

# 화재안전 및 단열성능 확보 건물 외벽시스템 개발

이태원 KICT 화재안전연구소 선임연구위원

## 머리말

최근 정부는 2030년까지 국가 온실가스를 2018년 대비 40% 감축하는 내용을 담은 2030년 국가온실가스 감축 목표(NDC, Nationally Determined Contribution)를 유엔기후변화협약 사무국에 제출했다. 이는 기존 26.3%보다 대폭 상향 조정된 것으로 국회에서 35% 이상으로 정한 탄소중립기본법에서 정한 수치를 훌쩍 뛰어넘는 수치다. 목표달성을 위한 연도별·부문별 온실가스 감축목표 및 계획은 올해 발표할 예정이라고 한다. 에너지 소비를 줄이기 위해 이미 세계 최고 수준의 단열기준 등이 적용되고 있는 건물분야에 새롭게 할당될 온실가스 감축목표와 그에 따른 국민의 부담에 대한 걱정이 앞선다.

2018년 9월, 정부는 친환경 미래 에너지 발굴·육성과 국가 온실가스 감축 목표 달성을 위해 건축물 에너지절약설계기준을 개정해 건축물 단열성능 기준을 선진국의 패시브 건물 수준으로 강화한 바 있다. 즉, 건축 허가 시 충족해야 하는 부위별(외벽, 최상층 지붕, 최하층 바닥, 창 및 문) 단열기준을 선진국<sup>1)</sup>의 패시브 건축물<sup>2)</sup> 수준으로 강화하는 한편, 국내 지역별 기후조건에 따라 전국을 3개 권역(중부, 남부, 제주)으로 나누던 것을 4개 권역(중부 1, 중부 2, 남부, 제주)으로 세분화함으로써 지역 여건에 맞게 난방 등에 소비되는 에너지를

최소화할 수 있도록 차별화한 게 주요 골격이다.

날로 강화되는 건축물의 단열기준을 만족하기 위해 단열재의 성능과 그에 따른 두께가 고려되어야 한다. 최근 여기에 추가적인 문제가 대두되었는데 단열재 두께를 줄이기 위해 가장 에너지 효율적인 외단열 공법<sup>3)</sup>의 채택이 주류를 이루게 되었다는 점이다. 요즘 흔히 얘기하는 드라이비트 공법<sup>4)</sup>이 그 한 예다. 여기에 값싸고 시공이 쉽지만 불에 매우 약한 유기 단열재를 사용함으로써, 또 강화되는 단열기준에 맞추기 위해 단열재의 두께가 크게 증가할 수밖에 없다는 점에 기인해 유사시 건물의 내외부에서 불이 나면 견잡을 수 없이 번진다는 화재안전상의 문제가 끊임없이 지적되어 왔다.

이에 한국건설기술연구원에서는 2018년부터 3년간 주요사업을 통해 기존의 건축자재들을 사용해 경제적이면서 단열성능과 화재안전성을 동시에 만족하는 건물 외벽시스템을 개발해왔다(이태원 등 2021). 즉, 단열과 화재안전분야 연구진이 함께 참여해 융복합 연구를 수행한 결과, 새로운 소재, 구조 및 공법의 적용으로 국내에서 가장 가혹한 단열성능 기준과 세계 최고 수준의 화재안전성능 기준을 만족하는 화재확산방지구조 기술을 개발해, 국제공인시험기관의 검증도 받은 바 있다. 이 글에서는 본 연구의 배경과 내용 및 주요 성과를 간략히 소개하고자 한다.

1) 독일 기준

2) 에너지 손실을 최소화하여 난방 등 기계적 설비에 대한 의존을 줄이는 건축물

3) 건축물의 단열방법에는 단열재의 설치위치에 따라 내단열, 중단열 및 외단열 공법이 있으며, 건물 외벽의 바깥에 단열재를 부착하는 외단열 공법의 단열성능이 뛰어나 에너지 절약을 위해 요즘 설치 사례가 급증해왔다.

