

## Properties of non-cement mortars with small addition of alkali activator using fly ash and fused waste slag

Yootaek Kim<sup>†</sup> and Kyongwoo Lee

*Department of Advanced Materials Science and Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea*

(Received September 2, 2015)

(Revised September 18, 2015)

(Accepted September 25, 2015)

**Abstract** Recently the world wide efforts reduce occurrence of CO<sub>2</sub>; global warming main reason. The aim of this study is to improve recycling rate of the fly ash (FA) and fused waste slag (FWS) from the power plant and to carbonate under supercritical condition (40°C, 80 kgf/cm<sup>2</sup> pressure, 60 min) for CO<sub>2</sub> fixation. Specimens of mortar with various mixing ratios of FA, FWS (from 100:0 to 20:80 in 5 steps of 20 % reduction each time), distilled water and 3 M NaOH alkali activators were prepared. As a result, the proportion of weight change ratio increases with CaO content, to 12 % after carbonation under the supercritical condition. There is difference of compressive strength between the carbonated and the alkali activator mortar specimens. The stabilization of CO<sub>2</sub> fixation through carbonation which could confirm the applicability of the eco-friendly materials without loss of compressive strength.

**Key words** Carbonation, Supercritical condition, Fly ash, Fused waste slag

## 석탄회 및 용융폐기물 슬래그에 소량의 알칼리 활성화제를 첨가한 무시멘트 모르타르의 특성

김유탉<sup>†</sup>, 이경우

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2015년 9월 2일 접수)

(2015년 9월 18일 심사완료)

(2015년 9월 25일 게재확정)

**요약** 현재 전 세계적으로 지구온난화의 주범인 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 노력을 하고 있으며, 산업발전에 필요한 화력발전 등에서 발생한 부산물을 재활용하는 방안이 시급하다. 따라서 본 연구는 산업부산물인 비산재와 폐기물 슬래그를 이용하여 모르타르 경화체를 제작하였으며 알칼리 활성화제 첨가에 따른 물성을 비교하기 위해 비교적 낮은 농도인 3 M의 NaOH solution을 사용하였고, 이 경화체에 초임계 이산화탄소 조건(40°C, 80 kgf/cm<sup>2</sup> pressure, 60 min)에서 탄산화를 통하여 CO<sub>2</sub>를 경화 체내에 안정적으로 고정화 시켜 이에 따른 물성을 평가하였다. 탄산화 인자인 CaO의 함량이 많을수록 탄산화율은 높게 나타났으며, 탄산화 후 무게변화율이 최대 약 12 % 증가하였다. 탄산화 후 압축강도는 전과 비슷한 수준이었으며, 이를 통해 탄산화를 통해 CO<sub>2</sub>를 안정하게 고정화시킨 친환경 소재에 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 탄산화 반응 후에 생성되는 H<sub>2</sub>O로 인해 추가적인 양생을 통해 장기적인 관점에서 탄산화를 통해 물성향상 또한 기대해 볼 수 있을 것으로 생각된다.

### 1. 서론

전세계적으로 CO<sub>2</sub>의 배출이 늘어남에 따른 온실효과에 의한 지구온난화 현상으로 CO<sub>2</sub> 저감을 위해 노력을 하고 있다. 특히 우리나라의 CO<sub>2</sub> 배출량은 2008년 5.4

억톤으로 전 세계 8위에 해당하였으며, 2012년에는 6.2억톤으로 전 세계 7위에 해당하여 매년 증가하는 추세에 있으며, 이에 따라 CO<sub>2</sub> 저감을 위한 정책 및 기술 개발 등이 활발히 진행되고 있다[1].

