

Manufacturing of geopolymers for replacing autoclaved lightweight concrete panels

Minjeong Kim and Yootaek Kim[†]

Dept. of Materials Eng., Kyonggi University, Suwon 16227, Korea

(Received January 7, 2020)

(Revised January 14, 2020)

(Accepted January 22, 2020)

Abstract Lightweight geopolymers were fabricated by using fused slag from integrated gasification combined cycle as a raw material and Si sludge from silicon wafer process as a bloating material for the purpose of replacing autoclaved lightweight concrete (ALC). Density and compressive strength of geopolymers were measured and compared with the properties of ALC according to the variation of mol concentration of alkaline activator, W/S ratio, addition of fibers, and addition of polystyrene and the possibility of replacing ALC panel was estimated through the comparisons. Although the geopolymer satisfying the standard of ALC panel was not made by controlling mol concentration and W/S ratio, addition of inserts such as fibers and polystyrene insert was tried to overcome the obstacle of enhancing properties. Geopolymers cannot satisfying the standard of ALC panel by adding carbon or glass fibers; however, adding fibers can be suggested as one of the methods enhancing compressive strength because the compressive strength of the specimen containing 0.3 wt.% glass fibers was increased by 3 times. The maximum addition of polystyrene insert was turned out to be 50 vol.% and the properties of geopolymers varied by the method of insertion. When using single polystyrene insert, compressive strength was 17.8 MPa and density was 0.996 g/cm³ which were similar values to the standard of ALC panel. If the difficulties of reproductivity of production and insertion method of inserts were overcome through the future research, the geopolymers containing polystyrene inserts could possibly replace ALC panel.

Key words Lightweight geopolymers, Si sludge, ALC, Compressive strength, Polystyrene insert

ALC 패널 대체용 지오폴리머의 제조

김민정, 김유탉[†]

경기대학교 신소재공학과, 수원, 16227

(2020년 1월 7일 접수)

(2020년 1월 14일 심사완료)

(2020년 1월 22일 게재확정)

요약 본 연구에서는 ALC 패널을 대체하고자 석탄가스화 복합발전에서 배출되는 용융 슬래그를 주원료로 실리콘 웨이퍼 부산물로 발생하는 Si sludge를 발포제로 경량 지오폴리머를 제조하여 알칼리 활성화제의 몰 농도, W/S 비, Fiber, Polystyrene(스티로폼) 첨가에 따른 비중과 압축강도 등의 물리적 특성을 측정하고 ALC 판넬 대체 가능성을 분석/비교 하였다. W/S 비, 알칼리 활성화제의 몰 농도 조절을 통해 ALC 기준에 부합되는 시편을 만들 수는 없었으나 이를 섬유상 물질 및 스티로폼 등의 외부물질을 첨가하여 물성향상 한계의 벽을 뛰어넘고자 하였다. 유리섬유와 탄소섬유 첨가 지오폴리머는 ALC 패널의 기준에 도달하지 못했지만, 유리 섬유 0.3 wt.%를 첨가한 경우 압축강도가 3배 이상 증가했다는 면에서 경량 지오폴리머의 압축강도를 크게 향상시키는 방법으로 제시될 수 있었다. 스티로폼 첨가 시편의 경우 스티로폼 최대 첨가량은 50 vol.%였으며, 삽입물의 첨가 방법에 따라 물성이 크게 변화하였다. 단일 삽입물을 첨가한 경우 강도 17.8 MPa 밀도 0.996 g/cm³으로 ALC 패널 기준과 유사한 물성을 얻을 수 있었다. 향후연구를 통해 시편제조 재현성 및 제조방법의 어려움을 극복한다면, 스티로폼 삽입 지오폴리머는 ALC 패널을 대체할 가능성이 충분히 있다고 판단되었다.

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

1. 서 론

2000년대 이후 온실가스에 의한 환경문제가 사회적으로 이슈화 됨으로써, 제조과정에서 다량의 CO₂를 배출하는 시멘트를 대체할 수 있는 저탄소 시멘트계 재료의 개발 요구가 증대되어 호주, 미국, 유럽 등을 중심으로 플라이애쉬(fly ash), 고로슬래그(blast furnace slag) 등을 이용한 알칼리 활성화 콘크리트에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1].

건축물의 고층화에 따른 건물 자중에 대한 문제점이 발생하면서 구조물의 중량 부담을 경감하기 위해 단열재, 방음재, 슬라브 채움재 등의 용도로 사용되는 비구조용 경량콘크리트 제품의 사용이 급격하게 늘어나고 있는 추세이다. 경량 콘크리트는 크게 경량골재 콘크리트, 경량 기포콘크리트, 무세골재콘크리트로 구분할 수 있다. 특히 경량기포콘크리트(autoclaved lightweight concrete: ALC)는 외국에서는 이미 범용화 되었으며, 국내에서는 주로 경량블록 등의 건식건축자재로 사용되고 있다[2]. ALC 패널은 시멘트를 사용하며 별도로 오토클레이브(autoclave) 양생 공정을 필요로 한다. 이산화탄소의 주발생원인인 시멘트를 이용한다는 점과 소모되는 에너지가 큰 오토클레이브 양생 공정을 거쳐야 한다는 점을 보아 미래의 환경문제를 고려한다면 ALC 패널을 대체할 수 있는 새로운 건축 자재의 등장이 필수적이다.

