

[Research Paper]

필로티 반자 내 화재 시 단열재 화염확산 특성연구

김홍식[†] · 오부열^{*} · 박민영^{**}

국립소방연구원 화재안전연구실장, ^{*}국립소방연구원 화재안전연구실 공업연구사, ^{**}국립소방연구원 대응기술연구실 연구원

Fire Spread in Insulation Materials in the Ceiling of a Piloti-Type Structure

Hong-Sik Kim[†] · Bu-Yeol Oh^{*} · Min-Young Park^{**}

Division Director, Fire Safety Research Division, National Fire Research Institute,

^{*}Junior Research Official, Fire Safety Research Division, National Fire Research Institute,

^{**}Researcher, Fire Technology Research Division, National Fire Research Institute

(Received September 28, 2020; Revised October 13, 2020; Accepted October 21, 2020)

요 약

본 논문에서는 필로티 구조 건축물의 천장(반자 위) 공간 내부를 모사한 축소모형과 실험실 화재 실험을 통해 천장(반자 위) 단열재, 천장재에 따른 화재확산의 정도, 시간에 따른 온도변화를 확인하였다. 축소모형 실험의 천장공간 내부구조는 압출법 단열재(XPS 단열재) + 열경화성수지 천장재(SMC), 난연 비드법 단열재(난연 EPS) + 열경화성수지 천장재(SMC), 그리고 압출법 단열재(XPS) + 아연도금강판 천장재(DMC)로 예비실험을 진행하였다. 이를 바탕으로 필로티 구조 건축물 화재를 모사한 실험실 화재 실험을 통해 천장(반자 위) 내부 공간에서의 열의 유동 파악, 대형화재로의 확산 원인을 확인하였다. 실험실 화재 실험은 화재 사고를 가정하여 최상의 경우인 난연 EPS 단열재 + DMC 천장재와 최악의 경우인 XPS 단열재 + SMC 천장재로 진행하였다. 실험결과, 화원에 노출된 단열재에서부터 연소가 시작되어 용융된 압출법 단열재(XPS)가 열경화성수지 천장재(SMC)로 낙하하면서 새로운 화원을 형성하고 천장재가 탈락하며 산소 유입에 의해 연소 확대로 이어졌다.

ABSTRACT

In piloti-type structures, large-scale fires frequently occur because insulation materials in the ceiling are ignited. However, the spread of fire in these cases is not well known. Therefore, this study conducted small-scale (1.0 m × 1.0 m) tests and real-scale model tests. According to the results, we clarified the fire spread, temperature variation over time, and the effects of insulation materials in fire sites. For the small-scale tests, the internal structure of the ceiling was extruded polystyrene (XPS) + sheet molding compound (SMC), retardant expanded polystyrene (Retardant EPS) + sheet molding compound (SMC), and extruded polystyrene (XPS) + design metal ceiling (DMC). From the small-scale and large-scale tests that simulated a fire in a piloti-type structure, the flow of heat in the interior space and the cause of a large fire were identified. The tests were conducted with EPS+DMC, defined as the best-case scenario, and XPS+SMC, defined as the worst-case scenario during a fire accident. The results from the tests showed that combustion began when the insulation material was exposed to the fire source. Then, molten XPS fell onto the SMC, establishing a new fire source that destroyed the ceiling material, leading to increased combustion due to the inflow of oxygen.

Keywords : Piloti-type structure, Fire spread, Insulation materials, Ceiling materials

[†] Corresponding Author, TEL: +82-41-559-0530, FAX: +82-41-541-1108, E-Mail: yurimgas@korea.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서론

현대 건축물 및 복합건축물 화재사고의 경우 일반적인 건물에 비해 몇 가지 특징을 지닌다. 건축물 공간마다 화재 하중이 매우 높으며 특히 천장내부, 단열재, 배관용 보온재 등의 플라스틱 계통 가연물은 연소 확대 속도가 매우 빠르고 승강기, 전기, 공조, 배관 등의 수직 연결공간은 건물의 높이에 비례하여 연돌효과(Stack effect)를 발생시켜 연소범위가 넓어진다.

특히 필로티와 같은 개방된 구조는 바람의 영향을 많이 받기 때문에 화염의 확산이 빠르고 연소 하중이 높은 차량과 단열재 등으로 인해 인접 건물에도 영향을 줄 수 있다. 또한, 유리 출입문이 깨지면 건물 내부로 유입된 화염과 유독가스는 계단과 승강기 그리고 피트와 같은 공간을 통해 상층으로의 연소가 급격히 진행되어 재실자의 위험성이 증가한다⁽¹⁻³⁾. 사례로는 2018년 발생한 제천 스포츠센터 화재 역시 필로티 주차장 반자 안 스티로폼의 급격한 연소로 인해 화재와 연기가 주계단실과 비상계단 등 위쪽으로 확산되어 많은 사상자가 발생하였다⁽⁴⁾.

국내에서 일어난 대형 화재의 공통점은 부주의, 화재에 방 건축재료에 대한 명확한 시공기준 미흡 등의 요인이 다수로서 재발방지를 위한 노력이 절실하다. 그중에서도 필로티 구조 건축물에서 가장 중요한 것은 단열재, 천장재 등에 대한 적절한 기준 설정을 통해 다수의 인명피해를 줄이는 것이 필요하다.

