

Properties of carbonated green construction materials by changes in processing conditions

Yootaek Kim[†]

Department of the Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

(Received May 27, 2013)

(Revised June 5, 2013)

(Accepted June 11, 2013)

Abstract The purpose of this study is to enhance the mechanical strength of specimens containing fly ash from fluidized bed type boiler, which the recycling rate will be eventually increased. Specimens containing fly ash in a certain portion were made and aged for 3, 14, and 28 days. Specimens were carbonated under the supercritical condition at 40°C. The carbonation process under the supercritical condition was performed to enhance the mechanical property of specimens by filling the voids and cracks existing inside cement specimen with CaCO₃ reactants. The additional aging effect after the supercritical carbonation process on mechanical strength of specimens was also investigated by comparing the compressive strength with and without 7 day extra aging. Under the supercritical condition and additional 7 day aging specimens were very effective for enhancement of mechanical strength and compressive strength increased by 44 %.

Key words Supercritical condition, Fly ash, Extra aging, Carbonation

공정조건 변화에 따른 탄산화 녹색건자재의 물성

김유탉[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 443-760

(2013년 5월 27일 접수)

(2013년 6월 5일 심사완료)

(2013년 6월 11일 게재확정)

요약 발전소에서 발생하는 산업부산물인 석탄재는 포집방법에 따라 크게 저회와 비산회로 구분되는데, 순환유동층 연소방식에서 발생하는 비산회는 탄산화 반응 인자인 Ca 성분을 다량 포함하고 있다. 탄산화 반응 인자가 풍부한 비산회를 시멘트에 일정량 치환하여 제조한 경화체를 초임계 이산화탄소(CO₂) 분위기조건에서 반응시켜 제작된 경화체의 기계적 물성향상을 도모하였다. 시멘트 대비 비산회 치환량을 10~40 %까지 10 % 단위로 4수준으로 하여 경화체를 제작하였으며 각각 3, 14, 28일 동안 양생하여 각 양생일 마다 탄산화를 진행하였으며 공정조건 변수로 탄산화 시 발생하는 수분과 미수화 반응물의 추가적인 포졸란 반응을 유도하기 위하여 탄산화 후 7일 동안 추가양생을 실시하였다. 공정조건의 변화를 변수로 둔 경화체의 무게변화율, TG/DTA 분석, 1 % 페놀프탈레인 알칼리성 측정을 통하여 탄산화 진행여부를 확인하였으며, 경화체의 압축강도 측정을 통해 기계적 물성향상을 분석하였다. 임계 탄산화 후 7일간 추가 양생시킨 녹색 건자재의 기계적 물성은 추가 양생하지 않은 시편과 비교해 44 % 향상되었다.

1. 서 론

화력발전소에서 발생하는 석탄재는 미분탄 연소방식과 순환유동층 연소방식에 따라 분류되며, 발전부산물인 석탄재는 포집 방법에 따라 크게 비산회(Fly Ash)와 저회

(Bottom Ash)로 구분된다[1]. 이 중 비산회는 연소되고 남은 가벼운 재를 집진기에 의하여 포집한 것으로 미분탄 연소방식의 비산회는 80 % 이상이 콘크리트 혼화재와 시멘트의 원료로 활발히 재활용되고 있다[2-4]. 하지만 순환 유동층 연소방식은 미국재료시험규격 C-type(ASTM C 618) 비산회로 높은 칼슘 함량 때문에 재활용 제품 제조 시 높은 팽창율을 나타내며 콘크리트 및 각종 시멘트 경화체에 대한 첨가제로 부적합하다고 발표되어 있다[5-7]. 또한 KS 규격(KS L 5405)에 부합하지 못하여 국

[†]Corresponding author
Tel: +82-70-4024-9765
Fax: +82-31-244-6300
E-mail: ytkim@kgu.ac.kr

Table 1
The elemental compositions of the fly ash (FA) expressed in oxide form

(wt%)

FA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₃	SO ₃	Ig. loss	Total
	21.94	8.53	6.05	45.4	6.06	0.06	0.48	0.5	0.08	4.26	6.65	100

내에서도 재활용되지 못하고 전량 매립되고 있는 실정으로 대처방안이 절실히 요구되고 있다[8].

순환유동층 방식에서 발생한 비산회에는 알칼리 토금속을 함유한 CaO와 MgO 화합물 성분이 다량 함유되어 있기 때문에 이산화탄소를 내부에 안정하게 고정시키는 탄산화 반응을 통하여 재활용이 가능할 것으로 판단된다. 비산회는 가격이 저렴하여 경제성이 좋고, 만약 성공적으로 탄산화 되어 건자재 및 콘크리트 혼화재로 재활용될 경우 콘크리트 경화체 조직의 치밀성, 시공성 개선, 장기강도 향상 등 많은 장점을 가지고 있다[9]. 또한 최근에 급격한 경제 규모의 성장과 산업화의 무분별한 진행으로 환경파괴, 지구 온난화, 자원고갈 등 다양한 문제점이 심각하게 대두되고 있다. 특히 온실가스의 82%를 차지하는 이산화탄소의 배출량 중 8%는 콘크리트 제조 분야에서 배출되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 폐자원의 활용을 통한 친환경 콘크리트 개발에 대한 연구가 이루어지고 있다[10]. 시멘트 경화체의 경우 기체 및 액체의 특성을 동시에 갖는 초임계 상태의 이산화탄소를 사용하여 경화체 내부의 수화반응을 통해 생성되는 Ca(OH)₂를 CaCO₃의 상으로 전환시키는 반응을 급속화시키며 내부에 생성된 미세한 기공을 반응생성물로 메우는 효과를 얻음으로 시멘트 경화체의 내침출성과 기계적 물성을 향상시키는 방안이 제시되었으며[11], 이에 따라 Ca(OH)₂ 성분을 이용하여 이산화탄소를 주입 및 반응시키는 화학실험을 바탕으로 폐콘크리트 미분말(주로 시멘트 수화물)에 이산화탄소를 안정적으로 저장하여 활용도를 높이는 방법과 경화체에 이산화탄소를 안정적으로 저장하는 방법이 연구되고 있다[12].