시멘트를 대체하기 위한 노력은 1839년 R. Feret에 의해 시도된 이후 많은 성과를 얻어 왔으나, 시멘트를 전혀 사용하지 않은 지오폴리머 콘크리트는 1978년에 프

랑스의 Davidovits가 알칼리 활성화 콘크리트를 세계 최초로 개발하였으며 그 후 여러 연구자들에 의해 연구가 수행되었다. 최근 환경문제가 사회적으로 이슈화됨에 따라 호주, 미국, 유럽 등을 중심으로 산업 부산물을 이용한 연구가 활발히 진행되어 실용화가 이루어지고 있다[3]. 따라서 본 연구에서는 환경보전, 에너지 절감, 경제성 제고 등을 위해 순환자원들을 재활용할 뿐만 아니라, ALC 제조에 사용되는 오토클레이브 공정을 사용하지 않고, 상온 상압에서 ALC 패널과 비슷한 물성을 가질 수 있는 지오폴리머(geopolymer) 제조공정조건을 연구하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 재료

본 연구에서는 지오폴리머를 제조하기 위한 원료로 IGCC(integrated gasification combined cycle) 슬래그를 사용하였다. IGCC 슬래그의 경우 석탄가스화 복합발전에서 발생하는 부산물로 슬래그 미립자 분쇄용 분쇄기를 통해 미분쇄하였다. Table 1에는 XRF 분석결과를 보여주고 있으며, 35.81 wt.%의 Al₂O₃, 29.71 wt.%의 SiO₂, 22.66 wt.%의 CaO 성분으로 대부분 구성 되어있는 것을 확인했다. XRD 측정 결과 Fig. 1에서와 같이 비정질 피크를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

이번 ALC 대체 경량 지오폴리머 연구에서 발포제로는

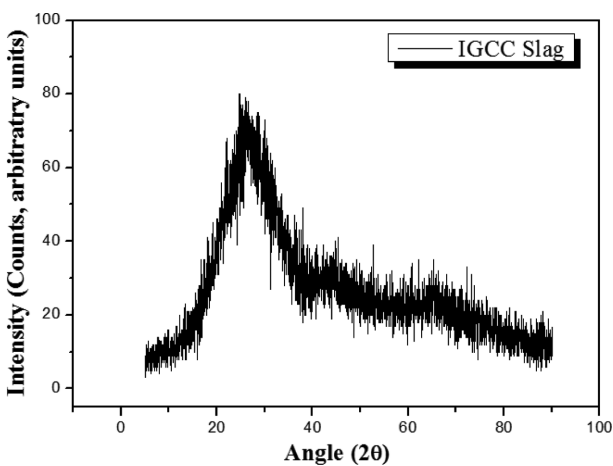


Fig. 1. XRD pattern of IGCC slag.

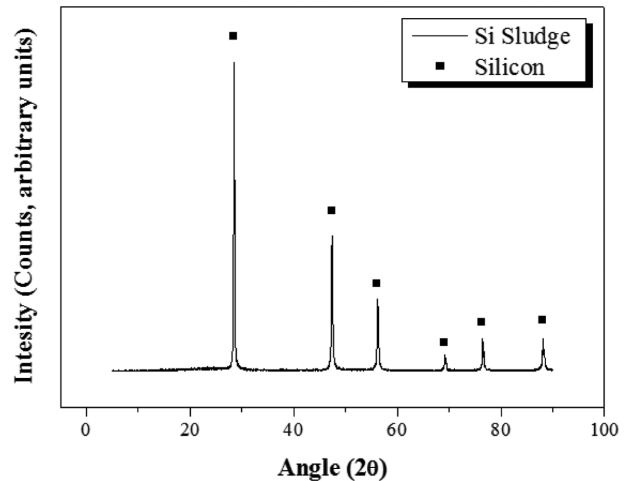


Fig. 2. XRD pattern of Si sludge.

Table 1
Chemical composition of Si sludge determined by XRF (wt.%)

Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
wt.%	29.71	35.81	0.15	22.66	0.64	7.75	0.39	0.40	0.50

Si sludge를 이용했고 Si sludge는 실리콘 웨이퍼 제조 중 절단 공정에서 발생하는 부산물로 많은 양의 실리콘 카바이드, 실리콘 입자 그리고 절삭유 등이 함유되어있다[4]. 원료 준비 시, Bulk 상태의 원료를 분쇄 후 140 메시(mesh) Sieve(testing sieve, Chung gye industrial mgf., Korea)로 체거름하여 사용하였다. Si sludge의 기초 물성을 분석하기 위해 XRD 분석을 진행했다. Figure 2와 같이 결정질 silicon 피크를 갖고있는 것을 확인할 수 있었다.

