

Fabrication of lightweight geopolymer based on the IGCC slag

Soo-bin Park, Kang-duk Kim and Seung-gu Kang[†]

Department of Advanced Material Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received October 25, 2017)

(Revised November 13, 2017)

(Accepted November 21, 2017)

Abstract In this study, a lightweight geopolymer was prepared using by slag discharged from IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) power plant and its physical properties, the density and compressive strength, were analyzed as a function of the concentration of alkali activators, W/S ratio and aging times. Also the possibility of applying it to lightweight materials by adding Si sludge as a foaming agent to the geopolymer was investigated. In particular, a complex composition of alkali activator and a pre-curing process were applied to improve the strength properties of lightweight geopolymers. While the compressive strength of the lightweight geopolymer using a single activator was 9.5 MPa, the specimen made with a complex composition of alkali activator had compressive strength of 2~5 times higher. In addition, the lightweight geopolymer with pre-curing process showed a compressive strength value of 18~48 % higher than that of specimen made with no pre-curing process. In this study, by using a complex activator and a pre-curing process. the maximum compressive strength of lightweight geopolymer was obtained as 40 MPa (The specimen was aged for 3 days and had density of 1.83 g/cm³), which is comparable to cement concrete. By analyzing the crystal phase and microstructure of geopolymers obtained in this study using by XRD and SEM, respectively, it was confirmed that the flower-bud-like zeolite crystal was homogeneously distributed on the surface of the C-S-H gel (sodium silicate hydrate gel) in the geopolymer.

Key words IGCC slag, Si sludge, Compressive strength, Density, Lightweight geopolymer

IGCC 용융 슬래그를 이용한 경량 지오폐리머 제조

박수빈, 김강덕, 강승구[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2017년 10월 25일 접수)

(2017년 11월 13일 심사완료)

(2017년 11월 21일 게재확정)

요약 본 연구에서는, IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle: 석탄가스화 복합발전)에서 배출되는 용융 슬래그로부터 지오폐리머를 제조하여 알칼리 활성화제의 몰농도, W/S 비(water/ solid ratio), 재령일에 따른 비중과 압축강도 등 물리적 특성을 분석함과 동시에 발포제인 Si 슬러지를 첨가하여 경량화 소재로서의 가능성을 고찰하였다. 특히 경량 지오폐리머의 강도 특성향상을 위하여 복합 활성화제 및 pre-curing 공정을 적용하였다. 단일 활성화제를 사용한 경량 지오폐리머의 압축 강도는 9.5 MPa이었으나, 복합 활성화제로 제조할 경우 2~5배 정도의 압축강도 증진 효과를 나타내었다. 더군다나, pre-curing을 실시한 경량 지오폐리머의 경우, pre-curing하지 않은 시편들에 비해 18~48 % 가량 높은 압축강도 값을 보였다. 본 연구에서 복합 활성화제와 pre-curing 공정의 도입으로 얻어진 경량 지오폐리머의 최고 압축강도는 40 MPa(3일 재령하여 밀도가 1.83 g/cm³인 시편)로서 시멘트 콘크리트에 필적하였다. XRD 결정상 분석과 SEM을 이용한 미세구조 분석을 통하여 지오폐리머 표면에서 C-S-H 겔(sodium silicate hydrate gel)의 모상에 꽃봉오리 모양의 zeolite 결정상이 균일하게 분포된 것을 확인할 수 있었다.

1. 서론

지오폐리머(geopolymer)는 알루미늄 실리케이트계의 무

기화합물로서 기존의 포틀랜드 시멘트에 비해 제조공정에서 CO₂ 발생이 거의 없고, 다양한 기능을 나타내므로 최근 들어 이에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 지오폐리머 관련 연구는 1930년대 클링커(clinker)가 생성되지 않는 시멘트의 대체재 개발을 위해 시작되었으며, 1940년에 A. Purdon은 알칼리염으로 만들어진 슬래

[†]Corresponding author

E-mail: sgkang@kgu.ac.kr

그와 가성 소다로 구성된 시멘트에 대한 연구를 처음으로 수행하였다[1]. J. Davidovits는 1981년에 석회암과 고품토, 백운석의 혼합물에 알칼리를 혼합한 무기계 바인더를 개발하였고 이 바인더가 중합반응을 하여 고분자와 유사한 3차원 구조를 나타냈기에 지오폐리머(geopolymer)라 명명하였다[2]. 최근에는 산업부산물물을 이용한 지오폐리머 콘크리트가 개발되고 있으며 여러 연구 결과를 통해 콘크리트의 시멘트를 바닥재(coal bottom ash)나 비산재(coal fly ash) 등의 산업부산물로 50%까지 대체가 가능하다는 것이 밝혀졌다[3, 4]. 이러한 연구들을 통하여 지오폐리머는 시멘트 대체재로서의 가능성뿐만 아니라 폐자원의 재활용 측면에서도 매우 중요한 소재로 인식되고 있다[5-9]. 한편 건설소재의 경량화는 각 부재의 부담을 줄이고, 고정하중이 감소되기 때문에 경제적으로 유리할 뿐만 아니라 재료의 열전도율이 낮으므로 단열효과까지 기대할 수 있다[10, 11]. 이런 이유로 지오폐리머 제조 시, 발포제를 함유시켜 경량화시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 통상 시멘트 콘크리트를 경량화시킬 때는 발포제로서 Al, H₂O₂, Zn 등을 사용해 왔으나 Valentina Medri 등은 다양한 형태의 Si를 발포제로 첨가함으로써 수소 가스 생성을 통한 발포 지오폐리머를 제조할 수 있다는 결과들을 보고하였다[12-14].