4) 스티로폼 소재와 같은 가연성 단열재 위에 몰탈이나 페인트 등을 덧바르는 건축물 외장공법으로, 시공이 간편하고 공사기간을 단축할 수 있지만 화재에 대단히 취약하고 불이 나면 급속히 확산하는 한편 유해 물질을 다량 방출해 화재 참사의 원인으로 자주 지적되고 있다.

**현황 및 문제점**

일반적으로 사용되는 단열재로는 EPS(Expanded Poly Styrene, 비드법 보온재), XPS(Extruded PolyStyrene, 아이소핑크), 준불연 EPS<sup>5)</sup>, 우레탄폼과 같은 유기질 성분의 단열재와, 글라스울, 미네랄울, 페놀폼 등의 무기질 성분의 단열재가 있다. 유기 단열재는 가격이 저렴하고 단열효과도 비교적 우수하며 경량이어서 운반이 쉽고 시공성이 좋다는 장점이 있으나, 고온과 자외선에 약하고 화재 시 착화가 매우 쉬우며 유독가스가 발생해 인체에 위험하다는 단점이 있다. 이에 반해 무기 단열재는 고온에서 사용이 가능하며 외부의 압력이나 압축 및 다양한 물리적 충격에 의한 유효두께 감소 현상이 적다는 장점이 있지만, 원료가 고가이고 상대적으로 무거워서 운반이 어렵고 시공성이 떨어지며 높은 수분 흡수력으로 인해 우천 시 또는 높은 습도의 날씨에 취약하며 단열성능이 떨어질 수 있다는 단점이 있다.

한편, 지금까지 사용되어 온 건축물 외단열 공법으로는 크게 이른 바 드라이비트로 대표되는 습식 공법과 알루미늄복합패널 등 금속패널로 마감하는 건식 공법을 들 수 있다.

먼저, 습식 공법 중 드라이비트 공법은 건물의 외벽에 단열재를 설치한 후 유리섬유 등의 소재로 만들어진 메시(그물망)와 모르타르(시멘트 회반죽)를 덮고 도료로 마감하는 방식으로, 오래 전부터 건설현장에서 많이 사용되어 온 전통적인 방식

이다. 접합부의 강성이 비교적 우수하고 다양한 외관의 표현이 가능하다는 장점이 있으나, 현장작업이 복잡해 숙련된 인력이 필요하고 건축물의 자중이 크며 공사기간이 상대적으로 길고 장마철과 빙점 이하의 동절기에는 작업이 어렵다는 단점이 있다. 또한 일단 외벽에 붙이 옮겨 붙으면 급격히 상부로 확산된다는 화재안전 측면의 문제점이 지적되고 있다. 의정부 도시생활형 주택 화재(2015년)와 제천 스포츠센터 화재(2017년) 등이 대표적인 사고사례다.

한편, 건식공법은 콘크리트나 미장 재료 등 경화를 필요로 하는 재료를 사용하지 않고 바로 조립하는 공법을 통칭한다. 즉 습식공법의 문제점을 개선할 수 있는 공법으로, 공장 생산과 기계화 시공을 통해 현장 작업의 단순화가 가능하다는 특성을 지니고 있다. 따라서, 대량생산과 이로 인한 원가절감이 가능하고 건축물의 자중을 줄일 수 있는 장점이 있지만, 구조적으로 접합부의 강성이 습식공법에 비해 상대적으로 작고 건축물 외관이 획일적일 수 있다는 단점도 지니고 있다. 또한 일단 개구부 등을 통해 화염이 전파되어 알루미늄 소재 등 패널 외피가 용융되고 가연성 심재가 화염에 노출되면 삽시간에 화염이 안쪽으로 침투해 중공층을 따라 인접패널로 급격한 확산이 진행될 수 있다. 대표적 사고사례로는 영국 그린펠 타워 화재(2017년)와 최근 울산에서 발생한 주상복합 건물 화재 등을 들 수 있다.