2.2. 실험조건 및 절차

ALC 패널 대체 경량 지오폐리머를 제작하기 위한 실험 변수로는 water/solid ratio(W/S ratio), 알칼리 활성화제의 물 농도, Si sludge의 첨가량, Fiber의 첨가, Polystyrene의 첨가에 따라 실험을 진행했고, 배합비는 Table 2에 나타냈다. 실험 절차는 Fig. 3과 같이 진행했다. IGCC slag, Si sludge, Al₂O₃ Ball 15개(10 mm)를 볼밀용 HDPE 광구병에 넣고 볼밀을 이용하여 117 RPM에서 10분 이상 혼합하였다. 이후 알칼리 활성화제와 Na₂SiO₃를 첨가하고 모르타르 믹서(mortar mixer)를 이용하여 5분 이상 혼합하였다. Fiber 첨가 실험 시, 볼밀 혼합 후 Fiber를 첨가하여 혼합 후 알칼리 활성화제를 혼합하였다. 모르타르 압축 강도 측정용 큐브 금형(5 × 5 × 5 cm³)에 페이스트를 채워넣고 건조기(70°C)에서 24시간 고온 양생을 실시한다. 고온 양생 시, 급격한 수분 증발로 발생하는 크랙을 방지하기 위해 폴리에틸렌 봉투에 넣었고 양생 후 3일간 재령 후 분석했다. 발포 지오폐리머는 경화하

기 전 발포가 발생하여 높이가 5 cm 이상이므로 압축강도와 밀도를 재기 위해 시편의 밑면에서부터 버니어캘리퍼를 이용하여 5 cm를 측정하였다. 분석에 적합한 시편의 크기(5 × 5 × 5 cm³)를 고려하여 측정 높이에서 Diamond saw로 시편을 절단하였다.

ALC 패널은 다양한 발포 방법으로 다량의 기공을 시편 내부에 형성시켜 일반 블록보다 가벼운 특성을 갖는다. 발포 방법으로는 선 발포 방식, 후 발포 방식으로 나뉘는데 발포기에서 기포를 생성시켜 이를 슬러리와 혼합하는 방식이 선 발포 방식, 발포제를 첨가하여 가스가 방출되는 화학반응으로 기포를 만드는 방식이 후 발포 방식이다[5]. 본 연구에서는 Si sludge를 IGCC Slag와 혼합한 후 알칼리 활성화제와 혼합하여 화학반응을 통해 수소 가스를 발생시켜 시간이 경과함에 따라 발포가 진행되는 후 발포 방식을 택했다.

3. 실험 결과

3.1. W/S 비, 발포제 첨가량, 알칼리 활성화제 농도가 지오폐리머 물성에 미치는 영향

Figure 4에서 보는 바와 같이, Si 슬러지 첨가량이 증가할수록 압축강도와 밀도는 감소했다. W/S 비 0.2에서 Si 슬러지 0.1 wt.%, 9M 시편의 압축강도는 13.868 MPa, 밀도는 1.32 g/cm³, Si 슬러지 0.3 wt.%, 9M 시편의 압축강도는 6.032 MPa, 밀도는 0.992 g/cm³로 같은 물농도에서 Si 슬러지의 양이 3배로 증가하였을 때, 압축강도

Table 2
Experimental conditions for making lightweight geopolymers used in each section

Samples used in section	W/S	Alkali activator	Alkali activator (M)	Si sludge (wt.%)	Fiber (wt.%)	Polystyrene (vol.%)
3.1.	0.20, 0.22	Mixed alkali activator	9, 12, 15	0.1, 0.2, 0.3	-	-
3.2.1 3.2.2	0.235 0.235, 0.240		15	0.1	Glass 0.0~0.3 Carbon 0.0~3.2	-
3.2.3	0.2~0.24		15	-	-	50

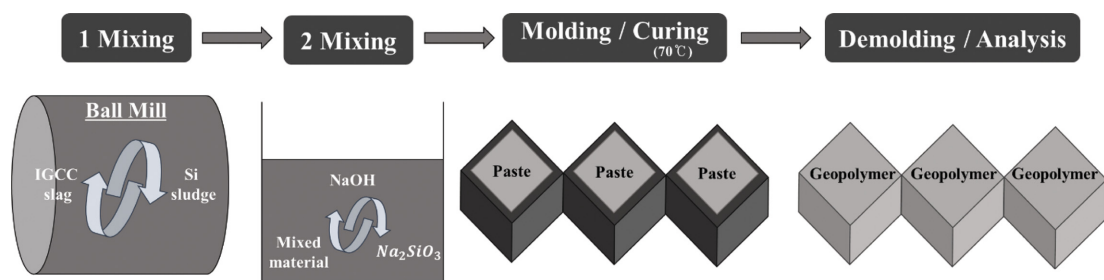


Fig. 3. A schematic diagram of experimental procedures.