본 연구에서는 재활용방안이 필요한 순환유동층 방식의 비산회를 시멘트 경화체에 일정 수준별로 치환하여 3일, 14일, 28일간 상온 상압 하에서 양생하여 이산화탄소의 처리를 위한 탄산화 반응을 촉진시켰으며, 또한 탄산화 반응 시 생성된 수분으로 인한 미수화 반응물의 추가적인 포졸란 반응 및 수화 반응을 유도하기 위하여 각 경화체마다 탄산화 후 7일 동안 추가적인 양생을 실시한 후 추가 양생하지 않은 시편과 비교하였다. 높은 강도와 탄산화율을 가진 녹색건자재의 제조를 목적으로 실험을 하였으며 유동층 비산회에 포함된 free-CaO 성분으로 인한 골재의 성능저하를 방지하기 위해 초임계 조건에서 이산화탄소를 반응시켜 CaCO₃로 상전환시킴으로써 최종적인 건자재의 물성 향상을 도모하였다.

2. 실험방법

2.1. 사용 재료 및 배합 조건

본 실험에서 사용된 시멘트는 국내산 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 잔골재로는 입도 0.08~2 mm의 표준시를 사용하였다. 치환된 비산회 원료는 국내 Y 화력발전소에서 발생된 ASTM C Type 비산회(Fly Ash)로써 화학조성을 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)를 통해 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. 사용된 비산회의 주 성분으로는 SiO₂와 CaO로 각각 21.94%와 45.40%로 구성되어 있다. 비산회 내에 CaO 성분의 함유량이 많은 것은 로 내 탈황을 위하여 석회석을 첨가하였기 때문이며 SO₃ 성분의 함유량은 4.26 wt%이므로 CaSO₄로 환산할 때 탈황작용에 사용된 CaO의 양은 약 2.88 wt%로, 약 43 wt%의 free-CaO 화합물이 존재할 것으로 사료된다.

본 실험의 배합조건은 Table 2에 나타내었으며, 실험 변수로는 시멘트에 대한 비산회의 치환율을 10%에서 40%까지 10%씩 변화시켜 4수준으로 하였으며 3, 14, 28일간 양생 후 탄산화 반응 후 물성과 탄산화 반응 후 7일간 추가양생을 시킨 시편의 물성을 비교하였다.

2.2. 실험 방법

본 실험의 실험 방법으로는 배합된 원료를 모르타르 압축강도 측정용 큐브몰드(50×50×50 mm³)에 채워 넣고 다짐봉으로 수십 회 상부 충격을 가하여 원료 내 기포를 제거하였다. 제작된 시험체를 상온에서 24시간 양생 후 몰드에서 탈형하여 3, 14, 28일간 상온, 상압 양생

Table 2
Mixture proportions of mortars

Specimen	C : FA	Addition	age	timeS/(C+FA)	(wt%)	W/B	(wt%)
C9F1-1							
C9F1-2	9 : 1						
C8F2-1							
C8F2-2	8 : 2						
C7F3-1						20	34
C7F3-2	7 : 3						
C6F4-1							
C6F4-2	6 : 4						

FA: fly ash, S: standard sand, C: cement, W/B: water/binder.

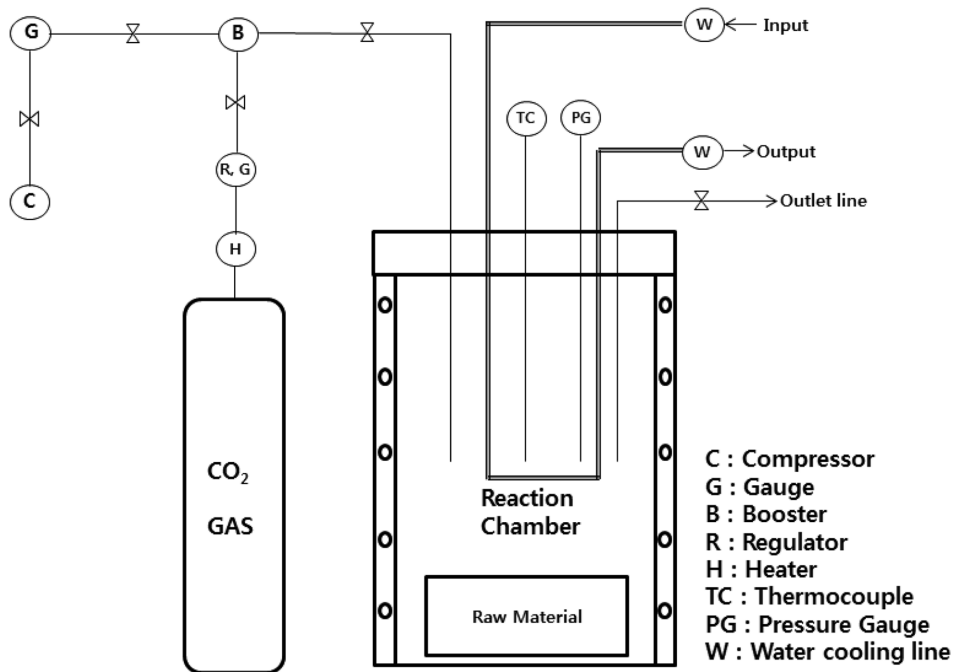


Fig. 1. Schematic diagram of the autoclave apparatus.

