

Property enhancement of geopolymer by means of separation/classification of spent-resources

Yooteak Kim, Hyunjung Kim[†] and Changsub Jang

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

(Received September 18, 2012)

(Revised October 5, 2012)

(Accepted October 19, 2012)

Abstract Geopolymer was made using magnetic separation fly ash with NaOH(Sodium Hydroxide) and the water glass as alkali activators in this study. Compressive strength of geopolymers ceramics was measured and analyzed according to the type of materials. Under the conditions of fly ash without magnetic separation and 28 day curing after molding, the compressive strength of the geopolymer reached up to 28 MPa.

Key words Geopolymer, Fly ash, Blast furnace slag, Fe₂O₃, Alkali activator, Water glass, Sodium hydroxide, Compressive strength

폐자원의 분류/선별을 통한 지오폐리머 특성 개선 연구

김유택, 김현정[†], 장창섭

경기대학교 일반대학원 신소재공학과, 수원, 443-760

(2012년 9월 18일 접수)

(2012년 10월 5일 심사완료)

(2012년 10월 19일 게재확정)

요약 본 연구에서는 비산회를 자력선별한 후 알칼리 활성화제인 수산화나트륨과 물유리를 사용하여 지오폐리머를 제조하였다. 자력 선별전의 원료, 자력 선별된 두 가지 종류의 자력 및 비자력 원료를 사용한 지오폐리머 시편에 대한 압축 강도를 측정하여 비교하였다. 비자력 비산회 원료를 사용한 지오폐리머 시편에서 가장 좋은 압축강도가 나올 것으로 예상하였으나, 실제로는 자력선별하지 않은 원재료 비산회와 고로슬래그를 사용한 경우에 재령 28일차 압축강도가 27.54 MPa로 가장 우수하였다. 이 결과에서, 자력선별 후 CaO 성분 농축으로 수화반응 증진에 의한 강도발현 증진 효과 보다는 자력 선별에 의해 지오폐리머 형성반응에 필요한 실리카와 알루미늄 성분은 오히려 줄어들어 지오폐리머 축합반응이 감소하여 오히려 압축강도 측면에서는 물성 개선효과가 없는 것으로 판명되었다.

1. 서론

포틀랜드 시멘트(Portland cement)는 고온(1450°C)상태에서 용융시켜야만 생산할 수 있기에 대량의 에너지를 소비할 뿐만 아니라 시멘트 1톤 생산 시 1.25톤의 이산화탄소를 배출하고 있다. 시멘트 산업에서 이산화탄소 배출량은 전 세계 온실가스 배출량의 7%를 차지할 정도로 크기 때문에 국내에서도 시멘트 생산과정에서 배출되는 이산화탄소를 저감하는 대책이 강구되고 있다[1].

이에 많은 연구자들이 친환경을 지향하는 미래 산업 환경의 변화를 고려하여 이산화탄소의 배출을 줄이기 위한 노력과 시멘트를 대체할 수 있는 새로운 재료의 개발에 많은 관심을 기울이고 있으며, 최근 몇 년에 걸쳐 친환경적인 콘크리트에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[2, 3]. 이러한 노력과 함께 시멘트를 전혀 사용하지 않는 친환경 지오폐리머에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있는데 그 중 1978년 Davidovits가 지오폐리머(geopolymer)라고 명명[4]한 것이 여러 가지 형태로 잘 연구되어지고 있다[5-9]. 지오폐리머는 알루미늄 규산염(aluminosilicate)의 조성을 갖는 물질이 알칼리물질과 반응하여 수경성을 나타내는 것을 이용하는 것으로서, 현재는 시멘트를 대체할 수 있는 재료로 부상하고 있다. 성분상으로는 비정