5) EPS 비드에 특정 난연성 물질을 사용해 코팅막을 형성하는 것으로, 화재 시 열가스성 성질이 열경화성으로 바뀌면서 불꽃이 닿는 부위에 탄화막이 만들어져 불이 확산되는 것을 차단함으로써 준불연 성능을 갖게 해주는 소재

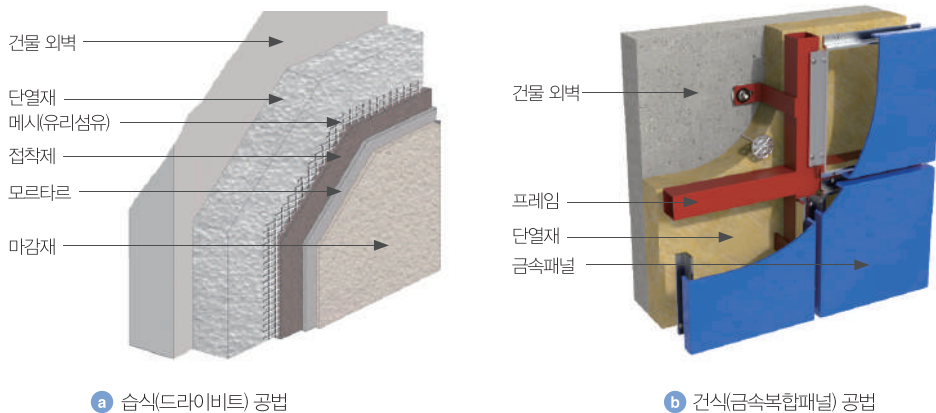


그림 1 건축물 외단열 공법의 종류

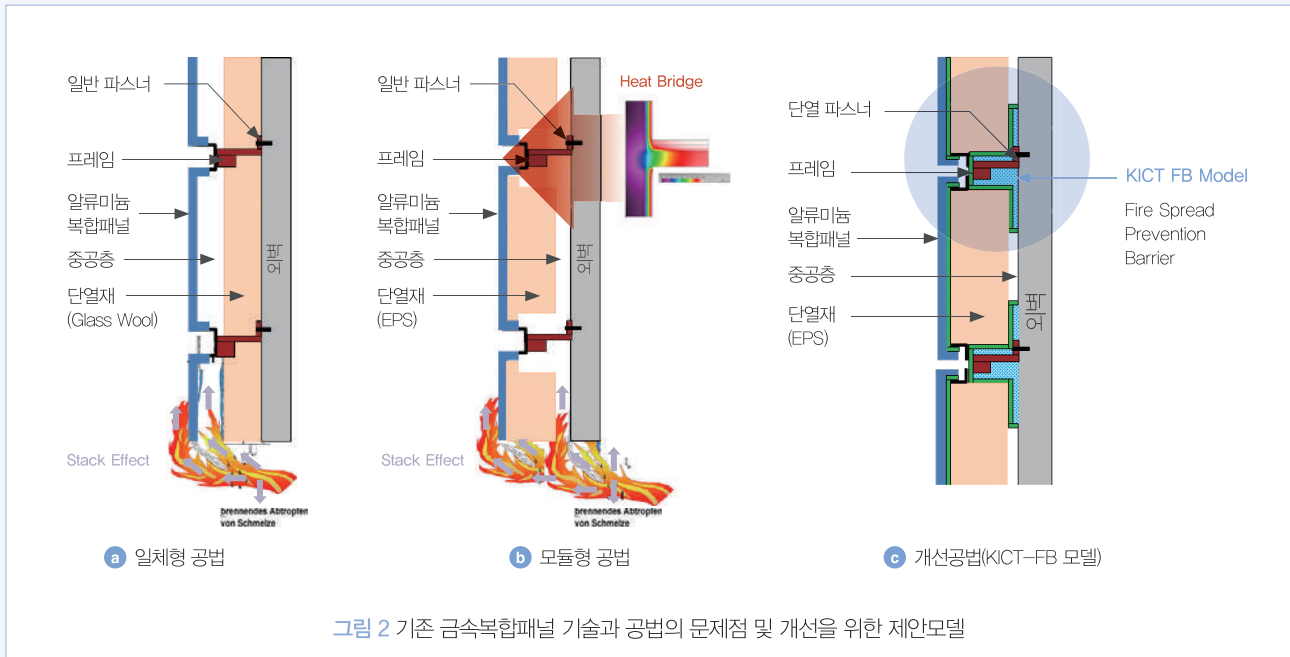


그림 2 기존 금속복합패널 기술과 공법의 문제점 및 개선을 위한 제안모델

**화재안전 제도 강화 추이**

지난해 말, 정부는 건축물 화재안전을 향상시키기 위해 ‘건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준’을 개정한 바 있다. 여기에는 강판과 심재 등으로 만들어지는 복합자재의 심재는 무기질 재료를 사용하거나 준불연 재료 이상의 성능을 확보해야 하고, 두 가지 이상의 재료로 제작되는 외벽 마감재는 사용되는 모든 재료가 난연성능을 확보하도록 시험 기준과 평가기준을 정하는 등 강화된 규정이 포함되었다. 또 강판과 심재로 구성되는 복합자재와 두 가지 이상의 재료로 제작되는 외벽 마감재료는 재료 전체를 하나로 보아 화재확산방지 성능을 확인하기 위한 실대형 성능시험의 도입도 매우 주목할 만한 변화다.

실대형 성능시험은 영국 규격인 BS 8414와 BR 135를 참고해 제정한 KS F 8414(건축물 외부마감시스템의 화재안전 성능시험방법, 2021)에서 정하는 바에 따르면, 너비 2.6m, 깊이 1.5m, 높이 8m의 벽체를 ‘ㄱ’자 형태로 세우고 중앙 하단에 설치된 화구에 주어진 상태 및 규격의 목재더미를 정해진 방법으로 쌓은 후 실험을 수행한다. 