지오폐리머 반응은 다음과 같은 단계에 걸쳐서 일어나는 것으로 알려져 있다. 먼저, 알루미늄 규산염계 원료와 알칼리 활성화제가 반응하면 Si, Al 이온이 용출되고 이는 Si-O-Al 형태의 결합으로 구성되는 단량체(oligomer)를 형성하게 된다. 이 단량체들은 고온의 환경에서 축·중합 반응을 거치며 삼차원적인 구조를 형성하는데 이것들이 서로 결합하며 경화되어 지오폐리머로 합성된다[15, 16]. P. Chindaprasirt 등은 알칼리 활성화제의 농도에 따라 지오폐리머 반응 속도가 크게 달라지며, 이에 따라 최종 경화체의 압축강도에 많은 영향을 미친다고 보고하였다[17, 18]. 또한 G. Ryu 등은 알칼리 자극제로서 NaOH와 sodium silicate를 혼합하여 사용할 경우 강도가 증진되어 콘크리트의 압축강도 기준인 40 MPa의 값을 갖는 지오폐리머 합성이 가능하다는 것을 확인하였다[19]. T. Bakharev는 지오폐리머 제조 시 고온 양생 전에 상온에서 시편을 일정 시간 방치하는 공정, 소위 pre-curing을 적용하면 시험체의 강도 증진에 매우 효과적이라고 보고하였다[20]. 이러한 연구 결과에 따르면 활성화제의 농도, 배합비, 양생 조건 및 방법 등에 의해서 지오폐리머의 강도가 다양하게 변화하는 것을 확인할 수 있다.

기존 석탄 화력보다 효율은 높으면서도 공해 배출은 적어 친환경 청정발전기술로 주목 받고 있는 석탄가스화 복합발전(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)의 경우, 발전과정에서 필연적으로 용융 슬래그가 발생

되는데 국내에서도 2016년부터 연간 약 8.1만 톤의 용융 슬래그가 배출되기 시작하고 있어 향후 IGCC 용융 슬래그의 효과적인 자원화 기술 개발이 시급한 실정이다. 본 연구에서는 CO₂ 발생량 저감을 위한 시멘트 대체 소재로서 IGCC 슬래그를 기반으로 한 지오폐리머를 제조하였으며, 산업 부산물인 Si 슬러지를 발포제로 사용하여 지오폐리머의 경량화 특성을 고찰하였다. 또한 지오폐리머의 강도 증진을 위하여 복합 활성화제 및 전양생 공정 적용에 따른 물성변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 지오폐리머 원료는 국내 'S' 발전소에서 운용중인 석탄가스화 복합발전(IGCC)에서 발생하는 IGCC 용융 슬래그(이하 용융 슬래그)를 사용하였다. 지오폐리머 반응을 위한 알칼리 활성화제는 NaOH(Daejung Chemicals, 97% purity, Korea)와 증류수를 혼합한 수용액을 사용하였으며, 경우에 따라서는 경량화 시편의 낮은 강도를 향상시키기 위하여 NaOH에 물유리를 50 wt% 혼합한 복합 활성화제를 사용하였다. 또한 경량 지오폐리머 제조에 필요한 발포제로서 반도체용 실리콘 웨이퍼 절단 공정에서 발생하는 Si 슬러지 분말을 사용하되, 분쇄 및 체가름을 통하여 106 μm 이하의 것만을 선별하여 사용하였다.

용융 슬래그 지오폐리머의 유동성에 따른 최적 압축강도를 확인하기 위하여 알칼리 활성화제의 몰농도(M), W/S 비(Water/Solid ratio), 그리고 재령일(aging time)을 변수로 실험을 진행하였다. 경량 지오폐리머의 제조를 위해 발포제인 Si 슬러지 첨가량 역시 변수로 실험을 수행하였다. 지오폐리머 제조 공정은 다음과 같다. 먼저 용융 슬래그와 활성화제를 W/S 비에 맞춰서 배합한 뒤, 금형 몰드(50 × 50 × 50 mm³)에서 성형하였다. 제조된 성형체는 폴리카보네이트 지퍼백(polycarbonate zipper bag)에 넣어 밀봉시킨 후, 70°C 건조기에서 24시간 동안 고온 양생한 뒤, 탈형하여 상온에서 재령(aging)시켰다. 이 때 경우에 따라 고온 양생 전에 23°C/24 h 조건으로 pre-curing을 실시하였다.

용융 슬래그와 Si 슬러지 그리고 지오폐리머의 화학성분 분석과 결정상 분석을 위하여 XRF(ZSX-100e, Rigaku, Japan)와 XRD(DMAX2500, 8 KW, Rigaku, Japan)(MiniFlex II, Rigaku, Japan)를 각각 측정하였다. 제조된 지오폐리머 시험체의 압축강도는 UTM(UTM-900NH Series DAEKYUNG, Korea)을 이용하여 측정하되, 3~5개 시편에 대한 측정 값을 평균하여 그래프 작성에 사용하였다. 또한 지오폐리머의 표면 미세구조 분석을 위해 SEM(Scanning Electron Microscope, S-4800, HITACHI,

Japan)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원료 분석

IGCC 용융 슬래그와 발포제로 사용한 Si 슬러지 분말의 화학조성 분석 결과를 Table 1에 나타내었다. 지오폴리머는 반응 과정 중 Si, Al 이온의 용출이 필수적이기 때문에, 일반적으로 알루미나 규산염계 원료를 사용한다. 통상 원료 내 Si/Al 비의 분석을 통해 지오폴리머 제조 가능성을 판단하는데 그 범위가 1~4일 때, 지오폴리머의 제조가 가능하다고 보고되고 있다[21-23]. 본 연구에 사용되는 IGCC 용융 슬래그의 XRF 분석 결과, 주성분은 SiO₂, Al₂O₃, CaO로 확인되었으며, Si/Al 비가 2.25로 지오폴리머의 재료로서 사용하기에 적당하고 판단되었다. 한편 발포제로 사용한 Si 슬러지는 SiO₂가 98.02%로 주성분을 이루고 있으며, Al₂O₃를 소량 포함하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

