

팽창흑연을 활용한 건축물 외단열 바탕조정재의 역학 및 연소 특성평가

Mechanical and Fire Resistance Properties of Surface Preparation Mortar in Buildings Using Expanded Graphite

류화성^{1*} · 신상현² · 송성용³ · 김득모⁴

Hwa-Sung Ryu^{1*} · Sang-Heon Shin² · Sung-Young Song³ · Deuak-Mo Kim⁴

(Received November 4, 2019 / Revised December 10, 2019 / Accepted December 10, 2019)

In the case of fire, surface treatment agents used in external insulation finishing methods are substances that are vulnerable to fire due to thin finishes and the combustion of polymers. In this study, it was expected that the performance of surface preparation mortars could be improved by using expandable graphite with excellent thermal performance. Experimental results showed that the mechanical properties of surface preparation mortar were improved by using the fly ash and silica fume. Surface treatment materials using expanded graphite have a characteristic of expanding when a fire occurs. It has been shown that heat-swellable surface treatment materials can reduce the penetration of heat sources into the surface of synthetic insulation.

키워드 : 페놀폼, 팽창흑연, 외단열, 바탕조정재, 복합단열

Keywords : Phenol foam, Expanded graphite, External insulation, Surface preparation mortars, Composite insulation

1. 서론

외단열 공법의 하나인 습식 공법 ETICS(Exterior Thermal Insulation Composite System)는 구조물의 외피(Building Envelope)에 단열재를 부착하고 단열재 상부의 표면 처리를 실시하고 경도가 약한 단열재의 외피를 보호하기 위해 바탕조정재를 단열재의 외부에 시공하는 공법이다. 단열공사에서 사용하는 기존의 바탕조정재는 시멘트계(Cementitious) 바탕조정재로써, 외피의 경우 아크릴 에멀전을 사용한 마감재로 구성되어 있다(Chang and Choi 2013; Kim and Kim 2014).

외단열 공법에서 시멘트계 바탕조정재의 사용의 목적은 단열재를 콘크리트 벽체와 접착시키는 기능과 단열재 부착 후 단열재 간의 틈이나 요철을 미장(Plaster) 공정을 통해 평탄화하는 목적이 있다. 또한, 바탕 조정 후 아크릴계 마감재를 시공하기 위한 적절

한 표면 구조를 확보하는데 있다.

따라서 건축물 외단열 공법에서 사용되는 시멘트계 바탕조정재에는 다양한 성능이 요구된다. 대표적으로 단열재의 부착력을 확보하기 위한 접착강도, 외기 온도 변화에 따른 부착력의 안정성, 외기로부터의 투수에 의한 단열재 손상을 막기 위한 내수성이 요구된다. 부착력이 낮은 시멘트계 바탕조정재를 사용할 경우, 외단열 공법에서 발생하는 주요 하자(defect)에는 단열재의 박락(exfoliation)이 발생하거나 수분 투과로 인한 단열층의 열전도율이 낮아지는 문제가 있다. 이러한 하자 발생을 제어하기 위하여, 외단열 공법에서 사용되는 시멘트계 바탕조정재의 부착강도와 온냉반복강도는 1.1N/mm^2 이상, 물흡수계수 $0.2\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ 이하로 규정되어 있다(KS F 4716). 이러한 성능을 확보하기 위하여 시멘트계 바탕조정재는 에멀전 타입의 폴리머를 사용하여 부착력 및 내수성을 향상한 폴리머 시멘트 모르타르 계열의 소재가 사용되고 있다.

* Corresponding author E-mail: rhsung73@hanyang.ac.kr

¹한양E&C 총괄사업팀장 (Hanyang Experiment and Consulting, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea)

²한양E&C 연구개발팀장 (Hanyang Experiment and Consulting, Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea)

³(주)유송엔지니어링 연구소장 (Yousong Engineering, Anyang, 15588, Korea)

⁴화록건설산업 대표이사 (Hwarok Construction Industry Hanyang University ERICA, Ansan, 15588, Korea)

한편, 습식 외단열 공법에서의 화재 발생시 단열층의 내화성을 향상하기 위한 다양한 방안이 제시되고 있다(Min and Kim 2010; Lee et al. 2016). 하지만, 외단열 공법의 습식 공법에서 단열재 상부의 마감재와 바탕조정재의 두께는 3mm 정도이며 화재가 발생할 경우 단열재에 대한 내화성이 낮은 문제점이 있다. 경량 단열 모르타르와 같은 다공질 구조로서 경량 단열 모르타르와 같은 소재는 열투과를 억제하는 효과가 있으나, 외단열 공법에서의 바탕조정재의 두께(3mm)를 고려할 때, 시공과정에서 적합한 표면구조를 구현하기가 어려운 문제점이 있다. 외단열 공법을 적용한 건축물에서의 화재가 발생할 경우, 건축물의 외부 혹은 내부의 착화과 함께 화염에 의한 열이 외피 마감재에 투과되어 단열재까지 도달한다. 이후 발화점 이상으로 상승되어 단열재의 착화로 연결되고 외벽면을 따라 급격하게 화재가 상층부로 전달되는 과정을 거치게 된다.

특히, 가장 많이 사용되고 있는 EPS(Expanded Poly Styrene) 소재 Styrofoam 단열재는 450°C부근에서 액상화를 거친 후 약 550°C 부근에서 발화되어 화재 확산성이 매우 큰 특성을 가지고 있다(Lee et al. 2013). 반면에, 페놀폼이나 우레탄폼은 650°C부근에서부터 연소가 되고 탄화물하여 상대적으로 EPS에 비하여 낮은 화재 확산성을 가진다. 이 가운데 페놀폼은 연소시 가스생성물이 적고 EPS에 비하여 열적성능이 우수하여 외단열공법에서 주요한 소재로 대두되고 있으나 고비용으로 사용에 제한이 있다. 결론적으로, 외단열재 및 바탕조정재에 요구되는 가격절감, 연소 확산속도를 저하, 시공성능 향상을 위하여, 단열소재의 복합구조, 시멘트계 바탕조정재의 열투과성 억제가 필요하다.

