

Effect of Si sludge addition on the properties of lightweight geopolymers

Minjeong Kim and Yootaek Kim[†]

Department of Materials Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received October 8, 2019)

(Revised October 21, 2019)

(Accepted October 30, 2019)

Abstract Lightweight geopolymers were fabricated with non-milled IGCC slag and Si sludge as a bloating material. The relationship between addition amount of Si sludge and physical/chemical properties of lightweight geopolymers was investigated. When the geopolymers were made by mixing IGCC slag, alkali activator, and more than 10 wt.% Si sludge, the temperature of the geopolymer pastes reached higher than 130°C in a few minutes. This exothermic reaction accelerated the geopolymer reaction; however, it was difficult to make geopolymer specimens because of a rapid bloating reaction. Both compressive strength and density of the specimens tend to decrease with an addition of Si sludge; however, there was little difference in both compressive strength and density with addition of Si sludge more than 10 wt.%. Because there was a limit to get low density geopolymers by simply increasing the addition of Si sludge, the control of pore size and distribution of geopolymer is more important by controlling flow rate of the paste through the control of W/S ratio. Therefore, it is important to control process conditions, appropriate W/S ratio for the bloating than the control of Si sludge. The optimum W/S ratio was 0.20 for the addition of Si sludge less than 30 wt.% and W/S ratio should be more than 0.28 for the addition of Si sludge more than 30 wt.%, although there was no practical application in fact.

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

Si 슬러지의 첨가가 경량지오폐리머 물성에 미치는 영향

김민정, 김유택[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2019년 10월 8일 접수)

(2019년 10월 21일 심사완료)

(2019년 10월 30일 게재확정)

요 약 분쇄되지 않은 IGCC 슬래그와 Si 슬러지를 발포제로 사용하여 경량 지오폐리머를 제조하였다. 이때, Si 슬러지 첨가량에 따른 경량 지오폐리머의 물리/화학적 특성을 파악하고자 하였다. IGCC 슬래그, 알칼리활성화제, 그리고 Si 슬러지를 5 wt.% 이상 혼합하여 지오폐리머 페이스트를 제조하면 발열반응에 의해 페이스트의 온도가 수분내에 90°C 이상 도달하였고, 이 발열반응으로 인해 지오폐리머 반응이 가속화되어 경화되었으나 너무 격렬한 발포반응 때문에 시편성형이 어려웠다. 시편의 압축강도와 밀도는 Si 슬러지의 첨가량이 증가할수록 모두 감소하는 경향을 보였으나, 10 wt.% 이상의 첨가에서는 압축강도와 밀도 모두 큰 변화를 보이지 않았다. 단순히 Si 슬러지의 첨가량 증가만으로 낮은 밀도를 달성하는 것에는 한계가 있으며 W/S 비의 조절을 통해 페이스트의 유동성을 조절하여 기공을 비교적 균일하게 제어하는 것이 중요하다고 판단되었다. 따라서, Si 슬러지 첨가량의 조절보다는 작업조건 및 기포형성에 적절한 W/S 비를 찾는 것이 중요하며, Si 슬러지 0~30 wt.% 첨가시에는 W/S 비를 0.2로, 실제 적용 가능성은 없으나 Si 슬러지 30 wt.% 이상 첨가시에는 0.28 이상으로 조절하는 것이 바람직한 것으로 사료되었다.

1. 서 론

현대 사회에서 산업이 발전함에 따라 건설 분야도 빠르게 발전하게 되어 건설 자재의 다양성이 요구 되고있

다. 이때 콘크리트 중 경량 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 경제적으로 유리하고 낮은 열전도율을 가지므로 단열효과를 갖는 특징이 있다[1]. 이는 열의 이동 속도가 고체 매질에 비해 기체 매질에서 낮다는 사실을 응용하여 공기층을 경량콘크리트 내부에 균일하게 분포시키는 방식으로 제조된다. 경량 기포 시멘트 콘크리트는 발포제를 첨가하거나 발포기에서 기포를 만들어 슬러리(slurry)

[†]Corresponding author
E-mail: ytkim@kgu.ac.kr

와 혼합하는 방식으로 제조된다. 판넬 형태로 제조되는 경량 기포 시멘트 콘크리트는 고온 고압하에서 생산되기 때문에 높은 에너지가 소비되며 시멘트 자체의 생산에서도 CO₂가 발생되기 때문에 지구 온난화의 가속에 일조한다[2].