IGCC 슬래그와 Si 슬러지의 결정상 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었으며, 그 결과 IGCC 슬래그는 비정질 상인 반면 Si 슬러지는 silicon 결정상으로만 이루어져있음을 알 수 있었다. 슬래그의 경우 고온으로부터 급랭되는 공정을 거치기 때문에 비정질로 이루어지는 경우가 많은데,

Table 1
Chemical composition of IGCC fused slag by XRF (wt%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Total
IGCC slag	46.29	21.33	7.38	21.68	1.16	0.47	0.53	1.17	100.0
Si sludge	98.02	1.98	-	-	-	-	-	-	100.0

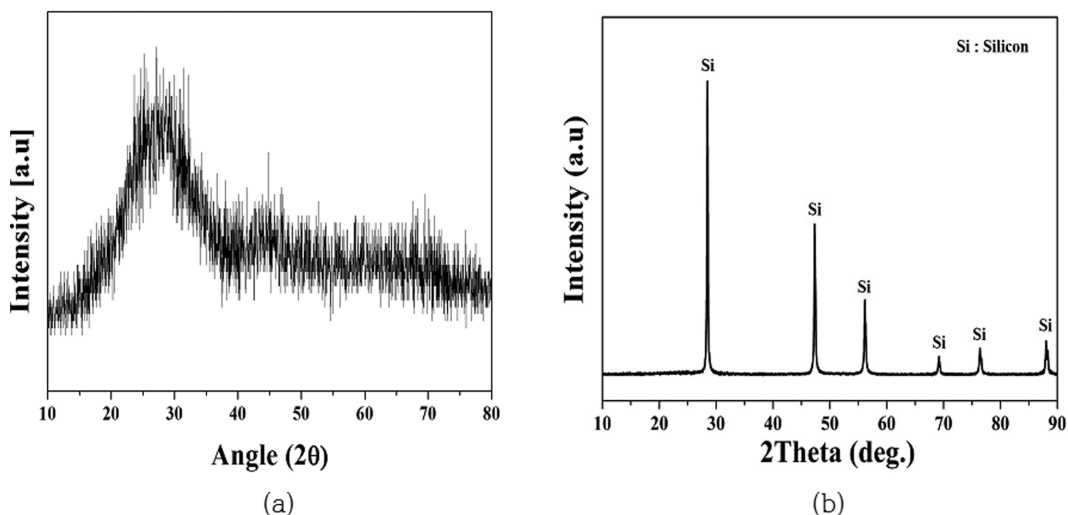


Fig. 1. XRD pattern of the raw materials: (a) IGCC slag, and (b) Si sludge slag.

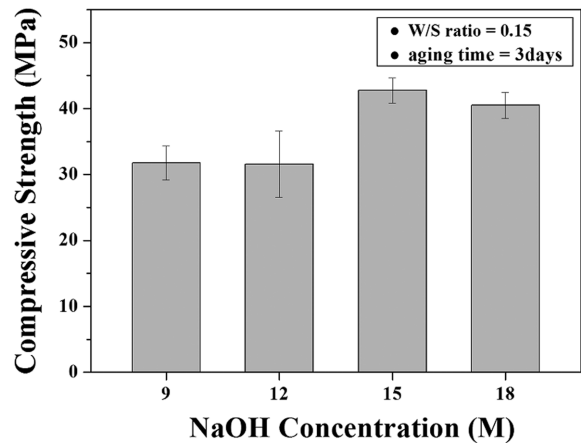


Fig. 2. Compressive strength of IGCC-slag-based-geopolymer activated by various concentration of NaOH solution.

이와 같은 비정질 원료의 경우 구조의 특성 상 알칼리 용액에 접촉 시 Si, Al 이온의 용출이 원활하게 일어나 지오폴리머의 재료로 사용하기에 적합하다[24].

3.2. IGCC 용융 슬래그 지오폴리머 제조

Fig. 2는 알칼리 활성화제의 몰 농도에 따른 지오폴리머의 압축강도 변화를 나타낸 그래프이다. 알칼리 활성화제의 몰 농도가 15 M일 때 압축강도가 가장 높게 측정되었는데, 이는 몰 농도가 높아짐에 따라 IGCC 슬래

그에서의 Si, Al 이온의 용출이 원활하여, 그에 따라 중합반응이 더욱 활발하게 일어나 강도가 증진된 것으로 판단된다[25].

Fig. 3은 알칼리 활성화제의 몰농도를 15 M로 고정시킨 후 W/S 비를 0.1~0.25 범위로 제조된 지오폐리머의 압축강도 그래프이다. W/S 비가 0.1의 경우 반응에 필요한 물의 양이 너무 적을 뿐 아니라, 지오폐리머 페이스트(paste)의 유동성이 낮아 성형성이 나빠져서 압축강도가 낮은 것으로 생각되며, W/S 비가 0.15의 경우 반응이 필요한 물량이 충분하고 또한 페이스트의 성형성이 높아져 압축강도가 크게 증가된 것으로 보인다. 그러나 물의 양이 증가하여 W/S 비가 0.2 이상일 경우, 오히려 압축강도가 저하되는 특성을 나타내었다. 이는 과도한 물량으로 제조된 시편에서는 반응에 참여하지 않는 물이 재령(aging) 기간 동안 건조되면서 기공을 형성하기 때문으로 생각된다.

