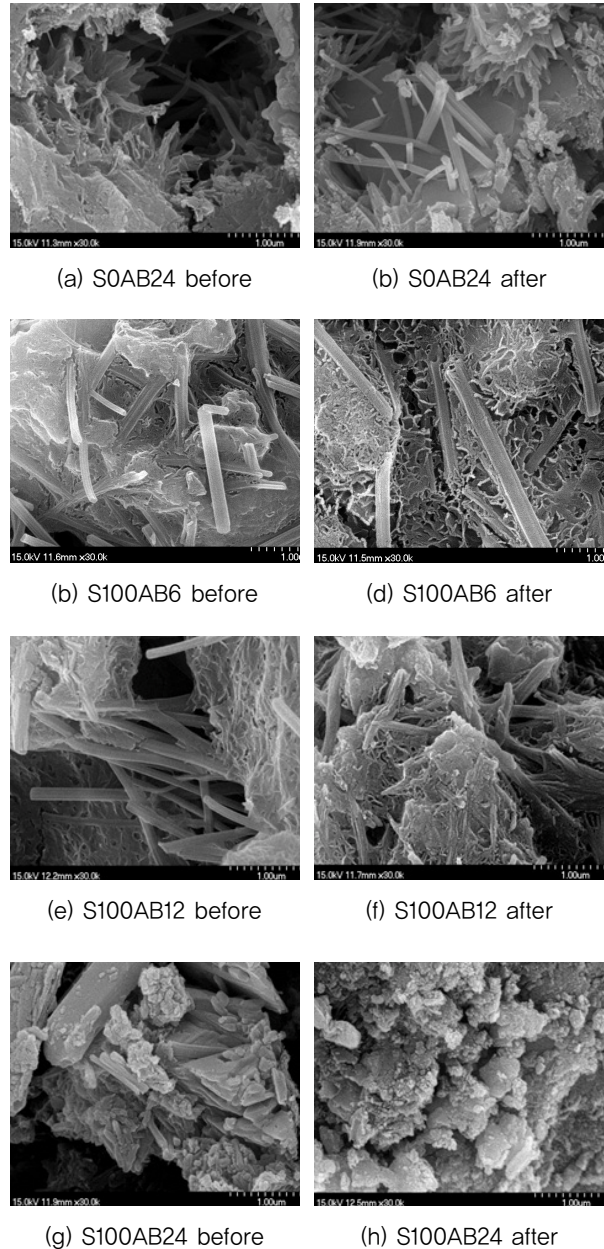


Fig. 3 SEM Images Before and After the Carbon Dioxide Absorption Experiments

활성화제 투입량에 따른 이산화탄소 흡수 전 페이스트의 구조적인 특성으로는 투입량이 증가함에 따라 페이스트의 수화반응이 촉진되어 표면 및 내부 조직이 치밀해지는 것으로 판단된다. 이산화탄소 흡수 후 표면에 생성된 화합물은 이산화탄소와 칼슘이 반응하여 생성된 탄산칼슘과 같은 탄산염인 것으로 추정된다 (Ma, et al., 1995).

4.3. 이산화탄소 흡수 전후의 페이스트 성분 변화

XRF 분석 결과 Table 4와 같이 각 페이스트에서 이산화탄소 흡수 후에 CaO 비율이 증가하였다. 이산화탄

소 흡수 후의 CaO 증가량은 OPC 페이스트보다 활성화된 고로슬래그 페이스트에서 두드러지게 높게 나타났다. 기존 연구 결과 대기 중의 이산화탄소와 OPC 및 무시멘트 페이스트 내부의 수화결과물이 반응하여 탄산칼슘을 생성하는 것으로 알려져 있다(Fernández Bertos et. al., 2004). 현재까지 밝혀진 이산화탄소와 반응하는 페이스트 내부 물질로는 수산화칼슘 이외에 $C_3S(3CaO \cdot 2SiO_2)$, $C_2S(2CaO \cdot 2SiO_2)$ 와 같은 수화 생성물이 있다(Puertas et. al., 2009).

Table 4. Changes in Chemical Composition on the Surface of Pastes Before and After the Carbon Dioxide Absorption Experiments

		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO
S0AB24	before	16.0	4.1	3.6	71.7
	after	15.6	4.0	3.7	71.9
S100AB6	before	28.5	11.9	0.6	53.2
	after	27.8	11.7	0.5	54.5
S100AB12	before	27.4	11.5	0.5	55.3
	after	26.5	11.1	0.5	56.6
S100AB24	before	23.9	10.0	0.4	60.7
	after	23.8	9.8	0.4	61.2

그러나 XRF 분석 결과에서 증가한 CaO 비율은 페이스트 수화반응에 따른 $Ca(OH)_2$ 의 증가량과 이산화탄소 흡수반응에 따른 $CaCO_3$ 의 증가량이 구분이 되지 않으므로, 본 XRF 결과만으로는 이산화탄소 흡수 결과로 생성된 생성물의 정량화를 단정하기는 어렵다. 이에 향후 추가 연구로 XRD-리트베틀법 등을 이용하여 보다 세부적인 생성물의 정량분석이 요구된다(Hesse et. al., 2012).

5. 결론

- 동일한 활성화제 투입조건에서 OPC를 결합제(binder)로 사용한 페이스트에 비해 고로슬래그를 활용한 페이스트의 이산화탄소 흡수능이 현저히 높았다. 이는 고로슬래그를 바인더로 사용할 경우 생성되는 클링커의 종류가 달라짐에 따라서 페이스트의 이산화탄소 흡수 포텐셜이 증가한 것으로 판단된다.
- 활성화제 투입농도가 증가함에 따라서 이산화탄소 흡수량은 증가하였으나, 증가율 및 이산화탄소 흡수 속도 상수는 감소하였다. 이는 활성화제 투입농도가 증가함에 따라 페이스트의 수화반응이 촉진되어 내

부구조가 치밀해지고 공극률이 감소되어 이산화탄소 흡수 반응이 표면에서만 이루어졌기 때문이다.