시멘트를 대체하기 위해 등장한 지오폴리머(geopolymer)는 무기질의 비정질 물질로 실리케이트(silicate)를 포함한 다양한 알루미늄-실리케이트(alumino-silicate) 원료를 강알칼리 용액과 혼합, 저온 양생을 통해 제조한다. 이때 사용되는 원료는 원래 메타카올린(metakaolin)과 같은 고급원료를 사용하였으나, 최근에는 고로슬래그(blast furnace slag), IGCC(integrated gasification combined cycle) 슬래그, 석탄회 등과 같은 순환자원을 사용한 연구가 증가하여 자원 재활용에 기여할 수 있는 방안들이 강구되고 있다. 본 연구에서는 연간 10만톤 정도 국내에서 발생하는 IGCC 슬래그를 주원료로 사용하여 재활용을 제고를 도모하고자 하였다. 기공을 화학적으로 형성시키기 위한 발포제로 사용한 Si 슬러지는 실리콘(Si) 웨이퍼를 절삭 또는 연마하는 과정에서 발생하는 산업 폐자원이다. 이 역시 연간 2만톤 이상 발생하기 때문에 산업 부산물을 효과적으로 재활용한다는 측면에서 친환경적 발포제를 사용했다고 할 수 있다. 지오폴리머를 다공성으로 만들면 치밀한 지오폴리머보다 강도는 낮아지지만 투수성, 단열성, 흡음성이 증가된다는 장점이 있어 흡착제, 단열재, 흡음재, 필터재료 등 기능성 재료로 적용이 가능하다 [3].

본 연구에서는 IGCC 슬래그를 주원료로 하는 지오폴리머에 발포제로 Si 슬러지(sludge)를 첨가하여, Si 슬러지 첨가량에 따른 경량지오폴리머의 물성변화, 미세구조 변화, 발포 온도 비교를 통해 경량 지오폴리머의 제조조건 확립을 위한 기초자료를 확보하고자 하는 연구를 수행하였다.

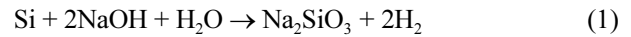
2. 실험 방법

2.1. 사용원료

본 연구에서 사용한 지오폴리머의 주원료는 IGCC(석탄가스화복합발전)에서 발생한 IGCC 슬래그를 사용하였고, 발포제로는 Si 반도체 웨이퍼 제조과정에서 발생하는 Si 슬러지를 사용했다. 지오폴리머 주원료가 비정질일 경우 높은 pH의 알칼리활성화제(alkali activator)를 만나면 빠르게 이온 용해가 발생하여 지오폴리머의 3차원 알루미늄-실리케이트 망목구조(alumino-silicate network)를 형성한다. IGCC 슬래그는 XRD 측정 결과 비정질임을 확인할 수 있었으며, 지오폴리머 경량화를 위한 발포 물

질로 사용된 Si 슬러지의 XRD 측정 결과 순수한 Si 결정상인 것으로 확인되었다[4]. Si 성분이 알칼리활성화제와 반응하여 Eq. (1)에서와 같은 반응에 의해 수소가스(H₂ gas)가 발생하고 시편 내부에 기공을 형성하게 된다 [5].

IGCC 슬래그 내의 Al, Si 이온을 용해시키는 역할을 하는 알칼리활성화제는 소다라이트(sodalite) 광물을 제외한 대부분의 알루미늄-실리케이트 광물에서 더 높은 이온 용해도를 갖는 NaOH를 선정하여 사용했다[6].



2.2. 실험조건 및 절차

Table 1은 이 연구에서 진행한 실험들의 조성 및 세부 실험조건들을 나타내고 있다. 실험은 Fig. 1의 순서로 진행되었으며 미분쇄 IGCC 슬래그의 경우 5 mm 이하 체로 1차 선별한 후 더 이상의 원료가공 없이 곧바로 지오폴리머 제조에 사용되었으며, Si 슬러지의 경우 입수상태부터 160 μm 이하였기 때문에 더 이상의 분쇄없이 그대로 사용하였다. 준비된 IGCC 슬래그와 발포제(Si 슬러지)를 볼밀(ball mill)로 10분 이상 혼합한 다음, 증류수에 계산된 몰(mol)비만큼 녹여 제조한 NaOH 용액(DAEJUNG CHEMICALS, 97 wt.%)과 규산나트륨 용액(Na₂SiO₃·nH₂O, DAEJUNG CHEMICALS, Na₂O: 9~10 wt.%, SiO₂: 28~30 wt.%)을 1:1 비율로 혼합하여 복합 알칼리활성화제를 준비하였다.

