

흡착 성형체에 미치는 무기첨가제와 소성온도의 영향

배민아 · 김경호 · 백재호*

한국생산기술연구원 친환경재료공정연구그룹

Effect of Inorganic Additives and Sintering Temperature on Adsorbents

Min A Bae, Kyeong Ho Kim, and Jae Ho Baek*

Green Materials & Processes Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),
Ulsan Regional 44413, Republic of Korea.

Abstract: Magnesium silicate is a porous material with a large specific surface area and is easily adsorbed. In particular, it is widely used commercially because it is very effective for adsorbing Na⁺, K⁺ ions and other catalysts. However, if the powder is used as an adsorbent as is, there are disadvantages, in that the adsorbed material is easily lost during the adsorption action and becomes difficult to recover. In this study, magnesium silicate was used as an adsorbent to remove pollutants (CO₂) from the atmosphere. In addition, in order to overcome the disadvantages of using a powder adsorbent material, an inorganic binder (clay) and a reinforcing agent (glass fiber) were added to prepare a molded article which imparted strength to the adsorbent material. Changes in the properties of the adsorbent were confirmed. Changes in the physicochemical properties of the adsorbed material according to the calcination temperature, from 400 to 800°C, were confirmed. In addition, it was confirmed that a molded body with 15 wt% inorganic binder and 4 wt% reinforcing agent had a specific surface area of about 87 m²/g and a strength of 4.63 N. The prepared molded article could adsorb about 0.41 mmol/g of CO₂ at atmospheric pressure, confirming its potential use as a CO₂ adsorbent.

(Received 27 September 2021; Accepted 1 December 2021)

Keywords: magnesium silicate, adsorbent, clay, glass fiber

1. 서 론

흡착제의 경우 공간을, 세공용적, 비표면적 등이 크고, 밀도가 낮을수록 흡착 효율이 우수하다. 그렇기에 우수한 비표면적 특성을 가진 활성탄, zeolite, magnesium silicate와 같은 물질이 흡착제로 널리 사용되고 있다. 흡착제 중 magnesium silicate는 활성탄과 같이 다공성 구조를 가지고 표면적이 넓기에 흡착 능력이 뛰어나며, 흡착 속도가 빠르기 때문에 대기 중 오염물질 제거에 효율적이다. 또한 Na⁺, K⁺ 이온 및 기타 촉매를 흡착하는데 효과적이고, 화장품에도 사용되어 피부나 모발 내 수분과 유분 흡수를 용이하게 하여 흡수제, 벌크제, 불투명화제 등으로 사용되고 있다. 하지만 흡착제로써 magnesium silicate를 활용할 경

우 분말 그대로를 사용하기 힘든데, 이는 흡착 작용 시 흡착물질이 손실되기 쉽고, 회수가 어렵다는 단점 때문이다 [1-4]. 이를 해결하기 위해 분말 형태의 흡착물질에 결합제를 첨가하고 압출, 사출, 펠렛화 등의 공정을 통해 성형 능력을 부여함으로써 형상을 가지는 흡착제로 만들어 사용하고 있다 [5]. 압출성형의 경우 혼합, 압출, 탈지 및 소결의 연속된 세부공정으로 구성되어 있으며, 다양한 상태의 유체를 사용하여 원하는 성형물의 연속 생산이 가능하기에 여러 산업공정에서 사용되고 있다. 그러나 압출의 각 세부 공정의 변수들은 서로 영향을 미치기 때문에 원료의 함량, 함유율 등의 개별 변수를 항상 독립적으로 변화시킬 수는 없다.

흡착제의 압출 및 형상화를 위해 사용되는 첨가제는 유기결합제, 무기결합제, 보강제 등으로 나눌 수 있으며, 결합제와 세라믹 분말의 혼합물의 성형성은 결합제의 종류와 함량에 따라 차이가 나며 결합제의 혼합량이 증가할수록 성형체의 소결성은 저하되어 고밀도의 소결체를 얻기가 어렵다 [6]. 성형체에서 유기결합제는 소성 전 흡착제의 형상유지 역할

- 배민아 · 김경호: 연구원, 백재호: 수석연구원
*Corresponding Author: Jae Ho Baek
[Tel: +82-52-980-6632, E-mail: jhbaek@kitech.re.kr]
Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

Table 1. Physiochemical properties of prepared magnesium silicate

Sample	Chemical composition(%)				Surface Area (m ² /g)	Pore Volume (cm ³ /g)	Pore Size (Å)
	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	SO ₃			
Magnesium silicate	76.17	17.74	3.02	2.40	214.87	0.4305	80.15