이때 설치된 시스템의 화재확산 정도를 파악하기 위해 화구 상부 2.5m와 5m 위치의 외벽

표면과 내부 및 내벽에 정해진 간격으로 온도센서 7개씩을 설치하며, 이들 측정결과로부터 실험의 개시와 합격여부를 판단한다. BS 규격에 따르면, 2.5m 부위의 온도가 200℃에 이르면 시험이 시작되고, 600℃를 넘어서면 시험이 종료되는데, 개시 후 지속시간이 15분 이상이면 합격으로 판정된다.

**소재, 구조 및 공법 적용**

**화재확산방지구조(KICT-FB 모델) 제안**

지금까지 건물 외벽의 구성 요소들은 상호 긴밀한 관계가 있음에도 불구하고 함께 고려되지 못하고 개별적으로 공급, 설치되어왔다. 즉, 단열재와 금속패널 자재의 생산업체가 다르고 시공사는 이들을 주문해 나름대로의 공법을 이용해 시공하는 형태다. 결국 단열성능과 화재안전성능을 동시에 또 종합적으로 검토하는 것이 사실상 불가능함은 물론, 결과적으로 저렴하면서도 열손실에 따른 에너지 소비를 막아주고 불에도 강한 건물 외벽시스템에 대한 국민적 요구는 수용되기 쉽지 않았다.

그림 2의 (a)와 (b)는 금속복합패널을 이용한 기존 일체형 및 모듈형 공법<sup>6)</sup>의 개념을 각각 보인 것이다. 먼저 사용된 단열재의

6) 일체형이란 금속복합패널과 별도로 건물의 외벽에 단열재를 먼저 부착한 후 패널을 시공하는 방법이고, 모듈형이란 단열재가 부착된 패널을 건물의 외벽에 시공하는 방법을 말한다.