Table 1
Experimental conditions for making lightweight geopolymers

W/S ratio	Alkali activator	Alkali activator (mol)	Si sludge (wt.%)
0.2~0.30	Mixed alkali activator	12	0
			10
			20
			30
			40
0.22	Mixed alkali activator	15	50
			0
			0.05
			0.1
			0.5
			1.0
			3.0
			5.0
			10.0
20.0			
50.0			
0.2		9~15	0.1
			0.2
			0.3

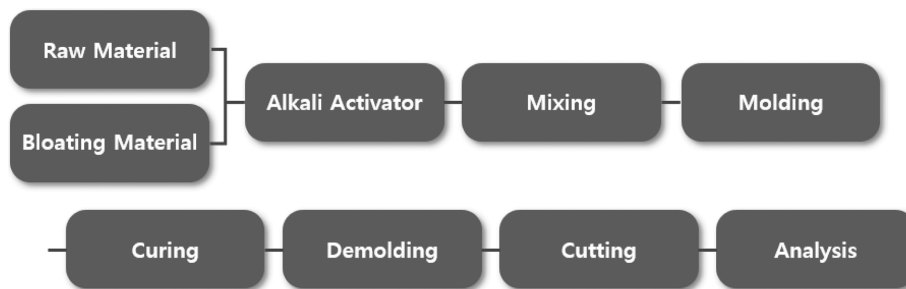


Fig. 1. A schematic diagram of experimental procedures.

준비된 복합 알칼리활성화제 용액과 불밀에서 혼합한 원료를 잘 혼합한 후 몰드에 부어 성형하였다. 성형된 시편은 건조기에서 비닐로 밀봉한 후 70°C로 24시간 양생 후, 탈형을 진행하고 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 크기로 시편을 잘라 압축강도와 밀도를 측정하였다[7]. 시편의 온도는 저온 측정용 열전대를 측정하고자 하는 시편 페이스트 내부에 매립하여 측정하였다. 70도에서 24시간 양생은 성형후 모든 시편에서 진행되었으며, Si 함유량에 대한 시편 페이스트의 온도 측정은 별도의 실험으로 진행되었다.

3. 실험 결과

3.1. Si 슬러지 첨가시 발열반응

Si 슬러지를 발포(bloating) 물질로 사용했을 때 Si 슬러지 첨가량에 따라 지오폐리머 페이스트(paste)의 온도를 시간에 따라 측정한 결과는 Fig. 2와 같다. 이 실험에서 W/S 비(water/solid 무게비)는 모두 0.22로 고정하였다. Si 슬러지의 첨가량을 증가시키기에 따라 발열온도가 증가하는 경향을 보였으며 급격하게 온도가 증가하는 시점이 빨라졌다. 온도가 급격하게 증가하는 시점이 빨라지는 것은 발열(발포) 반응이 시작되는 시기가 앞당겨졌다는 것을 의미하며, 온도가 고온으로 유지된다는 것은 유지시간동안 발포반응이 충분히 진행되어 발열량을 계속 유지시키기 때문에 이 기간 동안 시편에 충분한 기공이 형성된다고 해석할 수도 있다. 하지만, Si 슬러지 3 wt.% 이하 첨가 시편의 경우 발포가 일어나지 않는 것은 아니며, 발열량이 부족하여 온도상승이 관찰되지 않은 것으로 사료되어진다. 따라서, Si 슬러지 첨가량이 증가할수록 기공의 크기가 커지고 분포가 많아질 것으로 예측되었다.

지오폐리머 반응과 Si 슬러지의 발포 반응을 비교한다면 지오폐리머 반응 결과물의 Gibbs Free Energy보다 Si 슬러지의 발포 반응이 더 낮은 값을 갖기 때문에 Si 슬러지의 발포반응이 지오폐리머의 경화 반응보다 먼저 발생한다[7]. 또한 시편의 온도상승은 지오폐리머 경화반