이에 본 연구에서는 실제 필로티 구조 건축물에서 천장 내부 상황을 모사하여 단열재 및 천장재에 의한 확산정도를 축소모형 및 실험모형 실험을 통해 파악하고 필로티 구조물 화재 시 효과적인 천장 내부의 단열재 및 천장재에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

1.1 천장 단열재의 화재확산 프로세스

Figure 1과 같이 필로티 화재사례를 분석해 보면, 대부분의 경우가 필로티 1층 천장 내부에서 정리되지 않은 전선(꼬임, 피복탈락, 쥐의 갇힘 등)에 의한 전기 누전, 습기, 먼지를 매개체로 하는 발화 등이 원인이 되어 천장 내부의 단열재를 연소시키고, 연소된 단열재가 하부 천장재로 떨어진 후 천장재를 연소시킨다. 연소된 천장재는 다시 1층 주차장으로 떨어지며 이때 필로티 구조 건축물의 특징인 주위보

다 높은 풍압, 지속적인 산소공급을 통해 화재를 확대하며, 차량을 비롯한 많은 가연물로의 연소확대를 통해 대형화재로 이어진다⁽⁵⁻⁷⁾.

1.2 필로티 구조 건축물의 단열재와 천장재

단열공법은 Figure 2와 같이 콘크리트 건축물을 단열재로 둘러싸는 것으로, 축열성이 있는 콘크리트 구체가 실내측의 온도에 동조하여 겨울의 추위나 여름의 더위로부터 거주자를 지키는 것을 의미한다. 이는 에너지 절약 및 건물의 수명에 영향을 주는 요소로 인간의 쾌적한 주거생활을 유지하기 위한 건축공법의 하나이다. 주로 여러 가지 종류의 단열재를 사용하지만 크게 유기계와 무기계 단열재로 나눌 수 있다.

유기계 단열재인 발포플라스틱계 단열재는 원료, 제조법에 따라 비드법폴리스티렌(EPS), 압출폴리스티렌(XPS), 경질우레탄폼(PUF) 등이 있으며, 건축구조물에는 대부분 Figure 3과 같이 시공성과 경제성이 뛰어난 EPS와 XPS 단열재가 적용된다. EPS 단열재는 폴리스티렌 수지와 탄화수소계 발포제에서 생성된 원료비드를 예비발포 시킨 후 금형에 충전하고 가열하는 것에 따라 약 30배~80배로 발포시켜 만들 수 있다. 반면, XPS 단열재는 폴리스티렌 수지에 탄화수소 등의 발포제를 첨가해서 압출성형하여 생산된 단열재이다⁽⁸⁻¹²⁾.

일반적으로, 필로티 구조 건축물에 사용되는 천장재는 크게 2가지 종류로써 열경화성수지 천장재(Sheet molding compound, SMC)와 아연도금강판 금속 천장재(Design metalceiling, DMC)이다(Figure 4 참조). SMC는 습기와 오염에 강한 장점이 있으나 열적 변형에 취약하다. 반면, DMC 천장재는 준불연 성능과 친환경 성능을 갖춘 천장재이나 금속 성분을 지니고 있어 습기가 많은 곳에 부적합할 수 있다^(13,14).

2. 모형 화재실험

실대 화재실험에 앞서 단열재와 천장재의 변화에 따른 연소 현상과 경시변화에 따른 온도변화를 확인하기 위해 천장(반자 위) 공간 내부를 모사한 모형실험을 수행하였고 시험체는 Figure 5와 같다. 축소모형의 실험체 규모는 작지만, 실제 현장설치 구조와 동일한 공간과 단열재(천장재)로 제작하였으며 단위 모듈구조(1.0 m × 1.0 m × 0.8 m)로 설계하여 실험을 수행하였다. 넓이를 1.0 m × 1.0 m로 제작한

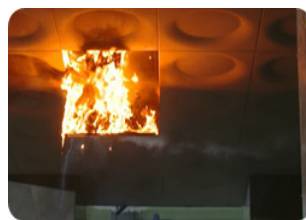


Figure 1. Process of fire spread in the ceiling of pilotti-type structure.

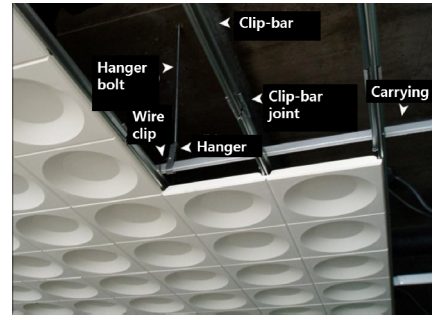


Figure 2. Materials of insulation and ceiling of piloti-type structure.



Figure 3. Insulation materials (EPS & XPS).



Figure 4. Ceiling materials (SMC & DMC).

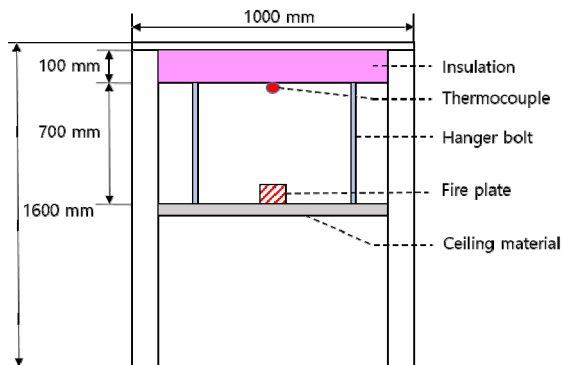


Figure 5. (left) Design of a small-scale model, (right) specimens for the small-scale test (XPS + SMC, fire retardant EPS + SMC, XPS + DMC).

