

재생원료(망간, 제강슬래그)를 활용한 기능성 세라믹 섬유 단열재 개발

Development of High Performance Exterior Ceramic Fiber Insulator with Recycled Materials



송 훈 Hun Song
한국세라믹기술원
책임연구원
E-mail :
songhun@kicet.re.kr



임형미 Hyung-Mi Lim
한국세라믹기술원
수석연구원
E-mail :
lim@kicet.re.kr



박선민 Sun-Min Park
한국세라믹기술원
수석연구원
E-mail :
psm@kicet.re.kr



고현석 Hyun-Seok Ko
한국세라믹기술원
박사 후 연구원
E-mail :
hko@kicet.re.kr



김한봄 Han-Bom Kim
벽산
팀장
E-mail :
spring73@bsco.co.kr

1. 서론

국내에서는 2017년 패시브하우스, 2025년 제로에너지주택 의무화를 목표로 녹색건축물 조성지원법, 에너지절약 설계기준 등을 통해 건축물의 에너지저감 대책을 지속적으로 강화할 예정이다. 이러한 추세에 발맞춰 외단열 공법의 적용이 늘어나고 있고 경제적이면서 단열성능이 우수한 폴리스틸렌폼(이하 EPS) 등을 활용한 공법이 일반적으로 적용하고 있다.¹⁾ 하지만 EPS 등의 유기계 단열재는 단열성능이 우수하나 화재에 취약하며, 실제로 다수의 사상자가 발생한 의정부 도심형 생활주택 화재(2015) 및 밀양 세종병원 화재(2018)를 계기로 유기계 단열재 사용의 위험성을 인식하는 계기가 되었다.

급격한 외벽 화재확산을 방지하기 위한 대책으로 2010년부터 “건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙”에서 건축물의 마감재료 중 외벽에 사용하는 마감재료는 불연

[표 1] 기존 단열재의 성능비교

구분	유기계			무기계		재생원료 활용 세라믹 단열재
	폴리스틸렌폼 (EPS)	폴리우레탄폼 (PUR)	페놀폼 (PF)	글라스울 (Glass wool)	미네랄울 (Mineral wool)	
밀도 (kg/m ³)	15~30 이상	25~45 이상	28~40	32~80	50~140	60~140
열전도율 (W/mk)	0.036~0.043 이하	0.023~0.025 이하	0.017~0.019	0.032~0.035	0.036~0.039	0.035
압축강도 (N/mm ²)	0.05~0.16 이상	0.08~0.35 이상	0.12~0.18	-	-	-
내수성능	보통	보통	장기성능 안 좋음	보통	보통	보통
난연성능	-	-	준불연	불연	불연	불연
열간수축 온도 (°C)	-	-	-	430	550	500
가스유해성	연소시 CO 가스 발생	연소시 CO 가스 발생	연소시 가스 다소 발생 포름알데이드 존재	접착제 연소로 다소 유해	거의 없음	거의 없음

재료 또는 준불연재료를 사용하도록 권고하였고, 2019년 개정을 통해 5층 이하의 건축물에 대한 화재안전 규정 강화와 필로티 구조 건축물의 외벽 중 1층과 2층에는 불연재료 또는 준불연재료를 마감재료로 사용하도록 권고하였다. 최근 EPS를 대체하기 위한 단열재로 페놀수지를 이용한 페놀폼이 국내에서 개발되어 준불연재료로의 많은 관심을 받고 있고²⁾, EPS 등의 외단열용 단열재의 대안책으로 제시되고 있지만 장기내수성과 부식 등의 문제에서 자유롭지 못하다.³⁾