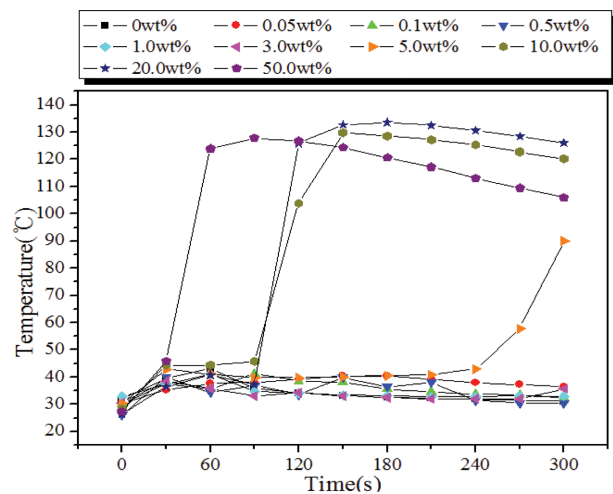


Fig. 2. Geopolymer paste temperature according to the addition of Si sludge.

응을 촉진시킨다[8]. Si 슬러지를 첨가하지 않았을 때에도 43.1°C까지 온도가 증가했는데 이는 지오폐리머 결합을 생성하기 위해 발생된 발열반응 때문으로 사료된다. Si 슬러지 함량이 3.0 wt.% 이하의 페이스트 모두 45°C 부근에서 유지되고 있는 것을 보면, 이들 조건에서는 Si 슬러지의 첨가량이 적어 급격한 발포반응은 일어나지 않고 발포반응과 지오폐리머화(geopolymerization) 반응이 동시에 천천히 일어나고 있다는 것을 미루어 짐작할 수 있다. Figure 2에서 Si 슬러지를 3.0 wt.% 이하로 첨가했을 경우, 온도 상승 곡선이 나타나기 전에 즉, 300 s 이전에 본격적인 발포반응이 일어나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Si 슬러지 20 wt.% 170 s 경과 시, 133.5°C로 가장 높은 온도가 발생했으며 10 wt.% 이상 첨가한 시편들에서 모두 급격한 발열반응으로 인해 페이스트의 급결 현상이 발생했다. 20 wt.%에서 가장 높은 발열 온도가 발생한 것은 그 이상 첨가하더라도 발포반응은 더 격렬하게 진행되고 최고 온도까지 도달하는 시간은 짧아지나, 시편에 기공이 많아지고 페이스트가 급속히 응고되어 발열반응이 더 이상 진행되지 않고 종결단계로 접어들기 때문에, 시편의 온도를 더 올리기에 페이스트 내부에서 발

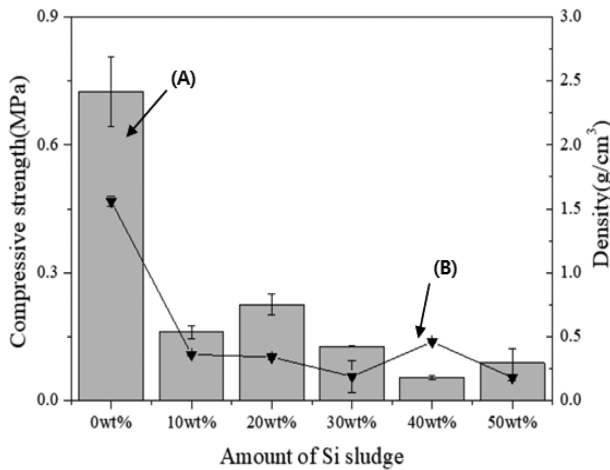


Fig. 3. Properties of lightweight geopolymers according to the addition of Si sludge: (A) Compressive strength and (b) density.

생되는 열과 시편이 외부대기에 의해 냉각되는 열의 균형이 맞아 더 이상의 페이스트 온도상승은 일어나지 않는 것으로 사료된다. 페이스트의 급속한 경화에 의해 발포반응이 급격히 감소하게 되면 발포 반응에 참여하지 못한 미반응 잔존 Si 슬러지가 지오폐리머 반응에도 참여하지 못하고 그대로 시편 내부에 남아 기계적 물성에 악영향을 끼치게 되는 것으로 판단된다. 이는 다음절에서 설명할 Si 슬러지 첨가량과 압축강도의 상관 관계와도 잘 일치되고 있다(Fig. 3 참조). 본 실험에서는 W/S 비를 고정시켰으나 발포 반응을 충분히 일으키기 위해 W/S 비를 증가시킨다면 발포반응은 증가하겠지만, 시편 자중을 지탱하지 못할 만큼 불균일하고 거대한 기공이 발생하여 우리가 원하는 시편모양으로 성형이 불가능하게 되어 너무 높은 W/S 비 역시 바람직 하지 않은 것으로 판단되었다. 또한 Si 슬러지의 첨가량에 따라 지오폐리머 페이스트의 작업성이 달라지기 때문에 첨가량별 최적의 W/S 비 산출이 필요하다고 생각되었다. 300 s 이후의 온도 경향은 더 이상의 특이사항 없이 모든 시편이 시간이 경과함에 따라 45°C 부근으로 수렴하였기 때문에 여기서는 300 s 까지의 데이터만을 보여주었다.