이유는 일반적인 천장재의 크기가 0.6 m 이하로 제작되기 때문에 천장재 간 연결되는 부분의 화재에 따른 변형 유무

및 탈락 등을 파악하기 위하여 설계하였다. 또한, 반자 위 높이를 0.8 m로 한 것은 일반적인 필로티 구조의 반자 위

공간을 적용하였다. 화원은 등유(열방출율 1,680.0 kW/m²)를 사용하였으며 화원의 크기는 상부에 시공된 단열재에 점화할 수 있는 직경 20 cm 풀(Pool)을 사용하였다.

천장재로는 필로티 구조 건축물 천장재로 많이 사용되는 SMC (열경화성수지 천장재)와 열에 강한 DMC (아연도금강판 금속 천장재)를 사용하였다. 축소모형 실험은 총 3가지의 실험군으로 계획하였으며, 상세하게는 ① 현재 국내 필로티 구조 건축물 천장에 많이 사용되는 XPS 단열재 + SMC 천장재, ② 단열재를 범직 제시 이상으로 한 난연 EPS 단열재 + SMC 천장재, ③ 열에 강한 천장재를 설치한 XPS 단열재 + DMC 천장재 구조로 설정하여 모형실험을 진행하였으며, ①번의 필로티 구조 건축물의 천장 내부공간 모사를 화재에 가장 취약한 구조로 가정하고 실험을 진행하였다.

2.1 XPS 단열재 + SMC 천장재 축소 모형실험

Figure 6과 7에서 보이는 것과 같이 실험 시작 15 s 후, 연소된 XPS 단열재가 SMC 천장재 위로 떨어지는 현상을 확인할 수 있었으며, SMC 천장재 위로 낙하된 용융된 XPS 단열재가 연소확대되면서 화원의 크기가 확대되고 화재강도가 급속도로 상승하는 현상을 확인할 수 있었다. 화재강도가 최대로 된 이후 SMC 천장재는 천장 구조 지지대에서 박락되어 중력에 의해 바닥으로 떨어지는 탈락 현상이 발생하며 그 후 급속한 산소 유입이 플래시오버를 발생시켰다(Figure 8 참조). Figure 6에서와 같이 SMC 천장재가 탈락된 100 s 이후 급격한 산소의 유입으로 화재확산을 확인할 수 있었다.

2.2 난연 EPS 단열재 + SMC 천장재 축소 모형실험

Figure 9에서 보면 난연 EPS 단열재의 경우 화원을 지속적으로 공급하여도 XPS 단열재와 같이 용융상태를 나타내

는 경향을 보이지는 않았다. 이는 EPS 단열재의 제작과정에서 알 수 있듯이, 비즈라는 알갱이를 통해 난연 처리를 했기



Figure 7. The results of a small-scale model (XPS + SMC).

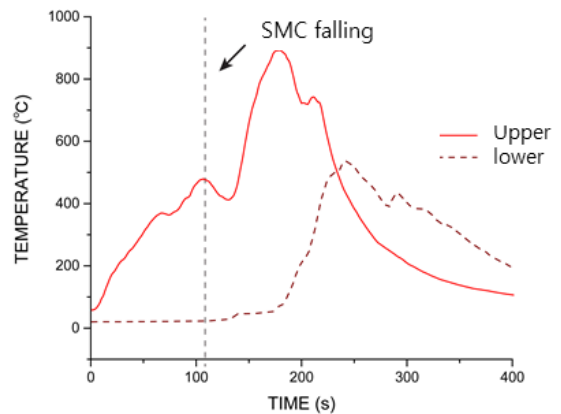


Figure 8. Thermocouple measurements in the ceiling (XPS + SMC).

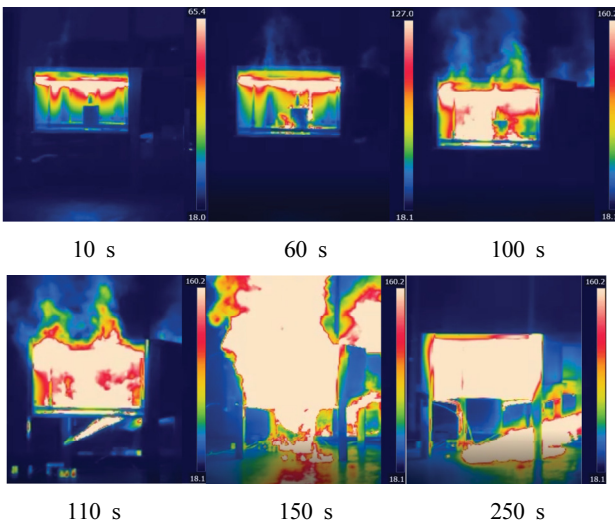


Figure 6. The IR camera results of a small-scale model (XPS + SMC).

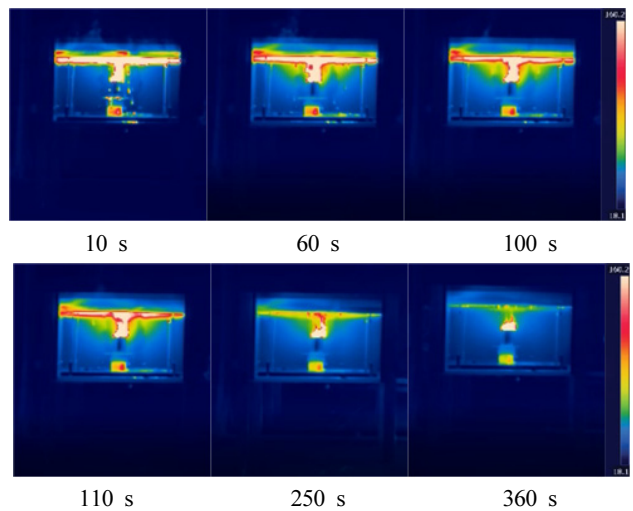


Figure 9. The IR camera results of a small-scale model (Fire retardant EPS + SMC).