종류에 관계없이 금속패널 내부에 수직방향으로 중공층이 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이 공간은 유사시 외벽의 표면에 불이 났을 때 산소를 공급하는 통로로 작용해 인접모듈 특히 상부로 화염을 급격히 확산시키는 이른바 연돌효과(Chimney effect)를 일으켜 안전에 매우 취약해지는 결과가 초래된다. 만약 여기에 유기 단열재가 사용된다면 그 결과는 상상을 초월할 것이다. 일체형 공법에 무기 단열재를 설치한다 해도 중공층의 영향으로 금속패널만으로 화재안전을 확보하기엔 부족함이 있으며, 울산 주상복합 건물 화재사고가 이를 증명한 바 있다. 여기에 더해 모듈형 공법에서는 모듈과 모듈 사이의 중공층을 통해 따뜻한 벽체로부터 차가운 대기로 열이 새어 나가는 열교현상(Heat bridge)이 발생해 단열능성이 떨어지고 에너지의 손실이 초래될 수 있어 보완이 필요하다.

이와 같은 문제점을 해결하고 단열성과 화재안전성을 동시에 만족하면서 경제적인 건물 외벽시스템을 개발하기 위해 ① 매우 가혹한 조건과 경제성을 고려해 불에 취약지만 가격이 저렴한 유기 단열재 기본 채택, ② 국내에서 가장 가혹한 중부 1 지역 주거용 건물 단열기준 만족, ③ 세계 최고 수준의 건물 외벽에 대한 화재안전성기준(BS 8414) 만족, ④ 개발 기술의 국제 공인시험기관에 의한 성능 검증 등의 전제조건을 상정하였다.

그림 2(c)에 본 연구에서 개발한 KICT-FB(Fire spread prevention Barrier) 공법(이태원 등, 2021)의 개념도를 도시하였다. 먼저 선행연구로써 개발된 난연성 플라스틱 소재를 이용해 복합패널의 충전재 즉, 심재를 준불연 성능으로 개선한

국외 A2 등급의 알루미늄 복합패널을 채택하였다. 또한 우레탄 소재의 기능성 발포패드를 사용해 패널 모듈 사이의 중공층 공간을 채움으로써 열교현상을 구조적으로 차단하는 한편, 만약 건물 외벽에 불이 붙을지라도 가연성 단열재 및 중공층을 통한 수직 화재확산을 근본적으로 차단하기 위해 패널 내부와 단열재 및 패드 등을 기능성 열발포성 시트로 보호하는 화재확산방지구조를 채택하였다. 이후 다양한 실험을 통해 취약부위를 확인함으로써 보완책을 추가로 반영하였다.

### 단열 및 화재안전 성능

그림 3은 개발 기술의 적용에 따른 단열성능 확인을 위해 전산 프로그램을 사용한 예측값과 열관류율 실험을 통해 얻은 실험값을 비교, 도시한 것으로, 계산은 기후조건에 따른 단열기준을 만족하기 위해 적용해야 할 단열재 두께를 미리 예측하기 위해 수행하였고, 동일한 공법에는 같은 종류의 단열재를 같은 두께로 적용하는 것으로 하였다. 채택하는 공법에 따라 일정 성능기준을 만족하기 위해 필요한 단열재 두께가 달라지는 게 일반적인데, 일체형 공법은 건물의 외벽에 단열재를 고르게 설치하므로 비교적 수월하게 목표로 하는 단열수준을 얻을 수 있는 반면, 모듈형 공법에서는 앞에서 기술한 바와 같이 벽체와 패널 사이의 중공층의 영향으로 원하는 단열수준을 얻기가 쉽지 않다. 본 연구에서 개발한 구조와 공법을 적용한 결과 국내에서 가장 가혹한 수준인 중부 1 지역 주거용 건물에 대한 단열기준을 만족하는 한편, 실험결과를 기준으로 단열성능이 3.8배 향상됨으로써 결국 단열재 두께와