3.2. Si 슬러지 첨가가 물성에 미치는 영향

원료를 분쇄하지 않고 5 mm 채거름만 한 상태의 입도가 큰 벌크(bulk)상태 원료를 사용하여 지오폐리머 시편을 제조하고 압축강도와 밀도를 측정하여 얻은 결과는 Fig. 3과 같다. Figure 3의 시편들에 대한 제조 조건은 Table 1에서와 같이 모두 동일한 조건이 아닌 즉, W/S 비가 동일하지 않고 작업조건 및 탈형조건을 고려하여 온전한 시편 즉, 물성시험을 수행할 수 있을 만한 시편을 얻을 수 있게끔 W/S 비를 조절하여 시편을 제작하였

다. 구체적으로는, Si 슬러지 0~30 wt.% 첨가 시편에서는 W/S 비를 0.2로 고정하였으며, Si 슬러지 40~50 wt.% 첨가 시편에서는 성형상의 문제로 W/S 비를 0.28~0.30으로 조정하여 사용하였다. 물론 W/S의 비가 지오폐리머 물성에 미치는 영향은 매우 크지만[9], 본 실험에서는 W/S 비를 고정시킬 경우 제대로 된(물성 시험이 가능한) 시편을 얻기 어려웠기 때문에 온전한 시편획득이 가능한 조건에서 W/S 비를 최소한으로 변화시키면서 Si 슬러지 첨가량 변화에 따른 지오폐리머의 물성변화를 관찰하였다.

Figure 3에서 보는 바와 같이 원료를 분쇄를 하지 않고 벌크상태 그대로를 사용했기 때문에 Si 슬러지 발포제를 첨가하지 않은 시편에서도 낮은 압축강도(0.507 MPa)가 나타났다. 그 이유는 주원료의 낮은 비표면적으로 인해 원료로부터 이온들의 용출이 적게 일어나 Si-O-Al 결합에 의한 네트워크 형성이 충분히 일어나지 않아 지오폐리머 성형체 겔(gel)의 경화가 진행되지 못한 것으로 보인다[10]. 또한, 지오폐리머 반응시 H₂O가 주 원료의 작은 비표면적 때문에 지오폐리머 반응에 충분히 참여하지 못하는 대신, Si 슬러지와 주로 반응하여 많은 양의 수소가스를 발생시킬 뿐만 아니라, 3.1절에서 이미 설명한 발열반응으로 인해 시편의 온도를 물의 끓는점 이상으로 상승시켜 많은 양의 수분을 증발시켜 비정상적으로 큰 기공들을 형성 시킴으로서 낮은 압축강도를 보인 것으로 사료된다.

W/S 비를 2.0으로 고정시키고 Si 슬러지의 첨가량을 0 wt.%에서 30 wt.%까지 증가시킨 결과 슬러지의 첨가량이 증가될수록 시편의 작업성은 나빠져 온전한 시편을 얻기 어려웠다. 따라서 발포제의 양이 증가함에 따라 적합한 작업성을 갖는 W/S 비를 찾아 온전한 시편을 제조하는 것이 필요하다는 판단을 하였다. 시편 성형에 많은 문제점이 있었음에도 불구하고, W/S 비를 고정시키고 Si 슬러지의 첨가량을 0 wt.%에서 30 wt.%까지 증가시킨 결과 Fig. 3에서 볼 수 있듯이, Si 슬러지의 첨가량이 증가할수록 압축강도는 감소하고 밀도는 급격하게 작아지는 경향을 보였다. 물론 Si 슬러지를 첨가하지 않은 시편과 비교하여 Si 슬러지를 첨가한 시편의 경우 압축강도가 0.5 MPa 정도 급격하게 감소하였으나 Si 슬러지를 10 wt.% 이상 첨가한 경우에도 압축강도는 10 wt.% 첨가 시편과 비교할 때 압축강도는 큰 감소를 보이지 않았다. 물론 같은 W/S 비에서는 아니지만, 10 wt.%에서 50 wt.%까지 Si 슬러지를 첨가한 경우 압축강도 값이 비슷하거나 오히려 증가하는 경우도 있었다. 밀도의 경우 Si 슬러지를 0 wt.%에서 10 wt.%로 증가시켰을 때 밀도는 크게(약 1.3 g/cm³) 감소하여 밀도는 0.4 g/cm³ 이하로 측정되었다. 이후 Si 슬러지를 50 wt.%까지 첨가하여도 밀도는 크게 감소하지 않았다.