Table 2. Mixing ratio of magnesium silicate

wt%	4A1	6A1	8A1	6B1	6C2	6D1	6D3	6D4
Magnesium silicate	100	100	100	100	100	100	100	100
Clay	11	11	11	15	19	15	15	15
PVA(Polyvinyl-Alcohol)	20	20	20	20	20	20	20	20
Glass fiber(300 μm)	8	8	8	8	8	4	12	16
Sintering Temp.(°C)	400	600	800	600	600	600	600	600

을 하며 소성과정에서 제거되며 이 과정에서 또 다른 기공을 형성시킨다. 무기결합제와 보강제는 소성 후 흡착제 형상을 유지하는 역할을 하는데 소성 과정에서 흡착제와 밀착함으로써 성형체의 강도를 높여주어 최종적으로 원하는 형상을 얻는 것을 도와준다 [5,7]. 또한 형상화 과정에서 소성 온도 설정이 중요한데, 소성 온도를 너무 낮게 설정할 경우 무기결합제가 충분히 제거되지 않아 기공을 감소시킬 수 있으며, 너무 높은 온도로 설정할 경우 원재료 및 첨가된 무기결합제의 소결에 의해 비표면적이 줄어들 수 있기 때문에 원재료 자체의 흡착성능을 떨어뜨릴 수 있다 [7-8]. 그렇기에 형상화 강도가 확보되는 무기결합제와 보강제의 첨가에 따라 흡착제가 가지는 비표면적이 변화되기에 무기결합제, 보강제의 배합비와 적합한 소성 온도를 찾는 것은 필수적이다.

본 연구에서는 magnesium silicate를 흡착제로 이용할 시, magnesium silicate의 형상화를 위한 무기결합제와 보강제의 최적 배합비 선정을 진행하였으며, 이 과정에서 흡착제로써 특성을 유지할 수 있는 소성 온도를 특정하기 위한 실험을 진행하였다. 다양한 비율로 제조된 성형체는 열중량 분석기(Thermo Gravimetric Analysis(TGA)), 비표면적 측정기(Brunauer-Emmett-Teller(BET)), 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope(SEM))을 이용하여 변화되는 특성을 살펴보았으며, 이를 통해 최적의 흡착성능을 나타낼 수 있는 소성 온도와 배합비를 선정하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 magnesium silicate(Giant Chemical. Co. Ltd, Korea)는 SiO₂가 76.17%, MgO가 17.74%로 물리적 특성은 표 1과 같으며, 이를 원료물질로 하여 poly vinyl alcohol(DAEJUNG Chemical.Co.Ltd, Korea)을 유

기결합제로, 무기결합제 clay(DAEJUNG Chemical.Co.Ltd, Korea)와 보강제로 300 μm 단일크기의 백색분말인 glass fiber(Milled Fiber Glass, Korea)를 선정하여 흡착 성형체를 제조하였다. Magnesium silicate에 무기결합제 비율을 11~19 wt%로 변화시키고, 보강제 또한 4~16 wt%로 다양화하여 혼합하였으며, 혼합된 샘플은 80 °C에서 24 hr 건조한 뒤, 소성을 거쳐 성형체를 제조하였고, 각 샘플의 배합비는 표 2에 나타내었다.

우선 소성 온도의 차이에 따른 물리 화학적 특성 차이를 확인하기 위해 소성 온도를 400 °C, 600 °C, 800 °C로 변화시켰으며, 이 결과로 최적의 소성 온도를 설정한 뒤 무기결합제와 보강제의 함량을 다르게 하여 변화되는 물리 화학적 특성을 확인하였다. 배합비와 소성 온도에 따른 물질의 질량 변화를 관찰하기 위해 열중량 분석(TGA/DSC 3+, Switzerland)을 진행하였으며, 비표면적(NOVA 2000e, America) 분석을 통해 물질의 비표면적과 기공의 변화를 확인하였다. 또한 미세 구조 변화를 관찰하기 위해 SEM(SU8020, Japan) 분석을 진행하였다. 각 배합별로 제조된 성형체는 진공압출성형기(VEXT-080~130, MINO, Korea)를 사용하여 펠렛 형태로 압출하였으며, 압출된 시편의 강도는 인장압축시험기(DS2 OPTECH, China)를 통해 압축강도를 측정하였다. 최종적으로 선택된 성형체는 80 °C에서 4시간 이상 전처리 후, 3 flex adsorption analyzer (micromeritics, US)를 이용하여 상온(25 °C)에서 상대압력(P/P₀)에 따른 CO₂ 흡착량 테스트를 진행하여 CO₂ 흡착제로의 사용 가능성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소성 온도에 따른 성형체 특성