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

질이며 합성방법이 열경화성 수지와 비슷하여 지오폴리머(geopolymer)라고 불리운다. 지오폴리머를 제조하기 위해서는 반응물질과 활성화제(activator)가 요구된다. 초기 연구에서 반응물질로 사용된 것은 비표면적이 넓은 점토, 주로 메타카올린(Meta-kaolin)이었으나 이후 비산회(fly ash), 고로슬래그(blast furnace slag), 연탄재 등으로 활용 폭이 넓어졌다[10]. 비산회는 화력발전소에서 전기를 생산하는 과정에서 얻어지는 산업부산물이다. 현재 폐기물로 지정되어 있으며, 대부분 매립 처리되고 있어 재활용을 위한 연구가 아직 초기단계에 머물러 자원화 되지 못하고 있는 실정이다[11]. 또한, 최근에는 이러한 환경문제로 인하여 시멘트를 전혀 사용하지 않는 시멘트 ZERO 콘크리트 개발에 관한 연구가 주목을 받고 있다. 지오폴리머 시멘트 제조에 사용되는 고로슬래그 미분말은 연간 약 800만 톤 이상으로 2000년대 초까지도 재활용이 낮아 상당한 양의 재고가 쌓여 있었으나, 최근 보통 포틀랜드 시멘트 생산 시 증량제, 혼합시멘트 및 레미콘 혼화재 등으로 사용량이 급증함에 따라 재활용율이 100%에 근접하게 되었다. 그러나 2010년부터 제철소가 추가로 가동되면서 향후 고로슬래그 미분말의 발생 양은 계속 증가 할 것으로 판단되므로 이에 대한 대책이 필요하다. 그에 따라 비산회, 고로슬래그 등 산업 부산물을 이용한 알칼리 활성화 모르타르(mortar)에 대해 국내외적으로 다양한 연구가 진행되어 일부 실용화가 이루어지고 있으나, 아직까지 해명되지 않은 부분이 많다.

따라서 본 연구에서는 비산회와 고로슬래그를 주원료

로 사용하여 포틀랜드 시멘트의 대체소재로서 지오폴리머 세라믹의 활용 가능성을 알아보고자 하였으며 자력선별 유무에 따른 비산회의 종류가 지오폴리머 세라믹 제조 시 미세조직 변화 및 압축강도에 미치는 영향에 대하여 연구하여 지오폴리머 연구의 기초자료 및 향후 연구 방향을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 사용재료

2.1.1. 석탄회 및 고로슬래그

석탄 화력발전소에서 석탄을 연소하고 발생하는 석탄회를 크게 비산회(fly ash)와 저회(bottom ash)로 구분하고 비산회는 석탄이 보일러에서 연소된 후 전기집진기에 포집되는 분말상태의 석탄회를 말한다. 고로슬래그는 용광로에서 철을 생산할 때 생기는 부산물이다. 본 연구에서 사용한 비산회와 고로슬래그는 각각 삼척화력발전소와 포항제철소에서 발생된 것을 사용하였으며 비산회를 자력선별하여 분류 전 비산회(RFA: raw fly ash), 자력비산회(MFA: magnetic fly ash), 비자력비산회(NMFA: non-magnetic fly ash)의 세 가지 종류의 비산회를 사용하여 실험을 진행하였다. 기초 물성을 분석하기 위해서 XRF와 XRD 분석을 시행하였다. 실험에서 사용한 각 원료의 화학조성은 Table 1과 같다. Table 1에 나타난

Table 1
Chemical compositions of fly ash and blast furnace slag

	Chemical compositions (wt%)											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	C	Ig. loss
RFA ¹⁾	37.68	10.85	11.56	16.81	3.89	0.28	0.98	0.51	0.23	0.2	10.47	3.09
MFA ²⁾	37.58	9.96	11.55	15.33	4.4	0.24	0.89	0.5	0.17	0.21	9.75	8.99
NMFA ³⁾	20.93	4.34	2.93	32.59	2.52	0.14	0.47	0.24	0.08	0.07	16.48	18.11
BS ⁴⁾	37.33	12.49	0.26	43.13	5.31	0.16	0.35	0.41	0.02	0.3	-	0

¹⁾RFA: raw fly ash, ²⁾MFA: magnetic fly ash, ³⁾NMFA: non-magnetic fly ash, ⁴⁾BS: blast furnace slag.