이산화 탄소(CO<sub>2</sub>)포집 및 저장기술(Carbon Capture and Storage, CCS) 개발을 위한 연구가 국내외에서 활발히 연구 중이며, 온실가스 문제에 직접 대응할 수 있는 CCS 기술은 수송 및 저장에 따른 안정성과 경제성에 대한 논란의 해소가 필요하며 이로 인하여 실용화에

<sup>†</sup>Corresponding author  
Tel: +82-31-241-9918  
Fax: +82-31-244-6300  
E-mail: ytkim@kyonggi.ac.kr

Table 1  
Elemental compositions (wt%), expressed in oxide forms, of fly ash and fused waste slag

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CuO	BaO	MnO	Total
FA	14.46	6.44	15.32	53.98	3.72	4.06	0.68	0.76	-	0.32	0.17	99.91
FWS	47.40	13.78	7.55	22.07	1.35	0.14	1.10	2.32	0.63	1.47	0.44	98.25

한계가 있는 실정이다[2]. CCS 기술 중 탄산염 광물화 (Mineral carbonation) 공정은 CO<sub>2</sub>를 특정한 금속이나 금속화합물과 반응 유도하여 열역학적으로 안정한 탄산염 형태로 CO<sub>2</sub>를 고정화시키는 연구로써 현재 많은 연구가 진행되고 있다[3-6].

화력발전소에서 석탄을 이용하여 에너지를 생산하는 연소방식 중 순환유동층 연소방식의 부산재는 KS규격 (KS L 5405)에 부합하지 못하며, 미국재료시험규격 (ASTM C 618) C-type 부산재로 분류된다. 이는 콘크리트 혼화제와 시멘트의 원료로 사용시 높은 팽창율을 나타내어 원료로 적합하지 못하여 재활용 방안이 시급히 요구되고 있다[7, 8].

순환유동층 연소방식은 석회석을 노 내 탈황을 위해 첨가하는데 이때 탈황 반응에 참여하지 못한 잉여 석회 성분이 부산재 내에 잔존하여 CaO 화합물 상태로 존재하게 되며, CaO 화합물이 다량 함유된 재료를 콘크리트 혼화제로 사용하였을 경우 잔존하는 CaO 성분이 콘크리트의 슬럼프 손실, 이상 응결, 지연제 사용량 증가, 내구성 저하 등의 문제를 일으킨다. 또한 콘크리트의 팽창, 균열 등 물성저하에 영향을 미친다고 알려져 있다[9, 10]. 이에 한국등록 특허(10-0538586, 10-0592870)에서 Kim 등은 제강슬래그의 Free-CaO 성분을 탄산화를 통한 안정화 또는 제강슬래그를 이용한 콘크리트에 물유리를 첨가하여 팽창문제를 해결하고자 하였다[11, 12].

최근 대량생산 및 소비 경향이 크게 늘어남에 따라 생활 폐기물이 다량 발생되고 있으나, 폐기물 매립에 필요한 부지확보에 한계가 발생하여 이를 소각처리 하는 방법이 매우 유용한 폐기물 처리방법 중 하나로 대두되고 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 생산과 소비가 늘어남에 따라 소각장에서 배출되는 소각재의 양도 증가하는 추세로 2002년에는 국내 전체 소각재 발생량은 377,495톤이었으나, 2012년에는 638,328톤으로 10년 동안 약 2배 가까이 증가하였다[13].

따라서 본 연구에서는 재활용 방안이 요구되는 순환유동층 방식에서 발생한 부산재와 폐기물 슬래그를 일정 수준별로 치환하여 양생 일수에 따라 기체 및 액체의 특성을 동시에 갖는 초임계 이산화탄소 조건(40°C, 80 kgf/cm<sup>2</sup> pressure, 60 min)에서 탄산화하여 물성을 평가하고자 하였다. 또한 CaO 화합물 성분이 다량 함유되어 있는 순환유동층 연소방식에서 발생한 부산재를 수화시킬 경우 Ca(OH)<sub>2</sub>이 생성되어 이로 인해 pH가 10 이상으로