후 물성을 측정하였으며 각 재령일수에 Autoclave 장비를 이용하여 초임계 이산화탄소 분위기 조건인 80 kgf/cm²의 압력과 40°C의 온도에서 Supercritical 탄산화를 시험체 별로 60분씩 반응시켜 초임계 탄산화에 따른 물성을 측정하였다. 또한 반응 시 생성된 수분으로 인한 미수화 반응물의 추가적인 포졸란 반응 및 수화반응을 발생시키기 위해 탄산화 후 7일간 추가양생(3+7일, 14+7일, 28+7일)을 실시하고 이에 따른 물성을 측정하여 비교하였다. 실험에 사용된 탄산화 반응기인 Autoclave는 O-Ring Type의 Sealing이며 도식도는 Fig. 1에 나타내었고, 반응기 내부에 압력 센서와 열전대를 포함하여 실시간으로 온도와 압력의 변화를 측정할 수 있으며 Booster 설비를 통해 80 kgf/cm²의 압력을 유지할 수 있다. 탄산화에 대한 측정으로는 시편의 탄산화 전, 후의 무게변화율을 측정하여 반응생성물의 여부를 판단하였고 압축강도를 통해 물성향상을 판단하였다. 또한 1% 페놀프탈레인을 파단면에 분무하여 탄산화 반응 여부를 확인하였으며 TG/DTA 분석을 통하여 탄산화를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 탄산화 유무 판단에 관한 고찰

비산회의 치환율과 탄산화 후 추가양생에 대한 시멘트 모르타르 경화체의 물성 향상 여부를 확인하기 위하여 초임계 이산화탄소 분위기 조건에서의 가속탄산화 반응

을 시행하고 물성을 측정하였다. Table 2에 나타내었듯이 비산회의 치환율을 시멘트 대비 10~40%까지 4수준으로 배합하여 제작하였으며 상온, 상압 하에서 양생 후 각 재령일 마다 경화체를 초임계 이산화 탄소 조건인 80 kgf/cm²의 압력과 40°C의 온도 하에서 초임계 탄산화 반응을 진행하였으며 또한 탄산화 반응 시 발생한 수분이 미처 반응하지 못한 미수화 반응물의 추가적인 포졸란 반응 및 수화 반응을 유도하기 위해 7일 동안 추가적으로 양생을 진행하였다. 탄산화 시 반응생성물의 생성 유무를 판단하기 위하여 탄산화 전 시편의 무게와 탄

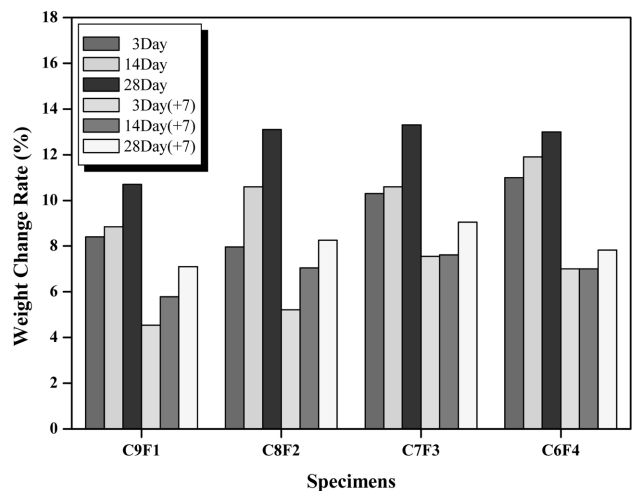
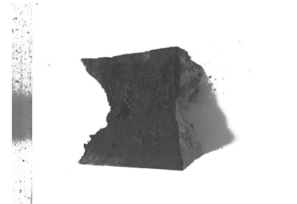
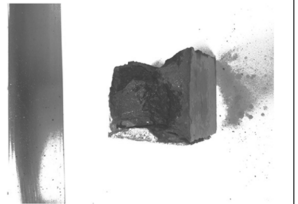
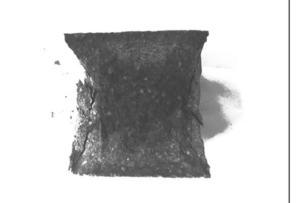
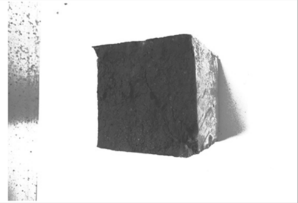
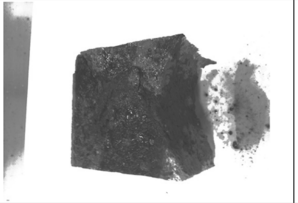
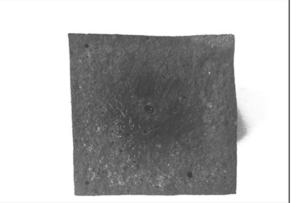
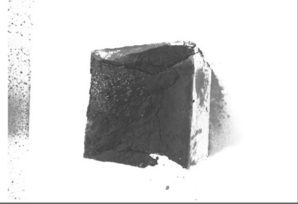
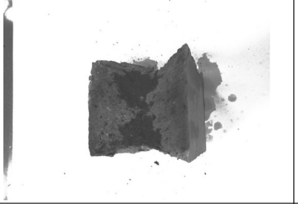
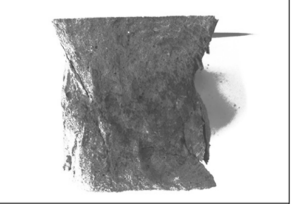
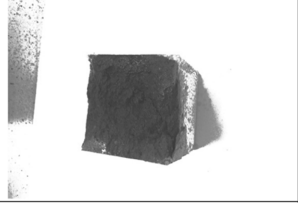
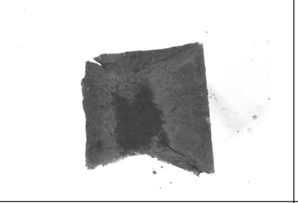
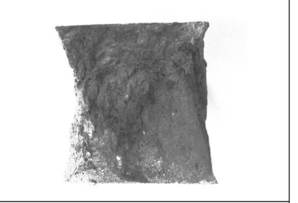


Fig. 2. Weight change of fly ash substituted mortars after carbonation under the supercritical condition (80 kgf/cm² and 40°C-60 min) and addition aging time mortars after carbonation.