전통적인 불연 단열재는 글라스울과 미네랄울이 대표적이며, 불연재료로 구분되는 만큼 화재안전성이 우수하다.⁴⁾ 하지만 글라스울과 미네랄울은 샌드위치 패널을 제외하고 건축용으로 한정적인 사용에 그치고 있고 대부분 발전소 등의 산업용 플랜트 배관설비나 선박용 등으로 사용된다. 글라스울은 우수한 단열성을 가지고 있지만 수분에 노출될 경우 물을 흡수하고 알칼리 성분과 접촉 시 쉽게 용출되는 단점과 수분에 의해 뭉침이나 처짐 현상이 발생하고 단열효과가 떨어지므로 외벽용 단열재로는 활용되고 있지 않다. 미네랄울은 고온에서 안정성이 우수하고 외벽용 단열재로의 사용가능성이 높지만 유럽이나 미국 등의 제품과 같이 외벽용으로 사용하기 위한 수분저항성이나 시공성을 높이기 위한 표면처리 등에 대한 인식이 적어 활용도가 그리 높지 않았다.

본 기술기사의 재생원료를 활용한 세라믹 섬유 단열재는 불연 단열재인 미네랄울을 기반으로 글라스울과 미네랄울의

장점을 결합하고, 여기에 외벽용 단열재의 필수 성능인 수분저항성(장/단기흡수성) 및 시공성을 개선한 제품이다.

2. 기능성 세라믹 섬유제조를 위한 재생원료 및 섬유화 특성

2.1 재생원료

재생원료는 산업부산물 혹은 산업폐기물 중 재활용을 통해 2차상품의 원료로 사용될 수 있는 물질로 “파쇄·분쇄·세척·성형·열처리 등의 일련의 가공 공정을 거쳐 더 이상 가공이 필요하지 않은 원료(최종원료)”로 정의된다. 본 기사에서의 재생원료는 폐유리, 경석, 플라이애시 및 슬래그류를 검토하여, 최종적으로 망간슬래그, 제강슬래그와 규석의 3종 재생



그림 1. 망간슬래그(좌)와 제강슬래그(우)

[표 2] 재생원료의 화학성분 분석 결과 예

구분		화학성분 (wt.%)									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	감열감량
기존 제품 비교	Ultimate fiber (프랑스 사)	41.8	21.1	13.5	1.5	6.1	3.5	5.2	-	-	-
	Mineral wool	37.9	14.4	34.9	5.5	0.3	-	1.0	-	-	-
	Glass wool	70.5	1.0	9.6	3.9	14	0.2	0.2	-	-	-
재생 원료	고로슬래그	32.8	13.1	41.2	3.47	0.75	0.45	0.49	0.6	-	1.75
	망간슬래그	40.0	17.3	19.0	4.67	0.81	2.51	0.35	0.3	2.0	-
	제강슬래그	20.0	1.68	42.6	6.34	0.47	0.09	22.6	0.7	-	-
	규석	89.8	3.64	1.33	0.05	1.36	1.01	0.7	0.13	-	1.58

원료를 대상으로 진행하였다. 망간슬래그는 망간 제조과정에서 발생하는 부산물로, 고로슬래그 대비 Al_2O_3 함량(17.3%)이 높고, CaO 함량(19.0%)은 낮다. 제강슬래그는 철에서 강을 만들기 위해 쇠물에 녹아있는 탄소, 규소성분 등을 제거하는 과정에서 발생하는 부산물로, 고로슬래그 대비 Fe_2O_3 함량(22.6%)이 높다. 망간슬래그와 제강슬래그의 평균 입경은 약 100mm이며, 망간슬래그와 제강슬래그를 생산라인에 적

용하기 위해서는 별도의 분쇄 공정이 필요하다.

2.2 생산공정 및 운전조건 분석

미네랄올과 글라스올은 사용하는 원재료 차이로 인해 주요 공정에서 서로 차이가 있지만 기본적으로 ① 배합공정, ② 용융공정, ③ 섬유화공정 ④ 집면공정, ⑤ 경화공정, ⑥ 절단공