팽창 흑연은 일반 흑연과 유사하게 카본 함량이 높은 물질로서 일반 흑연은 열을 받으면 단순 산화에 의해 분해되는 것과 달리 팽창 흑연은 흑연의 층상구조 사이에 황이나 질소화합물을 주입한 후 열을 받으면 층간 구조가 팽창되어 수십배에서 수백배의 발포율을 갖게 되는 물질이다. 팽창된 이후의 흑연은 다공층의 구조를 만들어 열과 화염을 차단하는 차열층을 생성하여 열투과성을 억제할 수 있는 특성이 있다. 시멘트계 바탕조정재는 약 2mm 정도의 얇은 미장층을 갖으나 팽창 흑연을 사용할 경우 화재 발생시 체적을 팽창시켜 다공층을 생성시킬 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 외벽면 위에 ①페놀폼-②EPS-③유리섬유메시-④팽창흑연 혼입 바탕조정재의 순서로 구성된 외단열 공법의 단열재층의 물리역학적 특성을 검토하고자 한다. 세부적으로, 외단열 공법에 사용되는 시멘트계 바탕조정재가 얇게 시공되는 경우에도 표면부까지의 열전달을 억제할 수 있도록 바탕조정재에 팽창흑연의 혼합 및 적용성을 검토하였다. 또한 팽창흑연 혼입에 따른 물리역학적 성능 저하(부착강도, 물흡수계수 등)를 방지하기 위하여 플

라이애시와 실리카흙의 혼입 및 적용을 2차적으로 검토하였다. 또한, 단열재 상부에 바탕조정재를 도포하기 전에 부착되어 바탕조정재의 경화 과정 중 균열 억제 및 인장강도 증진을 위해 유리섬유 mesh의 부착이 공통적으로 필요하다. Mesh 부착 이후 페놀폼과 EPS의 2단 구조로 형성된 단열재의 상부에 팽창흑연 혼입 바탕조정재를 바르고 화염에 노출시켜 연소특성을 평가하였다.

2. 사용재료

2.1 바탕조정재

본 연구에서 사용된 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 비중은 3.15이며, 사용재료의 물리 화학적 성질은 아래 Table 1과 Table 2와 같다. 바탕조정재에 사용된 골재의 입도와 구성은 Table 3과 같이 요약한다. 바탕조정재는 아크릴 에멀전(아크릴수지+에멀전)과 골재가 혼합된 반액상의 페이스트를 제조한 뒤 여기에 시멘트가 혼합되어 구성된다. 아크릴 에멀전에 사용된 아크릴 수지의 물성을 Table 4에 나타낸다. 아크릴수지에 첨가되는 에멀전은 보습제, 증점제 및 소포제로 구성되었다. 시멘트와 함께 바인더로 사용된 아크릴 에멀전의 구성은 Table 5와 같다.

Table 1. Chemical composition of ordinary portland cement(unit: wt%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃
21.1	4.84	63.9	3.32	3.09	1.13	0.29	2.39

Table 2. Physical properties of ordinary portland cement

Density(20°C)	Blaine fineness specific surface(cm ² /g)
3.15g/cm ³	3,400

Table 3. Size of dolomite aggregate

Size(mm)	0.6~0.85	0.25~0.6	0.1~0.25	0.075~0.1
Rate(%)	19.74	40.78	13.16	26.32

Table 4. Specification of acrylic resin

Color	Solid content(%)	Viscosity(mPa · S)	pH(20°C)
White	48	102	9.0

Table 5. Composition of binder(unit: wt%)

Acrylic resin	Butyl carbitol	Antifoaming agent	Ethylene glycol	Methyl cellulose
93.86	3.25	0.36	1.44	1.09

Table 6. Specification of expandable graphite

Carbon content(%)	Expansion rate(%)	Starting temperature(°C)	Particle size(μm)
92	100~250	200~250	173

바탕조정재 표면의 팽창성을 부여하기 위한 방안으로 팽창흑연을 사용하였다. Table 6은 본 실험에 사용된 팽창흑연의 물성을 나타낸다. 팽창흑연은 난연재로 주로 사용되는 소재로 유기물 내 연소시 탄소 층간 결합의 확장으로 인해 공극이 생성되며, 열전달을 억제할 수 있는 소재이다. 본 연구에서 사용된 팽창흑연은 173μm의 입도를 갖고 팽창율은 100~250%이며, 발포 개시온도는 180~200°C인 것을 사용하였다.

유리 섬유 메쉬는 단열재 상부에 바탕조정재를 도포하기 전에 부착되며, 바탕조정재의 경화 과정 중 균열 억제 및 인장강도 증진을 위해 사용된다. 유리 섬유는 단열재 상부의 보호층의 역할을 하며, 본 연구를 위하여 사용된 유리 섬유 메쉬는 900MPa급의 것을 사용하였다. Table 7은 유리 섬유 메쉬의 물리적특성을 나타낸다. 한편, 바탕조정재의 혼화재료로 사용된 주요 소재는 플라이애시와 실리카흄을 사용하였으며, 주요 물성은 아래 Table 8과 같다.

Table 7. Physical properties of glass fiber mesh

Moisture regain(%)	Density (g/cm ³)	Loss of ignition(%)	Tensile strength (MPa)	Mesh size (mm)
<0.06	2.54	0.7±0.15	900	4

Table 8. Specification of fly ash and silica fume

Type	Fly ash	Silica fume
SiO ₂	41.20%	95.90%
Al ₂ O ₃	14.70%	0.00%
CaO	16.00%	1.01%
MgO	1.36%	0.09%
K ₂ O	2.38%	0.44%
Na ₂ O	0.61%	0.00%
Fe ₂ O ₃	18.10%	0.18%
SO ₃	1.03%	0.11%
Loss of ignition	1.60%	0.70%
Density(g/cm ³)	2.2	2.1
Blain(g/cm ²)	2,800	150,000~250,000

2.2 단열재

본 연구에서 사용된 단열재는 페놀폼과 EPS의 조합으로 구성되며, 단열재 시험체는 페놀폼 30mm와 EPS 60mm로 구성되었다. 페놀폼의 표면에는 유리 섬유 메쉬로 보강된 바탕조정재를 사용 단열 구조체를 제작하였다. 단열재 시험체에 사용된 단열소재의 물성은 아래 Table 9와 같다.