- 이산화탄소 흡수 반응 생성물에 따른 화학적 특성 변화를 확인하기 위해 이산화탄소 흡수 전후의 페이스트를 XRF 분석하였으며 이산화탄소 흡수 이후에 CaO 비율이 증가하였다. 그러나 본 연구에서 진행한 정량분석으로는 수화반응 생성물과 이산화탄소 흡수 반응 생성물을 명확히 구분할 수 없어 추후 세부적인 이산화탄소 흡수반응 생성물 분석과 정량화가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 2013년 국토해양기술연구개발과제 “탄소중립형 도로 기술개발” 연구단의 연구지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

BIBLIOGRAPHY

- Ministry of Environment, 2013, National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea
- Ahn, J. W., Cho, J. S., Han, G. C., You, K. S., 2004, Effects of Alkaline Activator and Specific Surface Area of Blast Furnace Slag on the Compressive Strength of Blast Furnace Slag Cement, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 41. 395-402.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., J. van Deventer, J. S., 2006, Geopolymer technology the current state of the art, *Journal of Materials Science*, Vol. 42. 2917-2933.
- Fernando, P. T., João, C. G., Said, J. 2008, Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture, *Construction and Building Materials*, Vol 22. 1315-1322.
- Fernández Bertos, M., Simons, S. J. R., Hills, C. D., Carey, P.J., 2004, A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B112. 193-205.
- Fernandez-Jimenez, A., Puertas, F., Arteaga, A., 1998, Determination of Kinetic Equations of Alkaline Activation of Blast Furnace Slag by Means of Calorimetric Data, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 52. 945-955.
- Fernandez-Jimenez, A., Puertas, F., 2002, The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32. 1019-1024.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., 2005, Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35. 1984-1992.
- He, J., Zhang, J., Yu, Y., Zhang, G., 2012, The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study,

- Construction and Building Materials, Vol. 30. 80-91.
- Hesse, C., Goetz-Neunhoeffler, F., Neubauer, J., Braeu, M., Gaeberlein, P., 2009, Quantitative in situ X-ray diffraction analysis of early hydration of Portland cement at defined temperatures, Powder Diffraction, Vol. 24. 112-115
- Heah, C. Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C. M., Liew, Y. M., 2012, Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers, Construction and Building Materials, Vol. 35. 912-922.
- Jang, B. J., Kim, S. W., Song, J. H., Park, H. M., Ju, M. K., Park, C. W., 2013, Fundamental Characteristics of Carbon-Capturing and Sequestering Activated Blast-Furnace Slag Mortar, International journal of highway engineering, Vol. 15. 95-103.
- Kim, Y. S., Moon, D. I., Lee, D. W., 2011, An Experimental Study on Alkali-Silica Reaction of Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag Mortars, Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 11. 345-352.
- Lee, H. S., 2011, CO₂ Reduction Technology for Concrete, Journal of the Korea concrete institute, Vol. 23. 28-31.
- Lee, M. K., Jung, S. H., Kim, D. H., Jang, B. S., 2003, An Experimental Study on the CO₂ Diffusivity of Concrete, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23. 413-420.
- Lee, S. H., Kim, W. K., Kang, S. H., 2012, Hydration Mechanism of Ground Granulated Blast Furnace Slag, Journal of the Korea concrete institute, Vol. 24. 31-34.
- Lim, B. H., Lee, S. S., Yun, H. D., Yoon, G. H., 2010, An Experimental Study on the Quality Properties of High Strength Concrete by the Replacement Ratio SFFB as Substitutes of Silica-fume, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 14. 87-92.
- Ma, W., Liu, C., Brown, P. W., Komarneni, S., 1995, Pore structures of fly ashes activated by Ca(OH)₂ and CaSO₄ · 2H₂O, Cement and Concrete Research, Vol. 25. 417-425.
- Moon, H. Y., Shin, D. G., 2005, Effect of Alkali Activators on Early Compressive Strength of Blast-Furnace Slag Mortar, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 9. 120-128.
- Palomo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T., 1999, Alkali-activated fly ashes: A cement for the future, Cement and Concrete Research, Vol. 29. 1323-1329.
- Puertas, F., Palacios, M., Gil-Maroto, A., Vazquez, T., 2009, Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type, Cement and Concrete Composites, Vol. 31. 277-284.
- Rao, A. B., and Rubin, E., 2002, A technical, economic and environmental assessment of amine-based CO₂ capture technology for power plant greenhouse gas control, Environmental Science and Technology, Vol. 36. 4467-4475.
- Tho-in, T., Sata, V., Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., 2012, Pervious high-calcium fly ash geopolymer concrete, Construction and Building Materials, Vol. 30. 366-371.
- Yang, K. H., Song, J. K., Ashour, A. F., Lee, E. T., 2008, Properties of cementless mortars activated by sodium silicate, Construction and Building Materials, Vol. 22. 1981-1989.
- Yang, K. H., Sim, J. I., Nam, S. H., 2010, Enhancement of reactivity of calcium hydroxide-activated slag mortars by the addition of barium hydroxide, Construction and Building Materials, Vol. 24. 241-251.
- Wang, S. D., Scrivener, K. L., Pratt, P. L., 1994, Factors affecting the strength of alkali-activated slag, Cement and Concrete Research, Vol. 24. 1033-1043.