산화 후 시편의 무게를 측정하여 무게변화율을 측정하였으며 사용된 분위기 조건 및 무게변화율을 Fig. 2에 나타내었다. 무게변화율은 각각 치환율에 상관없이 28일 재령일에서 가장 높은 변화율을 나타내고 있으며, 7일 동안의 추가양생을 진행시킨 시편의 경우 추가양생하지 않은 시편보다 낮은 변화율 값을 나타내었다. 무게변화율이 증진됨에 따라 탄산화에 의한 반응생성물인 CaCO_3 의 상이 생성됨을 예측할 수 있으며 비산화 및 시멘트의 탄산화 반응 인자인 수화 반응에 의한 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 성분이 재령일수가 길어질수록 생성되는 양이 많아져 초임계 탄산화 반응 시 높은 무게변화율을 나타내었으며 비산화 치환율이 증가할수록 원료 내에 반응에 참여하지 않는 free-CaO의 함량이 높아져 높은 탄산화 무게변화율을 나타내는 것으로 사료된다. 추가 양생시킨 시편의 무게변화율이 상대적으로 낮은 값을 나타내는 것은 탄산화 반

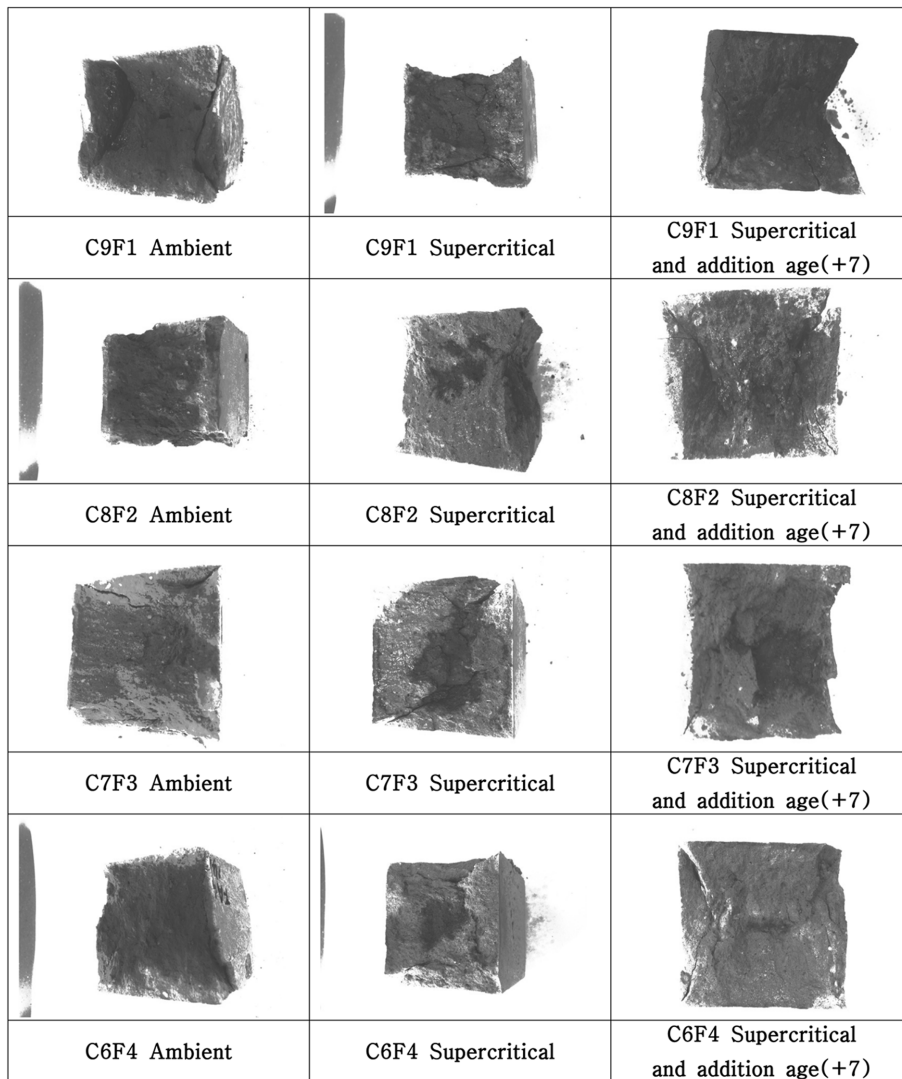
응 시 발생된 수분의 증발 또는 반응으로 인해 무게감소가 나타난 것으로 사료된다.