[표 3] 생산 공정 및 내용

구분	공정내용
① 배합공정	세라믹 단열재 제조 시 필요한 원료를 호퍼에 채우고 제품 배합에 따라 적량의 원료를 계량호퍼에서 계량 후 배출함. 미네랄올 생산 공정에서는 주원료인 고로슬래그와 규석 외 용해공정에서 열에너지를 공급하는 코크스도 계량·투입됨
② 용융공정	계량된 원료는 용융로 투입 전 균일하게 혼합되며 전기적 신호에 따라 일정 간격으로 용융로 내부로 투입됨. 미네랄올 생산공정에서는 코크스의 원활한 연소를 위해 공기를 불어 넣어주며 용융로 최고온도는 약 1,700°C에 도달함
③ 섬유화공정	용융로에서 액화된 원료는 고속으로 회전하는 회전체에서 섬유상으로 변환됨. 미네랄올 생산공정에서는 4개로 이뤄진 휠타입 스피너에서 섬유화되며 동시에 섬유 간 결합을 위한 바인더가 분사됨
④ 집면공정	섬유화 공정을 떠난 세라믹 단열재 섬유는 하향기류로 내부가 저기압으로 유지되는 집면기 내부에서 적재됨.
⑤ 경화공정	세라믹 단열재에 분사된 열경화성 바인더를 건조 및 경화시켜 일정 규격에 맞는 제품을 제조하여 무기단열재 제품의 강도 및 형상 유지를 위한 외관상태 품질을 보증함. 경화로 상하부에 있는 판 플레이트 간격에 따라 제품의 두께를 결정함
⑥ 절단공정	경화로를 통과하여 판상형으로 제조된 세라믹 단열재 제품을 고객이 요구하는 제품의 규격에 맞게 너비 및 길이를 절단하는 공정으로 치수상태 품질을 보증함
⑦ 포장공정	제품 밀도에 지정된 세라믹 단열재 개수 별 수축 포장기를 통과하여 포장 및 하조에 대하여 제품을 보호 및 운반, 취급의 편리를 도모함
⑧ 적재공정	적정 수량의 포장된 제품을 파렛트에 적재하여 제품 출하 시 편리를 도모함

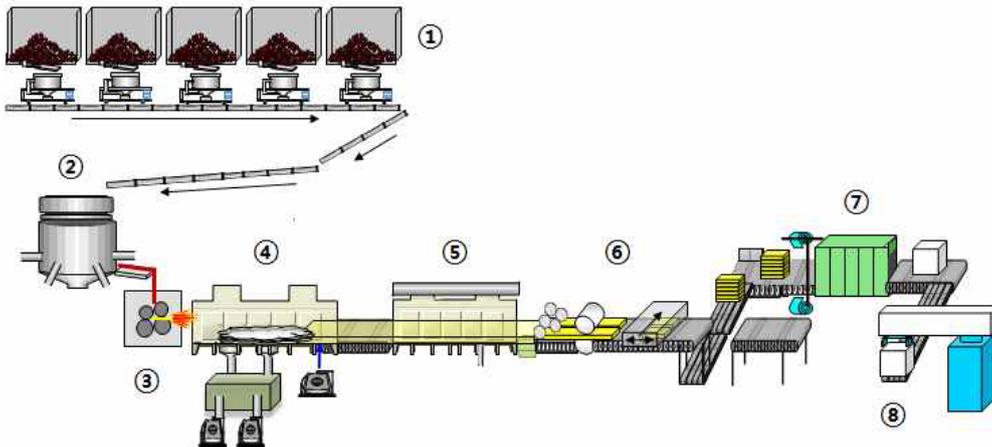


그림 2. 미네랄올의 생산공정

정, ⑦ 포장공정, ⑧ 적재공정의 총 8개의 공정을 거쳐 생산된다. 제조설비에 목표된 화학조성으로 시제품 등을 생산하기 위해서는 각 공정에 적합하고, 글라스울이나 미네랄울의 제조설비에 재생원료의 투입이 가능한 공정을 유지해야 하고, 용융공정이나 섬유화공정 등의 연속생산이 가능하도록 조정이 필요하다.⁵⁾

2.3 원료배합

미네랄울의 주원료는 고로슬래그로 원료 특성상 CaO 함량을 줄이는데 한계가 있다. 따라서 미네랄울의 CaO 범위는 10~25%로 설정하였다. SiO₂ 함량을 조정하기 위해 기존 원료 중 규석은 신규 배합에도 포함시키며 고로슬래그는 제외하는 방향으로 검토하였고, Al₂O₃는 미네랄울 섬유의 기본적인 골격을 형성하는 SiO₂를 대체할 수 있고, Fe₂O₃는 미네랄울 섬

유의 내열성을 향상시키는 역할을 한다.