Table 9. Specification of insulation

Type	Phenol foam	EPS
Color	Pink	White
Thermal conductivity (W/m·k)	0.019	0.036
Density(kg/cm ³)	36	30
Flexural strength(MPa)	23.3	35

3. 실험계획 및 방법

3.1 개설

본 실험은 두 단계로 진행되었다. 첫번째는 시멘트계 바탕조정재의 팽창흑연을 혼입한 뒤 강도 저하를 평가하였다. 팽창흑연 혼입에 따른 강도 저하 현상을 보완하기 위한 방안으로 플라이애시와 실리카흄을 혼입하여 강도 성능을 향상하고자 하였다. 두 번째는 제조된 시멘트계 바탕조정재를 단열재의 상부에 도포한 뒤 화염에 노출된 시간에 따른 단열재 내부 온도를 측정하여 화재 지연형 바탕조정재의 특성을 평가하고자 하였다. 실험과정을 아래 Table 10에 나타낸다.

Table 10. Experiment process

Experiment step	Evaluation index
① Characteristics of graphite incorporation	Compressive and flexural strength Adhesion in tension Freeze thawing Water absorption coefficient
② Fly ash and silica Fume incorporation to improve performance	Compressive and flexural strength Adhesion in tension Freeze thawing Water absorption coefficient
③ Characteristics of graphite incorporation	Adhesion in tension Freeze thawing Water absorption coefficient
④ Characteristics of heat transfer delay	Temperature changing Expanded depth

3.2 바탕조정재의 배합

본 연구 개발에서 사용된 바탕조정재의 배합은 아래 Table 11과 같다. 아크릴 에멀전과 골재가 혼합된 반액상의 페이스트를 제조한 뒤 여기에 시멘트를 혼합하여 배합하였다. 먼저, 플라이애시와 실리카흄을 사용하여 물리적 성능을 향상하고자 하였으며, 이후 화염 반응성 소재로 팽창흑연을 사용하여 바탕조정재를 배합하였다.

Table 11. Experimental factors and levels in this study(unit: g)

Items	Sand	Flyash	Silica fume	Expandable graphite	Emulsion	Methyl cellulose	water	OPC
Plain	1140	0	0	0	180	6	280	2000
EG05	1083			57				2000
EG10	1026			114				2000
EG15	969			171				2000
EG20	912			228				2000
F05	1083	57	0	0				2000
F10	1026	114	0	0				2000
F15	969	171	0	0				2000
F20	912	228	0	0				2000
F10S1	1014.6	114	11.4	0				2000
F10S3	991.8	114	34.2	0				2000
F10S5	969	114	57	0				2000
FSEG05	934.8	114	34.2	57				2000
FSEG10	877.8	114	34.2	114				2000
FSEG15	820.8	114	34.2	171				2000
FSEG20	763.8	114	34.2	228				2000

*Abbreviation

F-Fly ash, S: Silicafume, EG: Expandable Graphite

3.3 실험 방법

3.3.1 압축 강도 및 휨강도

본 실험에서는 시멘트 모르타르의 기초적인 성능을 평가하기 위하여 시멘트 모르타르의 시멘트 모르타르(KS F 2477)의 압축강도와 휨강도를 측정하였다. 압축강도와 휨강도의 측정은 각 재령별로 3일, 7일, 28일의 특성을 평가하였다.

3.3.2 부착강도

배합에 따른 시험체의 부착강도 시험은 70mm×70mm 시험체를 제작하여 KS F 4716의 규격에 따라 RH60%, 20±2℃의 조건에서 표준양생을 실시한 뒤 14일의 부착강도를 측정하였다. 아래 Fig. 1은 부착강도 시험체의 형상을 나타낸 것이다.

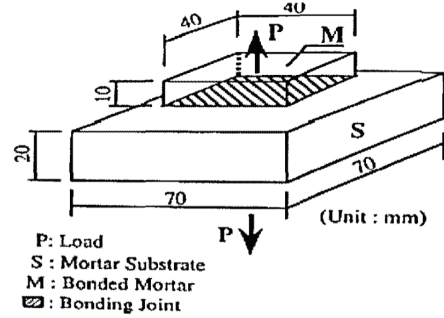


Fig. 1. Specimen of adhesive in tension strength test

3.3.3 물흡수계수

물흡수계수란 재료의 면적당 물흡수량(kg/m²)과 시간(√t)사이의 비례 계수를 말한다. 물흡수계수를 측정하기 위하여 KS F 4716의 기준에 따라 시험체를 제작하였다. 시험체는 지름 150mm, 두께 40mm로 된 원형시험체에 대하여 표면에 바탕조정재를 3mm도포하여 제작하였다. 제작된 시험체를 물흡수계수 산정을 위하여 KS F 2609(건축 재료의 물 흡수 계수 측정 방법)에 따라 측정하였다. 재료의 한면이 물과 접촉시 시간에 따른 면적당 흡수량은 다음과 같다.

$$m = w \cdot \sqrt{t}$$

여기서,

- m: 면적당 물흡수량(kg/m²)
- w: 물 흡수 계수(kg/m²h^{0.5})
- t: 시간(h)

3.3.4 온냉반복시험

마감재의 온냉반복시험을 평가하기 위하여 KS F 4716에 따라 시험을 수행하였다. 시험체의 제작은 70mm×70mm×20mm의 모르타르판을 제작한 뒤 상부에 바탕조정재를 3mm도포하였다. 먼저, 시험체를 20±2℃의 물속에 18시간 담가둔 뒤, 즉시 -20±3℃의 항온 탱크 속에서 3시간 냉각시키고, 이어서 50±3℃의 다른 항온 탱크 속에서 3시간 가온하는 사이클로 24시간을 1사이클로 하는 조작을 10회 반복한 뒤, 부착강도를 측정하였다.