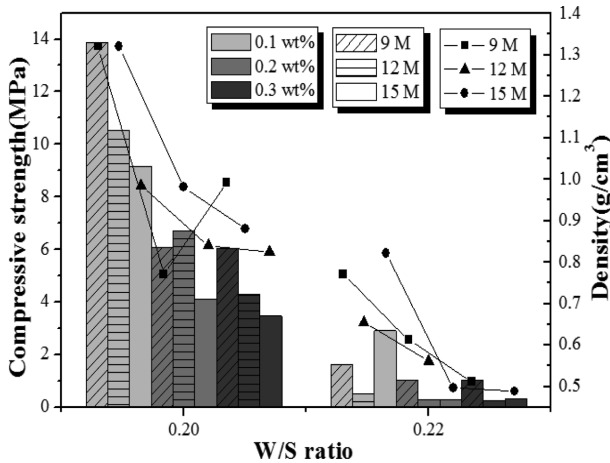


Fig. 4. Compressive strength and density of geopolymers according to the mol concentration of alkaline activator, amount of Si sludge addition, and W/S ratio. Bars and scattering dots in the graph represent compressive strength and density, respectively.

는 50% 이상 감소했으나 밀도는 약 30% 정도 감소했다. W/S 비 0.22에서는 물농도가 올라갈수록, Si 슬러지의 첨가량이 많아질수록 압축강도와 밀도는 감소하는 일반적인 경향을 보였으나, 압축강도와 밀도의 감소율을 직선적이지 않았고 일정한 관계를 찾을 수 없었다. Figure 4에서 보듯이, 지오폐리머 제조에 알맞은 W/S 비는 0.20 이었으며, W/S 비를 0.22 이상으로 증가시키면 강도 및 밀도가 모두 급격히 낮아져 더 이상의 W/S 비의 증가의 의미가 없다고 판단되었으며, 또한 W/S 비 0.20 이하에서는 지오폐리머 성형 시 페이스트(paste)의 유동성이 급격히 낮아져 작업성이 나빠졌기 때문에 성형상의 어려움으로 인해 0.20 이하의 W/S 비 역시 실험에서 배제하였다. W/S 비의 성형 가능범위가 매우 좁아 성형 시 적절한 W/S 비의 선택은 지오폐리머 물성을 좌우하는 매우 중요한 요소 중 하나라는 것을 알 수 있었다.

W/S 비 0.20, Si sludge 0.1 wt.% 첨가 시편에서는 9 M에서 최대 강도가 나타났고 Si sludge 0.2 wt.% 첨가 시편에서는 12 M에서 최대 강도가 나타났으며, Si sludge 0.3 wt.% 첨가 시편에서도 9 M에서 최대 강도가 나타났다. 따라서, 각 실험 조건에 알맞은 물 농도가 있다는 것을 알 수 있었으나, 일반적으로 지나치게 높은 농도의 알칼리 활성화제는 지오폐리머 반응과 발포반응에 참여하지 않은 여분의 잔존 Na^+ 이온을 시편내부에 미반응 이온상태로 축적 시키기 때문에 시편의 압축강도에 오히려 악영향을 미치며 이후 미반응 Na^+ 이온이 대기중 수분, 시편내 미반응 음이온 물질 등과 반응하여 백화현상을 발생시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다[6]. 따라서 이후 압축강도 향상을 위한 첨가물 사용 실험 시 Si sludge 첨가량은 0.1 wt.% 이하로 제한하고 W/S 비는 0.20~0.28 사이로 변화시키며 실험을 진행하였다.

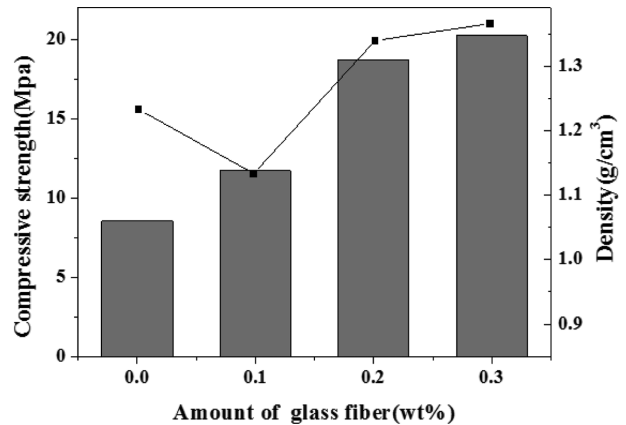


Fig. 5. Compressive strength and density of geopolymer according to the amount of glass fiber addition when W/S ratio was 0.235.