Figure 10. The results of a small-scale model (Fire retardant EPS + SMC).



Figure 13. The results of a small-scale model (XPS + DMC).

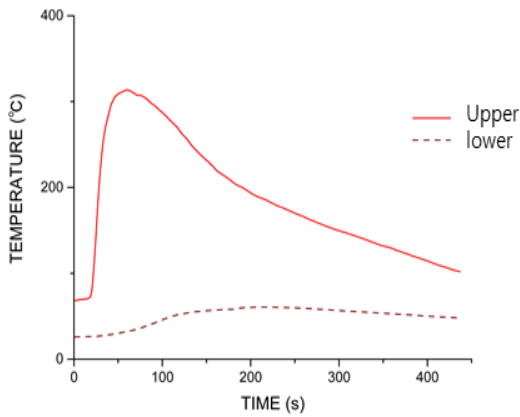


Figure 11. Thermocouple measurements in ceiling (Fire retardant EPS + SMC).

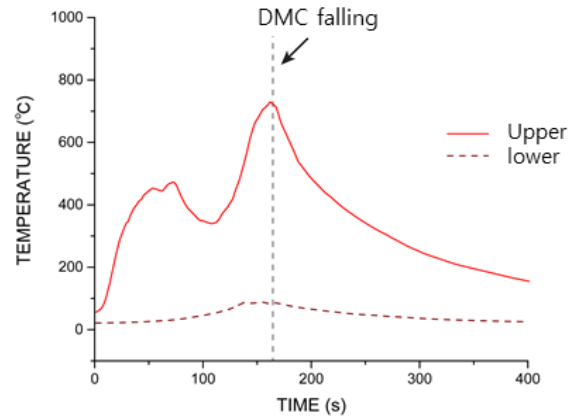


Figure 14. Temperature of thermocouple sensors in ceiling (XPS + DMC).

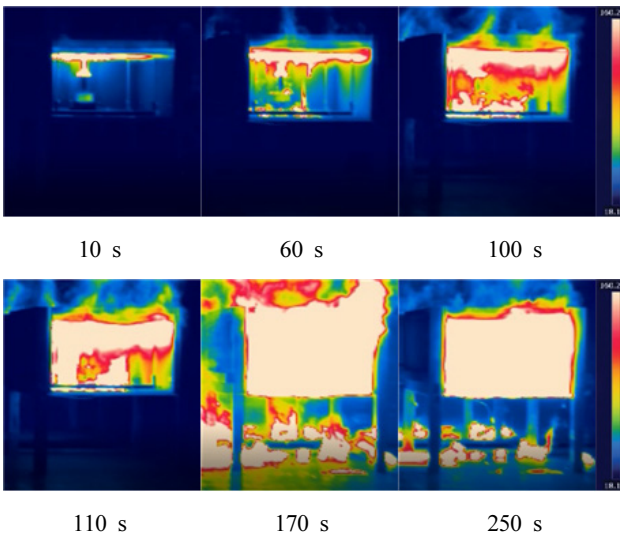


Figure 12. The IR camera results of a small-scale model (XPS + DMC).

때문에 화원이 닿은 부분만 연소되어 작은 탄화 알갱이 형태로 천장재로 낙하하며 이는 연소를 확대할 만큼의 화재

강도를 가지지는 않았다. 본 축소모형 실험에서 Figure 10, 11과 같이 실험체 상부는 최대 320 °C 이상으로 상승하지 않았고, SMC 천장재도 가열에 의해 탈락되지 않아 다량의 산소 유입에 따른 화재 확대현상은 발생하지 않았다.

2.3 XPS 단열재 + DMC 천장재 축소 모형실험

Figure 12와 13에서 보이는 것과 같이 실험 시작 15 s 후, 용해된 XPS 단열재가 DMC 천장재로 떨어지는 현상을 확인할 수 있다. DMC 천장재 위에 쌓인 용해된 XPS 단열재가 가연성 가스를 발생하면서 화원의 크기가 확대되었고 화재강도가 급속도로 높아지는 현상도 확인되었다.

3번 실험체인 XPS 단열재 + DMC 천장재 구조와 1번 실험체인 XPS 단열재 + SMC 천장재의 화재성장 차이는 화재강도가 최대임에도 불구하고 DMC 천장재가 SMC 천장재에 비하여 장시간 탈락하지 않았다. 또한, XPS 단열재에서 뿜어져 나온 연기가 축소모형 내부에 가득 차서 그로 인해 화재강도가 일시적으로 감소하는 것을 Figure 14 온도와 시간 그래프에서 확인할 수 있다. 이후 높은 화재강도에 의하여 DMC 천장재는 바닥으로 탈락하였다. DMC 천장재는 더욱 강한 화재에 노출되었음에도 불구하고 SMC 천장

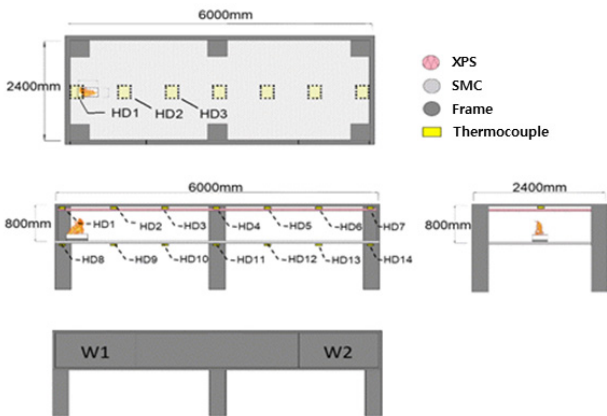


Figure 15. Schematic of the insulation materials, the ceiling and thermocouple positions of the piloti-type large-scale structure.