강알칼리 분위기를 형성하는데, 이에 폐기물 슬래그를 일정 수준 치환하여 추가적인 축중합 반응에 의한 경화 반응이 일어나도록 유도하였으며, 소량의 NaOH 수용액을 첨가하여 물성 변화를 관찰하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 사용 재료 및 배합 조건

본 실험에서 사용된 원료는 국내 Y 발전소에서 발생한 부산재(Fly ash, FA)와 폐기물가스화 공정을 거친 후 발생하는 폐기물 슬래그(Fused waste slag, FWS)를 유성형 볼밀을 이용하여 분쇄하여 106 μm 이하의 분말을 사용하였으며, 그 화학조성은 다음의 Table 1과 같다.

실험의 배합 및 변수는 Table 2와 같으며, 증류수의 양은 성형성을 기준으로 페이스트의 Flow를 150~170 mm으로 하였다. 실험 변수로 부산재와 폐기물 슬래그를 혼합하여 사용하였으며, 부산재에 다량 함유되어 있는 CaO 성분으로 포졸란 반응을 통해 경화되는 부산재에 소량의 알칼리 활성화제를 첨가하여 그에 따른 물성을 평가하고자 하였다. 알칼리 활성화제는 NaOH(DAEJUNG, pellet, assay > 97%) solution을 사용하였으며 일반적인 지오폴리머 제조시 사용하는 농도보다 낮은 3 M의 농도로 사용하였다. 왜냐하면, 이전의 보고에서 언급했듯이 부산재와 증류수를 사용한 경우에도 부산재에 함유된 알칼리성분에 의해 용융슬래그의 지오폴리머 반응이 일부 확인되었기 때문이다[14].

Table 2  
Mixture proportion of specimens (g)

	Symbol	FA	FWS	Distilled water
Distilled water	FA100(DW*)	600	0	300
	FA80 FWS20(DW)	480	120	272.5
	FA60 FWS40(DW)	360	240	245
	FA40 FWS60(DW)	240	360	217.5
	FA20 FWS80(DW)	120	480	190
NaOH 3 M solution	FA100(AA**)	600	0	300
	FA80 FWS20(AA)	480	120	272.5
	FA60 FWS40(AA)	360	240	245
	FA40 FWS60(AA)	240	360	217.5
	FA20 FWS80(AA)	120	480	190

\*DW: distilled water, \*\*AA: Alkali activator.

2.2. 실험 방법 및 분석

비산재와 폐기물 슬래그 미분말의 혼합비율은 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80으로 진행하였으며 배합된 원료를 압축강도 측정용 50 × 50 × 50 mm<sup>3</sup> 큐브몰드에 채워 넣고 다짐봉으로 수습회 상부를 두드려 배합된 원료 내에 존재하는 기포를 제거하였다. 성형 후 24시간 동안 상온, 상압에서 양생한 후 탈형하였고, 이후 시편을 각각 3, 7일간 상온, 상압에서 추가 양생하였다. 각 재령일수에 Autoclave 장비를 이용하여 초임계 이산화탄소 분위기를(40°C, 80 kgf/cm<sup>2</sup> pressure)에서 60분 동안 탄산화 반응을 시킨 후 압축강도 측정기(Jeil, JI-303)를 이용하여 탄산화 전, 후의 강도를 측정하였다. 본 실험에서 사용된 Autoclave는 O-ring type의 sealing 이며, Fig. 1에 장치의 모식도를 나타내었다.