비산화 치환율과 추가양생일수에 따른 초임계 이산화탄소 분위기조건에서의 탄산화 유무를 판단하기 위하여 시편 파단면에 1% 페놀프탈레인 용액을 분무하고 알칼리성에 의한 변색을 통하여 탄산화 유무를 판단하였으며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 탄산화를 진행시키지 않은 시편인 Ambient 시편들의 경우, 모두 높은 알칼리성을 띄고 있기 때문에 진한 적색의 변화를 나타내고 있으며 탄산화 반응을 진행시킨 시편의 경우 추가양생에 관계없이 대체적으로 적색으로 변색된 부분이 적어지는 것을 확인하였으며 또한 비산화의 치환량이 증가할수록 변색 부분은 더욱 감소하는 것으로 나타났다. 이는 비산화 치환량이 증가할수록 비산화 내 free-CaO가 이산화탄소와 반응하여 변색부분이 감소한 것으로 판단되며 재령일에

		
C9F1 Ambient	C9F1 Supercritical	C9F1 Supercritical and addition age(+7)
		
C8F2 Ambient	C8F2 Supercritical	C8F2 Supercritical and addition age(+7)
		
C7F3 Ambient	C7F3 Supercritical	C7F3 Supercritical and addition age(+7)
		
C6F4 Ambient	C6F4 Supercritical	C6F4 Supercritical and addition age(+7)

(a) 3 Day

Fig. 3. Carbonation depth of fly ash substituted mortars after carbonation under the supercritical and addition aging mortars after carbonation.



(b) 14 Day

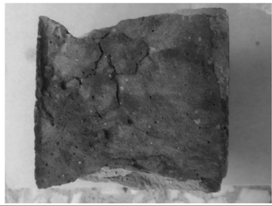
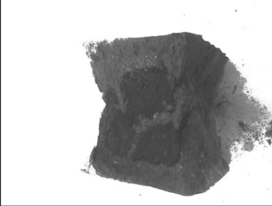
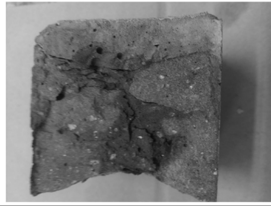
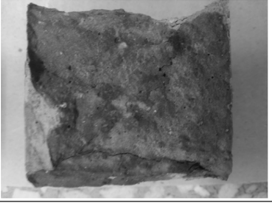
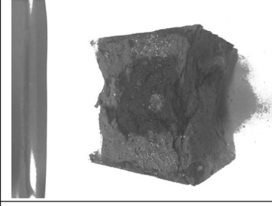
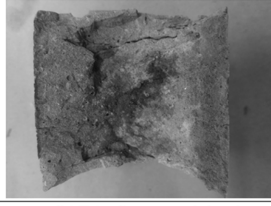
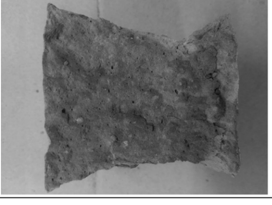
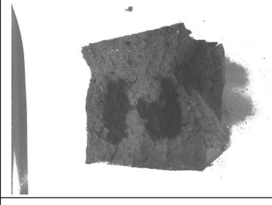
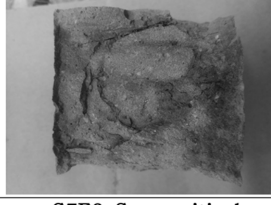
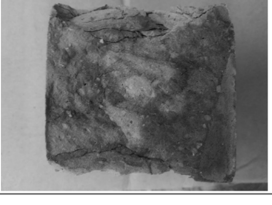
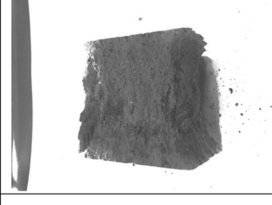
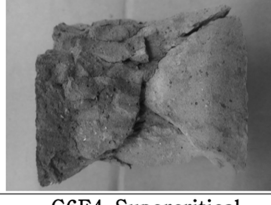
Fig. 3. Continued.

상관없이 C6F4의 시편에서 가장 높은 탄산화 반응이 발생한 것으로 사료된다.

3.2. 압축강도

탄산화 반응 및 추가양생에 의한 기계적 물성향상을 확인하기 위해 압축강도를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 일반적으로 Ca 성분이 다량 함유되어 있는 비산회를 시멘트에 혼화재 또는 첨가제로 사용할 경우 CaO 팽창에 의한 압축강도 저하가 발생하는 것으로 알려져 있으며 본 실험에서도 비산회의 치환량이 증가할수록 대체적으로 압축강도가 저하되어 나타났다. 초임계 이산화탄소 분위기 조건에서 탄산화 반응시킨 시편의 경우 C9F1 시편의 28일차 강도 값과 반응 전 시편과 비교했을 때 대략 30 % 정도의 강도증진 효과를 나타내었다. 이것은

시편을 양생하면서 생성되는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 상 또는 CSH 겔 등의 상에서 초임계 탄산화 반응을 통하여 CaCO_3 상을 형성하면서 이 반응생성물이 시험체 내부의 미세한 기공을 메우는 효과를 얻음으로 시편 자체의 압축강도가 향상된 것으로 판단된다. 또한 초임계 탄산화 후 7일 동안 상온 상압하에서 추가 양생한 시편의 경우 같은 C9F1 시편의 28일차 강도는 88 MPa로 추가 양생하지 않고 초임계탄산화만 진행시킨 시편보다 약 70 % 정도 증진된 높은 강도를 나타냈다. 초임계 반응을 시키지 않은 상온 상압(ambient) 조건에서 양생시킨 시편과 비교해서는 120 %의 강도 증진을 가져왔다. 이는 초임계 탄산화 반응 시 생성된 수분의 반응과 미수화 반응물의 추가적 포졸란 및 수화 반응으로 인해 강도증진의 효과를 가져온 것으로 사료된다. 대체적으로 모든 시편이 초임계 탄산화 반응 후 추가양생을 진행시켰을 때가 가장 높은 강도

		
C9F1 Ambient	C9F1 Supercritical	C9F1 Supercritical and addition age(+7)
		
C8F2 Ambient	C8F2 Supercritical	C8F2 Supercritical and addition age(+7)
		
C7F3 Ambient	C7F3 Supercritical	C7F3 Supercritical and addition age(+7)
		
C6F4 Ambient	C6F4 Supercritical	C6F4 Supercritical and addition age(+7)

(c) 28 Day

Fig. 3. Continued

값을 나타내며 비산화 치환량이 적을수록 일반적인 강도는 가장 나타났다.