3.3.5 화염 노출 시험

먼저, 바탕조정재의 화염 노출로 인한 단열재 표면부의 특성을 평가하기 위하여 제조된 외단열 시스템을 제작하였다. 시험체의 단열재 구성은 스티로폼을 60mm, 페놀폼 30mm의 두께로 접착한 뒤 가로 15cm, 높이 50cm의 크기로 절단하여 제작하였다. 이후 페놀폼의 상부에 유리섬유메쉬를 대고 바탕조정재를 3mm도포하

여 표면부를 마감하였다. 시험체의 측정은 화원으로부터 약 7cm 간격으로 한 뒤 약 15분간 단열재 표면에 노출하였다. 화원은 가스 토치를 사용하였으며, 열원의 불꽃온도는 700℃의 온도를 갖는 것을 사용하였다. 열전대는 K형 열전대를 사용하였으며, 바탕조정 재료로부터 1.5cm 두께부위에 열전대를 하나 설치하였으며, 3cm 두께에 두 번째 열전대를 설치하여 15분간 화염에 노출 후 각 지점의 온도 변화를 측정하였다. 이후 바탕조정재의 팽창 두께를 측정하였다.

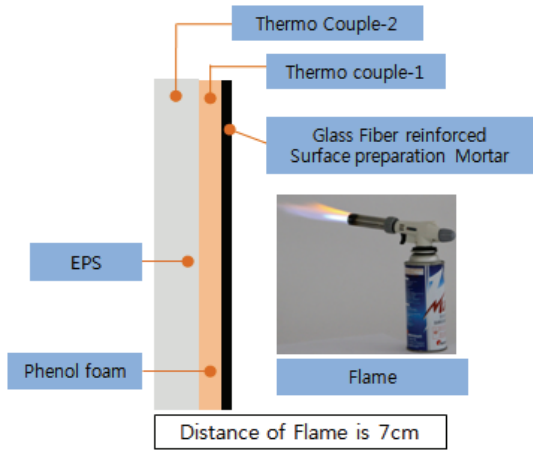


Fig. 2. Insulation system & flame exposed test

4. 실험 결과 및 고찰

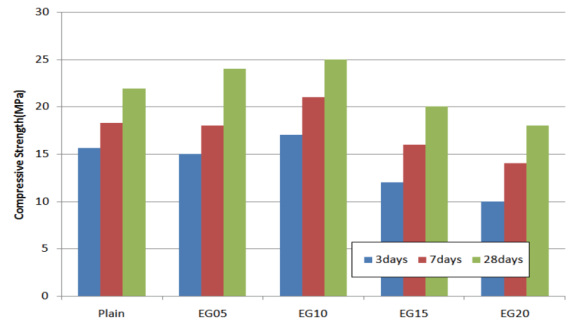
4.1 압축강도

Fig. 3은 압축강도 시험결과를 나타내고 있다. 팽창흑연이 혼입된 경화체의 압축강도는 5, 10%의 혼입율에서 Plain과 유사한 강도를 나타내었으나 15%이상의 치환에서는 압축강도가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다.

플라이애시가 혼입된 경화체의 압축강도를 측정한 결과 3일 재령의 압축강도는 OPC와 유사한 정도로 나타났다. 28일 재령에서의 압축강도는 20% 혼입시 최대인 것으로 나타났다.

실리카흄을 혼입한 시험체의 경우, 3일 재령의 압축강도는 거의 차이가 없는 것으로 나타났으나, 1% 혼입시 28일 재령에서의 압축강도의 증가가 가장 크게 나타났으며, 3%혼입시 최대로 증가하였다.

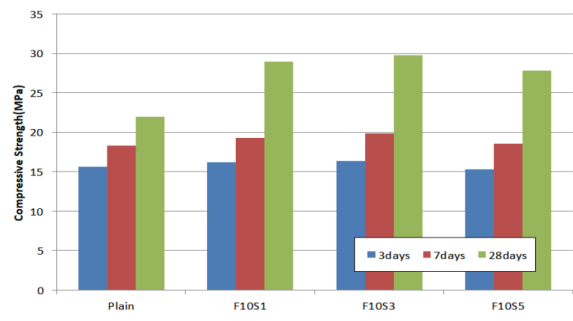
플라이애시 15%와 실리카흄 3%를 혼입한 배합에 대하여 팽창흑연을 혼입한 경우, 혼입율이 증가함에 따라 3일 재령의 압축강도는 감소하는 것으로 나타났으나 7일 이후의 압축강도는 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이후 28일 재령에서는 모든 시험체의 압축강도가 Plain보다 높은 것으로 나타났다.