탄산화 전, 후의 물성을 비교하기 위하여 압축강도, 무게변화율을 측정하였으며 시편의 단면에 1%의 페놀프탈레인 용액을 분무하여 탄산화 깊이를 측정하였다. 페놀프탈레인 용액은 pH 9.2 이상에서 붉은색의 형태로 색변화를 보여[15], 탄산화를 통한 중성화 여부와 깊이, 알칼리 활성화제의 잔여여부를 확인하기 위하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탄산화 유무 판단에 관한 결과 및 고찰

비산재와 폐기물 슬래그를 증류수 또는 NaOH 3 M의

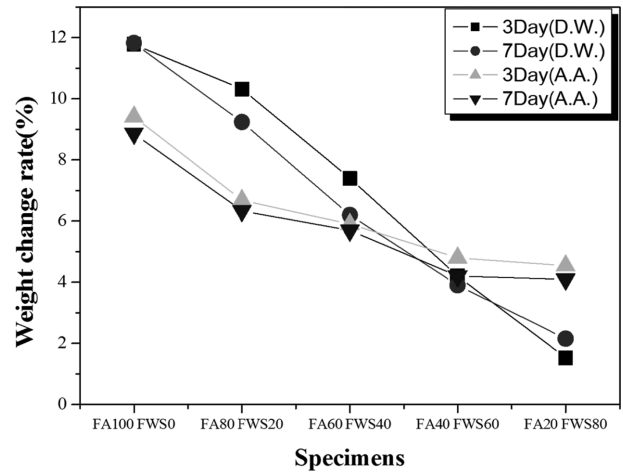


Fig. 2. Weight change rates of specimens using alkali activator solution and distilled water only after carbonation under supercritical condition (40°C, 80 kgf/cm<sup>2</sup> pressure, 60 min).

수용액을 혼합하여 성형을 한 후 상온, 상압에서 양생하여 양생일 별로 초임계 탄산화를 실시한 후 물성 변화를 평가하기 위하여 초임계 탄산화 전 후의 무게변화율을 측정하였다. Fig. 2에 탄산화 후의 시험체의 탄산화 전 후의 무게 변화율을 측정하여 나타내었다.

모든 시편에서 탄산화 후 무게가 증가하는 것을 볼 수 있었고 FA100 FWS0의 조성에서 증류수를 이용하여 경화시켰을 경우 최대 12%의 무게 변화율을 나타내었다. 이는 경화체의 무게를 고려하였을 때 약 20 g이 증가하였으며, 수분 등을 고려하였을 때 20 g 이하의 CO<sub>2</sub>가 경화체에 고정되었다고 판단할 수 있다. 비산재의 양이 줄어들수록 즉, 폐기물 슬래그의 치환량이 많아질수록

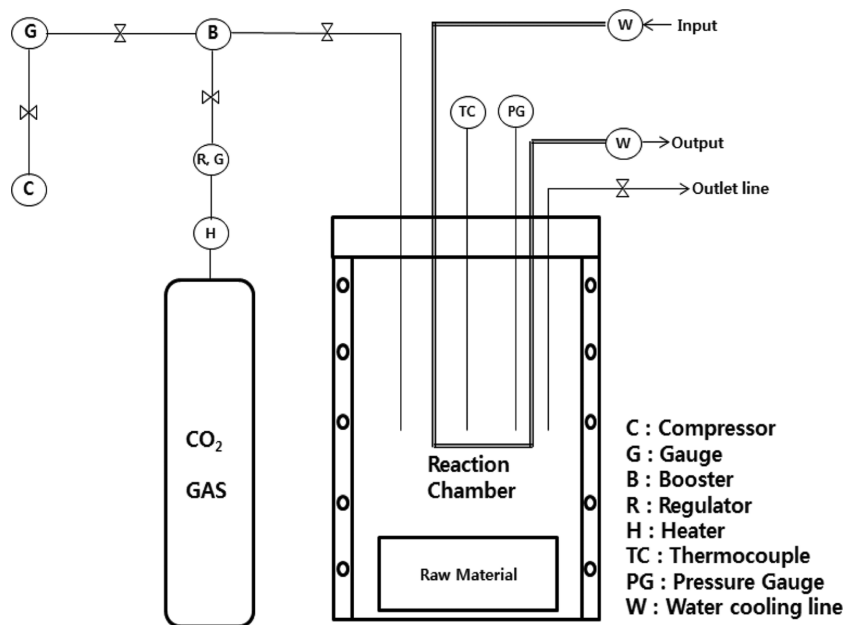


Fig. 1. Schematic diagram of autoclave apparatus of O-Ring type sealing.