원료 화학성분 분석결과를 바탕으로 원료배합비를 조절 한 결과, Al₂O₃의 최소치를 확보하기 위해 망간슬래그 50% 이상, Fe₂O₃의 최소치를 확보하기 위해 제강슬래그 20% 이상, 천연석 증량에 따른 용융로 부하 방지를 위해 규석 20% 이내로 하였다. 목표배합은 기존 화학조성 대비 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO 함량은 증가하고, CaO 함량은 감소되어 화학성분과 점도 간 상관관계를 고려할 때 목표배합 적용 시 기존 대비 점도가 상승할 것으로 판단된다.

따라서, 점도가 상승한 용융원료를 기존과 동일한 스피너 운전조건에서 제품을 생산하면 평균 섬유경과 표준편차가 증가하고 미섬유화 물질 함량이 증가하여 열전도율이 상승하는 결과를 가져오기 때문에 열전도율을 낮추기 위해서는 섬유경을 낮춰야 하며 섬유화 공정에서 스피너를 고속으로 회전시키는 방법을 사용한다.

[표 4] 원료배합에 사용된 주요 원료의 화학분석 결과

구 분		화학성분 (wt.%)					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO
기존원료	고로슬래그	34.4	15.1	42.5	3.61	0.59	-
	규석	85.8	4.48	2.35	1.51	1.70	-
신규원료	망간슬래그	37.4	22.2	15.8	3.99	0.19	14.4
	제강슬래그	16.6	2.15	48.4	5.91	19.5	-

[표 5] 목표조성을 달성하기 위한 배합설계

구분 (망간슬래그 : 제강슬래그 : 규석)	화학성분 (wt.%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO
목표조성	37~50	12~23	10~25	0~10	3~10	0~10
Type 1	38.0	13.5	23.6	4.19	6.21	4.32
Type 2	36.0	14.4	24.2	4.32	6.13	4.32
Type 3	40.5	15.5	20.3	4.00	4.28	2.88
Type 4	38.1	16.4	21.0	4.13	4.20	2.88