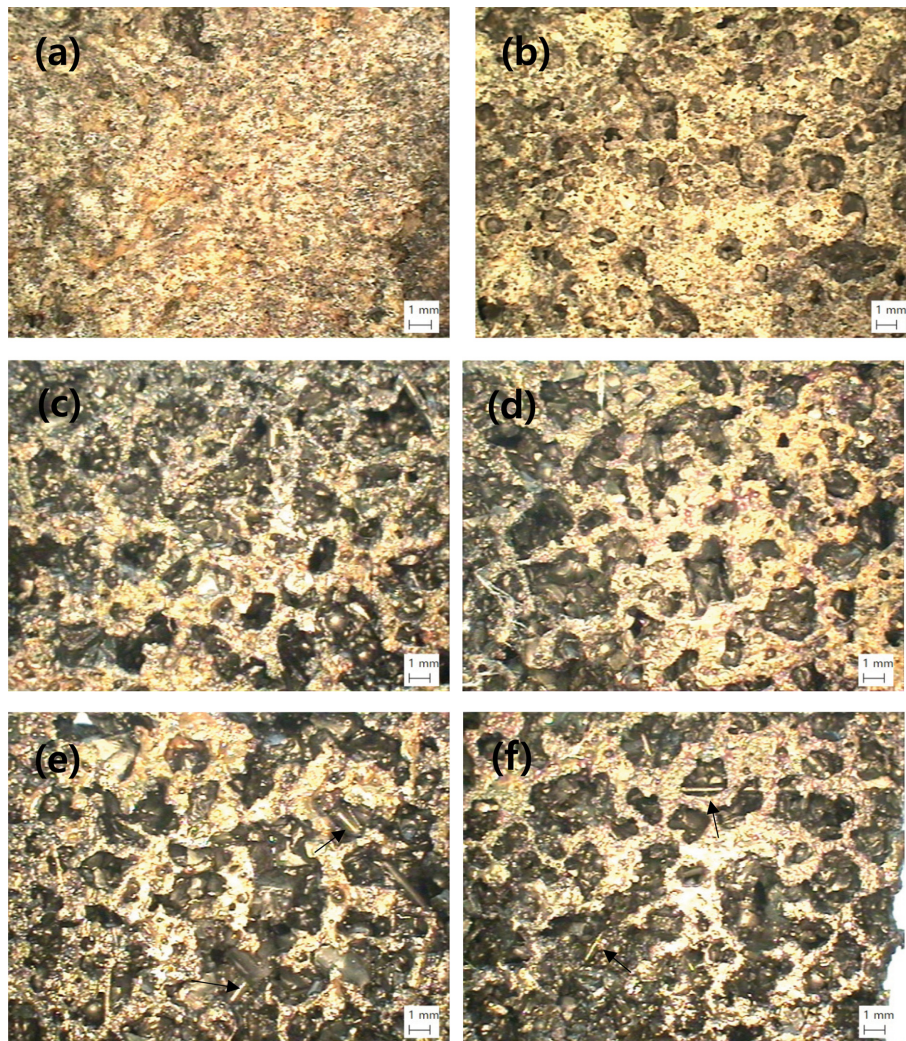


Fig. 4. Specimen morphologies of lightweight geopolymers according to the addition of Si sludge. (a) 0 wt.%, (b) 10 wt.%, (c) 20 wt.%, (d) 30 wt.% with W/S ratio 0.2, (e) 40 wt.% with W/S ratio 0.28, and (f) 50 wt.% with W/S ratio 0.30.