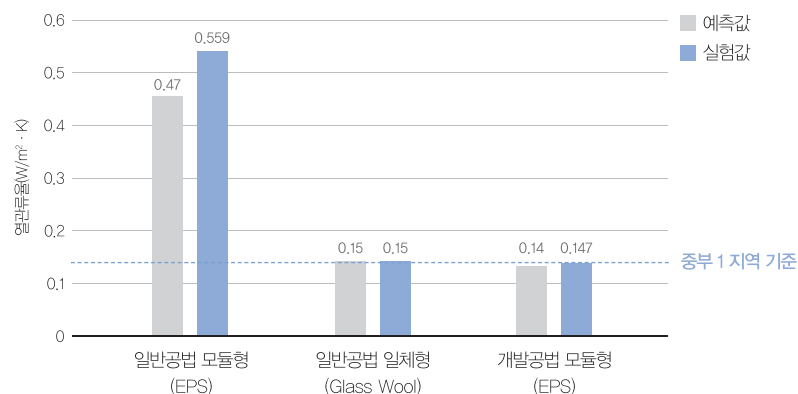


그림 3 기존 기술과 개발 기술의 단열성능 비교

시공비를 그만큼 줄일 수 있을 것으로 예상되었다. 한편, 개발 기술의 화재안전 성능의 확인을 위해 기존의 공법을 포함해 다양한 모델의 시제품에 대한 실규모 화재실험을 수행하였고, 이를 위해 국제적으로 널리 인정받고 있을 뿐만 아니라 한국산업규격으로 제정된 바 있는 BS 8414 규격을 적용하였다. 자체적으로 다양한 화재실험을 수행하는 것과는 별도로, 보다 체계적인 검증을 위해 BS 8414 인증시험을 수행하는 국제공인시험기관인 영국건축연구소<sup>7)</sup>와 교차시험을 수행해 개발 기술의 성능을 확인하였다. 이와 같은 과정은 현재 시행 중인 KS 기반의 국내 실규모 화재시험 제도 도입에 기여를 한 것으로 자부한다. 그림 4는 건물 외벽시스템에 대한 실규모 화재실험 모습이다.

그림 5는 적용한 기술과 공법에 따른 건물 외벽시스템의 화재안전 성능을 비교, 도시한 것으로, 모듈형 구조에 EPS와 준불연 EPS 등 유기 단열재를 사용한 경우다. 연구수행 당시와 달리 지금은 준불연 성능 이상의 소재만을 사용해야 하는 것으로 제도가 강화되었다는 점을 미리 알려둔다. 단열재로 EPS를 사용한 기존 모듈형 공법은 실험이 시작된 후 채 5분이 되지 않아 기준을 초과해 성능기준인 15분에 훨씬 미치지 못한 반면, 제안공법을 적용한 경우에는 23분 22초 동안 화재 확산을 지연시켜 기존 공법 대비 4.7배, 성능기준 대비 1.6배의 성능을 확보한 것으로 나타났다. 국내와 BRE에서 수행한

실험결과 사이에 12.6%의 차이를 보였는데, 이는 실험 환경과 조건이 상이한 결과로 판단되며, 이후 이에 관한 연구도 병행해 진행해왔다. 한편 국내 제도 강화에 따라 그에 부합한 소재인 준불연 EPS를 단열재로 사용한 결과, 시험의 최대 시한인 30분까지 화재확산을 방지해 더욱 우수한 성능을 확보할 수 있었다.

연구를 수행하는 동안 울산의 33층 주상복합 건물의 12층에서 불이 나 외벽을 타고 순식간에 꼭대기까지 번지는 화재사고가 발생했다. 이 건물은 무기 단열재인 글라스울과 금속패널로 시공되었음에도 화재확산을 방지하지 못했음을 인지해 이 구조에 대한 성능개선 연구를 추가로 수행하였다.