재의 탈락 시간보다 약 60 s 이후에 바닥으로 탈락하는 것을 확인할 수 있었다.

DMC 천장재가 바닥으로 탈락하기 전 실험체 내부에서 플래시오버가 발생하였으며, DMC 천장재가 탈락될 때 상부에 설치된 열전대가 실험체로부터 이탈되어 온도가 측정되지 않을 정도로 급격하게 연소가 확대되는 모습을 보였다.

3. 실대 화재실험

3.1 실대화재 실험체 구성

실대 화재실험에서는 실제 필로티 구조 건축물의 천장(반자 위) 내부와 동일한 구조와 크기로 실험체를 제작하였으며, 실험체의 평면도는 Figure 15에 나타내었다. 실험체는 필로티 구조 1층 천장을 상정하여 단열재, 천장재를 시공하여 실제 천장구조를 동일하게 모사하였다. 다만 실험체의 규모는 일반적인 필로티 원룸 건축물 주차공간(130 m²)의 1/9 넓이인 약 15 m² (작은 원룸 1개 정도의 넓이)로 제작하였고 화재실험장의 집진 용량 등을 고려하였다. 화염이 확산하는 현상과 온도를 측정하기 위해 폭(2.4 m: 주차 폭)보다 길이를 길게 6.0 m (일반적인 기둥 간 거리 3.0 m의 2배)로 설계하였다. 화원의 크기는 상부에 시공된 단열재에 점화할 수 있는 직경 20 cm 풀(Pool)이며, 등유(열방출율 1,680.0 kW/m²)를 사용하였다.

실대 화재실험에서 화재 사고의 경우를 가정하여 최악의 경우인 XPS 단열재 + SMC 천장재를 가정하여 실대 화재실험을 진행하였다. 실험체는 최대한 밀폐한 상태로 진행하였다. 실험 상황을 파악하기 위해 실험체 한쪽 면은 폴리카보네이트를 적용하여 열화상 측정, 영상촬영 등에 도움이 되도록 실험체를 제작하였다. 실대화재 실험결과, 온도 그래프에서 특이점이 발생하지 않은 데이터는 분석에서 제외하였으며, HD1, HD2, HD3을 중점적으로 분석하였다.

온도측정용 열전대는 단열재와 상부 콘크리트 구조체가

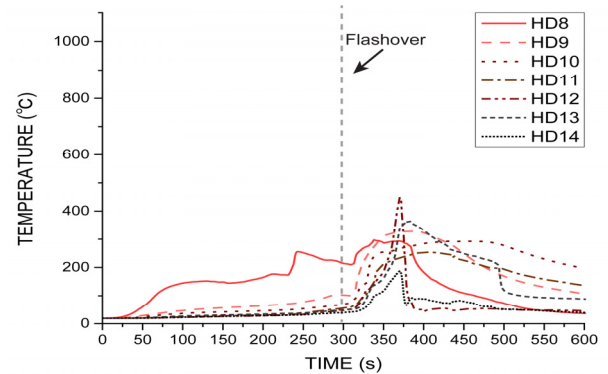
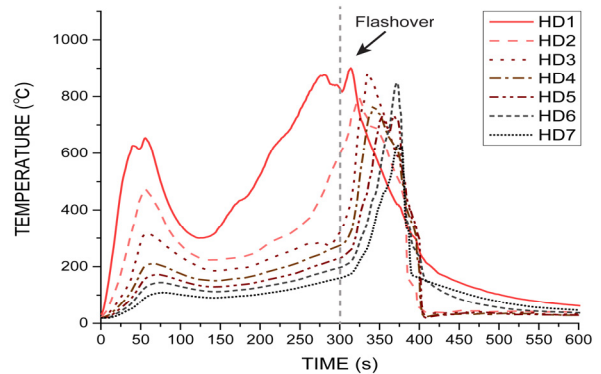


Figure 16. Temperature of thermocouple sensors in ceiling with a large-scale (XPS + DMC).

맞닿는 부분과 천장재 하부에 각각 7개씩 약 90 cm 간격으로 총 14개소에 설치하였으며 열전대(Heat detector, HD)의 위치는 Figure 15에 나타내었다.

3.2 XPS 단열재 + SMC 천장재 실대 화재실험

Figure 16과 같이 점화 후 화원부의 온도는 50 s까지 꾸준히 증가하다가 50 s 이후에는 산소의 부족으로 화염이 약해졌다. 하지만 실제 필로티 구조의 반자 공간은 실대 실험보다 공간이 넓기 때문에 산소가 부족하여 화염이 줄어들기 전에 천장재의 탈락 및 변형으로 산소가 반자로 유입될 것으로 사료된다.

또한, 중요한 것은 배관용 보온재(단열재)가 상부 천장 단열재로 화재가 확산하게 하는 매개체 역할을 하는 것으로 추정되었다. 왜냐하면, 천장재 위의 화재원인(단락, 합선 등) 만으로는 천장 단열재까지 거리가 멀고 발화열량이 부족하여 천장 단열재에 착화하기가 어려웠기 때문이다. 따라서 배관 보온재를 불연재(준불연재)로 시공한다면 화재 확산을 어느 정도 막을 수 있을 것으로 사료되었다.