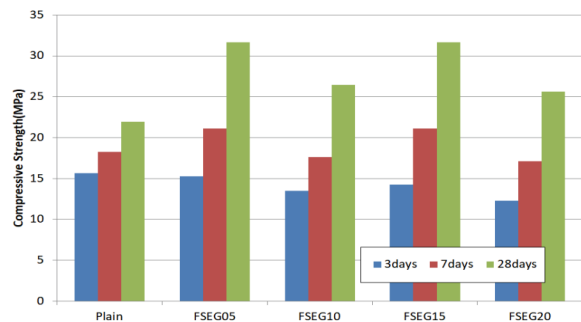
(a) Expandable graphite



(b) Fly ash

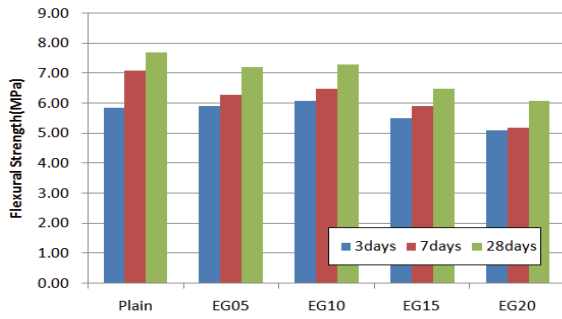


(c) Fly ash + silica fume

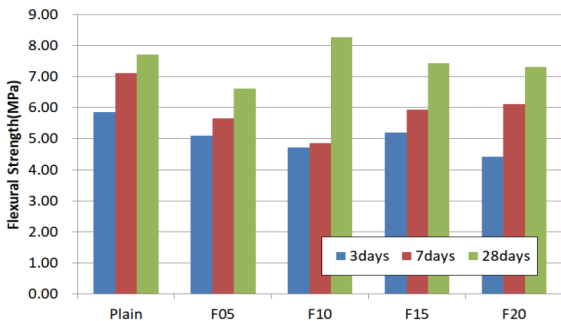


(d) Fly ash + silica fume + expanded graphite

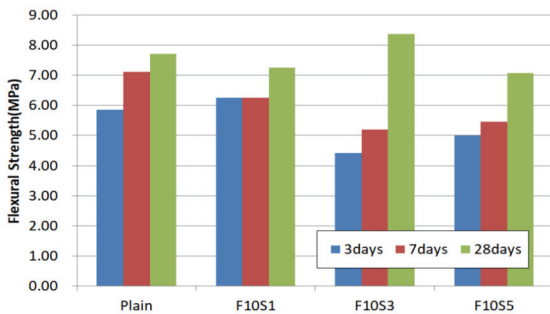
Fig. 3 Compressive strength



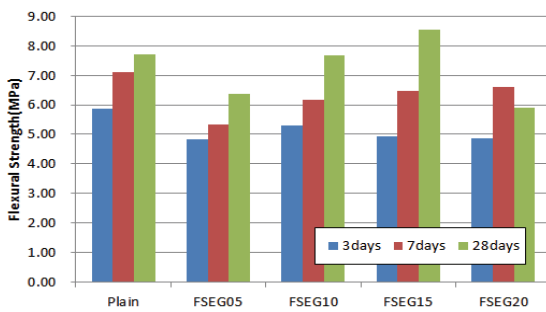
(a) Expandable graphite



(b) Fly ash



(c) Fly ash + silica fume



(d) Fly ash + silica fume + expanded graphite

Fig. 4. Flexural strength

4.2 휨강도 특성

Fig. 4는 휨강도 시험결과를 나타내고 있다. 팽창흑연을 혼입한 경화체의 휨강도는 팽창흑연의 혼입율이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 휨강도는 인장강도와 압축강도 두 가지의 힘으로 구성되어 있는 것을 고려할 때 압축강도가 증가되었던 5, 10%의 팽창흑연 혼입율에서의 강도 증가가 휨강도에서는 감소된 것으로 볼 때 시멘트 경화체의 인장력은 감소된 것으로 판단된다.

플라이애시 혼입시 휨강도 특성을 살펴보면 3일 재령에서의 휨강도는 플라이애시 혼입에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 플라이애시 10%에 대하여 실리카흄을 혼입한 경우 3일 재령의 휨강도는 약간 저하하거나 동등성능을 나타내는 것으로 나타났으나 28일 재령에서 3%혼입시 휨강도가 가장 큰 것으로 나타났다. 플라이애시 15%와 실리카흄 3%를 혼입한 배합에 대하여 팽창흑연을 혼입한 경우, 휨강도는 증가하는 형태로 나타나 팽창흑연 15%에서 Plain의 휨강도를 상회하는 것으로 나타났다.

4.3 바탕조정재의 부착강도

Fig. 5는 부착강도 시험결과를 나타내고 있다. KS F 4716에서 요구하는 부착강도는 1.1N/mm²로 Plain의 부착강도는 1일 재령에서 약 0.4N/mm², 14일 재령에서 1.8N/mm²로 나타났다. Plain에 대하여 팽창흑연을 혼입하는 경우, 부착강도는 1일 재령에서 5% 혼입시 약 0.2N/mm²로 나타났으며, 14일 재령에서 기준 강도인 1.1N/mm²를 도달하는 것으로 나타났다. 그러나 팽창흑연을 10% 이상 혼입하는 경우 1일 재령에서는 부착탈락으로 인해 강도 측정이 불가능하였으며, 14일 재령에서는 부착력이 기준 강도에 미달하는 것으로 나타났다. 팽창흑연입자는 수화불가능한 탄소 물질로 수화과정상에서 물리적 충전체로서만 존재하게 된다. 이로 인해 시멘트계 바탕조정재가 표면부의 앵커링을 저하시키고 수화물질의 생성에 있어 불순물로 존재함으로 강도가 저하는 것으로 판단된다.

플라이애시를 혼입한 경우 1일 재령의 부착강도는 플라이애시 혼입율 20%에서 최대 0.6N/mm²로 나타났다. 플라이애시 10%와 실리카흄을 각각 1, 3, 5%치환한 경우, 1일 재령에서 부착강도는 최대 0.7N/mm²로 나타나 플라이애시만을 혼입한 경우보다 약간 상승하는 것으로 나타났다. 14일 재령을 기준으로 하였을 때 플라이애시만을 혼입한 시험체의 최대 강도는 약 2.4N/mm² 정도였으나 실리카흄을 혼입한 경우 혼입율 3%에서 부착강도는 2.9N/mm² 정도로 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다.