3.2. 압축강도 향상을 위한 첨가제 포함 지오폐리머

3.2.1. 유리섬유 첨가

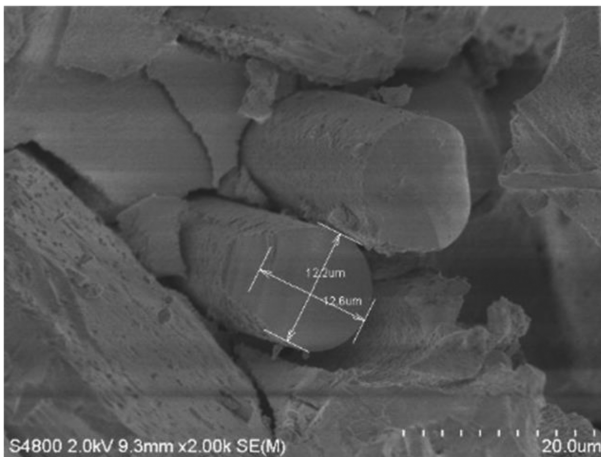
ALC 수준으로 지오폐리머의 밀도를 낮추고, 압축강도를 높이기 위해 fiber 형태의 유리섬유를 지오폐리머 성형 시 첨가하였다. 유리섬유의 첨가량은 0.0 wt.%, 0.1 wt.%, 0.2 wt.%, 0.3 wt.%로 변화시켰다. 지오폐리머 제작 시 일반적으로 W/S 비를 낮게할 경우, 슬러리(slurry)의 점도가 높아 작업성이 나빠지기 때문에 유리섬유를 효과적으로 분산시켜 혼합하기 어렵게 된다. 따라서, 유리섬유를 첨가한 시편들의 W/S 비를 높여 작업성을 개선하고, 유리섬유의 혼합도 균일하게 될 수 있도록 하였다. Figure 5에서 보듯이, 유리섬유의 첨가량이 증가할수록 압축강도가 증가한 것을 알 수 있으며 밀도 역시 증가하는 경향이 나타났다.

Figure 6에서 볼 수 있듯이, 유리섬유 첨가 지오폐리머의 단면에서는 지오폐리머에 유리섬유가 섞여 있는 모습을 관찰할 수 있다. Figure 6(a)와 Fig. 6(b)에서와 같이 혼합 과정에서 유리 섬유의 균일한 분산을 기대하였으나, 예상과는 달리 섬유들끼리 뭉쳐있어 균일한 분산이 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었다. 또한 지오폐리머와 유리섬유 사이의 계면 역시 잘 결합된 것으로 보이지 않았다. 하지만, Fig. 6(c)를 보면 Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)에 관찰되는 매끈한 표면의 유리섬유와 지오폐리머/유리섬유 계면상태와는 달리 시편에서 지오폐리머/유리섬유의 경계가 뚜렷하지 않고 유리섬유의 표면에서도 지오폐리머 반응이 일어나 지오폐리머 입자들이 관찰되었다. 이렇게 지오폐리머와 유리섬유 사이에 지오폐리머 반응이 일어나 뚜렷한 계면 없이 두 물질간의 접합이 잘된 경우에는 지오폐리머의 압축강도 및 인장강도 향상을 기대할 수 있다. 크랙의 전파 역시 유리섬유를 우회해서 일어날 것으로 예상되었기 때문에 유리섬유가 지오폐

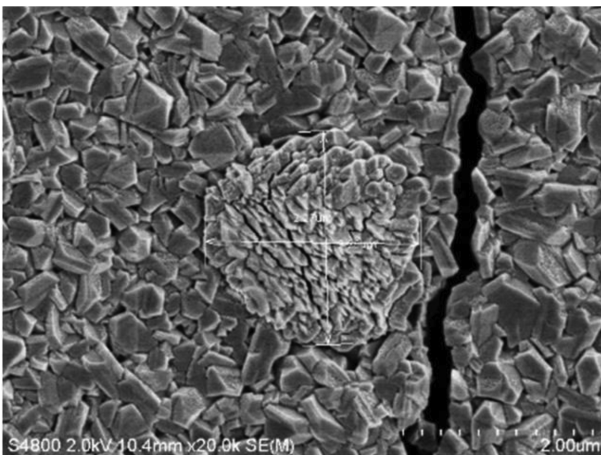
폴리머 matrix에 잘 결합되어 분산되어 있다면, 압축강도 향상에 기여할 것으로 사료되었다[7]. 유리 섬유를 0.3 wt.% 첨가한 경우, 밀도는 1.232 g/cm³에서 1.365 g/cm³로 0.13만큼 비교적 적게 증가한 반면, 압축강도는



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Micrographs of glass fiber reinforced geopolymers. (a) Fibers in the geopolymer matrix, (b) Enlarged image of glass fibers in the geopolymer matrix, (c) A crack near a glass fiber in the geopolymer matrix.