Fig. 4는 알칼리 활성화제 농도 = 15 M, W/S 비 =

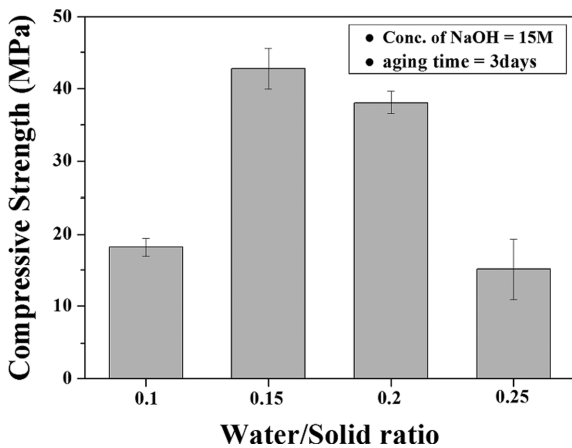


Fig. 3. Compressive strength of IGCC-slag-based-geopolymer made with various W/S ratio.

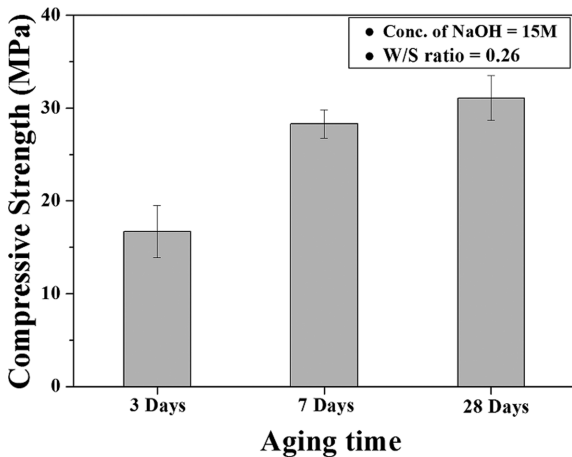


Fig. 4. Compressive strength of IGCC-slag-based-geopolymer made by different aging time.

0.26 조건으로 제조된 지오폐리머의 재령일에 따른 압축강도 변화를 나타낸 그래프이다. 실제 공정에 적용할 것을 고려하여 유동성이 좋은 W/S 비(0.26)를 선정하였다. 재령일이 길어질수록 지오폐리머 압축강도가 증진되었는데, 이는 시편 내부에 잔존하는 Si, Al 이온들의 중합 반응이 재령 시간만큼 계속 진행되었기 때문으로 생각된다.

3.3. Si 슬러지를 이용한 경량 지오폐리머 제조

Fig. 5는 Si 슬러지를 0.02 wt% 첨가하여 제조된 경량 지오폐리머의 3일차 압축강도를 W/S 비에 따라 나타낸 그래프이다. Si 슬러지가 첨가되지 않은 시편의 압축 강도가 16.5 MPa였음을 상기할 때(Fig. 4: 3일간 재령한 시편), Si 슬러지가 첨가된 경량 지오폐리머 시편의 압축강도값인 5 MPa(W/S 비 = 0.26으로 제조된 시편)은 매우 낮은 값을 알 수 있었다. W/S 비 증가에 따라 시편의 압축 강도가 낮아지는 것은, 건조 시 물이 빠져 나간 자리가 기공이 될 뿐만 아니라 반응식 Eq. (1)에 나타낸 바와 같이 물의 양이 증가함에 따라 발생하는 수소 기체 역시 더 많아지기 때문으로 생각된다.



상기 Eq. (1)에 보인 바와 같이 Si 슬러지는 알칼리 활성화제와 반응하여 수소 가스를 발생시키는데, 수소 가스는 지오폐리머 내부에서 포집되면서 팽창하여 시험체를 경량화 시키는 것으로 알려져 있다. 일반 경량 콘크리트의 경우 비중은 1.5~2.0 그리고 압축강도는 약 15 MPa 이 요구되므로 본 연구에서 제조된 경량 지오폐리머는 그 압축강도를 향상시키기 위한 추가 공정이 필요할 것으로 판단되었다[26].

경량 지오폐리머의 강도를 높이는 방안으로 본 연구에서는 첫째, 복합 활성화제의 사용 그리고 둘째, pre-curing 공정을 도입하였다. 알칼리 활성화제로 NaOH를 단독으

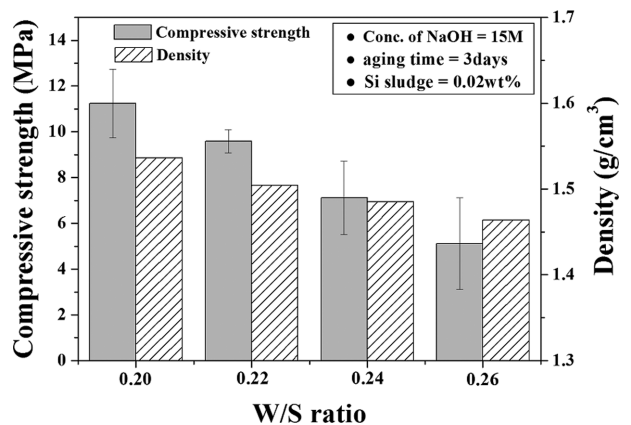
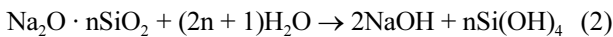


Fig. 5. Compressive strength and density of lightweight IGCC-slag-based-geopolymer made by different W/S ratio.

로 사용하는 것 보다 물유리(sodium silicate: SS)를 혼합하면 더 많은 Si가 공급됨과 동시에 Eq. (2)에 나타난 바와 같이 가수분해 반응에 의하여 OH기가 증가되고 pH가 상승함으로 이로 인하여 원료로부터 더 많은 Si, Al 이온이 용출된다. 따라서 지오폐리머 반응이 시작될 때 Si 이온이 충분히 공급되어 silicate 단량체 형성이 용이하게 되고, 결국 Al-O-Si 결합 즉, 지오폐리머 반응을 위한 전구체(precursors)가 많이 형성되는 것으로 알려져 있다[27-29].