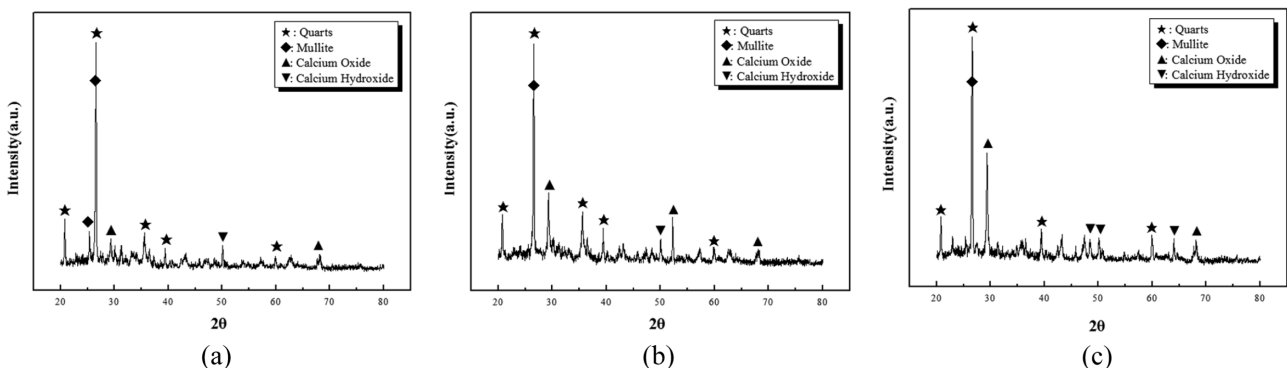


Fig. 1. XRD patterns of fly ash. (a) raw fly ash (RFA), (b) magnetic fly ash (MFA), and (c) non-magnetic fly ash (NMFA).

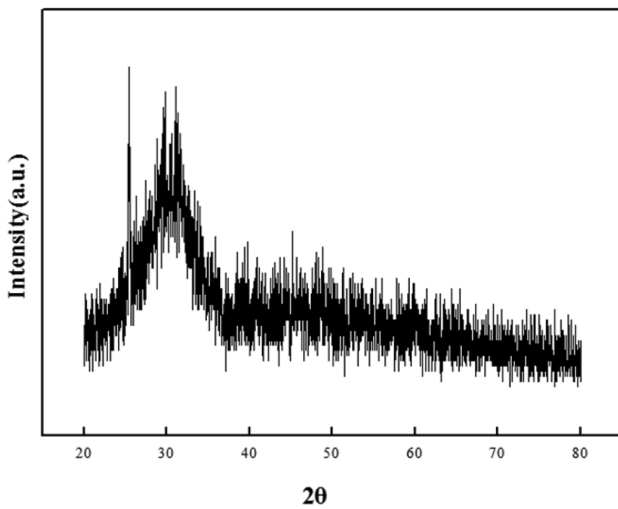


Fig. 2. XRD pattern of blast furnace slag.

바와 같이 비산회를 10000 Gauss 자석으로 선별한 후에 자석에 붙은 MFA 시료의 경우 CaO 함량이 RFA보다 약간 적은 15.33 wt%였고 자석에 붙지 않은 비자성 시료인 NMFA의 CaO의 함량은 MFA와 비교할 때 2배 이상 자력선별에 의해 농축된 32.59 wt%였다. 이 성분이 지오폐리머 제조과정에서 시멘트 수화반응에 의해 경화기구로 작용하여 지오폐리머의 강도 향상에 영향을 미칠 것으로 판단하였다. 고로슬래그 미분말은 실리카와 알루미늄의 함유량이 약 50 wt%로 비교적 높아 비산회와 같이 어느 정도 중합반응을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 특히 산화칼슘(CaO) 성분이 43.13 wt%로 풍부하여 일반 시멘트와 같이 수화반응도 기대할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 1과 Fig. 2에 비산회와 고로슬래그의 XRD 분석결과를 나타내었다. Fig. 1의 XRD 결과로부터 알 수 있듯이 비산회는 뚜렷한 결정성을 가지고 있었으며, 주 결정상이 quartz, mullite, calcium oxide, calcium hydroxide로 구성되어 있었다. Fig. 1의 XRD 피크에 나타난 CaO 피크의 강도를 보면 자력분리 전/후 그리고 자력/비자력 비산회 원료간의 CaO 함량이 크게 차이 난다는 사실을 알 수 있었다. Fig. 2의 고로슬래그의 XRD 패턴을 보면 실험에서 사용된 고로슬래그는 대표적인 비정질상으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