8.565 MPa에서 20.265 MPa로 약 2.4배 증가한 것은 Fig. 6(c)에서 관찰된 것처럼 지오폐올리머/유리섬유 계면에서 지오폐올리머 반응이 일어나 두 물질이 잘 결합되었고, 이 때문에 크랙의 진행을 늦추거나 방해하여 압축강도의 향상이 일어난 것으로 판단된다[8]. 이 실험에서 사용한 지오폐올리머의 밀도는 실제 ALC 패널에 비해 높기 때문에 ALC 패널을 대체하기에는 무리가 있지만, 밀도 1.2~1.4 사이의 값을 갖는 경량 지오폐올리머의 압축강도를 향상시키는 한가지 방안이 될 수 있다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 밀도 0.5 이하의 초경량 지오폐올리머에서는 유리섬유의 첨가가 밀도를 너무 큰 폭으로 증가시키기 때문에 초경량 지오폐올리머에서 유리섬유의 사용은 제한적일 수 밖에 없다는 결론을 얻을 수 있었다.

3.2.2. 탄소섬유 첨가

유리섬유 첨가 시 밀도의 증가가 많이 일어났기 때문에, 밀도값을 낮추어 ALC 패널과 비슷해지도록 유리섬유보다 가벼운 탄소섬유를 첨가하여 지오폐올리머를 제조해 보았다. Figure 7에서 보듯이, 탄소섬유를 첨가하지 않은 시편의 밀도는 W/S 비 0.235에서 1.250 g/cm³였으며, 탄소섬유를 첨가한 시편의 밀도는, 유리섬유첨가시의 최고 첨가량(0.3 wt.%)과 비교해 약 5배 이상(1.6 wt.%) 첨가량을 늘렸음에도 불구하고, 1.136 g/cm³까지 낮아졌다. 압축강도는 탄소섬유 미첨가시 8 Mpa에서 첨가량을 증가시킬수록 압축강도는 11 MPa까지 증가하였다. 한편, W/S 비 0.240에서는 탄소섬유를 1.6 wt.%에서 3.2 wt.%로 2배 첨가했음에도 압축강도는 12.928 MPa에서 12.024 MPa로 소폭 감소하고 밀도 역시 1.288 g/cm³에서 1.27 g/cm³로 감소했다. 이는 첨가한 섬유의 양이 부피 비로 너무 많아 지오폐올리머에 matrix에 완전히 분산되지 않고 불균질한 미세구조로 인해 탄소섬유와 지오폐올리머 간의

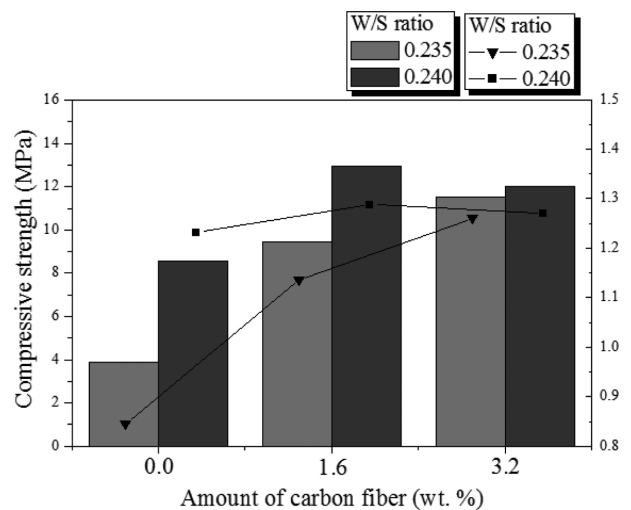


Fig. 7. Compressive strength and density of geopolymer according to the amount of carbon fiber addition and W/S ratio.

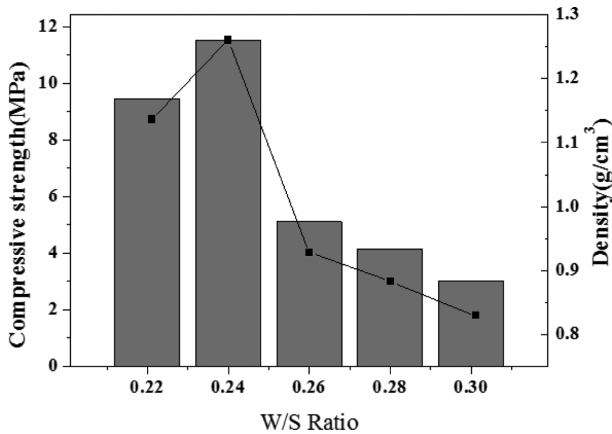
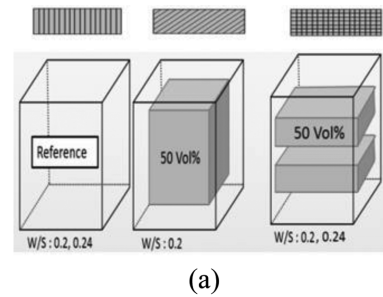