고온 양생 전에 pre-curing 공정을 도입할 경우 역시 강도를 증진시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있는데, 이는 더 많은 Si, Al 이온이 용출될 수 있는 시간을 제공해주기 때문이다[20]. 상기 두 가지 강도 증진 방법의 효과를 확인하기 위하여 복합 활성화제를 사용하고 동시에 pre-curing 공정을 도입하여 제조된 경량 지오폐리머의 밀도 및 압축강도 결과를 Fig. 6에 나타내었다. NaOH

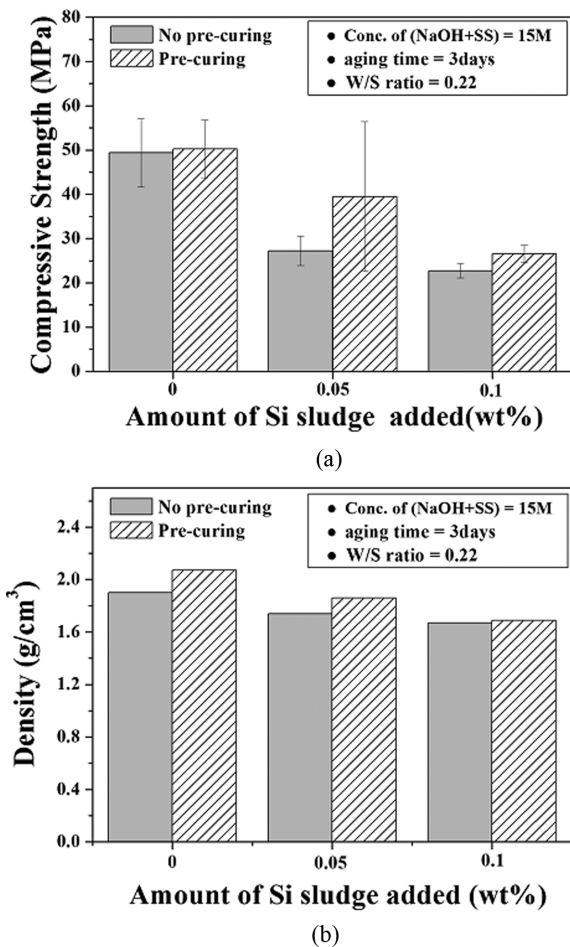


Fig. 6. Physical properties of IGCC-slag-based-geopolymer made by different amount of Si sludge: (a) compressive strength and (b) density.

와 물유리가 혼합된 복합 활성화제를 사용하였더니 Si 슬러지가 첨가되지 않은 시편의 압축강도가 49 MPa로서, NaOH 단일 활성화제로 제조된 시편의 압축 강도, 15~38 MPa(Fig. 3; W/S 비 = 0.2~0.25로 제조된 시편)에 비해 1.3~3.3배 높은 값이다. 특히 Si 슬러지가 첨가된 경량 지오폐리머의 경우, 단일활성화제를 사용한 시편의 압축 강도 값이 9.5 MPa(Fig. 5; W/S 비 = 0.22인 시편)로 낮았으나, 복합활성화제로 제조된 경량 지오폐리머의 압축강도는 22~27 MPa로서(Fig. 6(a); Si sludge = 0.05~0.1 wt%인 시편) 무려 2~5배의 두드러진 강도 증진 효과를 보였다. 더군다나, 복합 활성화제 사용과 더불어 pre-curing을 실시한 시편의 경우, Si 슬러지가 0.05 wt% 첨가된 시편은 40 MPa, Si슬러지가 0.1 wt% 첨가된 시편은 26 MPa로, pre-curing을 하지 않은 시편들의 압축 강도에 비해 각각 48 % 및 18 % 증가하였다. 복합 활성화제와 pre-curing을 적용한 지오폐리머의 밀도 값[Fig. 6(b)] 역시, 단일 활성화제를 사용하였거나, pre-curing을 실시하지 않은 시편들에 비해 증가되었음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6에 나타냈던 시편들 즉, 발포제인 Si 슬러지를 첨가하고 동시에 복합 활성화제를 사용하되, pre-curing 공정 도입 유무에 따른 경량 지오폐리머들에 대한 XRD 분석 결과이다. 발포제인 Si 슬러지를 첨가하지 않은 시편에서는 zeolite상과 calcium silicate hydrate 겔(C-S-H gel; $\text{Ca}_6\text{Si}_2\text{O}_7\text{SiO}_4(\text{OH})_2$)상이 생성된 반면, Si 슬러지를 첨가하여 제조된 시편에서는 각 결정상의 피크 강도가 낮아지면서 비정질 상이 우세하게 나타났다. 그러나 pre-curing 유무에 따른 XRD 피크 강도는 큰 변화를 나타내지 않았다. 또한 Si 슬러지는 미량으로 첨가되었기 때문에 XRD 분석에서 관련 결정 피크가 나타나지 않은 것으로 사료된다.

Si 슬러지 첨가량에 따른 IGCC 슬래그 지오폐리머의 미세구조를 Fig. 8에 나타내었다. 발포제가 첨가 되지

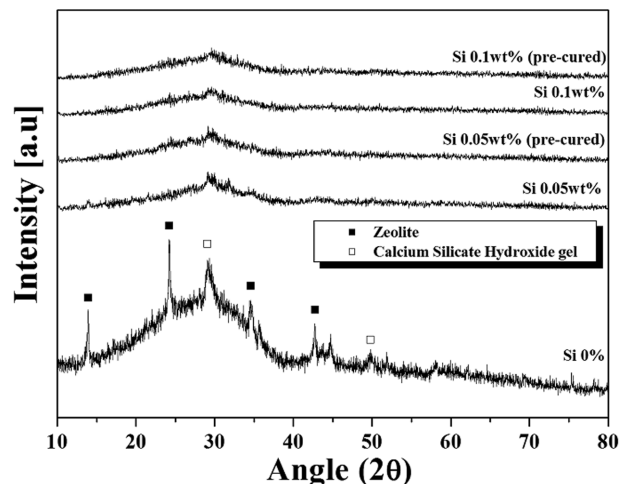


Fig. 7. XRD patterns of IGCC-slag-based-geopolymer.