화재강도가 약해진 이후 산소 공급을 위하여 발화 후 70 s 시점 실험체의 정면 좌측부분 일부분(W1, Figure 15 참조)을 제거하였으며 그로 인해 화재강도는 다시 증가하였다. 이후 XPS 단열재가 용융되면서 가연성의 가스를 생성하여 화원이 점차 확대되면서 화재의 강도가 더욱 강해졌다. 본 실험의 정면 좌측부분(W1)의 폴리카보네이트 벽체를 제거

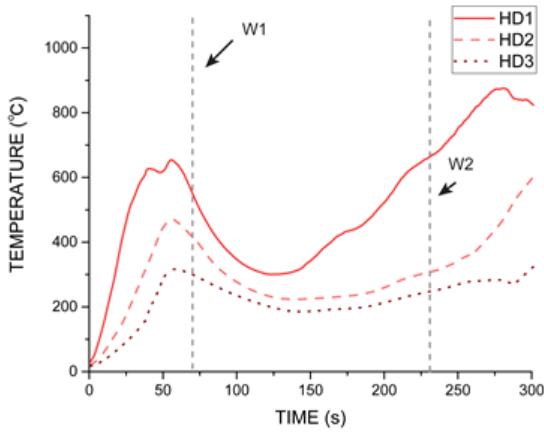


Figure 17. Main temperature of thermocouple sensors in ceiling with a large-scale (XPS + DMC).

한 후 화재의 강도가 증가한 것은 SMC 천장재 위에 낙하한 XPS 단열재의 용융물이 산소 공급으로 화원의 강도를 증가시켰기 때문으로 해석된다.

이와 동시에 SMC 천장재 일부가 1층 바닥으로 탈락하면서 외기의 산소가 실험체 내에 급격히 유입되면서 화재의 크기는 급속도로 증가하고 플래시오버가 발생하였다.

Figure 17에서 실대 화재실험 온도변화 그래프(축소 모형실험 XPS 단열재 + DMC 천장재의 성장과 유사)가 70 s 부근에 W1면을 제거했음에도 불구하고 열전대에서 측정된 온도가 낮아지는 현상은 실험체 내부에 누적된 가연성 가스 및 연기로 인해 주변 산소량이 감소하고 화원에 산소 공급이 원활하지 못해 화재강도가 일시적으로 약화하였음을 알 수 있다. 더불어, 축소모형실험 XPS 단열재 + DMC 천장재에서 XPS 단열재의 용융이 가열 시작 후 10 s 이내에 시작하는 점을 볼 때, 본 실험에서도 XPS 단열재의 용융물이 SMC 천장재 위에 누적되고 있었으며, 120 s 이후에는 SMC 천장재 위에 누적된 XPS 단열재의 용융물이 충분히 쌓이고 1층 바닥으로 탈락한 SMC 천장재의 구멍 사이로 들어온 외기의 산소와 만나면서 화재강도가 급속도로 증가한 것으로 사료된다.

Figure 18 실대화재 실험사진 280 s에서 볼 수 있듯이 화염이 천장재의 아랫면에 붙어있는 것은 SMC 천장재의 결합들 사이로 가연성 물질이 새어 나왔고 이를 매개체로 하여 화재의 확산이 이루어지는 것을 알 수 있다. 이후 수평적으로 실험체의 천장 내부 전체로 연소확대가 나타났으며, 천장재 하부에 설치된 열전대는 천장재의 1층 하부 탈락과 동시에 바닥으로 떨어져 측정이 제대로 이루어질 수 없었다.

3.3 난연 EPS 단열재 + DMC 천장재 실대 화재실험

난연 EPS 단열재와 DMC 천장재를 사용한 실험결과는 Figure 19~21과 같이 600 s 동안 진행됐음에도 불구하고 난연 EPS 단열재가 잘 용해되지 않고 DMC 천장재도 바닥으로 탈락하지 않는 안정적인 결과를 보였다. 같은 실험 조건

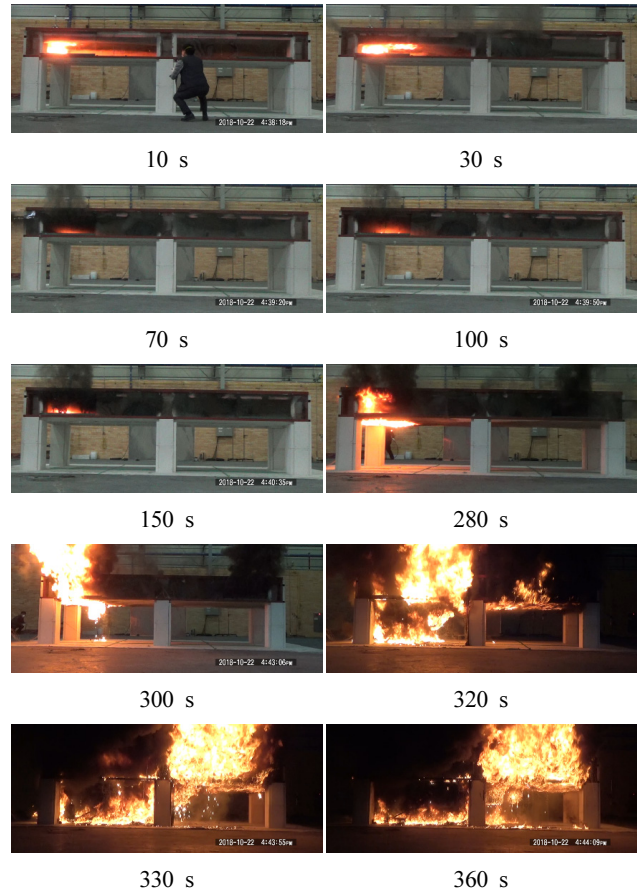


Figure 18. Large-scale experiments of fire spread by insulation materials in the ceiling (XPS + SMC).