2.1.2. 알칼리 활성화제

비산회는 자체적으로 지오폐리머 반응을 할 수 없기 때문에 유리질 피막을 깨고 지오폐리머 반응에 관여하는 Si^{4+} , Al^{3+} 이온을 용출시켜 반응을 일으킬 수 있는 강알칼리 활성화제를 사용하는데 OH⁻의 농도가 높을수록 $SiO_2-Al_2O_3$ 유리질 결합을 빨리 분해시키고 많은 양의 반응 이온들을 생성하게 된다. 따라서 알칼리 이온 농도가 높으면 비산회 활성화에 중요한 결정요소로서 알칼리

활성화제가 비산회의 반응물질 분해를 촉진시켜 높은 강도 및 내구성을 가지는 지오폐리머 페이스트를 제조할 수 있다.

따라서 알칼리 활성화제로 NaOH(순도 97% 이상, Deajung, sodium hydroxide)와 물유리(Na_2SiO_3 , Daejung, sodium silicate) 3호를 사용하여 경화반응을 증진하고자 하였다. 이 때 물유리 3호를 쓰는 이유는 1호, 2호보다 3호가 분자량이 크기 때문에 polymer chain이 많이 존재하게 되고 3호를 사용하게 될 경우 분말입자 간에 응집이 잘 일어나게 되므로 성형 시 밀도 증진에 영향을 미칠 것이라고 생각되어 물유리 3호를 사용하였다.

2.2. 습식 자력선별

CaO와 Fe_2O_3 산화물을 선별하기 위하여 10000 Gauss의 자석을 이용하여 비산회를 습식 자력선별 하였다. 비산회와 물의 비율은 1:10으로 고정한 뒤 10000 Gauss의 자석을 이용하여 자력 비산회(MFA)와 비자력 비산회(NMFA)를 각각 분류한 뒤 100°C에서 24시간 동안 건조하여 분리율 측정과 기초물성 분석을 시행하였다. 비산회의 분리율은 Table 2에서 보여주고 있다.

2.3. 실험조건

본 연구에서는 비산회와 고로슬래그 미분말의 혼합비율을 50:50으로 하였으며, 원료로 비산회와 고로슬래그, 알칼리 활성화제로 NaOH 및 물유리를 사용하여 자력선별 한 비산회의 종류에 따라 실험을 진행하였다. 지오폐리머 제조 조건은 Table 3에 나타내었으며, 일반적인 지오폐리머 세라믹의 제조공정을 이용하였다. 실험방법은 5리터의 진동혼합기에 NaOH, 물유리, 물로 구성된 배합수를 넣고 비산회와 고로슬래그 미분말을 혼합 한 후 제

Table 2
Separation rate for fly ash after magnetic separation (solid/liquid = 0.1)

	Gauss		Separation rate (%)
	10000	Magnetic Non-magnetic	
FA	10000	Magnetic Non-magnetic	90 10

Table 3
Mixture ratio of fly ash, blast furnace, and alkali activators

Sample	Batch (wt%)	L/S	NaOH (M)	WG (wt%)	W (wt%)	Curing temp.
I	RFA : BS	0.61				
II	MFA : BS	50 : 50	0.64	19.48	33.33	66.67 Room
III	NMFA : BS	0.64				

L/S: liquid/solid ratio, M: mole, WG/W: water glass/water ratio.

조된 슬러리를 모르타르 압축강도 측정용 큐브몰드($50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$)에 채워 넣고 상온에서 24시간 양생 후 몰드에서 탈형하여 공시체를 완성하였다. 이렇게 제조된 시편의 물성을 평가하기 위하여 재령 1, 7, 28일 후 압축강도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 결정상과 미세구조 특성

Fig. 3은 자력선별후 각각 다른 조성 및 물성을 가진 비산회와 고로슬래그를 Table 3와 같은 조합에 의해 혼합하여 만든 지오폴리머 경화체 시편의 XRD 분석결과를 나타낸 것이다. $20 \sim 35^\circ(2\theta)$ 부근에서 모든 시편이 halo 패턴을 나타내고 있다. 일반적으로 지오폴리머는 2θ 의 $20 \sim 35^\circ$ 영역에서 비정질 상을 의미하는 halo 패턴