W/S 비 2.0에서 Si 슬러지를 40 wt.% 및 50 wt.% 첨가한 시편은 작업성이 좋지않아 지오폐리머 시편성형에 실패하여 물성측정이 불가하였기 때문에 이들 시편들의 W/S 비를 0.28, 0.30으로 증가시켜 실험을 진행하였다. Si 슬러지 40 wt.%, W/S 비 0.28의 시편은 탈형이 어려웠다. 이는 발포제 첨가량에 비해 W/S 비가 컸기 때문으로 사료된다. 발포제 양에 비해 높은 W/S 비는 페이스트에 존재하는 수분이 빠져나가는 과정에서 시편 내부에 형성된 기공들의 연결을 증가시켜 개기공의 형성에 영향을 주고 그 이유로 동일한 밀도에서 낮은 압축강도가 발현되게 하거나, 지오폐리머 겔이 발생된 개기공을 지지할 수 없을 경우 시편이 붕괴되는 현상을 발생시킨다. 발포제 50 wt.% 첨가 시편의 경우 40 wt.% 시편에 비해 압축강도는 더 높게 발현되었고 밀도 역시 높게 나타났다는데 그 이유는 Si 슬러지를 10 wt.%나 더 첨가했음에도 불구하고 W/S 비는 0.30으로 0.02 만큼 소량

증가시켰기 때문에 수분부족으로 인해 상대적으로 40 wt.% 첨가시편에 비해 발포반응이 충분히 일어나지 못한 것으로 판단된다. 따라서, Si 슬러지 50 wt.% 첨가 시, 적합한 W/S 비는 0.3 이상으로 판단되었다.

Figure 4에서는 Fig. 3의 시편들에 대한 윗표면 기공구조를 보여주고 있다. 발포제를 첨가하지 않은 일반 지오폐리머(Fig. 4(a))는 매끈한 표면과 다양한 모양을 갖는 Bulk 입자가 분포되어 있으며 기공은 거의 존재하지 않았다. 그에 반해 발포제를 첨가한 발포 지오폐리머(Fig. 4(b)~(f))는 최대 1.5 mm까지 증가한 기공이 많이 분포되어 있으며 발포제의 양이 많아질수록 기공크기가 커지며 거대기공의 분포역시 증가하는 것을 알수 있었다. 특히 20 wt.% 이상 첨가한 시편들의 경우에는 겔의 경화가 시작되기 전 작은 크기의 기공이 서로 연결되어 성장한 것으로 보이는 거대기공들이 많이 관찰되었다[11]. 또한, 발포제의 첨가량이 증가할수록 기공의 크기가 커져 분쇄

되지 않은 침상형태 및 거대크기(수 mm 크기)의 Bulk IGCC Slag 입자들(그림에 화살표로 표시)이 기공을 관통하여 존재하는 것도 관찰할 수 있었다. Figure 4의 사진상에서는 시편별 기공율이 차이가 많이 나는 것으로 보이나, 10 wt.% 이상 첨가한 경우 매우 급격한 발포가 진행되어 시편 페이스트가 몰드에서 흘러나가 큰기공이 형성된 부분은 손실되고, 비교적 작은 기공들로 형성된 부분만 몰드내에 남아 밀도의 차이가 크게 나지 않는 것으로 보인다. 특히 몰드의 아래부분에 위치한 시편 아랫표면의 기공크기 및 분포는 Si 첨가량과 관계없이 비교적 일정한 것을 확인할 수 있었다.

Si 슬러지 40 wt.% 첨가 시편의 밀도는 0.054 g/cm^3 로 과거의 연구결과인 발포제 100 wt.% 첨가한 시편과 비교할 때 보다도 낮은 밀도가 발현되었으며[7], 이를 통해 단순히 발포제의 첨가량 증가만으로 낮은 밀도를 달성하는 것에는 한계가 있으며 주원료의 입도와 W/S 비의 조절을 통해 페이스트의 유동성을 조절하여 기공을 비교적 균일하게 제어하는 것이 필수적이라고 판단했다. 본 실험에서는 경제성을 고려하여 벌크상태의 원료를 이용하여 실험을 진행하였으나 높은 압축강도를 목표로 한다면 고강도를 갖는 지오폐리머 Gel 형성을 위해 낮은 입도를 갖는 원료를 이용해야 할 것이다. 또한, 높은 W/S 비는 페이스트의 흐름성(flow rate)을 증가시켜 작업성을 향상시키고, 시편의 충분한 발포에는 도움을 주지만 불균일한 기공을 발생시켜 낮은 압축강도가 발현되기때문에 항상 긍정적이지만은 않은 것으로 사료되었다. 결론적으로, Fig. 3과 Fig. 4에서 보듯이 벌크상태의 원료를 사용하여 10 wt.% 이상의 Si 슬러지 첨가는 큰 의미가 없어 보이며, Si 슬러지 첨가량의 조절보다는 작업조건 및 기포형성에 적절한 W/S 비를 찾는 것이 더 중요하다고 판단되었다.