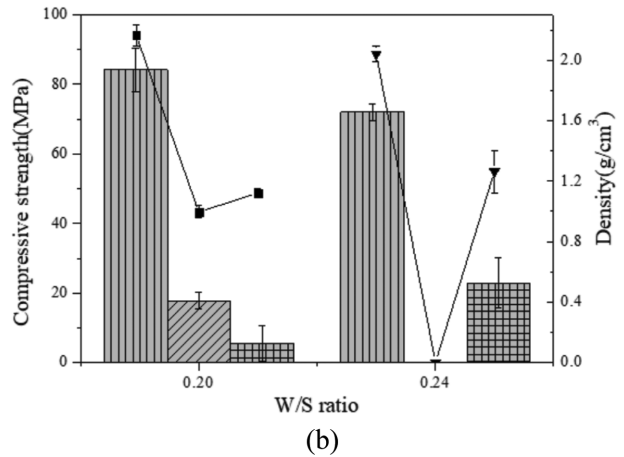
Fig. 8. Compressive strength and density of geopolymer according to the W/S ratio when carbon fiber was added by 3.2 wt.%.

계면결합이 제대로 일어나지 않아 너무 많은 탄소섬유의 첨가는 오히려 압축강도를 저하시키는 것으로 판단된다. 따라서, 1.6 wt.% 첨가가 탄소섬유강화 지오폐리머에 적합한 첨가량이라 판단하여 탄소섬유의 첨가량은 고정시키고, 탄소섬유를 지오폐리머에 보다 균일하게 분포시켜 압축강도 증진 및 밀도를 감소시킬 목적으로 W/S 비를 조절하는 실험을 진행하였다. 탄소섬유 첨가시편의 경우에는 시편제조 시 허용 가능한 w/s 비가 넓어졌기 때문에 w/s 비를 0.20에서 0.30까지 변화시켜 실험하였다.

Figure 8에서와 같이 W/S 비 0.24에서 최대 압축강도와 최대 밀도를 나타냈고, 물비가 0.24 이상 증가하면 강도 및 밀도가 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이 발생했다. W/S 비를 증가시켜 페이스트의 점도를 낮춰 작업성을 개선하면 섬유가 균일하게 분포되고 크랙의 진행을 늦춰 압축강도가 증가할 것이라 예상했으나 낮아진 점도로 인해 페이스트와 섬유의 부착력이 나빠져 압축강도가 11.5 MPa(W/S: 0.24)에서 5.105(W/S: 0.243)로 크게 감소했으며 밀도는 1.26 g/cm³(W/S: 0.24)에서 0.928 g/cm³(W/S: 0.26)로 역시 감소했다. W/S 비를 조절하여 탄소 섬유를 분산시키는 방법은 별도의 공정이 필요없어 지오폐리머 제작 시간이 짧다는 장점이 있지만 구조 내 섬유가 무작위로 배열되어 재현성이 떨어지고, 섬유의 뭉침 현상이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 단점을 개선하기 위해 탄소섬유의 균일한 분산방법을 개발하여 탄소섬유와 지오폐리머 matrix와의 부착력을 조절할 수 있다면, 높은 W/S 비의 시편에서 압축강도를 증가시키고 밀도는 소폭 낮추어 ALC 패널의 기준에 근접할 수 있는 탄소섬유강화 지오폐리머를 제조할 수 있을 것으로 사료되며, 이는 향후 연구에서 진행할 예정이다[9]. 결론적으로, 현재의 시편제조 방법으로는 탄소섬유를 사용하여 소폭의 압축강도 증진 및 밀도의 감소가 가능하지만, ALC 기준은 만족시키지 못한다는 결론을 얻을 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 9. A schematic diagram of geopolymers with and without polystyrene insert(s) and the compressive strength and density of them. (a) A schematic diagram of geopolymers without an insert (the reference specimen: left), with a single polystyrene insert (middle), and with two polystyrene inserts (right). The polystyrene inserts are indicated by grey shaded boxes. (b) Compressive strength and density of the three kind of specimens explained as the above.

3.2.3. 스티로폼(polystyrene) 삽입 지오폐리머

지오폐리머의 밀도를 낮춰 ALC 패널의 기준에 근접하게 제조하기 위해 $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ 의 50 vol.%에 해당하는 $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ 크기의 스티로폼을 시편 내부에 삽입하였다. 그 이상의 스티로폼 vol.%를 포함한 시편은 제조가 불가하였다. 따라서 최대 50 vol.%의 스티로폼을 지오폐리머 중앙에 두가지 방법으로 삽입하였고 작업성을 증가시키기 위해 물비를 0.24까지 증가시켰다. 스티로폼 삽입물(인서트: insert)은 Fig. 9(a)에서 볼 수 있듯이, 단일 삽입물(SL: single insert)과 이중 삽입물(DL: double insert) 두가지 방법으로 제작하여 삽입하였다. SL 시편에서 W/S 비 0.20의 경우 강도 17.8 MPa, 밀도 0.996 g/cm³으로 ALC 패널 기준과 유사한 물성이 측정됐다. DL의 경우 동일한 조건임에도 강도 5.6 MPa, 밀도 1.122 g/cm³으로 압축강도는 감소하고 오히려 밀도는 증가한 결과가 발현되었다. W/S 비 0.20에서는 두가지 조건을 비교해볼때 DL보다 SL이 더 효과적인 방법으로 판단되었다. 이는 DL 시편의 경우 스티로폼과 지오폐리머 사이 계면의 표면적이 증가하여(SL 표면적: 96 cm², DL 표면적: 128 cm²) 계면접합강도가 낮아지기 때문으로 생