을 관찰할 수 있는데, 많은 연구자들은 이것이 지오폴리머 반응에 의해서 생성된 aluminosilicate 겔(gel)의 영향이라고 보고하고 있다[12-17]. XRD 분석 결과에서 비산회와 고로슬래그는 다량의 비정질 유리상으로 구성되어 있어 비정질상이 알칼리성 용액의 자극과 열양생에 의한 축중합 반응을 통하여 비정질의 aluminosilicate 겔 상을 형성하게 된다. 비산회나 고로슬래그에 존재하는 Si-O-Al의 결합은 과량의 OH⁻에 의해 결합이 파괴되어 이온으로 용출되고, 용출된 이온들 중에서 Si, Al의 양이온은 K, Na, Ca 등과 축중합 반응에 의해서 비정질의 aluminosilicate 겔 상이 내부에 증가하게 되는 것으로 알려져 있다[18, 19]. 또한 $29^\circ(2\theta)$ 부근에는 calcite 피크와 C-S-H(calcium silicate hydrate) 겔 상이 새롭게 생성된 것을 확인 할 수가 있다. 이 calcite피크는 강알칼리 조건하에서 비산회 및 고로슬래그에 존재하는 다량의 CaO 성분이 알칼리성 용액에 의해서 용출된 후, 공기 중의 CO₂와 반응하여 생성된 것으로 판단된다[20,

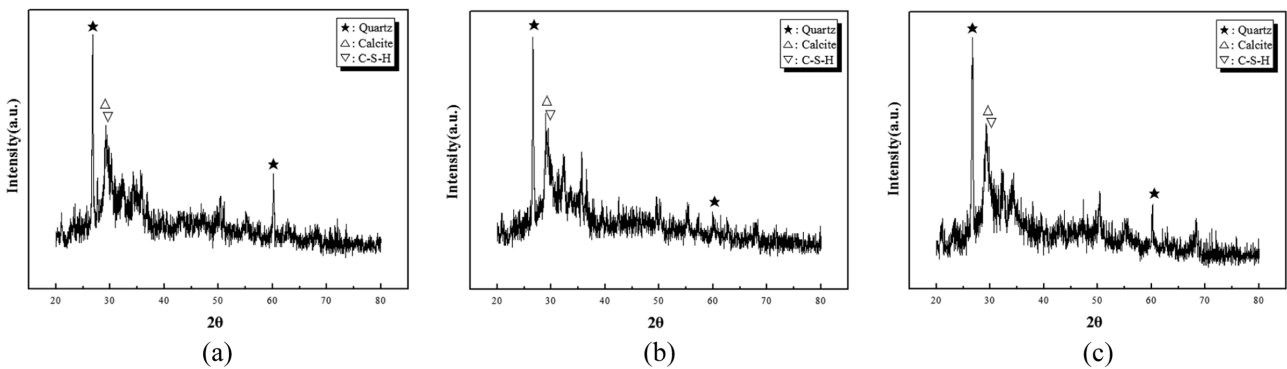


Fig. 3. XRD patterns of geopolymer specimens made of different type of fly ash. (a) RFA, (b) MFA, and (c) NMFA.