4. 결 론

분쇄 되지않은 IGCC 슬래그와 Si 슬러지를 발포제로 사용하여 경량 지오폐리머를 제조하였고 Si 슬러지의 첨가량에 따른 지오폐리머 페이스트의 온도, 압축강도, 밀도, 적정 W/S 비에 대한 관계를 알아보았다.

1) Si 슬러지 첨가량이 증가할수록 발열반응이 빨리 진행되었으며 최고온도 133°C 까지 페이스트의 온도가 올라갔다. 하지만 3 wt.% 이하의 첨가에서는 발열반응이 300 s 내에 일어나지 않았으나 지오폐리머 반응에 의해 페이스트이 온도는 43°C 로 유지되었다. 10 wt.% 이상 Si 슬러지를 추가한 경우에는 급격한 페이스트의 온도상승 즉, 격렬한 발열반응에 의한 거대기공 형성과 더불어 페이스트이 경화가 촉진되어 시편의 성형이 어려웠다.

2) Si 슬러지 첨가량이 증가함에 따라 압축강도와 비중은 동시에 감소하는 경향을보였으나, Si 슬러지의 양이 30 wt.% 이상 첨가되는 경우 페이스트의 작업성이 나빠져 같은 W/S 비에서 시편을 제조할 수 없었다. Si 슬러지의 양이 30 wt.% 이상 첨가되는 경우엔 W/S 비가 0.28 이상으로 조절되어야 성형이 가능하였다.

3) 단순히 Si 슬러지의 첨가량 증가만으로 낮은 밀도를 달성하는 것에는 한계가 있으며 W/S 비의 조절을 통해 페이스트의 유동성을 조절하여 기공을 비교적 균일하게 제어하는 것이 필수적이라고 판단했다. 따라서 벌크상태의 원료를 사용하여 10 wt.% 이상의 Si 슬러지를 첨가하는 것은 실 적용에 어려움이 있다고 판단되며, Si 슬러지 첨가량의 조절보다는 작업조건 및 기포 형성에 적절한 W/S 비를 찾아 각종 물성 시험이 가능한 시편의 제조 조건을 확립하는 것이 중요하다는 결론을 내릴 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2019학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

References

- [1] K.B. Han, "Current state of lightweight aggregate concrete and future perspective for artificial lightweight aggregate production", Kor. Con. Saf. Asso. 33 (2005) 34.
- [2] J.L. Bell and W.M. Kriven, "Preparation of ceramic foams from metakaolin-based geopolymer gels. Developments in strategic materials: Ceramic engineering and science proceedings", Cer. Eng. Sci. Proc. 29 (2009) 96.
- [3] M. Zeiml, D. Leithmer, R. Lackner and H.A. Mang, "How do polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete?", Cem. Conc. Res. 36 (2006) 929.
- [4] K. Komnitsas and D. Zaharaki, "Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry", Min. Eng. 20 (2007) 1261.
- [5] J.P. Wu, A.R. Boccaccini, P.D. Lee and R.D. Rawlings, "Thermal and mechanical properties of a foamed glass ceramic material produced from silicate waste", Gla. Tech. 48 (2007) 133.
- [6] L. Soler, "In situ generation of hydrogen from water by aluminum corrosion in solutions of sodium aluminate", Pow. Sour. 192 (2009) 21.
- [7] Y.T. Kim, S.Y. Kim and C.S. Jang, "Fabrication of porous geopolymer using fused slag with silicon sludge", Jou. Cer. Pro. Res. 17 (2016) 1202.
- [8] 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”, *Cer. Int.* 39 (2013) 7657.
- [9] M.S. Jansen and M.U. Christiansen, “Effect of water-solids ratio on the compressive strength and morphology of fly ash-waste glass geopolymer mortars”, *WOCA Con.* (2015).
- [10] L. Asso, E. Eddie and P. Ziehl, “Effect of source and particle size distribution on the mechanical and micro-structural properties of fly Ash-Based geopolymer concrete”, *Cons. Bui. Mat.* 167 (2018) 372.
- [11] S.J. Lee, E.M. An and Y.H. Cho, “Effect of foaming agent content on the apparent density and compressive strength of lightweight geopolymers”, *J. Rec. Const. Res.* 4 (2016) 363.