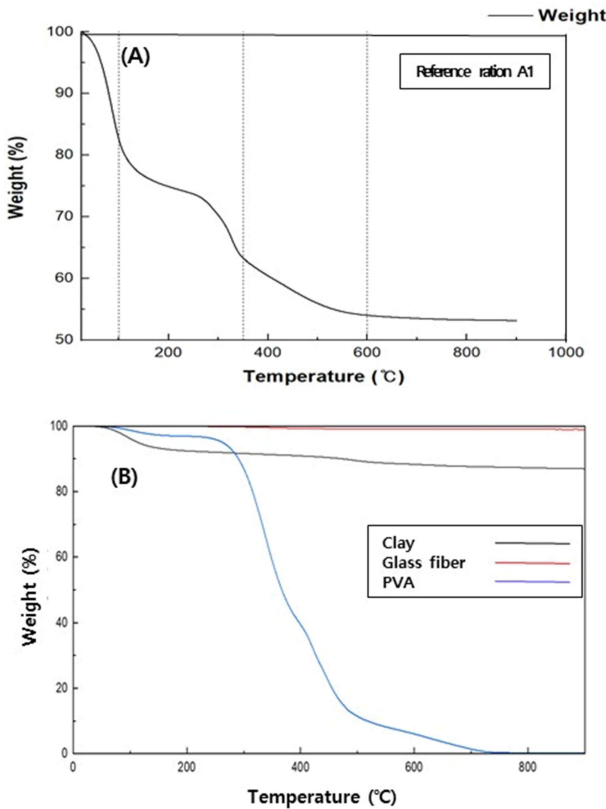


Fig. 1. Result of TGA curves : (A) Reference ratio A1 and (B) Additives.

유기결합제를 완벽히 제거할 수 있는 소성 온도와 온도별 질량 감소를 확인하기 위해 표 2에 나타낸 것과 같이 A1 배합으로 흡착 성형체를 제작하였으며 A1 샘플의 TGA 결과를 그림 1(A)에 나타내었다. TGA 결과를 보면 100°C까지 H₂O의 증발로 인해 약 18%의 질량 감소가 관찰되고, 약 350°C까지 결정수의 증발과 유기결합제의 연소로 인해 급격한 질량 감소를 보였다 [7-9]. 또한, 350~600°C 사이에서 약 9%의 질량 감소가 서서히 일어나는데, 이는 350°C 이하의 온도에서 제거되지 않은 유기결합제가 존재함을 알 수 있다 [9]. 따라서 400°C 이하로 소성 온도를 설정할 경우 유기결합제가 완벽히 제거되지 않아 기공 특성을 감소시키는 문제가 발생할 수 있다 [8-9]. 실제 각 첨가제의 TAG 결과를 나타낸 그림 1(B)를 보면 600°C이하의 온도에서 대부분의 유기결합제가 제거됨을 확인할 수 있다. 또한 400°C에서 소성시킨 4A1의 경우 진한 갈색을 나타내고, 6A1와 8A1의 경우 회백색을 보이는데, 이와 같은 색상 변화는 유기결합제의 잔존 유무에 의한 것으로 분해되지 않은 탄소가 미세구조를 변색시키는 “검은심”(black coring)효과라 할 수 있다 [20]. 그림

Table 3. BET results according to sintering temperature

	4A1	6A1	8A1
Surface Area(m ² /g)	194.20	83.24	1.91
Pore Volume(cm ³ /g)	0.3539	0.2831	0.0051
Pore Size(Å)	72.89	136.04	105.75

1의 TGA 분석 결과로 확인한 것과 같이 400°C도 부근에서 남아있던 유기결합제의 탄소 성분이 소성 온도의 상승에 따라 제거됨으로써 색상이 변화한 것으로 판단된다. 소성 과정을 통해 무기물질을 제외한 유기물들이 연소되면서 공극을 형성하고, 성형체의 소결 현상이 발생하여 무기결합제가 원재료와 단단히 밀착되어 소결되므로 높은 기계적 강도를 얻을 수 있다. 이에 소성 온도를 설정함에 있어, 원재료의 흡착성능을 유지하기 위해서는 비표면적을 크게 해치지 않는 것이 중요하다.