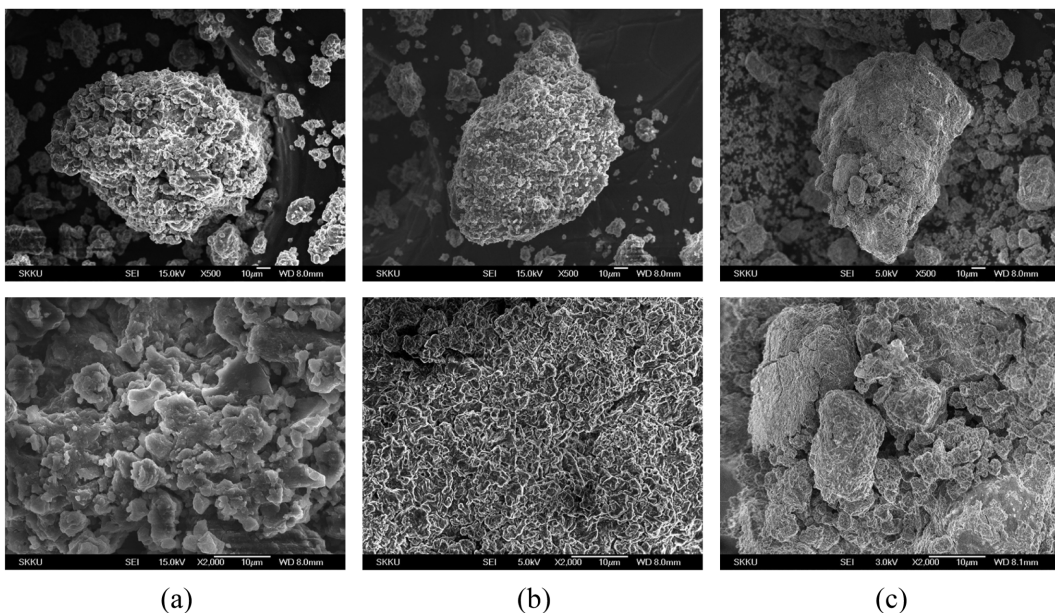


Fig. 4. FE-SEM micrographs of the specimens made of different type of fly ash. (a) RFA, (b) MFA, and (c) NMFA.

21]. C-S-H 겔 상은 비산회와 고로슬래그에 포함된 풍부한 CaO 성분과 알칼리 활성화제의 SiO₂ 성분이 반응하여 생성된 것이고 압축강도 증가에 영향을 미칠 것으로 판단된다. XRD 분석결과로 지오폴리머 경화체는 비정질의 aluminosilicate 겔을 나타내는 20~30°(2θ)의 halo 패턴과 결정질의 calcite 임을 알 수가 있었다[15, 17]. Fig. 4는 자력선별한 비산회의 종류에 따른 지오폴리머의 재령 28일차 시편의 미세구조 사진으로 (a)는 자력선별 전 비산회(RFA), (b)는 자력 비산회(MFA), (c)는 비자력 비산회(NMFA)를 사용한 지오폴리머의 경화체의 미세구조 사진이다. (a), (b), (c) 모든 시편의 미세구조 사진에서 개별적인 비산회, 고로슬래그의 입자는 관찰하기 힘들었으며, 대부분은 지오폴리머 반응에 의해 하나의 큰 축합체가 형성된 것으로 확인되었다. (a)와 (b)시편의 경우 표면이 치밀한 반면 (c)시편은 시편 내부에 기공이 많이 존재하는 것으로 나타났다. 미세구조 관찰 결과 이러한 내부 기공의 존재는 압축강도의 저하로 나타날 수 있다는 예측을 가능하게 하였다.

3.2. 압축강도 특성

자력선별된 원료로 제조된 지오폴리머 경화체의 압축강도를 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 재령 일 수가

Table 4
Compressive strength according to the type of fly ash (Unit: MPa)

Sample	Curing time		
	1 day	7 day	28 day
I (RFA + BS)	14.1	21.67	27.54
II (MFA + BS)	13.2	15.08	25.24
III (NMFA + BS)	8.44	13.32	14.58

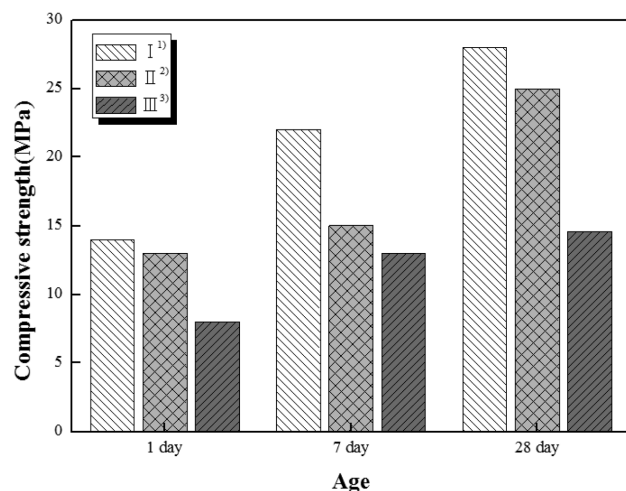


Fig. 5. Compressive strength of specimens made of different types of fly ash. Notations in the inlet means as follows; ¹⁾I: RFA + BS, ²⁾II: MFA + BS and ³⁾III: NMFA + BS.