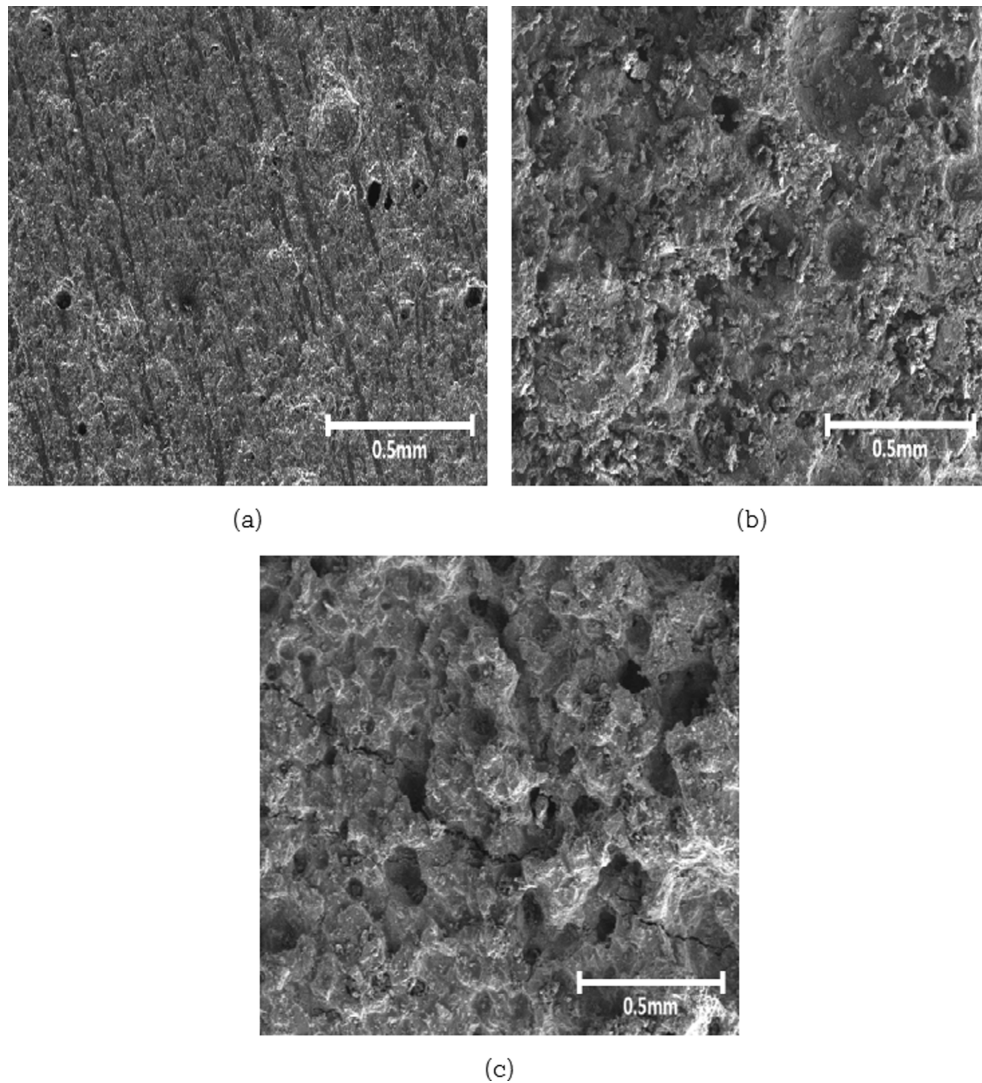


Fig. 8. SEM images of IGCC-slag-based-geopolymer containing (a) no foaming agent, (b) 0.05 wt% Si sludge, and (c) 0.1 wt% Si sludge (Magnified by 500 times).

얇은 지오폴리머 시료에서((a)) 지오폴리머 겔의 형성에 의한 조밀한 구조가 나타났다. 하지만 발포제의 양이 증가하자 지오폴리머 내부에 미세기공도 함께 증가되었고, 이는 시편의 비중과 강도를 낮추는 원인으로 작용한 것을 알 수 있었다(Fig. 5 및 6). Pre-curing 유무에 따른 경량 지오폴리머의 미세구조를 SEM으로 관찰하여 Fig. 9에 나타내었다. Shoumkova 등은 지오폴리머 미세구조가 C-S-H 겔이 모상을 이루며, 꽃봉오리 모양의 zeolite 결정상이 모상 내 균일하게 분포되어 있는 형상이라고 보고한 바 있다[30]. 본 연구에서도 제조된 지오폴리머 모상 내에 꽃봉오리 모양의 zeolite가 분포된 미세구조를 보였으며, 특히 pre-curing을 실시한 시편에서 zeolite 결정상이 더 크게 성장되었음을 관찰할 수 있었는데, 이는 pre-curing 단계를 거치며 더 많은 Si, Al 이온이 용출되어 zeolite 결정상 합성을 촉진시킨 것으로 판단된다.