소성 온도에 따른 비표면적과 기공 부피의 변화를 표 3에 나타내었으며 표 1에서 magnesium silicate의 비표면적은 214.87 m²/g, 기공 부피는 0.4305 cm³/g, 기공 크기가 80.15 Å임을 확인할 수 있다. 표 3을 보면 400°C로 소성한 4A1은 194.20 m²/g에서 600°C로 소성한 6A1의 경우 83.24 m²/g으로 반감하였고, 800°C로 소성한 8A1은 1.91 m²/g으로 소성 온도가 높아질수록 비표면적이 급격히 감소한 것을 확인할 수 있다. 기공의 부피 역시 4A1의 경우 0.3539 cm³/g에서 6A1은 0.2831 cm³/g로 약간의 감소가 일어난 뒤 8A1에서는 0.0051 cm³/g로 급격히 감소한 것을 관찰할 수 있다. 그러나 기공 크기의 경우 6A1이 가장 높은 136.04 Å가 나타났는데, 이는 유기결합제가 연소되면서 형성한 공극의 영향이라 판단되며 8A1의 경우 기공 크기가 다시 줄어들어 105.75 Å로 나타난다. 이처럼 소성 온도가 높아질수록 비표면적과 기공 부피가 감소하는 것은 소결 현상에 의해 magnesium silicate의 응집이 일어나 기공 특성이 감소했기 때문이다 [11].

SEM 분석을 통해 소성 온도에 따른 미세구조 변화를 확인해 보면, 표 3의 기공특성 변화와 유사한 모습을 보이는데 그림 2(A)의 경우 다공성 구조의 단면이 관찰되어 높은 비표면적 값을 나타내며, 그림 2(B)는 소성 온도가 증가하면서 입자들이 조밀해지며 비표면적은 감소하였지만, 유기결합제의 제거로 인해 추가적인 기공이 형성되었음을 관찰할 수 있다 [5]. 그림 2(C)는 800°C에서 유기결합제가 완전히 연소되면서 형성된 공극의 존재가 확인되지만 높은 소성 온도로 인하여 소결 현상이 일어나 magnesium silicate가 용융되었다가 다시 응집되어 하나로 뭉쳐진 모습을 볼 수 있다. 그림 3에 나타난 소성 온도별 강도값을

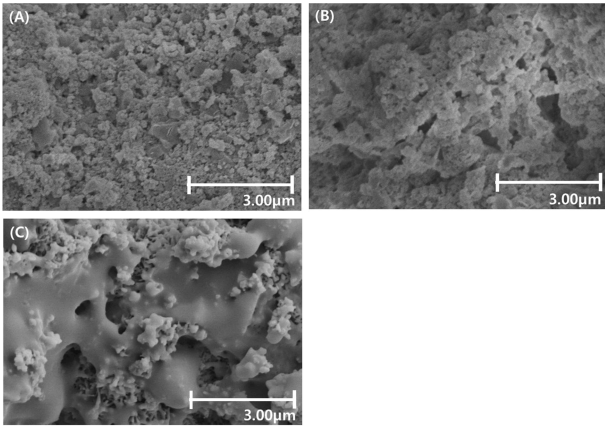


Fig. 2. SEM images of magnesium silicate according to sintering temperature : (A) 4A1, (B) 6A1 and (C) 8A1.

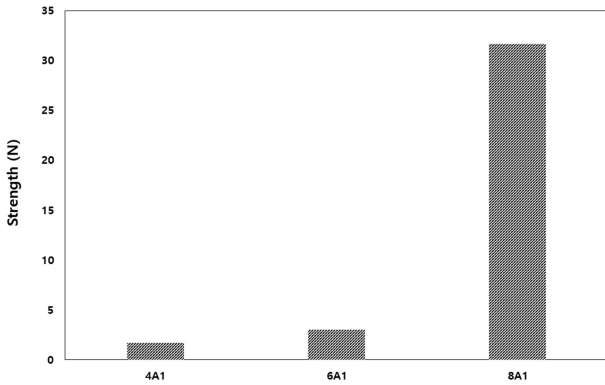


Fig. 3. Strength test results according to sintering temperature.

보면 소성 온도가 증가할수록 강도값은 증가하며 특히 800 °C에서 소성 시 강도값은 31.64 N으로 크게 증가하였다. 이는 그림 2의 SEM 결과에서도 나타나듯 magnesium silicate의 소결 현상으로 인해 강도가 증가한 것이라 할 수 있으며 이로 인해 낮은 비표면적 특성이 확인되었다. Magnesium silicate를 흡착제로 사용하기 위해선 높은 비표면적 값이 필수적인데 이 결과를 통해 소성 온도를 600 °C로 설정할 시 유기결합체가 제거되고, 이로 인해 생긴 공극으로 흡착특성을 높일 수 있기에 흡착이 가능한 비표면적의 확보가 가능한 것으로 판단된다.