으로 본래 진행된 좌측과 더불어 우측과 중간 지점에도 같은 화원을 두고 추가 실험을 진행하였으나, 난연 EPS의 용해 및 용융물이 천장재로 낙하해도 낙하 난연 EPS 용융물의 연소로 인해 화재가 확대될 수는 없을 것으로 사료되었다.

왜냐하면, 난연 EPS 단열재는 연소 확대가 일어나지 않았다. 화원에 의해 연소된 가연물은 각각 비즈형태의 탄화막을 형성하며 낙하하여 DMC 천장재에 열적인 영향을 주지 않았으며, DMC 천장재 또한 바닥으로의 탈락이 일어나지 않는 안정적인 결과를 나타냈다.

결과적으로, 필로티 구조 건축물의 실대 화재실험을 통해 볼 때, 천장 내부의 연소 및 연소 확대의 원인으로서는 실험 초기부터 가정된 단열재의 종류, 천장재의 종류 등 가연성 재료라는 것을 알 수 있었다.

또한 중요한 것은 배관용 보온재(단열재)가 상부 천장 단열재로 화재가 확산하게 하는 매개체 역할을 하는 것으로 추정되었다. 왜냐하면, 천장재에서의 화재원인(단락, 합선 등) 만으로는 천장 단열재까지 거리가 멀고 발화열량이 부족하여 천장 단열재에 착화하기가 어려울 것으로 사료되었다. 따라서 배관 보온재를 불연재로 시공한다면 화재 확산을 상당히 막을 수 있을 것으로 사료되었다.

결국, 필로티 천장 내부의 화재는 전선(합선, 과부하 등),

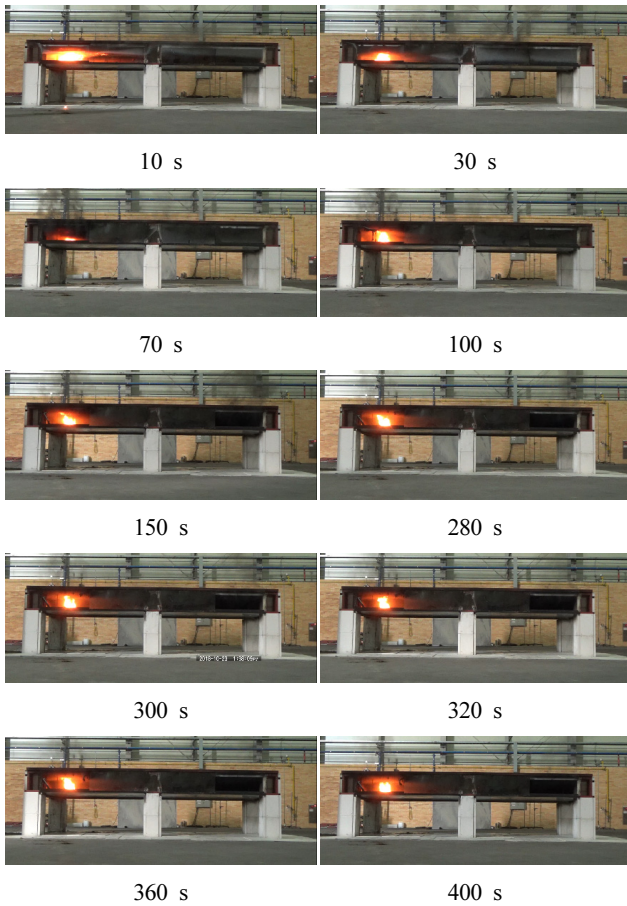


Figure 19. Large-scale experiments of fire spread by insulation materials in the ceiling (Fire retardant EPS + DMC).

콘센트 및 조명 설비 등의 원인에 의해 근거리에서 위치한 배관 보온재 등에 착화되어 상부 천장 단열재로 확대되는 것으로 사료된다. 이후에는 천장 내부의 단열재가 연소되어 용융물이 천장재 위로 낙하하고 연소 확대되어 천장재를 탈락시키며 탈락된 부위로 외부공기(산소)가 다량으로 유입되면서 화재강도 및 확산의 정도가 엄청나게 커지는 플래시오버 현상으로 이어지는 프로세스를 가지는 것으로 판단되었다.

4. 결론

필로티 구조 건축물의 실대 화재실험을 통해 볼 때, 천장 내부의 연소 및 연소 확대의 원인으로는 단열재 및 천장재의 종류 등 가연성 재료라는 것을 알 수 있었다.

천장재에 의한 외기 유입 발생 여부와 그 원인을 제공하는 불이 붙은 단열재 용융물의 천장재 상부 퇴적 유무가 필로티 건축물 천장 내부의 화재 확대를 결정하는 요소로 판단되었다.

또한, 중요한 것은 배관용 보온재(단열재)가 상부 천장 단열재로 화재가 확산되게 하는 매개체 역할을 하는 것

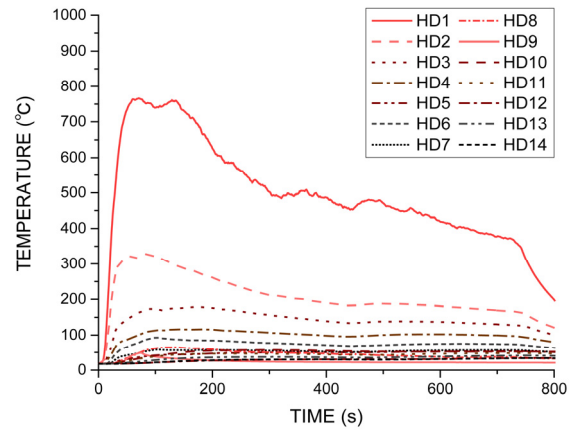


Figure 20. Temperature of thermocouple sensors in ceiling with a large-scale (Fire retardant EPS + DMC).