탄산화에 따른 무게 증가율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 비산재에 상대적으로 많이 함유되어있는 CaO의 양 때문인 것으로 사료되며, 슬래그의 치환율이 높아질수록 시편내 상대적 CaO의 양이 적어져 탄산화 인자가 적어짐에 의한 것으로 판단된다. 양생 일수에 따른 차이는 7일까지는 무게변화율에 크게 차이가 나지 않았으며, 알칼리활성화제 첨가 유무에 따라 대체적으로 증류수만 사용한 경우가 무게변화율이 더 높게 나타났다. 이는 FA 성분이 많은 시편들의 경우 알칼리 활성화제를 사용한 시편에서 지오폐리머 반응이 일부 일어나 증류수만을 사용한 시편보다 탄산화 반응이 덜 일어났기 때문으로 판단된다.

알칼리활성화제 사용 여부에 따른 시편을 3, 7일간 양생시킨 뒤 탄산화 전, 후의 중성화 여부 및 탄산화 깊이를 관찰하기 위하여 시편의 파단면에 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하여 Fig. 3에 나타내었다. 본 실험에서와

같이 비산재에 다량 포함되어 있는 CaO 성분이 수화반응을 통해 Ca(OH)<sub>2</sub>가 생성되어 이로 인해 시편이 알칼리성을 띄어 페놀프탈레인 용액을 분무하였을 경우 변색을 하게 된다. 탄산화 반응을 통해 이 Ca(OH)<sub>2</sub>가 CO<sub>2</sub>와 반응하여 CaCO<sub>3</sub> 상으로 합성하여[16], 중성화가 됨으로써 탄산화 반응이 일어난 부분에서는 변색이 일어나지 않게 된다. 그림 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 탄산화 반응을 거친 후에 상대적으로 색변화가 시편의 표면부터 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 슬래그의 치환율이 높아질수록 시편 내부까지 탄산화에 의한 중성화가 이루어진 것을 볼 수 있다. 이는 슬래그의 치환율이 높아질수록 시편의 강도와 비례하게 치밀도가 떨어져 CO<sub>2</sub>가 내부까지 침투가 용이해져 내부까지 중성화가 잘 된 것으로 사료된다. 3 M NaOH 알칼리 활성화제를 사용하였을 경우 증류수만 이용하여 경화시킨 시편에 비하여 색변화가 깊고 FA60 FWS40의 시편에서도 색변화가 나타났는데 이는 앞에서 예상하였듯이 알칼리 활성화제로 인한 지오폐리머 반응이 일부 일어났을 뿐만 아니라, 시편내 잔존 알칼리활성화제가 존재하여 시편의 알칼리성이 강하기 때문으로 사료된다. 비산재 성분이 많은 시편들에서 알칼리활성화제를 사용하지 않고 증류수 만을 사용한 시편의 탄산화 깊이가 깊게 나타난 것과 Fig. 2의 무게변화율 그래프와는 잘 일치하는 결과를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 물성평가에 관한 결과 및 고찰

알칼리 활성화제 사용 여부에 따른 효과를 관찰하기 위해, 시편을 3, 7일간 양생시켜 탄산화 전, 후의 압축강도를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수