증가할수록 강도가 증가되는 경향성을 보이고 있는데 이는, 양생시간이 증가할수록 원료 내에 반응성 산화물의 지속적인 축합반응과 지오폴리머 반응으로 생성된 aluminosilicate 겔 상이 점점 증가함으로써 치밀한 구조를 가지기 때문에 사료된다. 자력선별하기 전의 원래 비산회(RFA)와 고로슬래그를 치환하여 제조한 시편 I의 재령 28일차 압축강도 값은 28 MPa로 가장 높은 값을 나타내고 있다. 자력 비산회(MFA)와 고로슬래그를 치환하여 제조한 시편 II의 재령 28일차 강도가 225 MPa를 나타낸 것에 비하여 비자력 비산회(NMFA)와 고로슬래그를 치환하여 제조한 III의 재령 28일차 압축강도는 15 MPa로 상대적으로 낮은 압축강도 값을 나타내고 있었다. 이러한 결과는 원료를 자력선별 함으로써 CaO를 분류하여 CaO의 함량을 높임으로써 Ca 화합물의 수화반응 증진에 의해 지오폴리머의 압축강도가 향상될 것으로 생각했던 우리의 예상과는 완전히 다른 결과를 보이고 있다. XRD 패턴에서도 확인되었던 calcite 피크의 존재로 인해 압축강도가 향상되었을 것이라는 우리의 예상과는 다르게 오히려 비자력 비산회(NMFA)를 사용한 시편의 압축강도가 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 원료 내 수화반응에 영향을 미치는 CaO의 함량이 증가하였으나 Ca(OH)₂와 같은 수화반응 전구체로 전환되지 않아 충분한 강도발현이 되지 않았거나, 또는 CaO 함량 증가에 따른 수화반응 증진 효과 보다는 Table 1에서 볼 수 있듯이 자력선별에 의해 지오폴리머 반응에 필요한 aluminosilicate 성분, 즉 실리카와 알루미늄 성분은 현격히 줄어들어 지오폴리머 반응이 줄어드는 효과로 생각된다. Fig. 3의 XRD 피크에서 calcite 피크가 확인되는 것을 보면, 후자의 영향이 더 큰 것으로 사료된다. 따라서 원래 본 연구에서 의도되었던 자력선별에 의한 수화반응 증진으로 인한 지오폴리머의 압축강도의 향상은 이루지 못하였으나, 향후 자력선별 후 수화반응 전구체의 충분한 형성에 대한 연구와 알루미늄과 실리카 성분을 늘릴 수 있는 또 다른 분리 방법에 대한 연구가 이루어져야 될 것으로 사료된다. 본 연구는 구성성분의 변화가 물성에 영향을 줄 것이라는 가정 하에 연구되었으므로 지오폴리머 물성향상을 위한 기초연구 및 향후 연구방향의 제시라는 측면에서 그 의미가 있다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 자력선별로 분류된 세 가지 종류의 비산회(RFA, MFA, NMFA)를 고로슬래그 미분말을 혼합하고 NaOH와 물유리를 알칼리 활성화제로 사용하여 지오폴리머 경화체를 제조한 후 사용된 비산회의 종류가 지오폴리머 시편의 압축강도에 미치는 영향을 검토한 결

과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 지오폴리머 경화체의 반응생성물은 비정질의 aluminosilicate 겔과 calcite 및 C-S-H 상 이었으며, 모든 시편의 XRD 20~35°(2θ) 영역에서 halo 패턴을 관찰할 수 있었다.

2) 지오폴리머 경화체 시편의 미세구조는 FE-SEM 관찰결과 자력선별 전 비산회가 포함된 시편(시편 I)과 비자력 비산회가 포함된 시편(시편 II)의 경우 지오폴리머 반응에 의해 파단면이 치밀한 형상을 띄고 있었다.