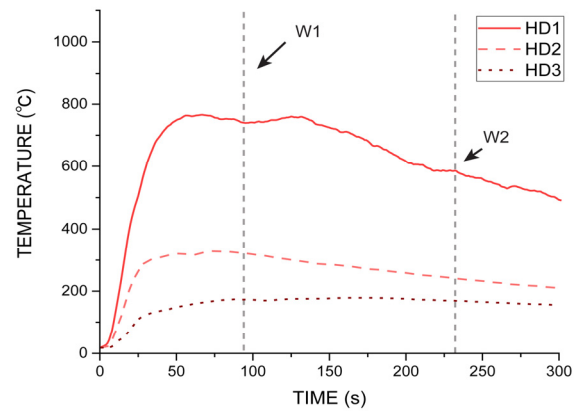


Figure 21. Main temperature of thermocouple sensors in ceiling with a large-scale (Fire retardant EPS + DMC).

로 추정되었다. 따라서 배관 보온재를 불연재(준불연재)로 시공한다면 화재 확산을 어느 정도 막을 수 있을 것으로 사료되었다.

결국, 필로티 천장 내부의 화재는 전선(합선, 과부하 등), 콘센트 및 조명 설비 등의 원인에 의해 근거리에서 있는 배관 보온재 등에 착화되어 상부 천장 단열재로 확대되는 것으로 사료된다. 이후에는 천장 내부의 단열재가 연소하여 용융물이 천장재 위로 낙하하고 연소 및 확대되어 천장재를 탈락시키며 탈락한 부위로 외부공기(산소)가 다량으로 유입되면서 화재 강도 및 확산의 정도가 커지는 플래시오버 현상으로 이어지는 프로세스를 가지는 것으로 판단되었다.

References

1. S. B. Choi and D. M. Choi, "A Study on Fire Risk of Apartment House with Pilotis Structure", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 48-54 (2016).
2. S. B. Choi and D. M. Choi, "Study of the Fire Risk of

- Occupants During Pilotis Space Fires”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 30, No. 5, pp. 144-150 (2016).
3. S. B. Choi, D. C. Choi and D. M. Choi, “A Study on Fire Spread Risk of Resident Buildings With Pilotis”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 103-110 (2017).
 4. E. P. Lee, “Anlysis of Causes of Casualties in Jecheon Sports Center Fire”, *Fire Science and Engineering*, Vol. 32, No. 4, pp. 86-94 (2018).
 5. J. I. Lee and K. C. Ha, “A Study for the Fire Analysis and Igniting Cause of Freezing Protection Heating Cables”, *J. Korean Soc. Saf.*, Vol. 33, pp. 15-20 (2018).
 6. J. G. Park, “An Experimental Study on Heat Accumulation Limit of Heating Lamp and Identification Error of a Source of Ignition”, *J. Fire Investig. Soc. Korea*, Vol. 9, pp. 81-97 (2018).
 7. H. J. Kim, J. Y. Park, H. W. Suh, B. Y. Cho, W. J. Park and S. C. Bae, “Mechanical Degradation and Thermal Decomposition of Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Polymer-Modified Cement Mortar (PCM) Exposed to High-Temperature”, *Sustainability*, Vol. 11, No. 2, 500 (2019).
 8. Y. Zhou, R. W. Bu, J. H. Gong, W. G. Yan and C. G. Fan, “Experimental Investigation on Downward Flame Spread over Rigid Polyurethane and Extruded Polystyrene Foams”, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 92, pp. 346-352 (2018).
 9. W. G. An, J. H. Sun, K. M. Liew and G. Q. Zhu, “Effects of Building Concave Structure on Flame Spread over Extruded Polystyrene Thermal Insulation Material”, *Appl. Eng.*, Vol. 121, pp. 802-809 (2017).
 10. Y. Zhang, J. H. Sun, X. J. Huang and X. F. Chen, “Heat Transfer Mechanisms in Horizontal Flame Spread over Wood and Extruded Polystyrene Surfaces”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 61, pp. 28-34 (2013).
 11. W. G. An, H. H. Xiao, K. M. Liew, L. Jiang, W. G. Yan, Y. Zhou, X. J. Huang, J. H. Sun, et al., “Downward Flame Spread over Extruded Polystyrene”, *J. Therm. Anal. Calorim.*, Vol. 119, pp. 1091-1103 (2015).
 12. L. Jiang, H. H. Xiao, Y. Zhou, W. G. An, W. G. Yan, J. He and J. H. Sun, “Theoretical and Experimental Study of Width Effects on Horizontal Flame Spread over Extruded and Expanded Polystyrene Foam Surfaces”, *J. Fire Sci.*, Vol. 32, pp. 193-209 (2014).
 13. T. D. Hapuarachchi, G. Ren, M. Fan, P. J. Hogg and T. Peijs, “Fire Retardancy of Natural Fiber Reinforced Sheet Moulding Compound”, *Appl. Compos. Mater.*, Vol. 14, pp. 251-264 (2007).
 14. A. Pourali, R. P. Dhakal, G. MacRae and A. S. Tasligedik, “Fully Floating Suspended Ceiling System: Experimental Evaluation of Structural Feasibility and Challenges”, *Earthq. Spectra*, Vol. 33, pp. 1627-1654 (2017).