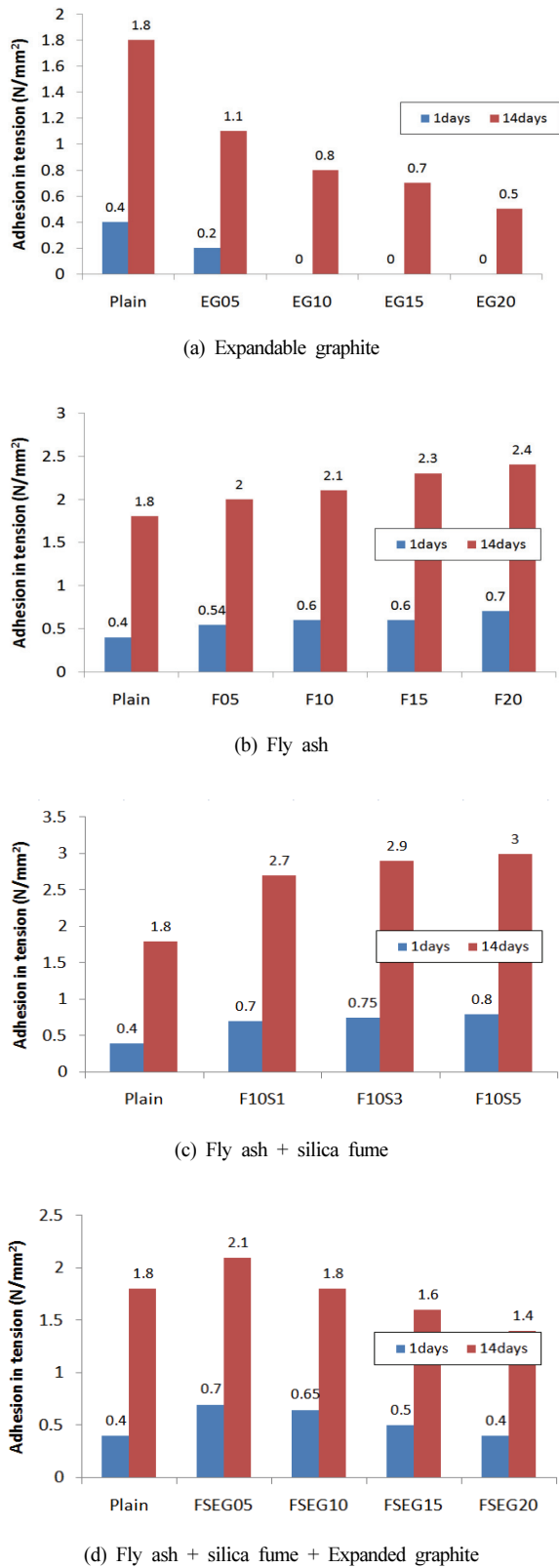


Fig. 5. Adhesion in tension

실리카흙 5%치환시의 부착강도는 실리카흙 치환율 3%와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 플라이애시 및 실리카흙의 원형입자들도 바탕조정재가 콘크리트계면의 취약한 미세공간들을 밀실하게 하는 앵커링 현상을 통해 강도가 증진되는 것으로 판단된다(Chuijen et al, 2013).

플라이애시 15%와 실리카흙 3%를 혼입한 배합에 대하여 팽창흑연을 혼입한 경우, 혼입율이 증가함에 따라 1일 부착강도 및 14일 재령의 부착강도는 점차 감소하는 것으로 나타났으나 모든 배합에서 14일 재령에서의 1.1N/mm²이상의 부착력을 보였다. 팽창흑연 15%이상 혼입시에는 Plain보다 낮은 부착강도를 나타내었다. 팽창흑연을 혼입한 경우 강도 저하로 인해 KS규격 이하의 성능이 나타났으나 플라이애시와 실리카흙의 혼입을 통해 물리적 성능을 개선한 바탕조정재에 대하여 팽창흑연 10%혼입시까지 기존 바탕조정재와 유사한 강도를 얻을 수 있었다.

4.4 바탕조정재의 온냉반복 부착강도

Fig. 6은 바탕조정재의 온냉 반복 조건하에서의 부착강도를 나타낸 그래프이다. 외단열 공법에서 사용되는 시멘트계 바탕조정재는 단열재 상부에 시공되는 소재로 외기 온도 변화에 따른 팽창과 수축으로 인해 강도 저하가 발생하게 된다. 시멘트계 바탕조정재의 규격인 KS F 4716에서는 기준 부착강도를 1.1N/mm² 이상의 성능을 요구하고 있다. Plain에 대하여 팽창흑연을 혼입한 경우 온냉 반복 강도는 혼입율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, 팽창흑연 5% 혼입시에도 기준 강도보다 낮은 0.6 N/mm² 으로 나타나 바탕조정재로 사용이 불가능하였다.

플라이애시를 혼입하는 경우 온냉반복강도는 5% 혼입에서부터 Plain보다 높은 부착강도를 보였으며, 플라이애시를 15% 치환시에는 부착강도가 약 1.4N/mm² 정도로 10% 치환시보다 약 0.2N/mm²가량 가장 높은 증가량을 보였다. 플라이애시를 20% 치환하는 경우 부착강도 증가가 크지 않은 것으로 나타났다. 플라이애시 15%에 대하여 실리카흙을 혼입하는 경우 1%혼입시 부착강도는 1.6N/mm²이상으로 나타나 부착강도의 안정성을 갖는 것으로 나타났다. 플라이애시와 실리카흙의 혼입을 통해 성능이 개선된 바탕조정재에 대하여 팽창흑연을 치환한 경우 5% 치환시 부착강도는 1.3N/mm²로 Plain보다 높은 강도를 나타내었으나 10%에서는 Plain과 유사한 수준의 부착강도를 나타내었다. Plain에 대하여 5%의 팽창흑연을 치환한 경우 부착강도 저하율은 46%정도였으나 실리카흙과 플라이애시로 개선된 바탕조정재에 대한 5%의 팽창흑연 치환시 부착강도 저하는 34%정도로 나타났다.

이는 시멘트 매트릭스에 수화 반응에 참여하지 않는 팽창흑연이 혼입되면 앵커링을 방해하면서 피착면에 대한 부착력 저하가 커지는 것으로 판단된다(Chuijen et al, 2013).