Zeolite 결정의 형상은 Si 슬러지의 결정상과 비교해 보았을 때 뚜렷한 차이가 있었으나 더욱 확실한 결론을 내기 위해서는 추후 EDS 분석이 추가로 수행될 필요가 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 석탄가스화 복합발전(IGCC)에서 부산물로 배출되는 용융 슬래그를 이용하여 친환경 무기계 결합제인 지오폴리머를 제조하고 그 경량화 가능성을 분석하였다. IGCC 용융 슬래그는 Si/Al 비가 2.25로 지오폴리머의 제조가 가능한 화학조성을 가지고 있으며, Si와 Al 이온들의 용출이 용이한 비정질 구조로 이루어진 것을 확인하였다. 알칼리 활성화제 농도 = 15 M, W/S

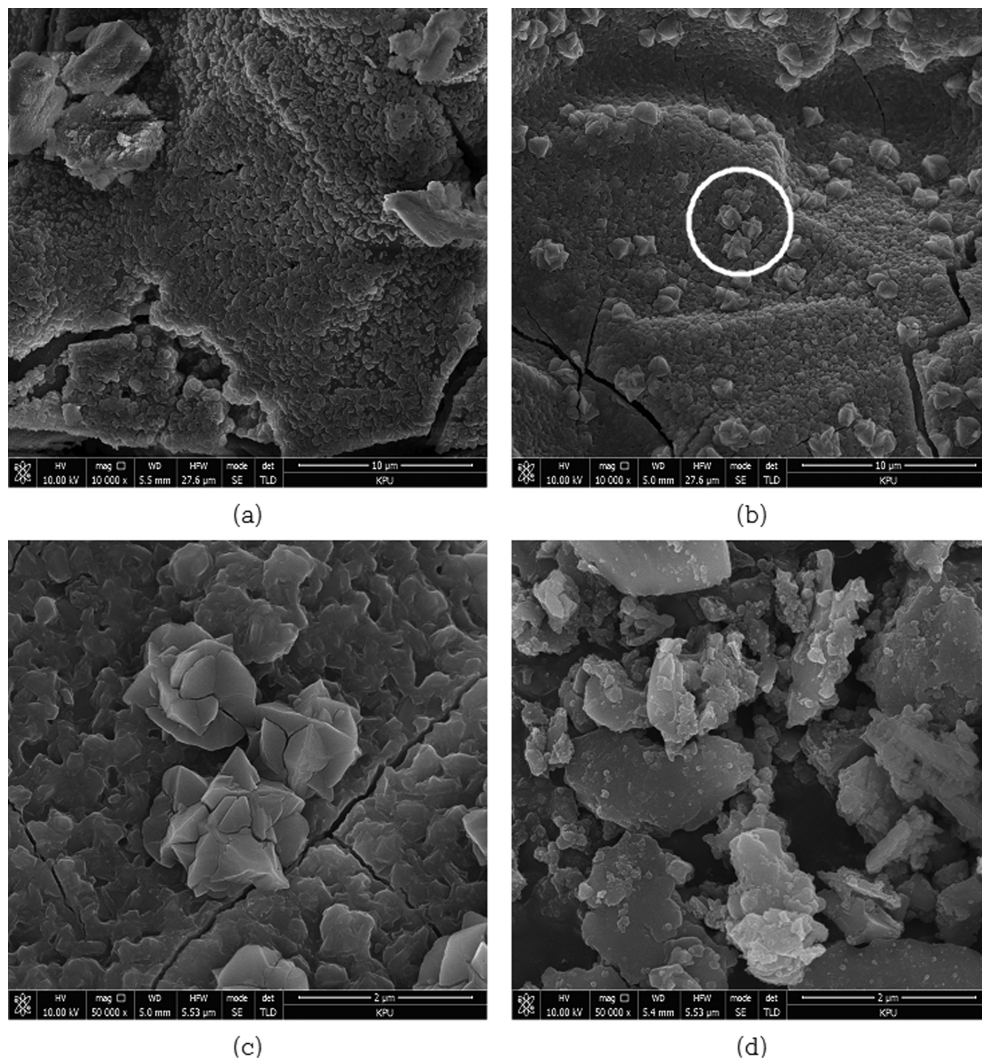


Fig. 9. SEM images of IGCC-slag-based-geopolymer made by different curing condition: (a) no pre-cured, (b) pre-cured, (c) highly magnified ($\times 50,000$) image of the circled area at specimen (b), and (d) raw Si sludge. The amount of Si sludge added was 0.1 wt%.

비 = 0.15인 조건으로 제조한 지오폐리머는 42.7 MPa의 압축강도 값을 나타내었다. 반면 발포제로서 Si 슬러지가 첨가된 경량 지오폐리머 시편의 압축강도는 5 MPa로 크게 낮아지는 것을 알 수 있었다. 단일 활성화제를 사용한 경량 지오폐리머의 압축 강도는 9.5 MPa이었으나, NaOH와 불유리가 혼합된 복합 활성화제로 제조할 경우 2~5배 정도의 압축강도 증진 효과를 나타내었다. 더군다나, 복합 활성화제 사용과 더불어 pre-curing을 실시한 경량 지오폐리머의 경우, pre-curing하지 않은 시편들에 비해 18~48% 가량 높은 압축강도 값을 보였다. 본 연구에서 경량 지오폐리머의 압축강도는 40 MPa(밀도 = 1.83; 3일 재령)로서 시멘트 콘크리트에 필적하였다. Si 슬러지를 첨가하지 않은 시편에서는 zeolite상과 calcium silicate hydrate 겔(C-S-H gel)상이 생성된 반면, Si 슬러지를 첨가하여 제조된 시편에서는 각 결정상의 피크 강도가 낮아지며 비정질 상이 우세하게 나타났다. 그러

나 pre-curing 유무에 따른 XRD 결정 피크 강도는 큰 변화를 나타내지 않았다. 경량 지오폐리머의 미세구조는 C-S-H 겔의 모상에 꽃봉오리 모양의 zeolite 결정상이 균일하게 분포되어 있음을 관찰할 수 있었다.