3.3. TG/DTA 분석

초임계 탄산화 후 강도 증진의 효과를 가져온 것으로 판단되어 이산화탄소의 고정효율을 확인하기 위해 각 조성의 28일차 및 28(+7)일차 시편의 TG/DTA 분석을 시행하여 Fig. 5에 나타내었다. (a)부터 (d)까지의 데이터는 초임계 탄산화 후 7일 동안 추가양생을 진행한 시편의 분석이며 (e)부터 (h)까지는 초임계 탄산화 후 추가양생을 진행하지 않은 시편의 분석결과이다. 모든 그래프 상에서 이산화탄소의 가스화 구간인 약 700~800°C 부근에서 흡열반응 피크가 발생하며 무게감소가 나타났는데 이는 추가양생에 관계없이 모든 초임계 탄산화 반응을

진행시킨 후 탄산화가 이루어진 것으로 사료된다. 1% 페놀프탈레인 분석과 비교하여 확인하면 비산화 치환량이 증가할수록 탄산화 반응에 의한 중성화가 진행되어 변색 부분이 감소하는 것으로 나타났다. 이것을 바탕으로 TG/DTA 분석 결과에서 확인해보면 비산화 치환량이 증가할수록 이산화탄소 증발량이 추가양생한 시편의 경우 4.17, 6.5, 8.6, 11.12%로 증가하며 추가양생하지 않은 시편의 경우는 8.03, 8.81, 8.91, 9.215로 증가하는 것으로 나타나는데 이는 탄산화에 의한 이산화탄소 고정량이 증가하여 1% 페놀프탈레인 시험 결과와 같은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 비산화 치환량에 따라 이산화탄소 탄산화율이 증가하는 것은 비산화가 증가될수록 시편 내부의 탄산화 반응 인자인 free-CaO 양이 증진되어 높은 탄산화율을 나타낸 것으로 사료된다. 또한 탄산화 후 7일간 추가양생한 시편 중 시멘트량이 많아지

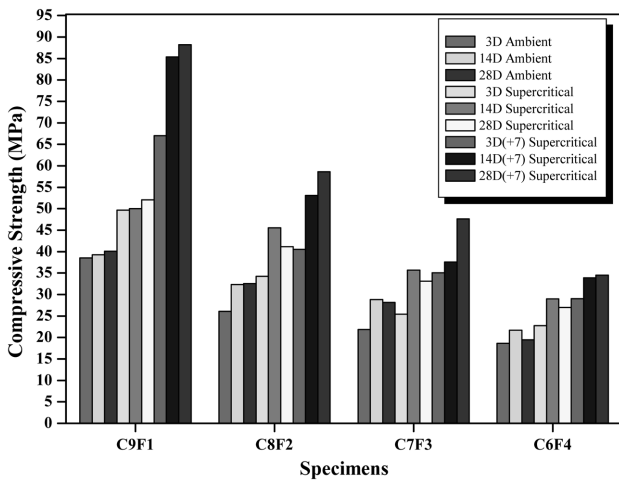


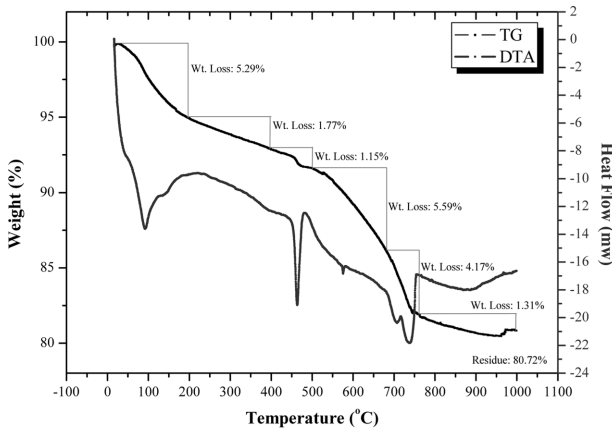
Fig. 4. Compressive strength of fly ash substituted mortars before and after the carbonation and after the carbonation. Where, 3DAmbient in the inlet means 3 days curing under the ambient condition and 3DSupercritical, 3 days curing under the ambient condition and then carbonated under the supercritical condition (80 kgf/cm² and 40°C-60 min) and 3D(+7) Supercritical, 3 days curing under the ambient condition and then 7 days addition aging time after carbonated under the supercritical condition. The remaining notations can be identified as same way as above.

는 경우 약 400~500°C 부근에 흡열피크가 강하게 나타나는 것이 확인되었는데 이는 추가양생에 의해 미수화 반응물이 탄산화 반응에 의해 생성된 수분의 도움으로 추가적인 포졸란 및 수화반응을 발생시켜 결정수를 생성하게 된 것으로 판단된다. Fig. 5a 및 5b에서 보는바와 같이 결정수 가스화 구간은 약 400~500°C 부근으로 C9F1과 C8F2 시편에서 다른 시편에서는 관찰되지 않는 강한 흡열 반응을 보여주고 있으며, 이는 추가적인 포졸란 반응으로부터 비롯된 것으로 사료된다.