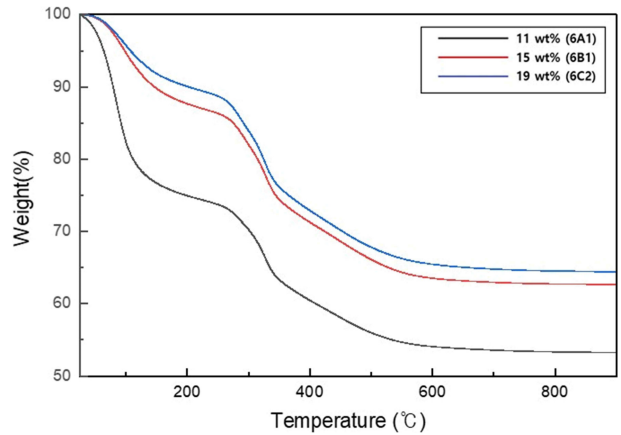


Fig. 4. Result of TGA curves for clay contents.

3.2. 무기결합체와 보강제 첨가에 따른 성형체의 특성 변화

Magnesium silicate를 흡착제로 형상화하여 사용하기 위해 무기결합체와 더불어 강도를 보강할 수 있는 보강제 첨가량 최적화 연구를 진행하였다. 무기결합체인 clay는 넓은 표면적(700~800 m²/g)을 가지며 재료 사이의 상호인력으로 인해 복합재료내의 응력 전이가 용이하여 기계적, 열적 성질이 증가한다는 것은 이미 잘 알려져 있다 [7-8, 11]. 또한 높은 중형 비를 가지는 clay들이 재료 내에서 일정한 방향으로 배열된다면 물질이 투과되는 경로를 증가시켜 가스 투과 억제성은 물론 절연성, 내용매성, 내열성 등의 장점도 가질 수 있다 [12-13].

Clay의 함량을 11 wt%, 15 wt%, 19 wt%로 변화시킨 샘플을 제작하였으며, 각 샘플의 열적 거동을 그림 4에 나타내었다. Clay 15 wt%를 사용한 6B1와 19 wt%의 6C2는 11 wt%를 사용한 6A1과 유사한 패턴의 질량 감소를 보이나, clay의 함량이 증가할수록 질량감소 폭은 작게 나타나는데, 이는 clay가 열이 이동하는 경로를 차단하여 H₂O의 증발과 유기결합체의 연소를 방해하기 때문이다 [11]. 표 4의 clay 함량에 따른 기공특성을 살펴보면 clay 함량이 증가할수록 clay의 영향으로 비표면적은 83.24 m²/g에서 93.52 m²/g로 소폭 증가하나 기공의 부피와 크기는 감소하였다. 또한 그림 6(A)의 clay 함량이 증가할수록 샘플이

Table 4. BET results according to the contents of clay and glass fiber

	6A1	6B1	6C2	6D1	6D3	6D4
Surface Area(m ² /g)	83.24	87.15	93.52	87.27	64.38	60.98
Pore Volume(cm ³ /g)	0.2831	0.2805	0.2746	0.34	0.1501	0.1402
Pore Size(Å)	136.04	128.74	117.46	127.12	127.78	126.01

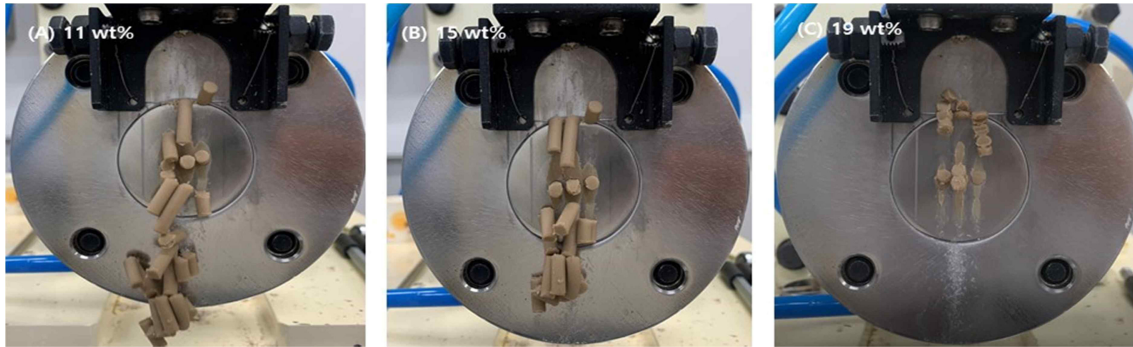


Fig. 5. Pictures of making pellets using an extruder : (A) Clay 11 wt%, (B) Clay 15 wt% and (C) Clay 19 wt%.