References

- [1] A.O. Pudon, "The action of alkali on blast-furnace slag", *J. Soc. Che. Ind.* 59 (1940) 191.
- [2] J. Davidovits, "Geopolymers: Inorganic polymeric new materials", *J. Therm. Analysis* 37 (1991) 1633.
- [3] J.-H. Lee, J.-H. Kim, Y.-R. Kim, S.-P. Kang, S.-J. Choi and M.-H. Kim, "An experimental study on the properties of concrete using bottom ash according to water-cement ratio", *Kor. Inst. Bldg. Const.* 2 (2002) 57.
- [4] D.-G. Kim, J.-H. Lee, H.-J. Lee and J.-H. Kim, "Effects of water-cement ratio on the freeze thaw resistance of

- fly ash concrete”, *Kor. Inst. Bldg. Const.* 22 (2010) 211.
- [5] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer”, *Min’l Eng.* 22 (2009) 1073.
- [6] C. Tippayasam, S. Boonsalee, S. Sajjavanich, C. Ponzoni, E. Kamseu and D. Chaysuwan, “Geopolymer development by powders of metakaolin and wastes in thailand”, *Adv. Sci. Tech.* 69 (2010) 63.
- [7] Q. Zhao, B. Nair, T. Rahimian and P. Balaguru, “Novel geopolymer based composites with enhanced ductility”, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 3131.
- [8] S. Kumar and R. Kumar, “Mechanical activation of fly ahs: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer”, *Cer. Int.* 37 (2011) 533.
- [9] E. Kamseu, A. Rizzuti, C. Leonelli and D. Perera, “Enhanced thermal stability in K_2O -metakaolin-based geopolymer concretes by Al_2O_3 and SiO_2 fillers addition”, *J. Mater. Sci.* 45 (2010) 1715.
- [10] W. Rickard, L. Vickers and A.V. Riessen, “Performance of fibre reinforced, low density metakaolin geopolymers under simulated fire conditions”, *App. Clay Sci.* 73 (2012) 71.
- [11] K.B. Han, “Current state of lightweight aggregate concrete and future perspective for artificial lightweight aggregate production”, *Kor. Const. Safety Association* 33 (2005) 34.
- [12] Z. Zhang, J.L. Provis, A. Reid and H. Wang, “Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction”, *Const. Bldg. Mat.* 56 (2014) 113.
- [13] V. Medri and A. Ruffini, “The influence of process parameters on in situ inorganic foaming of alkali-bonded SiC based foams”, *Cer. Int.* 38 (2012) 3351.
- [14] V. Medri, E. Papa, J. Dedecek, H. Jirglova, P. Benito, A. Vaccari and E. Landi, “Effect of metallic Si addition on polymerization degree of in situ foamed alkali-aluminosilicates”, *Cer. Int.* 39 (2013) 7657.
- [15] A.D. Hounsi, G.L. Nana, G. Djeteli, P. Blanchart, D. Alowanou, P. Kpelou, K. Napo, G. Tchchangbedji and M. Praisler, “How does Na, K alkali metal concentration change the early age structural characteristic of kaolin-based geopolymers”, *Cer. Int.* 40 (2014) 8953.
- [16] P. Duxon, A.F. Jimenez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo and J.S.J.V. Deventer, “Geopolymer technology: the current state of the art”, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 2917.
- [17] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee and U. Rattanasak, “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers”, *Waste Mngt.* 29 (2009) 539.
- [18] G.-S. Ryu, K.-T. Koh and Y.-S. Chung, “Analysis of mechanical properties and microstructure of fly ash based alkali-activated mortar”, *J. Kor. Inst. Res. Rec.* 21 (2012) 27.
- [19] J.G.S.V. Jaarsveld and J.S.J.V. Deventer, “Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers”, *Ind. Eng. Chem. Res.* 38 (1999) 3932.
- [20] T. Bakharev, “Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing”, *Cem. Conc. Res.* 35 (2005) 1224.
- [21] Z. Aly, E.R. Vance, D.S. Perera, J.V. Hanna, C.S. Griffith, J. Davis and D. Durce, “Aqueous leachability of metakaolin-based geopolymers with mole ratios of Si/Al = 1.5-4”, *J. Nucl. Mater.* 378 (2008) 172.
- [22] L. Weng and K.S. Crentsil, “Dissolution processes hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: part I-low Si/Al ratio systems”, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 2997.
- [23] P. Rovnanik, “Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer”, *Const. Bldg. Mater.* 24 (2010) 1176.
- [24] S. Delair, E. Prud’homme, C. Peyratout, A. Smith, P. Michaud, L. Eloy, E. Joussein and S. Rossignol, “Durability of inorganic foam in solution: The role of alkali elements in the geopolymer network”, *Corr. Sci.* 59 (2012) 213.
- [25] J.-T. Kim, D.-S. Seo, G.-J. Kim and J.-K. Lee, “Influence of alkaline-activator content on the compressive strength of aluminosilicate-based geopolymer”, *J. Kor. Cer. Soc.* 47 (2010) 216.
- [26] Concrete Standard Specification of Korea, Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016).
- [27] S.V. Joshi and M.S. Kadu, “Role of alkaline activator in development of eco-friendly fly ash based geopolymer concrete”, *Int. J. Evmnt. Sci. Dev.* 3 (2012) 417.
- [28] H. Xu and J.S.J.V. Deventer, “The geopolymerisation of aluminosilicate minerals”, *Int. J. Min’l Proc.* 59 (2000) 247.
- [29] J.T. Gourley, Paper presented at Materials 2003 Conference: Adap. Mater. Modern Soc., Sydney (2003).
- [30] A. Shoumkova and V. Stoyanova, “Zeolites formation by hydrothermal alkali activation of coal fly ash from thermal power station ‘Maritsa 3’”, *Bulgaria, Fuel* 103 (2013) 533.