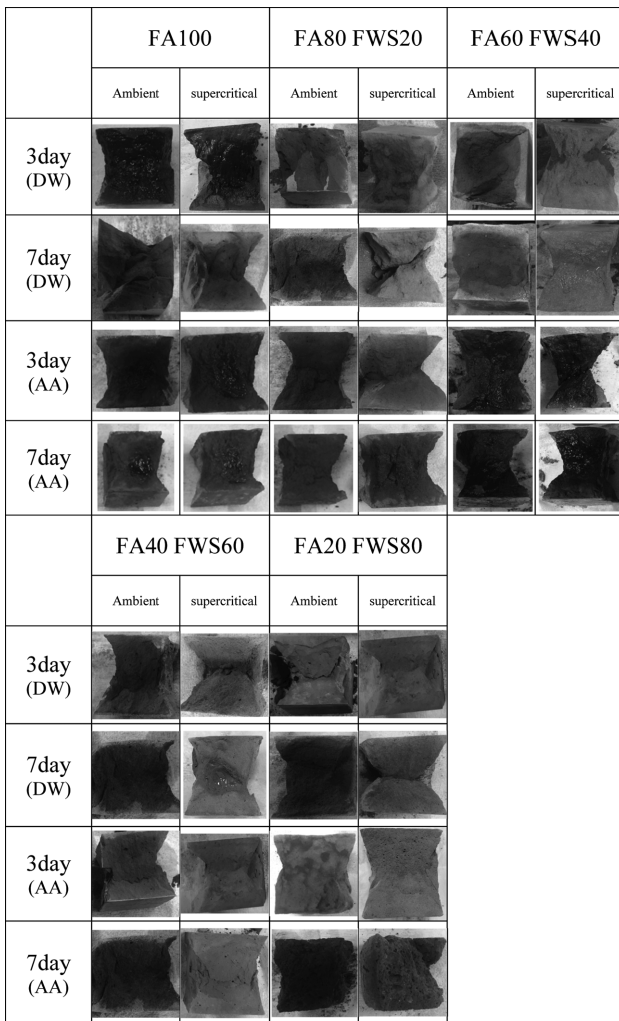


Fig. 3. Comparison in carbonation depths of the specimens before and after carbonation under supercritical condition (40°C, 80 kgf/cm<sup>2</sup> pressure, 60 min). Specimens were observed by spraying 1% phenolphthalein solution on the fracture surfaces.

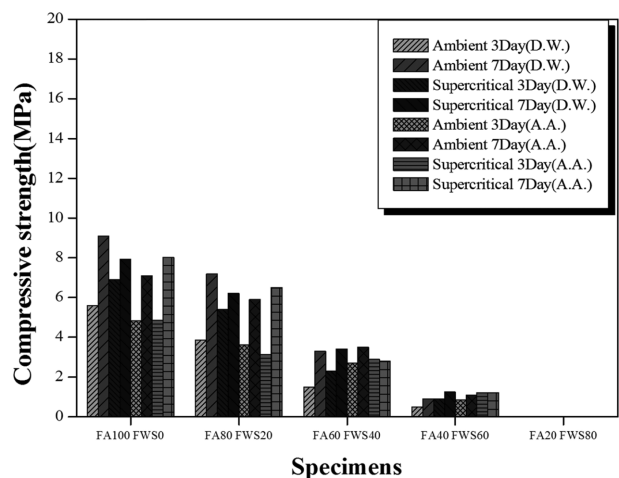


Fig. 4. Compressive strength of the specimens using alkali activator solution and distilled water before and after carbonation under supercritical condition (40°C, 80 kgf/cm<sup>2</sup> pressure, 60 min).