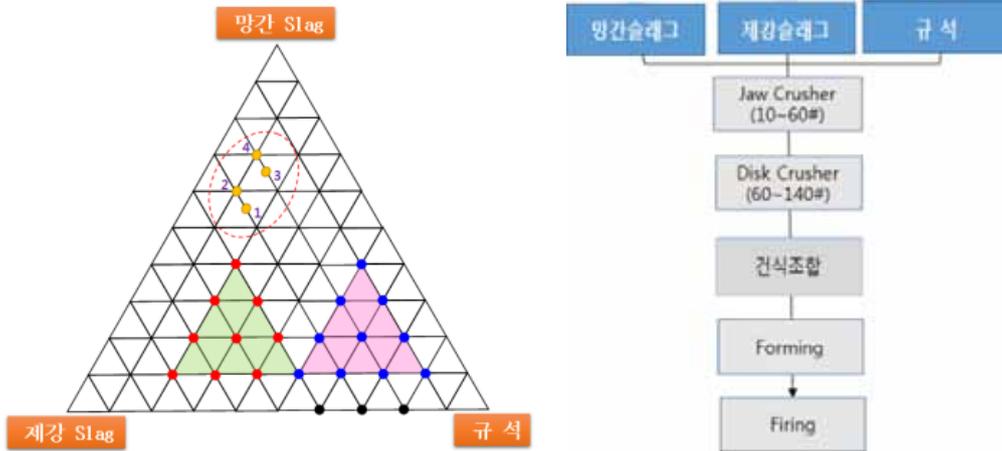


그림 3. 배합 및 성형, 용융특성 공정도

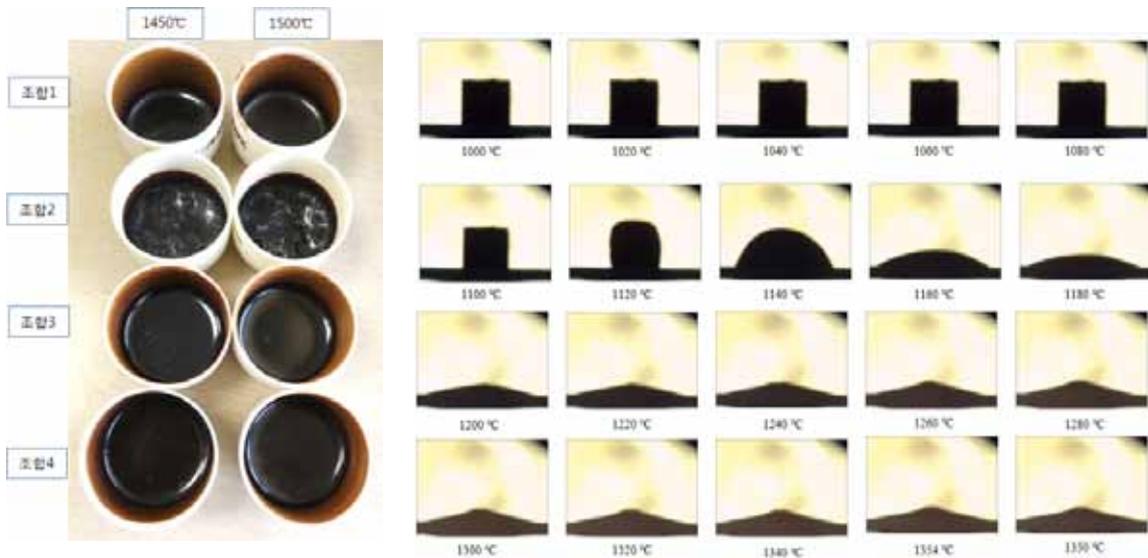


그림 4. 용융상태 및 고온현미경 결과(Type 3)

조성배합은 [표 4]에서와 같이 4종류로 하였다. 주 원료인 망간슬래그는 배합범위를 55%에서 70% 까지 하였고, 첨가제로 제강슬래그의 범위는 30%에서 20%, 규석은 10%에서 15%까지 변화하였다. Type 1, 3, 4 모두 목표 조성 범위에 포함됨을 확인할 수 있었고, Type 2의 경우 SiO₂ 함량이 다소 낮았으나 그 외의 화학성분은 목표조성 범위를 만족한다.

2.4 재생원료의 섬유화

<그림 5>와 같이 Type 2, 4의 경우 고온 영역인 1,150°C 이상에서는 기존 미네랄을 보다 낮은 점도를 보였다. 특히 Type 2의 경우 1,150°C 이상에서 미네랄을 Type 4 보다 낮은 점도임을 확인할 수 있었고, 1,150°C 이하의 온도에서 점도가