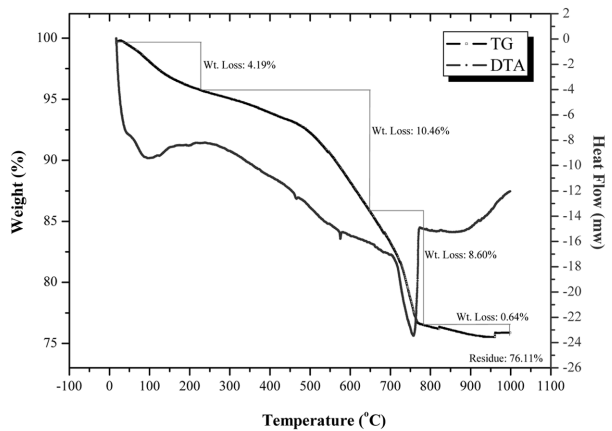
진행된 실험과 분석을 토대로 비산회를 시멘트 대비 일정량 치환 시킨 후 공정조건을 변화시켜 탄산화를 진행하면 이산화탄소의 처리와 폐자원의 재활용화라는 녹색건축재의 제조가 가능하며 물성 또한 증진된다는 것을 확인하였다.

4. 결 론

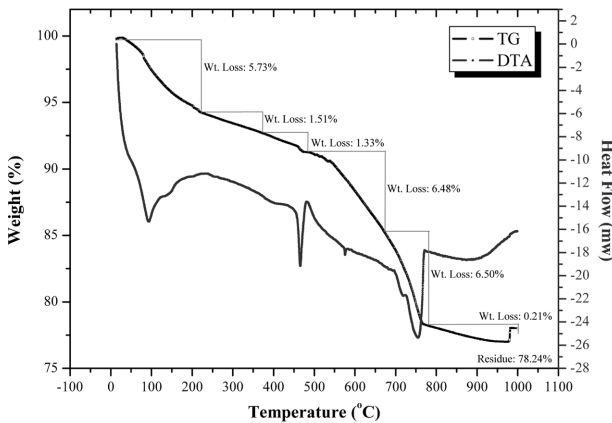
탄산화 녹색건축재의 물성을 증진시키기 위하여 폐자원인 C-Type 비산회를 시멘트 대비 일정량 치환하여 초



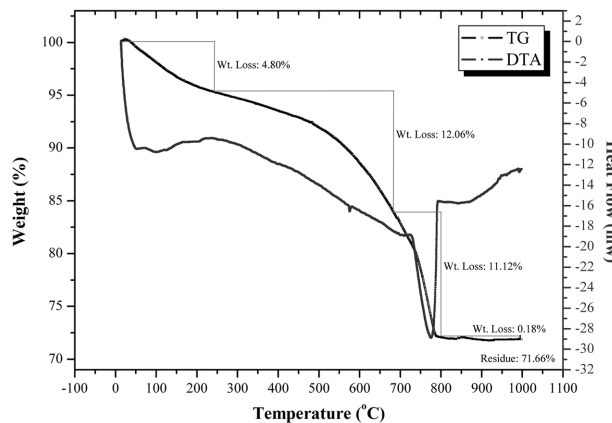
(a) C9F1 - add aging 7 days



(c) C7F3 - add aging 7 days



(b) C8F2 - add aging 7 days



(d) C6F4 - add aging 7 days

Fig. 5. TG/DTA analysis of fly ash substituted mortars after the carbonation for 28 days and addition aging time after carbonation for 28 days.