그림 6은 일체형 구조에 무기 단열재인 글라스울을 사용한 기술과 공법에 따른 건물 외벽시스템의 화재안전 성능을 앞의 유기단열재를 사용한 모듈형 기존공법과 비교, 도시한 것이다. 글라스울을 사용한 기존 일체형 공법은 울산 복합건물에 적용된 것과 동일한 공법으로, 14분 18초의 결과를 보여 성능기준에 미치지 못한 결과를 보였다. 반면, 동일한 단열재를 사용한 제안기술은 최대 시한인 30분 동안 화재확산을 방지함으로써 매우 안정된 성능을 확보했음을 볼 수 있다.

이외에도 개발 기술의 실용화를 위한 복합패널 생산모듈 결정과 개구부 등 연결부위 공법 개발, 경제성 검토 등을 위한 표준 모델 제작 및 현장적용에 관한 연구도 추가로 수행하였다.

7) Building Research Establishment, BRE

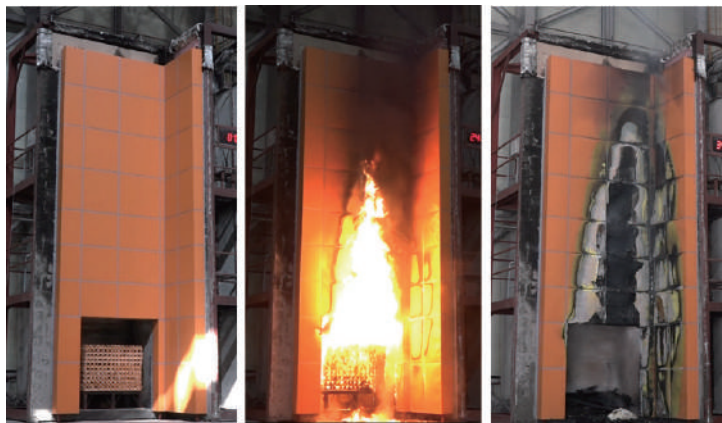
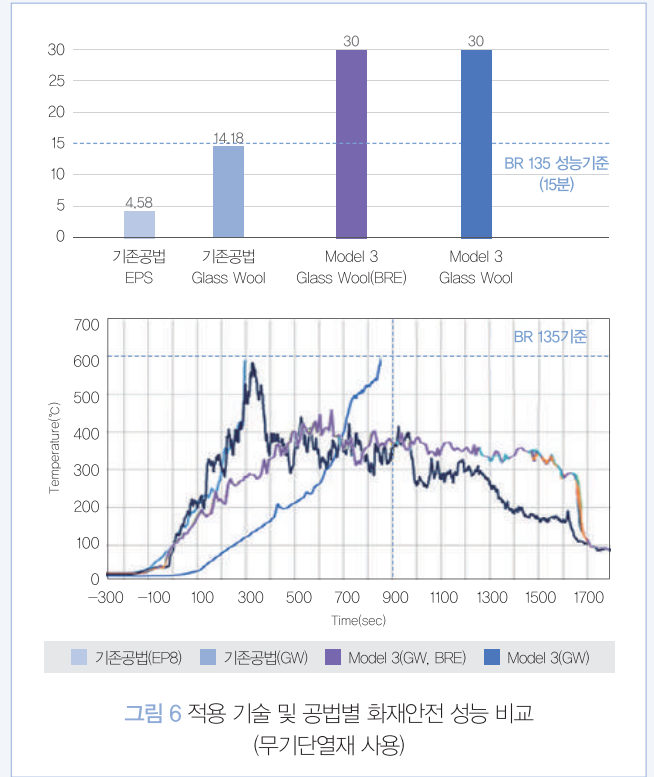
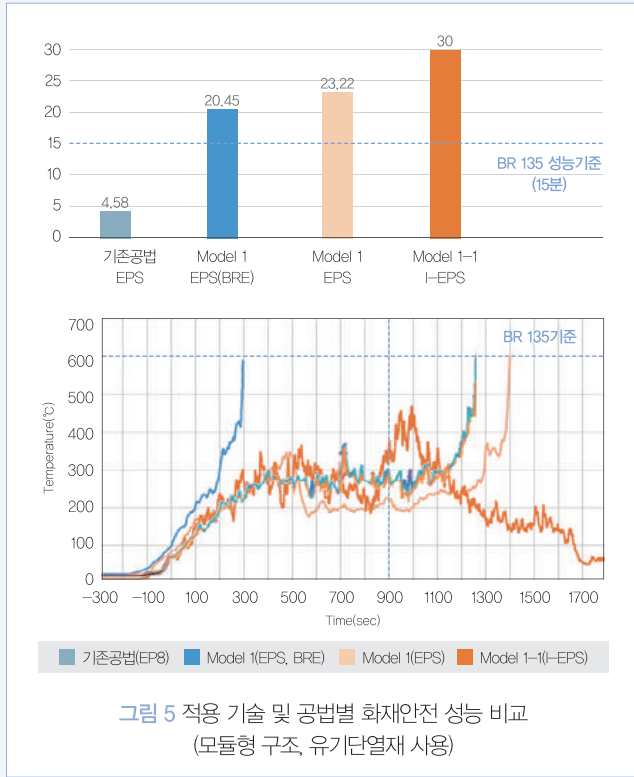