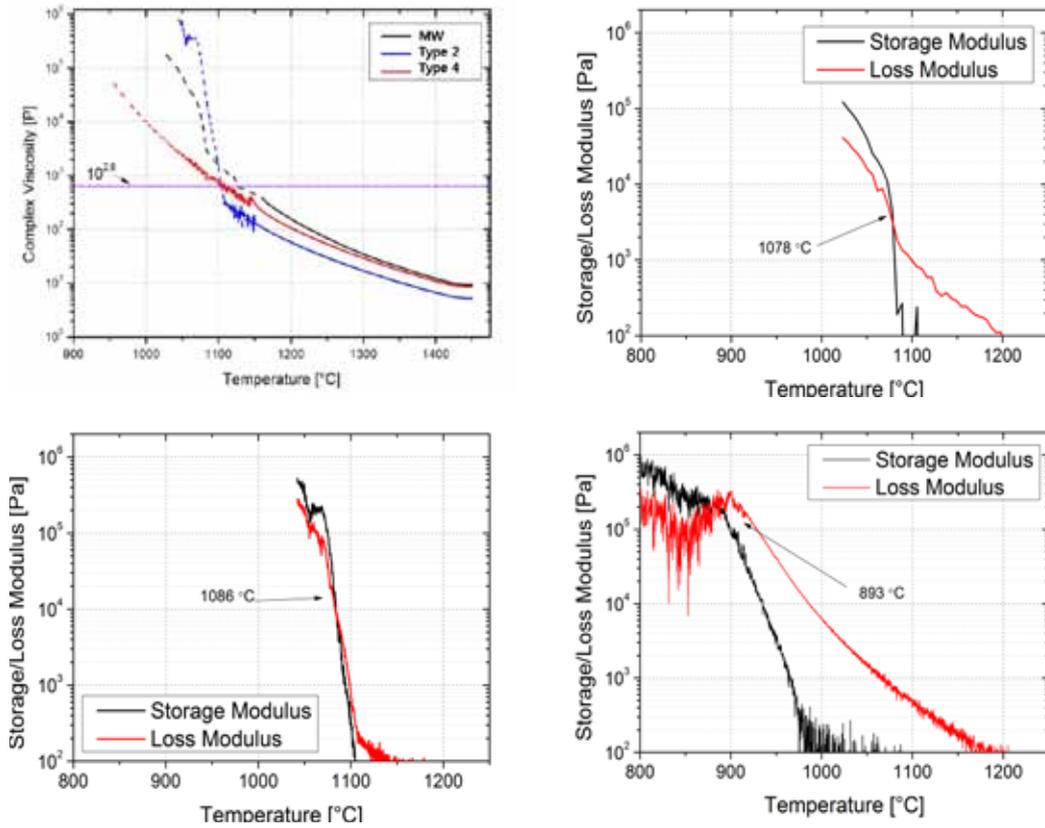


그림 5. 미세알루미늄과 배합에 따른 고온 점도(a) 및 고온 점탄성(b,c,d)

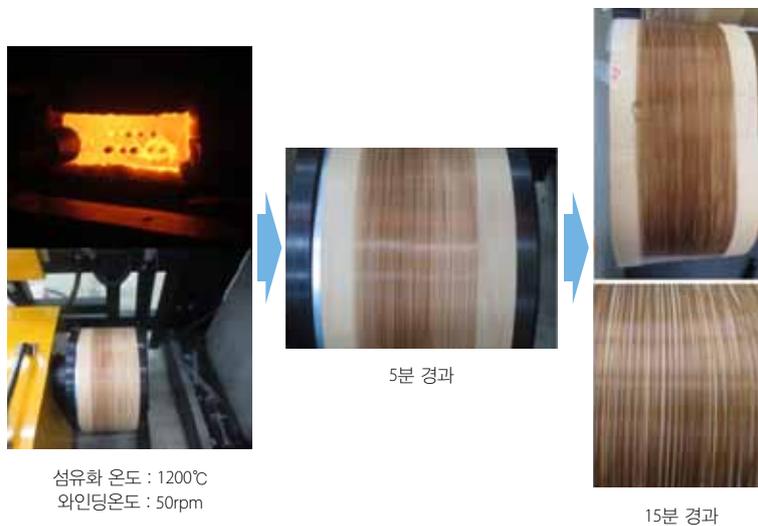
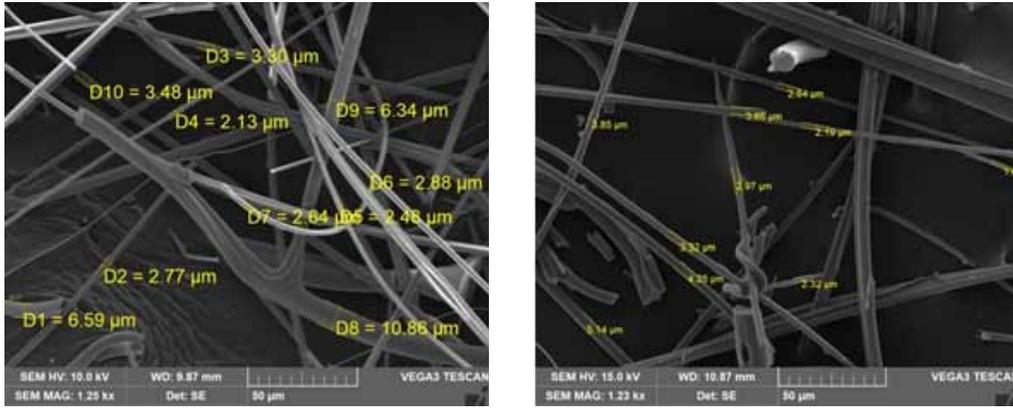