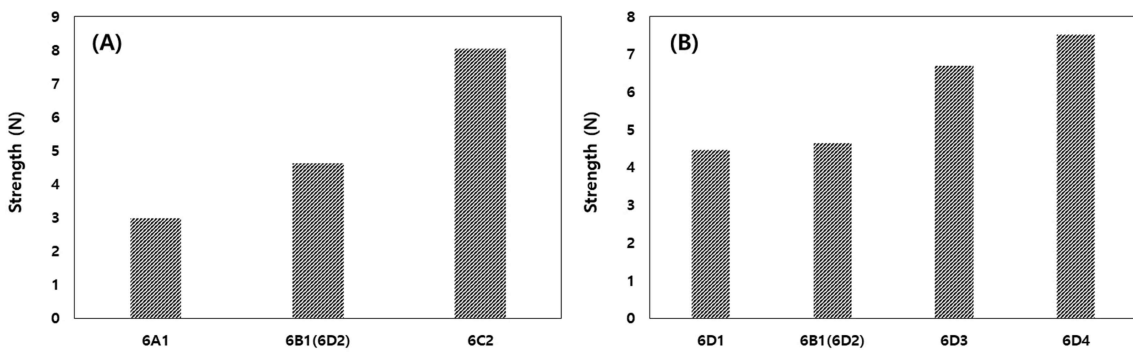


Fig. 6. Strength test results according to contents of clay and glass fiber : (A) Clay, (b) Glass fiber.

가지는 강도값을 보면 2.98 N에서 5.03 N으로 약 40% 증가하였다. 그러나 clay 함량이 증가할수록 그림 5와 같이 압출을 통한 연속적인 펠렛 성형을 불가함을 확인하였다.

Clay는 독특한 가소성을 가지는 카올리나이트 $[Al(Si_2O_5)(OH)_4]$ 구조로 450~700 °C에서 메타카올린 ($Al_2Si_2O_6$)이 생성되면서 결정수가 제거되는데, 이때 용융 현상이 발생한다. Clay와 같은 가소성을 지는 재료들은 이때도 입자 본연의 모양을 잃지 않고도 치밀화하여 강도를 발현하게 한다 [14-15]. 성형체를 제작할 때 소성공정을 추가하는 것은 재료를 단단하게 하는 치밀화 단계를 부여하기 위한 것이며 입자간 치밀화 발생은 표면에너지에 의한 모세관력이 의존하고 이 힘은 입자의 크기에 반비례한다. 치밀화를 원활하게 하는데는 상당량의 미립자가 필요한데, 본 흡착 성형체에서 이 미립자 역할을 clay가 대신하는 것으로 판단된다. 일반적으로 입자간 혼합계에서 조립 70%와 미립 30%의 혼합계가 최고의 충전밀도를 형성한다 알려져 있으며 미립자가 30% 가까이 채워졌을 때 소성중 미립이 조립 사이를 꽉 채워 전체 수축률에 영향을 주지 않으면서 치밀화를 형성할 수 있다 [15]. 그러나 흡착 성형체로 사용할 시 clay 함량을 무한정 증가하게 되면 흡착 물질의 이동 경로가 차단된다는 단점이 있다. 그렇기에 실

험결과를 바탕으로 clay 함량을 15 wt%로 고정하고 보강제인 glass fiber의 함량을 4~16 wt%로 달리하여 샘플을 제작하고 비표면적 변화를 확인하였다 [26-27].

Glass fiber는 유리원료를 1,500~1,600 °C의 고온에서 용융 방사하여 얻은 섬유 형태의 무기물로 복합재료로 많이 사용하며, 일반 유리가 가지는 투명성, 불활성 및 내약품성과 섬유의 특성인 유연성(flexibility), 가벼움(lightness of weight), 강도 특성뿐만 아니라 파괴 변형률이 크며 성형체에 연성적인 특성을 부여한다 [16]. Glass fiber 함량이 증가할수록 성형체가 가지는 비표면적이 87 m²/g에서 60.98 m²/g로, 기공부피가 0.34 m²/g에서 0.14 m²/g까지 감소하였으나, 기공크기는 126~128 Å로 유사하게 측정되었다. 이는 침상 형태인 glass fiber의 함량이 증가할수록 성형체가 가지는 기공을 막은 것으로 판단되며 그림 7의 SEM 사진을 통해서도 확인이 가능하다. 또한 Glass fiber의 함량이 증가할수록 원재료와 서로 엉키어 강도 증가 요소로 작용하고, 강도값이 4.47 N에서 7.52 N까지 증가하였다. Glass fiber의 경우 성형체에 파괴가 발생할 시 fiber이 균열의 가교(bridging)역할을 하여 균열폭이 증가하는 것을 억제하여 파괴를 지연시키게 된다. 그림 8을 보면 성형체의 초기 균열은 glass fiber의 영향보다 성형체의 특성에 따라 결정