있듯이 슬래그를 치환량이 증가할수록 압축강도는 낮아지는 경향을 보였으며, FA20 FWS80부터는 강도가 발현되지 않았다. FA만 사용한 시편에서 강도가 가장 높게 나타났는데, 이는 본 실험에서 제작한 시편에서 CaO와 H<sub>2</sub>O의 수화반응으로 생성된 Ca(OH)<sub>2</sub>에 의한 포졸란 반응으로 경화된 것이 주요하였다고 사료되며, 폐기물 슬래그가 시편에서 경화반응에 긍정적인 효과를 미치지 못한 것으로 사료된다. 또한 포졸란 반응에 필요한 Si, Al, Ca 외에 Fe와 같은 원소들이 불순물로 작용하여 시편의 강도가 충분히 발현되지 않은 것으로 사료된다. 알칼리 활성화제의 첨가 유무에 따른 강도는 크게 차이를 보이지 않았으며, 이를 통해 본 실험에서 사용한 3 M NaOH 알칼리 활성화제는 본 실험에서 사용한 원료와 양생 분위기에서 경화반응에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 나타났으며, 알칼리 활성화제에 의한 효과는 더 높은 농도의 알칼리활성화제를 사용하거나 추가적인 활성화 에너지가 필요할 것으로 사료된다. 알칼리활성화제를 전혀 사용하지 않고 비산재 자체의 pH를 이용해 20 MPa까지 강도를 발현한 보고와 달리 본 실험에서는 최고 9 MPa까지 압축강도를 얻을 수 있었으며, 이는 사용하는 석탄회의 종류에 따른 자체 pH의 변화에 의한 영향으로 판단된다. 소량의 알칼리활성화제 첨가에 의한 강도증진을 기대하였으나, 이 역시 사용 석탄회의 종류에 따라 효과가 크게 달라질 것으로 예상된다.

탄산화 반응을 통하여 시편의 강도향상이 뚜렷하게 보이지 않았으나, 탄산화 반응을 거쳐 탄산화 반응 전과 비슷한 강도를 나타냄으로써 본 실험에서와 같이 다량의 CaO를 함유하고 있는 원료로 만든 경화체에 CO<sub>2</sub>를 저장시켜 물성에 부정적인 영향을 미치지 않으면서도 친환경적인 소재로 적용할 가능성이 있을 것으로 판단되며, 탄산화 반응에서 생성되는 H<sub>2</sub>O로 인하여[13] 추가 양생시 물성향상을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

온실가스의 주 요인인 CO<sub>2</sub>를 광물 탄산화 과정을 통해 산업부산물인 비산재와 폐기물 슬래그를 이용한 모르타르에 안정적으로 고정화시키기 위해 초임계 이산화탄소 조건에서 탄산화를 실시하였으며, 포졸란 반응을 통한 경화 외에 축중합 반응에 의한 경화를 유도하기 위해 소량의 알칼리 활성화제를 첨가하였다. 알칼리 활성화제 첨가 유무와 탄산화 반응의 유무에 따른 물성을 평가하기 위해 시편의 무게변화율, 페놀프탈레인 용액 분무에 따른 변색 여부, 압축강도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

초임계 이산화탄소 조건으로 광물탄산화를 실시하여

시편의 내부까지 탄산화를 유도 할 수 있었으며, 무게변화율과 단면에 페놀프탈레인 용액을 분무하여 변색여부를 통해 탄산화가 되었음을 확인할 수 있었다.

탄산화 전후의 무게변화율 비교를 통해 알칼리 활성화제를 사용하였을 경우 증류수 만으로 경화시킨 시편에 비하여 탄산화율이 떨어지는 경향을 보였으며, 탄산화인자인 CaO의 함량이 높았던 비산재만을 사용한 경우에서 무게변화율이 약 12% 증가하여 탄산화율이 가장 높은 것을 알 수 있었다.

페놀프탈레인 용액을 시편의 단면에 분무한 결과 시편이 치밀할수록 시편의 내부까지 CO<sub>2</sub>의 침투가 어려워 내부까지 완전히 탄산화가 되지 않은 것으로 보였다. 또한 비산재의 비율이 높을수록 시편에 상대적인 CaO의 양이 많아 탄산화가 완전히 이루어 지지 않은 것으로 사료된다. 페놀프탈레인에 의한 변색이 탄산화 후에도 나타났으며, 이를 해결하기 위하여 반복적인 탄산화 과정이 필요할 것으로 사료된다.

압축강도 측정결과 알칼리 활성화제 첨가 유무에 따라 압축강도는 크게 차이 나지 않은 것으로 보아 본 실험에서 사용된 원료와 조건에서 알칼리 활성화제가 경화반응에 크게 작용하지 않은 것으로 판단되며, 사용원료의 자체 pH가 시편의 압축강도를 좌우하는 매우 중요한 요인인 것으로 판단된다.