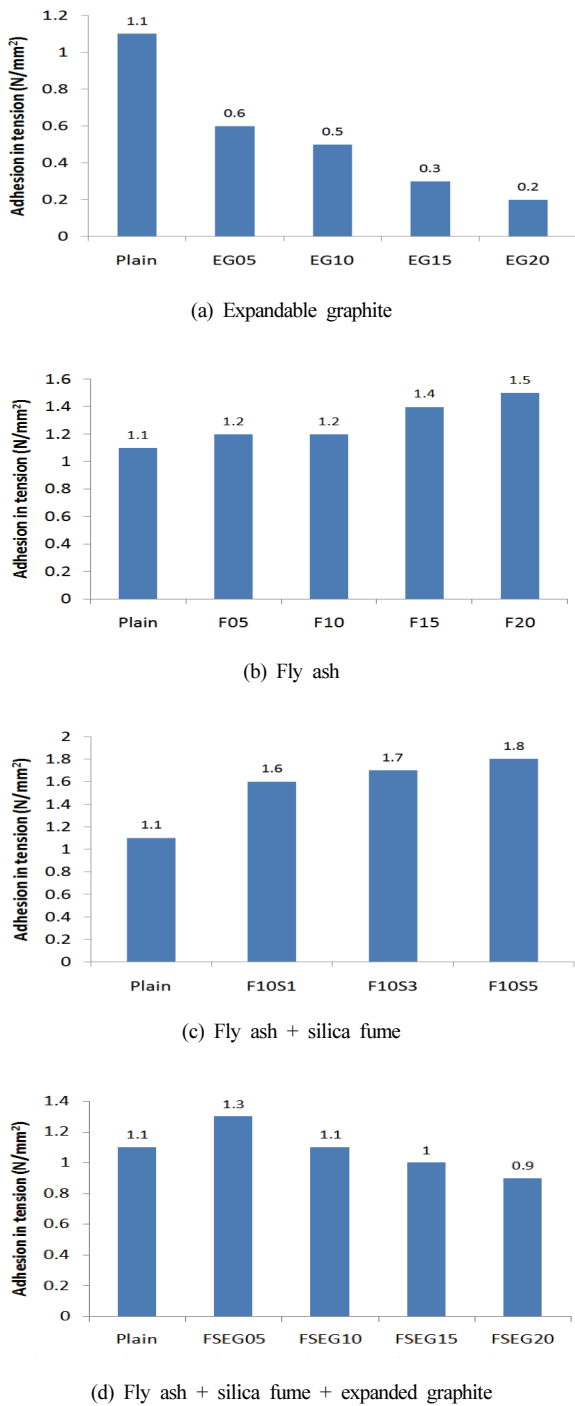


Fig. 6. Adhesion in tension according to freeze thawing

플라이애시와 실리카흄을 혼입하는 경우 수화조직을 밀실하게 하여 부착계면의 앵커링 증진 효과로 온냉 반복 조건에서의 팽창·축연 혼입시 강도 저하를 억제할 수 있는 것으로 판단된다(Yang et al, 2007).

4.5 물흡수계수

Fig. 7은 바탕조정재의 물흡수계수를 나타낸 그래프이다. Plain의 물흡수계수는 $0.07\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ 로 KS 4716의 물흡수계수인 $0.2\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ 보다 매우 낮게 나타났다. 팽창축연 5%를 혼입된 경우, 물흡수계수는 Plain보다 약 2배가량 상승하는 것으로 나타났다. 팽창축연 15% 혼입시 $0.25\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ 로 KS규격의 물흡수계수보다 높은 것으로 나타났다.

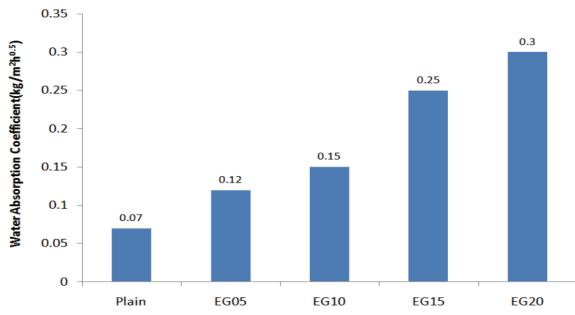
물흡수계수를 저감하기 위한 방안으로 플라이애시를 혼입하는 경우 10% 혼입율에서 최소인 것으로 나타났으며, 플라이애시 15% 이상 혼입되는 경우 물흡수계수는 Plain보다 높은 것으로 나타났다. 그러나 플라이애시 혼입시 증가된 물흡수계수는 플라이애시 혼입율 20%에서 $0.11\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ 로 Plain에 비하여 약 57% 증가하나 KS규격의 물흡수계수보다 낮은 것으로 나타났다. 플라이애시 15%에 대하여 실리카흄을 혼입하는 경우 실리카흄의 혼입율이 증가함에 따라 물흡수계수는 감소하는 것으로 나타났다.

플라이애시 15%와 실리카흄 3%로 개선된 바탕조정재에 대하여 팽창축연을 혼입하는 경우 물흡수계수는 팽창축연의 혼입율이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 팽창축연 혼입 5%와 10%까지는 물흡수계수가 $0.09\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$, $0.095\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ 로 유사하였으나 15%에서부터는 물흡수계수가 $0.1\text{kg/m}^2\text{h}^{0.5}$ 을 초과하는 것으로 나타났다.

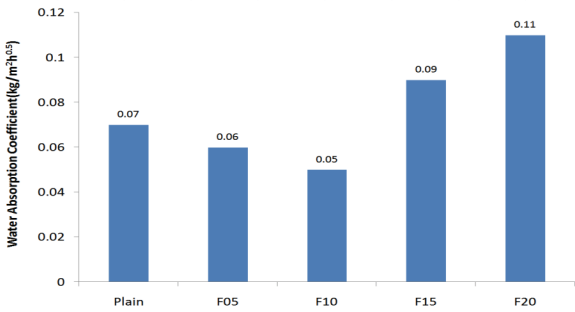
바탕조정재의 물흡수계수는 시멘트보다 분말도가 작은 플라이애시의 경우 일정 이상의 혼입율에서는 투수성이 높아지는 것으로 나타났다. 시멘트에 비하여 분말도가 큰 실리카흄은 분말도가 $150,000\text{g/cm}^3$ 상 즉 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 경우 미세공극 저감에 따른 투수성 억제에 효과적인 것으로 판단된다. 그러나 팽창축연의 입경은 $178\mu\text{m}$ 로 시멘트 입자 $20\mu\text{m}$ 보다 입자가 굵고 시멘트와 수화반응이 없는 소재로 입자 충전성이 저하되는 것으로 판단된다.

4.6 화염 노출 표면부 특성

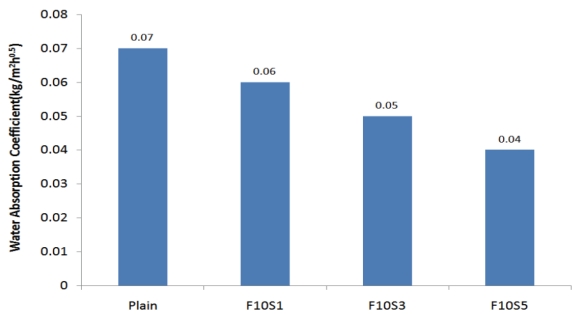
Table 12는 화염에 15분간 노출된 외단열 시스템의 온도 변화와 바탕조정재의 표면 팽창두께를 측정된 표이다. Plain을 사용한 경우, 페놀폼 내부온도가 불꽃온도보다 높은 온도인 750°C 까지 상승하였다. 외부 화염에 의해 페놀폼이 연소되면서 온도가 상승한 것으로 판단된다. 페놀폼 후면의 열선서는 600°C 까지 상승하여 EPS층이 붕괴된 것으로 나타났다. FSEG05와 FSEG10의 경우 페놀폼의 중심부 온도가 탄화온도까지 상승하였으나 후면부의 온도는 EPS의 열분해전 온도인 450°C 이하를 유지하여 EPS의 붕괴는 나타나지 않았다. 팽창축연이 혼입된 바탕조정재는 외부의 화염이 접촉되는 경우 표면부가 8~10mm가량 팽창된 탄화층이 생성된 것으로 나타났다.