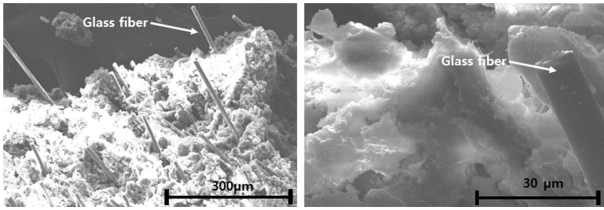


Fig. 7. SEM images of magnesium silicate with glass fiber added.

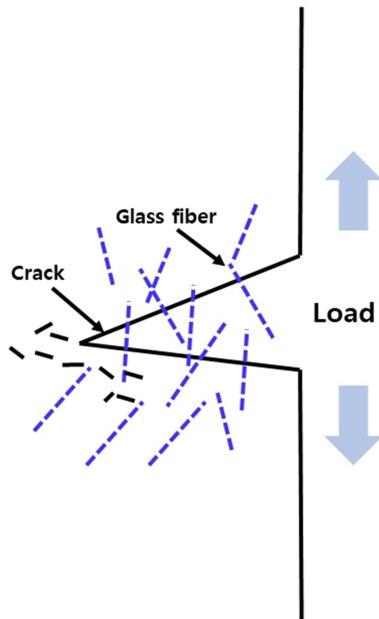


Fig. 8. The role of glass fiber inside the molded body.

되며 성형체 내부에 존재하고 있는 공극 또는 계면에서 초기균열이 발생된다. 초기 균열은 점진적으로 인접한 균열들과 연결, 통합되어 폭을 키우게 되면서 큰 균열로 성장하게 되는데 이때 균열과 균열 사이에서 glass fiber가 가교 역할을 하여 균열을 억제시킨다 [17-18]. 그렇기에 glass fiber의 함량이 증가할수록 성형체 입자 사이 가교수가 많아져 강도가 증가하게 되는 것이다.

약 $87 \text{ m}^2/\text{g}$ 의 비표면적과 4.63 N 의 강도값을 보이는 6B1 성형체에 대한 CO_2 흡착 테스트를 진행하였으며, 25°C 대기압에서 약 0.41 mmol/g 의 CO_2 흡착량을 보이는 것을 확인하였다. 이는 동일 조건에서 zeolite의 CO_2 흡착량($0.27\sim 0.48 \text{ mmol/g}$)과 유사한 수치인데, magnesium silicate, zeolite와 같은 고체 흡착제는 활성탄과 다르게 미세기공이 발달되어 있지 않기 때문에 물리적인 흡착기전으로 CO_2 를 포집함으로 선택적으로 CO_2 를 흡착하는 능력이 낮은 문제점이 보고되고 있다 [19-20]. 그러나 zeolite와 비교할 시 성형을 위해 첨가된 무기첨가제가 CO_2 흡착에

미치는 영향이 거의 없음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 magnesium silicate 흡착물질 제조를 위해 소성 온도의 차이가 흡착물질에 미치는 영향을 파악하고 무기결합제와 보강제를 첨가하여 그 특성 분석을 진행하였으며, 흡착 특성에 영향을 미치지 않는 소성 온도를 TGA, BET, SEM 분석을 통해 확인하였다. 800°C 의 높은 온도에서는 소결 현상으로 인해 입자들이 치밀한 구조를 형성하여 강도는 증가하나 입자간 응집으로 인해 대부분의 기공이 소멸하였고, 600°C 로 소성하는 경우 유기결합제가 완전하게 제거되면서 이로 인한 추가적인 기공을 얻음으로써 흡착제로써 기공 특성을 높일 수 있었다. 무기결합제의 함량이 증가할수록 흡착물질이 가지는 강도 값은 약 40%까지 증가하였으나 무기결합제의 함량이 증가할수록 흡착물질의 이동경로가 차단될 수 있기에 15 wt% 배합비를 선정하여 보강제 첨가 후 특성을 확인하였다. 무기결합제와 동일하게 보강제의 함량이 증가할수록 성형체의 강도값이 약 49% 증가하였으나 보강제의 형상 특성으로 인해 기공이 감소하였다. 흡착제가 가지는 기공 특성을 고려하여 무기결합제 15 wt%, 보강제 4 wt%를 가지는 성형체를 600°C 로 소성하여 CO_2 흡착 시험을 진행하였으며 대기압에서 약 0.41 mmol/g 의 CO_2 흡착량을 확인하였다.