3) 비자력 비산회가 포함된 시편(시편 III)의 경우 XRD 패턴에서 자력 비산회가 포함된 시편(시편 II)의 경우보다 강도가 높은 calcite 피크가 확인되지만, 자력 선별 후 수화반응에 의한 압축강도 증진 효과보다는 실리카 및 알루미늄 성분 감소로 인한 지오폴리머 축합 반응의 감소효과가 더 크기 때문에 실질적인 압축강도는 자력선별 전보다 더 낮게 측정된 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] G.S. Ryu, K.T. Koh, H.j. Kang and J.H. Lee, "Mechanical characteristic analysis of cement zero mortar using fly ash", Kor Civil Eng. 10 (2009) 1363.
- [2] Q. Zhao, B. Nair, T. Rahimian and P. Balaguru, "Novel geopolymer based composites with enhanced ductility", J. Mater. Sci. 42 (2007) 3131.
- [3] K. Komnitas and D. Zaharaki, "Geopolymerrisation; A review and prospects for the minerals industry", Miner. Eng. 20 (2007) 1261.
- [4] J. Davidovits, "Geopolymer cement to minimise carbon-dioxide greenhouse-warming", Ceram. Trans. 37 (1993) 165.
- [5] J. Davidovits, "Geopolymer: Man-made Rock Geo-synthesis and the resulting development of very early high strength cement", J. Mater. Education. 16 (1994) 91.
- [6] A.R. Brough and A. Atkinson, "Sodium silicate based. Alkali-activated slag mortar: Part I. Strength, hydration and microstructure", Cem.Concr. Res. 32 (2002) 865.
- [7] K.J. Mun, "Properties of non-sintered cement and con- create recycled sith industrial waste (in Korea), ph D. thesis", Chonbuk National University (2004).
- [8] S.H. Lee and Y.B. Mun, "Properties of reaction rim on blast furnace slag grain with alkali activator according to hydration reaction (in Korea)", J. Kor. Inst. Resources Recycling 18 (2009) 42.
- [9] G.J. Kim, H.G. Han, D.S. Seo and J.K. Lee, "Shell powder coating on the surface of concrete by geopolymer cement (in Korea)", J. Kor. Mater. Res. 20 (2010) 1.
- [10] G.S. Lee and Y.J. Song, "Process development of geopolymer pellets from coal preparation refuse", Kor. Geosystem Eng. 47 (2010) 199.
- [11] L. Choi and Y.J. Kwon, "Solving direction of the environmental friendly policy in Korea cement industry", Magazine of the Korea Concrete Institute 18 (2006) 8.
- [12] J. Davidovits, "Geopolymers and geopolymeric materials", J. Therm. Anal. 35 (1989) 429.
- [13] M. Sofi, J.S.J. Van devernter, P.A. Mendis and G.C. Lukey, "Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC)", J. Mater. Sci. 42 (2007) 3107.
- [14] S.G. Son, S.Y. Hong and Y.D. Kim, "Preparation and its characteristics of fly ash-based geopolymeric mortar using low grade silica waste," J. Kor. Ceram. Soc. 47 (2008) 375.
- [15] D. Panias, I.P. Giannopoulou and T. Perraki, "Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash-based geopolymers", Colloid and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects 301 (2007) 246.
- [16] Y. Zhang, W. Sun, Q. Chen and L. Chen, "Synthesis and heavy metal immobilization behaviours of slag based geopolymer", J. Hazard. Mater. 143 (2007) 206.
- [17] J. Zhang, J.L. Provis, D. Feng and J.S.J. van Deventer, "Geopolymers for immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺", J. Hazard. Mater. 157 (2008) 587.
- [18] A. Palomo, M.W. Grutzeck and M.T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future", Cement Concr. Res. 29 (1999) 1323.
- [19] Sindhunata, "A conceptual model of geopolymerisation, Ph D Thesis", Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Melbourne (2006).
- [20] W.Z. Choi and E.K. Park, "Study on CaCO₃ preparation from MSWI fly ash", J. Kor. Inst. Resources Recycling 15 (2006) 47.
- [21] M. Palacios and F. Puertas, "Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes", Cement Concr. Res. 37 (2007) 691.
- [22] H.J. Kim, Y.T. Kim and C.S. Jang, "Characteristics of Geopolymer based on recycling resources", J. Kor. Crystal Growth 22 (2012) 152.
- [23] J.Y. Park, Y.T. Kim and H.J. Kim, "Carbonation of coal fly ash for construction materials", J. Kor. Crystal Growth 22 (2012) 147.