그림 6. 10홀 방사장비를 이용해 제조한 재생원료 활용 세라믹 섬유(Type 4)



(a) Type 2

(b) Type 4

그림 7. 광학현미경을 이용한 세라믹 섬유경 측정 (Type 2, 4)

급격하게 상승하였다. 미네랄을 또한 1,080 °C 부근에서 점도 변화가 급격하게 일어났다. 점탄성 측정을 통해 용융물의 액체와 같은 흐르는 성질 (Loss modulus, G'')과 고체와 같은 탄성체 성질 (Storage Modulus, G')

MW의 경우 G', G'' 값은 1,078 °C에서 교차하며 Modulus는 3,267 Pa이다.⁶⁾ Type 2의 경우 G', G'' 교차온도는 1,086 °C이며 Modulus는 6,595 Pa이고, Type 4의 경우 G', G'' 교차온도는 893 °C이며 Modulus는 13,680 Pa이다.

또한, 미네랄과 Type 2는 경향성이나 그 값들이 유사하며 이를 통해 Type 2의 배합은 기존 미네랄과 동등한 수준의 품질 및 방사 능력을 가질 것으로 예상된다. 섬유를 방사하

기 위한 최적의 점도는 10^{2.8}~10³ Poise로 미네랄의 경우는 적합한 방사온도가 1,140 °C 이며, Type 2, 4 배합의 경우 약 1,100 °C인 것으로 확인된다.

2.5 섬유 및 보드 생산공정 최적화

[표 6] 섬유 생산공정의 최적화

물성	배합 조건	평균	
		Type 2	Type 4
섬유경 (μm)		4.68	4.83
입자함유율 (%)		0.54	0.64
열전도율 (W/m·K)		0.0321	0.0327



(a) 큐플라 용융로



(b) 섬유화 설비



(c) 고속 스피너

그림 8. 미네랄을 생산설비

미네랄을 생산에 활용되며 일반 스피너의 최대속도는 6,000rpm 정도이며 고속 스피너의 최대속도는 8,000rpm의 영역이다. 상대적으로 고속에서 생산한 샘플이 섬유경이 작고 열전도율은 다소 우수한 것으로 분석된다. 고성능 재생원료 세라믹 외벽용 단열재는 고속 스피너를 활용하였다. 스피너 휠이 고속으로 회전 시, 소형의 구상 용융 원료가 다량으로 발생되고 고압의 에어프레션에 의해 길게 섬유화되어 상대적으로 섬유두께가 얇고 입자함유율이 다소 높아졌다. 입자함유율이 높을수록 열전도율은 상승하지만 섬유경이 작아져 입자함유율 상승에 의한 영향을 상쇄한다.

3. 재생원료 활용 세라믹 단열재 제품 및 성능평가

3.1 세라믹 단열재 제품의 성능평가

재생원료 활용 세라믹 단열재 제품의 성능평가는 최종 생

산제품을 대상으로 실시하였고, 생산제품의 공인 시험결과는 다음의 [표 7]과 같다. 세라믹 단열재 제품의 성능평가는 열전도율, 열간수축온도, 불연성, 발수율, 단기흡수성, 장기흡수성, 10%압축강도 등 이다.