감사의 글

This work was supported by the Technology Innovation Program(20000126) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea). Also the support of the Korea Institute of Industrial Technology as (KITECH EO200014) and Small and Medium Business Technology Information Promotion Agency as (S3025882).

REFERENCES

1. K. H. Jo, *NEW & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERS* **35**, 4 (2017).
2. K. M. Lee and Y. M. Jo, *J. Korean Ind. Eng. Chem.* **19**, 5 (2008).
3. J. Zhang, L. Dang, M. Zhang, Q. Lu, and S. Zhao, *Surfaces and Interfaces* **8**, 112 (2017).
4. H. C. Choi and J. Y. Bae, patent 10-1314532, Korea (2011).
5. W. H. Jung, J. J. Kim, and S. H. Cho, *J. Korean Ceramic*

- Society* **25**, 4 (1988).
6. S. K. Ham, M. H. Jung, and J. H. Chang, *polymer* **30**, 6 (2006).
 7. J. H. Kim and G. H. Ryu, *Korean J. Food Sci. Technol.* **33**, 1 (2001).
 8. G. H. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **59**, 9 (2021).
 9. B. Sharma, S. Mahajan, R. Chhibber, and R. Mehta, *Procedia chemistry* **4**, 39 (2012).
 10. H. G. Oh, F. K. Park, Y. Kim, and M. S. Lee, *Korean J. Mer. Mater.* **57**, 12 (2019).
 11. K. J. Churl, J. H. Kim, J. Y. Jun, Y. Park, S. H. Kim, and J. S. Park, *J. Korea Organic Resource Recycling Association* **17**, 1 (2009).
 12. J. D. S. Favero, J. P. Peterle, V. W. Angeli, R. N. Brandalise, L. B. Gomes, C. P. Berbmman, and V. D. Santos, *Applied Clay Science* **124** (2016).
 13. S. I. Jeong, N. I. Kim, and S. J. Lee, *Korean J. Mer. Mater.* **54**, 10 (2016).
 14. James S. Reed, *Principles of ceramics processing*, pp 504-516, John Wiley & Sons, NewYork (1995).
 15. W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, *Introduction to ceramics, 2nd ed.*, pp. 7-17, pp. 633-649, Wiley (1976).
 16. J. S. Lee, M. J. Lee, T. Y. Lim, Y. Lee, D. W. Jeon, S. K. Hyum, and J. H. Kim, *Korean J. Mer. Mater.* **55**, 4 (2017).
 17. Y. S. Kim and I. K. Kim, *J. Korean Soc. Precis. Eng.* **17**, 5 (2000).
 18. H. D. Yun, S. W. Kim, and E. Jeon, *JOURNAL OF THE ARCHITECTURAL INSTITUTE OF KOREA Structure & Construction*, **22**, 12 (2006).
 19. S. W. Choi, *J. Environ. Scien.* **20**, 7 (2011).
 20. I. G. Park, M. S. Hong, B. S. Kim, and H. G. Kang, *J. Kor. Environ. Eng.* **35**, 5 (2013).
 21. J. Chandradass, M. R. Kumar, and R. Velmurgan, *J. Reinf. Plast. Compos.* **27**, 15 (2008).
 22. K. Yasui, K. Sasaki, N. Ikeda, and H. Kinoshita, *Appl. Sci.*, **9**, 8 (2019).
 23. J. Park, Y. Kim, and M. Jung, *J. Korean Ceram. Soc.* **49**, 5 (2012).
 24. J. Y. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.* **30**, 5 (2017).
 25. H. Kinoshita, K. Kaizu, S. Hasegawa, T. Ando, R. Kawamura, K. Ikeda, T. Kobayashi, and H. Fukuyama, *Journal of Environ. Eng.* **8**, 1 (2013).
 26. M. A. Bae, *Fabrication of De-NOx SCR catalyst using al waste dross*, pp.33-37, 51-60, Busan University, Busan (2013).
 27. S. H. Jang, *CLEAN TECHNOLOGY*, **19**, 4 (2013).