각되며, 증가한 계면에 많은 균열이 발생할 확률이 높아져 낮은 압축강도가 발현된 것으로 사료된다.

Figure 9(b)에서 볼 수 있듯이, W/S 비 0.24, DL 시편에서는 W/S 비 0.20 시편보다도 더 높은 압축강도를 얻을 수 있었으나, SL의 경우에는 W/S 비가 높아짐에 따라 지오폐리머 페이스트의 점도가 너무 낮아져 제대로 된 시편의 제조가 어려웠다. 어렵게 제조된 몇몇 시편에서도 의미있는 압축강도 및 밀도를 얻지 못하였다. 따라서, W/S 비 조건에 따라 삽입물의 삽입방식을 바꿔야 할 필요성이 대두되었으며, 비중이 낮은 스티로폼의 적절한 삽입방법이 시편제조의 재현성 향상을 위해 매우 중요한 요소라는 것을 알 수 있었다. 따라서, 적절한 제조공정조건과 방법을 확립한다면, 스티로폼 삽입물에 의해 경량지오폐리머의 물성을 ALC 패널 기준과 유사하게 맞출 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 향후 제조 재현성 확립을 위한 추가연구가 성공적으로 수행된다면, 스티로폼 삽입물을 활용한 경량지오폐리머가 충분히 ALC 판넬을 대체할 가능성이 있다고 사료되어진다.

4. 결 론

1) Si sludge 0.1 wt.%, Alkali activator 몰농도 9 M, W/S ratio 0.24의 조건에서 압축강도는 13.868 MPa, 밀도는 1.32 g/cm³로 ALC 패널 대체 가능성이 있음을 확인하였다.

2) ALC 패널 대체재료로서 경량지오폐리머의 물성 향상을 위해 첨가물로 유리섬유, 탄소섬유, 스티로폼을 첨가하였다. ALC 패널 기준에 맞춰 압축강도 향상 및 비중 감소를 기대했지만 유리섬유 및 탄소섬유의 경우 일부 부분적인 압축강도의 향상 및 밀도 감소효과만을 얻을 수 있었으나, 스티로폼 첨가 시편에서는 제조상의 어려움과 재현성문제가 있었으나, ALC 패널 대체 가능성이 있음을 확인할 수 있었다.

3) ALC 대체 시편은 낮은 비중에서도 높은 압축강도 값을 가져야 하는데 이를 위해서는 Bloating 현상이 일어나는 시기인 발포/성형 과정에서 지오폐리머 페이스트의 혼합 방법 개선과 더불어 Aging 및 열처리 방법을

개선이 이루어져야 할 것으로 판단되며, 향후 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2019학년도 경기대학교 대학원 연구원장학 생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

References

- [1] Y.K. Cho, G.D. Moon, J.M. La and S.H. Jung, "Effect of curing conditions on the strength of fly-ash based geopolymer", J. Kor. Conc. Inst. 26 (2016) 449.
- [2] Y.Y. Kim, H. Song, J.K. Lee and Y.S. Chu, "Improvement of fundamental properties in ALC added admixtures and silica powder size", J. Arch. Inst. Kor. Stru. Const. 23 (2007) 107.
- [3] K.T. Koh, G.S. Ryu and J.H. Lee, "Development of geopolymer mortar based on fly ash", J. Kor. Rec. Cons. Res. Inst. 6 (2012) 119.
- [4] H.D. Jang, D.S. Kil, H.K. Chang, Y.J. Cho and B.G. Cho, "Trend on the recycling technologies for silicon sludge by the patent and paper analysis", R. Met. Res. Cen. Kor. Inst. Ge. Min. Res. 21 (2012) 60.
- [5] S.J. Lee, E. 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.
- [6] X. Xue, Y. Liu, J. Dai, C. Poon, W. Zhang and P. Zhang, "Inhibiting efflorescence formation on fly ash based geopolymer via silane surface modification", Cem. Con. Comp. 94 (2018) 43.
- [7] J. Cao and D.D.L. Chung, "Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture", Cem. Con. Comp. 31 (2001) 1633.
- [8] C.K.Y. Leung and V.C. Li, "Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites", J. Mech. Phys. Solids. 40 (1992) 1333.
- [9] S. Zhandarov and E. Mäder, "Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters", Comp. Sci. Tech. 65 (2005) 149.