탄산화 유무에 따라 압축강도가 크게 차이 나지 않았으며, 이를 통해 향후 모르타르 탄산화 시 물성에 크게 영향을 주지 않는 친환경적인 소재로 적용 가능성이 있으며, 탄산화 반응에서 생성되는 물로 인해 추가 양생시 물성에 긍정적인 효과를 나타낼 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2015학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었습니다.

#### References

- [1] J.C. Lee, "A Basic Study for CO<sub>2</sub> Gas Curing Application to Cementitious Product", J. Architect. Ins. Kor. 30 (2014) 81.
- [2] H.J. Song, S.J. Han and J.H. Wee, "Mineral carbonation of high carbon dioxide composition gases using wollastonite-distilled water suspension", J. Kor. Soc. Environmental Engineers 36 (2014) 342.
- [3] W.J.J. Huijgen, G.J. Witkamp and R.N.J. Comans, "Mechanisms of aqueous wollastonite carbonation as a possible CO<sub>2</sub> sequestration process", Chem. Eng. Sci. 61 (2006) 4242.
- [4] K.U. Han, C.H. Lee and H.D. Chun, "Feasibility of

- mineral carbonation technology as CO<sub>2</sub> storage method considering the conditions of the domestic industry”, *Chem. Eng.* 49 (2011) 137.
- [ 5 ] H.S. Kim, S.C. Chae, J.H. Ahn and Y.N. Jang, “Technology trend: CO<sub>2</sub> storage technology by mineral carbonation”, *Mineral Ind.* 22 (2009) 71.
- [ 6 ] S.C. Chae, Y.N. Jang and K.W. Ryu, “Trend of mineral carbonation reaction to reduce CO<sub>2</sub>”, *J. Geol. Soc.* 45 (2009) 527.
- [ 7 ] S.H. Hong, B.D. Lee and S.H. Han, “Application of fly ash concrete in the pavement”, *J. Kor. Concrete Ins.* 20 (2008) 701.
- [ 8 ] Y.T. Kim, “Properties of carbonated green construction materials by changes in processing conditions”, *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 23 (2013) 152.
- [ 9 ] N.S. Ahn, J.H. Lee and Y.H. Lee, “Sulfate attack according to the quantity of composition of cement and mineral admixtures”, *J. Kor. Inst. Build. Const.* 11 (2011) 547.
- [10] K.H. Kim, J.Y. Lim, D.H. Ryu and S.W. Choi, “The present situation of production and its utilization of electronic arc furnace oxidizing slag in Korea and other countries,” *J. Kor. Conc. Inst.* 19 (2007) 51.
- [11] H.S. Kim, K.H. Han and W.H. Bae, “Method for stabilizing steel-making slag by adding iron-containing material with high T-Fe content”, Republic of Korea Patent, Patent No. 10-0538586 (2005).
- [12] H.S. Kim, K.H. Han and W.H. Bae, “Method for producing concrete using steel slag aggregate that quickly blocks expansion of steel slag aggregate by adding water glass”, Republic of Korea Patent, Patent No. 10-0592870 (2006).
- [13] Y.S. Kim and S.G. Kang, “Characterization of geopolymer made of municipal solid waste incineration ash slag”, *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 24 (2014) 15.
- [14] Y.T. Kim and K.W. Lee, “Mechanical properties of non-cement mortar without alkali activator using fly ash and fused waste slag under supercritical carbonation conditions”, *AFM 2015* (2015).
- [15] RILEM CPC 18. Measurement of hardened concrete carbonation depth, RILEM draft recommendation. *Mater. Struct.* 17 (1984) 435.
- [16] A.A. Ramezani pour, S.A. Ghahari and M. Esmaeili, “Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties”, *Construction and Building Materials* 58 (2014) 138.