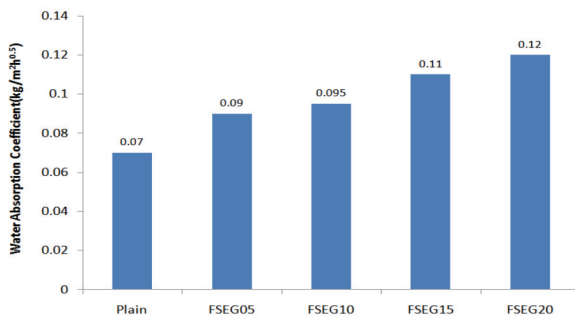
(a) Expandable graphite



(b) Fly ash



(c) Fly ash + silica fume



(d) Fly ash + silica fume + expanded graphite

Fig. 7. Water absorption coefficient

Table 12. Temperature change of insulation system and expanded depth of surface preparation mortars after 15 minutes of flame exposure

Type	Flame	Thermo couple-1	Thermo couple-2	Expanded depth of surface preparation mortars
Plain	700°C	750°C	600°C	0
FSEG05	700°C	670°C	430°C	8mm
FSEG10	700°C	650°C	400°C	10mm

5. 결론

본 연구에서는 플라이애시, 실리카흄 및 팽창흑연이 혼입된 시멘트계 바탕조정재의 특성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 팽창흑연을 혼입한 바탕조정재는 압축강도, 휨강도, 부착강도, 온냉반복강도, 물흡수계수는 KS F 4716의 기준보다 낮은 물성을 나타내었다. 기존 바탕조정재에 팽창흑연만을 혼입할 경우 물성 저하로 외단열 공법에 적합하지 않아 바탕조정재의 성능 개선이 필요함을 확인하였다.
2. 플라이애시와 실리카흄을 혼입하는 경우 바탕조정재의 부착강도, 온냉반복강도, 물흡수계수를 증진시킬 수 있었다. 플라이애시는 혼입율 20%까지 부착강도, 온냉반복시험에서 우수한 성능을 나타내었으나 물흡수계수 증가폭이 상승하기 때문에 플라이애시 혼입율 15%, 실리카흄 3%에서 적절한 물성이 개선을 확인하였다.
3. 플라이애시와 실리카흄을 사용하여 물성이 개선된 바탕조정재에 대한 팽창흑연은 최대 10%까지 기준 KS F 4716의 부착강도 및 온냉반복 부착강도를 만족할 수 있었다.
4. 팽창흑연을 사용한 바탕조정재는 외단열 공법 표면부에 화염이 발생하였을 때 바탕조정재가 붕괴되어 후면으로 열이 투과되는 현상을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 팽창흑연이 혼입된 바탕조정재를 사용할 경우, 단열재의 착화온도까지 도달하는 시간을 지연함으로써 화재 확산성을 억제할 수 있는 기술의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 논문은 국토부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(국토교통과학기술진흥원에서 부여한 과제번호: 19CTAP-C130219-03)임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

References

Chang, J.H., Choi, S.M. (2013). Workability evaluation of the inorganic surface preparation materials including EVA redispersible polymer powder for wall, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, **29(11)**, 53-62.

Chuigen, G., Lin, Z., Jianxiang, L. (2013). Effects of expandable graphite and modified ammonium polyphosphate on the flame-retardant and mechanical properties of wood flour-polypropylene composites, Polymers & Polymer Composites, **21(7)**, 449-56.

Kim, W.K., Kim, D.M. (2014). Properties of acrylic emulsion mortar using pyroligneous liquid of wood by-product, Journal of Korea Society of Waste Management, **31(1)**, 70-78.

Lee, J.C., Park, J.C., Song, H. (2016). Effect of external thermal insulation composite system with a non-combustible calcium silicate based mineral on the mitigation for reducing fast spread of flame, Journal of the Korea Institute of Building Construction, **16(5)**, 397-403.

Lee, J.C., Seo, J.S., Kim, S.B. (2013). Study on flame retardancy and thermal resistance properties of phenolic foam and polyurethane foam, Journal of the Korean Institute of Gas, **17(1)**, 35-41.

Min, S.H., Kim, M.S. (2010). A study on the fire risk assessment of EIFS by cone calorimeter test & single burning item test, Journal of the Korea Safety Management and Science, **12(1)**, 1-9.

Yang, E.H., Yang, Y., Li, V.C. (2007). Use of high volumes of fly ash to improve ecc mechanical properties and material greenness, ACI Materials Journal, **104(6)**, 303-11.

팽창흑연을 활용한 건축물 외단열 바탕조정재의 역학 및 연소 특성평가

외단열 마감 공법에서 사용되는 바탕조정재는 화재가 발생하는 경우 얇은 마감과 폴리머의 연소로 인해 표면부가 급속하게 붕괴되어 화재에 취약한 소재이다. 본 연구에서는 열적 성능이 우수한 팽창 흑연을 사용할 경우 바탕조정재의 성능을 개선할 수 있을 것으로 기대하였다.

실험결과, 팽창흑연을 사용한 바탕조정재는 부착강도 저하 및 물흡수계수 등의 감소가 발생하는 문제점이 있으나 플라이애시와 실리카흄을 사용하여 물리적 성능이 향상되는 것으로 나타났다. 팽창흑연을 사용한 바탕조정재는 복합 단열 시험체 표면의 페놀폼은 화염에 의한 표면 뚫림이 나타나지 않아 열원의 투과를 감소시킬 수 있을 것으로 나타났다.