그림 4 실규모 화재실험 수행 모습(BS 8414)



**맺음말**

2009년 준공 당시 30층 이상 건물에 대한 정부의 의무화 규정을 초과해 유기성 소재가 아닌 무기 단열재 사용한 울산 복합건물 화재사고는 우리에게 많은 점을 시사해준다. 12층에서 발생한 불이 순식간에 33층 꼭대기까지 확산됨으로써, 지금까지 단열재의 가연성이나 불연성 여부 등 주로 소재의 안전성에만 국한된 논란을 무색하게 했기 때문이다. 소재만으로 안전을 확보하는 게 쉽지 않다는 것이 증명된 결과이며, 설사 그렇다 하더라도 비용 문제가 뒤따르는 게 다반사다. 국민은 최소한의 비용으로 지어진 건물에서 에너지 소비를 줄이면서 안전하게 살기를 원한다. 시공비를 크게 늘리지 않으면서 단열 및 화재안전 성능을 갖춘 건물 외벽 건설기술이 제공되어야 하는 이유다.

기후변화와 지구온난화 대응 차원에서 정부는 온실가스 감축을 위한 건물의 단열성능을 지속적으로 강화해왔고, 이에 따라 에너지 소비절약에 매우 효율적인 외단열 공법을 채택하는 비율도 크게 증가해왔다. 하지만 단열성 및 경제성과 안전성의 편익이 상충하는 현실에서 설마 하는 확률적 판단이나 경제적인 관점이 앞선다면 안전성의 포기로 이어져 결국

견집을 수 없는 인명과 재산 피해를 피할 수 없음을 우리는 경험하고 있다.

정부의 화재안전 기준은 최소한의 규정이어야 한다. 안전을 담보한다는 명분으로 정부의 규제가 단편적이고 일방적이어서 곤란하다. 국민의 부담으로 직결될 수 있어서다. 국민도 정부의 규정이나 기준에만 기대는 안이한 생각을 버리고 소중한 생명과 직결되는 안전설비에 투자를 게을리해서는 안될 것이다. 하지만 더욱 중요한 것은 소비자가 원하는 기술과 제품이 활발히 개발, 공급되어야 한다는 것이다. 폐쇄된 규제시장을 넘어 다양한 소비자 요구를 충족하는 합리적인 신기술 개발이 활성화되었으면 하는 마음이 절실한 요즘이다. ☒

**참고자료**

- 이태원 등(2021) 화재안전 및 단열성능 확보 건물 외벽시스템 개발. KICT 2021-079, 한국건설기술연구원.
- BS 8414-1, Fire performance of external cladding systems, Part 1: Test method for non-loadbearing external cladding systems applied to the masonry face of building, BSI, 2015
- BR 135, Fire performance of external thermal insulation for walls of multistory buildings, BRE