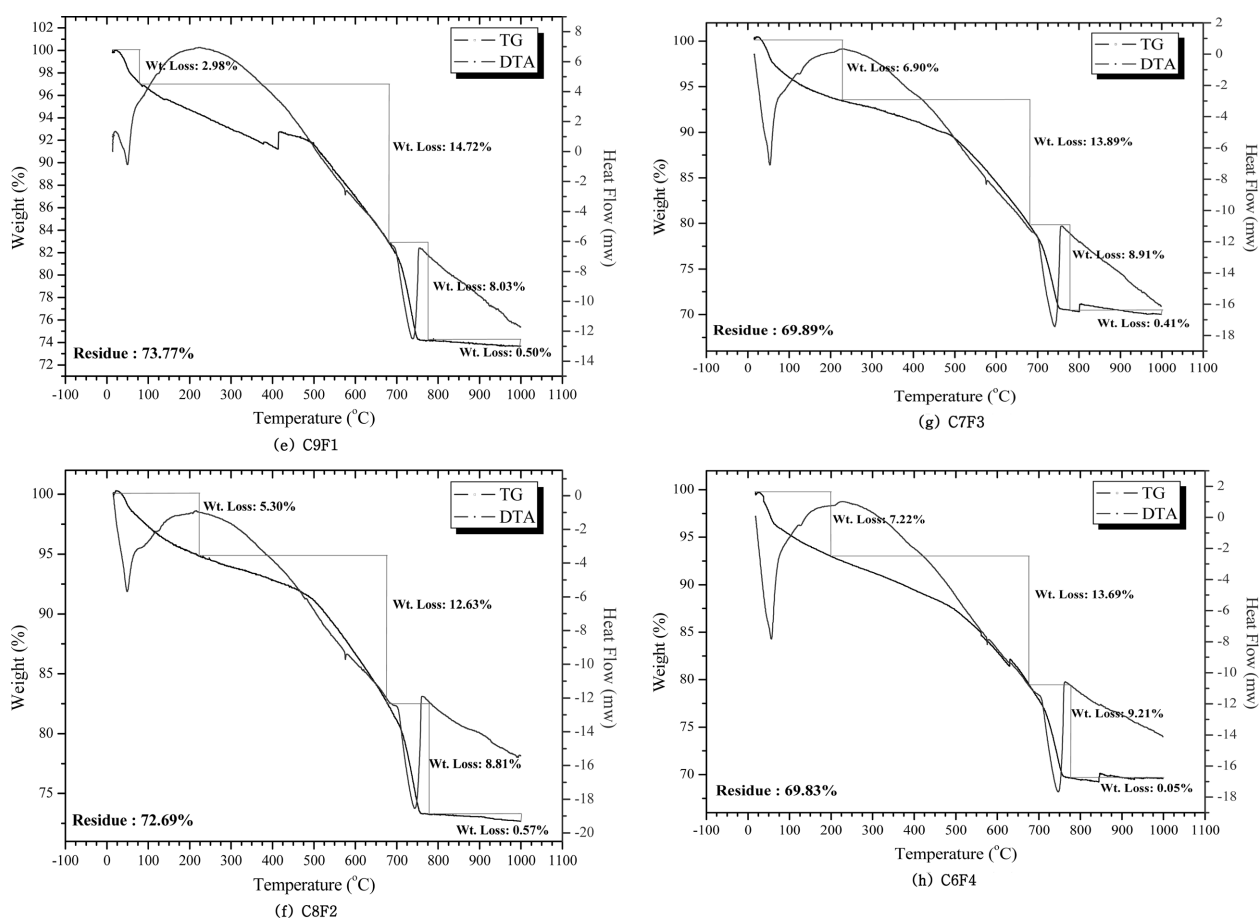


Fig. 5. Continued.

임계 탄산화를 진행시킨 후 추가양생까지 실시하여 탄산화 유무 검토, 압축강도 및 TG/DTA 분석을 측정하여 시편의 물성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 탄산화 유무 시험결과로 시멘트 경화체에 비산회를 일정량 치환하면 초임계 탄산화 반응을 진행하였을 때 이산화탄소 고정율이 증가하는 것을 확인하였으며 또한 재형일이 증가할수록 내부의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 와 같은 수화물 상태의 양이 증가하여 높은 탄산화율을 얻을 수 있다. 또한 압축강도 시험결과 초임계 탄산화 반응을 진행하지 않은 시편보다 높은 압축강도 값을 나타낼 수 있다.

2) 초임계 탄산화 반응 후 7일동안 추가양생을 진행시켰을 때, 탄산화 반응시 생성된 외부 및 내부 수분의 반응 또는 증발로 인해 무게변화율은 추가양생하지 않은 시편보다 감소하였지만 기계적 물성인 압축강도면에서 월등히 높은 강도 값을 나타내는 것으로 판단된다.

3) 시차열분석 시험 결과 비산회의 치환량이 증가될수록 내부의 free-CaO 함유량이 증가하여 고정화된 이산화탄소가 증가되며 TG/DTA 분석 결과 C6F4 시편의 경우 약 9~11% 정도 이산화탄소가 고정된 것을 확인하였다. 또한 추가양생에 따라 높은 강도값을 나타내는 것으로 확인되었는데 이것은 TG/DTA 분석에서 약 400~500°C

부근에서 흡열 반응이 발생한 것으로 보아 초임계 탄산화 반응 시 생성된 수분의 도움으로 미수화 반응물의 추가적인 포졸란 및 수화 반응이 발생된 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었습니다.

참고 문헌

[1] K.G. Lee, "Bloating mechanism of artificial lightweight aggregate with reject ash", J. Kor. Cryst. Growth and Cryst. Tech. 22[3] (2012) 158.
 [2] B.S. Chun and Y.H. Yeoh, "A study on the recycling of coal ash as structural backfill materials", J. Kor. Ocean Eng. Soi. 14[1] (2000) 74.
 [3] S.J. Choi and M.H. Kim, "A study on the durabilities of high volume coal ash concrete by the kinds of coal ash", J. Kor. Build. Const. Ins. 9[3] (2009) 73.
 [4] Y.W. Yoon, K.S. Chae and K.H. Song, "Evaluation of

- static and dynamic characteristic of coal ashes”, J. Kor. Geo-Environ, Soc. 10[3] (2009) 5.
- [5] 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. Building Construction Ins. 11[6] (2011) 547.
- [6] J.Y. Park, Y.T. Kim and H.J. Kim, “Carbonation of coal fly ash for construction materials”, J. Kor. Cryst. Growth and Cryst. Tech. 22[3] (2012) 147.
- [7] S.H. Hong, B.D. Lee and S.H. Han, “Application of fly ash concrete in the pavement”, J. Kor. Concrete Ins. 20[1] (2008) 701.
- [8] J.S. Sim, K.G. Lee, Y.T. Kim and S.K. Kang, “Hydration characteristics of coal-fly ash containing high CaO compound”, J. Kor. Ceramic Soc. 49[2] (2012) 185.
- [9] W.S. Kim, T.K. Kang, M.S. Paik, S.S. Kim and S.J. Jung, “The experimental study on carbonation properties of high volume fly-ash concrete”, J. Kor. Architectural Ins. 23[1] (2003) 207.
- [10] S.H. Han and M.J. Yong, “The future of concrete admixture industry for low carbon, green growth”, Magazine of Concrete Research 21[4] (2009) 41-43.
- [11] I.T. Kim, H.Y. Kim, G.I. Park, J.H. Yoo and J.H. Kim, “Effect of carbonation reaction of portlandite with supercritical carbon dioxide on the characteristics of cement matrix”, Applied Chemistry 5[1] (2001) 60.
- [12] H.S. Ahn, J.S. Kim and H.S. Lee, “A study on fixed amount of CO₂ and the estimation of production of CaCO₃ on waste concrete powder by wet carbonation”, J. Kor. Architectural Ins. 27[7] (2011) 133.