[표 7] 제품의 공인성적 결과

구분	단위	결과	
열전도율	W/m·K	0.034 (가등급)	
열간수축온도	℃	729	
불연성	최종평형온도차	K	5.4
	질량감소율	%	7.3
	가스유해성	분	15:00
발수율	%	99.97	
단기흡수성	kg/m ²	0.04	
장기흡수성*	kg/m ²	0.5	
10%압축강도	kPa	15.1	

[표 8] Mock-up 시공

재생원료 활용 단열재 시공절차 (불연 외단열 공법)	시공사진	
① 바탕면 정리 ② 단열재 벽체 부착		
③ 단열재 패스너 시공		
④ 프라이머 도포		
⑤ 1차 접착 모르타르 바름		
⑥ 보강 메시 부착		
⑦ 2차 접착 모르타르 바름 ⑧ 마감재 바름		

3.2 외단열 및 Mock-up 시공

외단열 시스템은 북미에서는 EIFS(Exterior Insulation and Finish System)으로 유럽에서는 ETICS(External Thermal Insulation Cladding System)으로 불리며 국내에서는 일반적으로 EIFS으로 불린다. 외단열 시스템은 일반적으로 구조체, 단열재, 보강 메시, 마감재로 이뤄지며 단열재를 구조체에 부착하는 방법에 따라 크게 습식, 건식 시스템으로 구분된다. 유럽과 북미 지역에서는 외단열 시스템을 오랜 기간 적용하면서 시스템 및 관련 규격을 개선해 온 반면 국내는 외단열 도입 초기 단계로 마감재 대상 표준은 있지만 시스템 및 기타 자재에 대한 표준은 없다. 국내 외단열 시장은 유기 단열재를 활용한 습식시공이 주를 이루고 있다. 건식 외단열 시스템은 최근 알루미늄 패널 등을 결합하여 시공사례가 많이 증가하였으나 국내 시장에서 차지하는 비중은 미미하다. 따라서 시공방법이 검증됐으며 가장 일반적인 습식 외단열 시스템으로 재생원료 세라믹 단열재의 시공성을 평가하였다. 접착 모르타르를 활용하여 단열재 부착하는 일반 공법과 달리 미네랄울을 적용하는 경우 구조체와의 계면에서 탈락할 수 있어 단열재를 관통해

서 구조체에 고정될 수 있는 패스너를 적용하였다.

4. 맺음말

전통적인 불연 단열재인 글라스울과 미네랄울은 유럽이나 미국 등에서 일반적으로 사용되는 재료임에도 불구하고 국내에서의 사용은 발전소나 플랜트 등의 내열성이 요구되는 장소에 제한적으로 사용되었다. 외벽용 단열재로의 사용도 유럽에서는 보편화 되었지만 국내에서는 시공사례를 찾아보기 어렵다. 최근의 화재 발생과 다량의 인명 및 재산피해 사례 및 교훈에서 유기계 단열재나 외벽 화재확산, 가연재료에서 발생하는 유독성 가스가 대부분을 차지하는 것을 확인하였고, 따라서 불에 타지 않는 불연 단열재인 세라믹 단열재의 보급 가능성이 예상되고, 활용범위도 넓어질 것으로 판단된다. 아직 경제성이나 시공성 측면에서 유기계 단열재가 가지는 장점도 커 급격한 단열재 시장의 전환은 어렵지만 안전한 사회 구축을 바라는 국민들의 요구도 커지고 있어 활용범위나 시장성이 높아질 것이다.

참고문헌

1. Mineral Wool - Global Market Outlook (2017-2026), Statistics Market Research Consulting, 2018.
2. A.M. Papadopoulos, State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, Energy and Buildings 37(1) (2005) 77-86.
3. D.D. Tingley, A. Hathway, B. Davison, D. Allwood, The environmental impact of phenolic foam insulation boards, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials 170(2) (2017) 91-103.
4. K.C. Dutton, Overview and Analysis of the Meltblown Process and Parameters, Journal of Textile and Apparel, Technology and Management 6(1) (2008).
5. T.G. Mezger, Applied Rheology 4th edn, Aton Paar 2017.
6. A. Berge, P. Johansson, Literature review of high performance thermal insulation, Chalmers University of Technology, 2012.

담당 편집위원 : 조형규(한국세라믹기술원)