

도심지 인접 산불의 불티 확산이 건축물 외장재와 지붕재에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Influence of the Spread of Firebrand on Building Exterior Materials and Roofing Materials in Urban Areas

민정기*

Jeong-Ki Min*

Principal Researcher, Real-scale Fire Testing & Research Center, Korea Conformity Laboratories, Samcheok, Republic of Korea

*Corresponding author: Jeong-Ki Min, jkm927@kcl.re.kr

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to evaluate the fire spread risk of building exterior and roofing materials due to the firebrand of forest fire occurring in the urban areas. **Method:** In order to achieve this research purpose, by selecting building materials used for exterior and roofing materials of buildings, the time to ignition, total heat release, and heat release rate were investigated, and a forest fire firebrand system was established to the possibility of fire spread was confirmed. **Result:** As a result of the cone calorimeter test, the roofing material had a similar or faster ignition time due to radiant heat compared to the exterior material with the steel plate exposed to the outside, and showed a higher heat release rate and total heat release than the exterior material. Although it was affected by the flammable material, it was confirmed that it did not spread easily due to the limited amount of combustible material, and carbonization marks appeared inside. **Conclusion:** The cone calorimeter test method has been shown to be useful in understanding the combustion characteristics of building materials by radiant heat, but the fire spread due to a firebrand in a forest fire is directly affected by the flame due to the ignition of surrounding combustibles, so finding a direct correlation with the cone calorimeter method is difficult. It is judged that the roof material may be more vulnerable to the spread of fire due to the fire than the exterior material.

Keywords: Forest Fire, Firebrand, Exterior Materials, Roofing Materials, Fire Spread

요약

연구목적: 본 연구는 도심지 인접에서 발생하는 산불의 불티로 인한 건축물 외장재 및 지붕재의 화재확산 위험성 평가를 목적으로 한다. **연구방법:** 이러한 연구목적을 달성하기 위해서 건축물의 외장재와 지붕재로 사용되는 건축자재를 선별하여 착화시간, 총 방출열량, 열방출률을 확인하고 산불 불티 비화 시스템을 구축하여 산불 불티로 인한 각각의 재료에 대한 화재 확산 가능성을 확인하였다. **연구결과:** 콘칼로리미터 실험결과 지붕재는 철판이 외부에 노출된 외장재에 비해 복사열로 인한 착화시간이 비슷하거나 빨랐으며 외장재보다 높은 열방출률과 총 방출열량을 나타냈으며, 불티 비화 실험에서 외장재는 하부에 가연물이 착화함에 따라 영향을 받았으나 제한된 가연물의 양으로 쉽게 확산하지 않고 내부에서 탄화흔이 나타난 것을 확인할 수 있었으나 지붕재의 경우 사용 재료에 따라 불티로 인한 가연물 착화로 쉽게 녹고 주변으로의 확산에 기여하는 것을 확인할 수 있었다. **결론:** 콘칼로리미터 실험 방법은 복사열로 건축자재의 연소 특성을 파악하는데 유용한 것으로 나타났으나 산불에서 불티로 인한 화재확산은 주변 가연물의 착화로 직접 화염에 영향을 받아 콘칼로리미터 방법과 직접적인 연관성을 찾는 것은 어려움이 있고 외장재에 비해 지붕재가 불티로 인한 화재 확산에 더 취약할 수 있는 것으로 판단된다.

핵심용어: 산불, 불티, 외장재, 지붕재, 화재확산

Received | 23 August, 2021

Revised | 2 September, 2021

Accepted | 10 September, 2021

 OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

2016년 산림청에서 발간한 산림기본통계에 의하면 2015년 말 기준 국내 산림면적은 6,335천ha로 국토면적 대비 산림비율은 63.2%이고, 산림비율은 OECD 국가 중 핀란드(73.1%), 일본(68.5%), 스웨덴(68.4%)에 이어 4위를 차지하고 있다 (Korea Forest Service, 2016). 국내 산림면적의 증가와 함께 최근 산림 휴양·레크레이션·등산 등 산림을 찾는 수요가 급증하고 기후변화 등의 원인으로 지난 10년간 연평균 432건의 산불이 발생(Yeom et al., 2019)하고 있으며 발생원인의 70% 이상이 인재에 의한 것으로 나타났다(Korea Forest Service, 2021). 인재에 의한 산림화재의 주요 발화 열원으로는 담뱃불(또는 라이터 불)과 불꽃, 불티로 인한 화재가 각각 40.4%, 40.7%로 가장 높은 비율을 차지하며 전체 화재 건수 중 83%가 종이, 목재, 건조 등에 착화되어 발생한 것으로 나타났다. 종이, 목재, 건조의 경우 열에 노출되었을 때 쉽게 착화되는 특성이 있어 한번 산림화재가 발생할 경우 주변의 수많은 착화물에 의해 화재확산이 급속도로 진행될 가능성이 높으므로 실제 산림과 유사한 착화물 환경을 조성한 상황에서의 불티 비화로 인한 화재 확산 가능성에 대한 평가가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 산림에 인접한 도시에서 발생한 대표적인 화재인 2013년에 포항 용흥동 용동초등학교 뒷산에서 발생한 화재(Yeom et al., 2015)와 같이 불티가 인근 시설물의 화재 확산에 미치는 영향에 대해 평가하기 위해 대상물(외장재, 지붕재)을 선정하여 콘칼로리미터 실험을 실시하여 복사열에 의한 연소특성을 확인하고 불티 비화 장치를 구축하여 주변 가연물로 인한 화재 확산 가능성에 대해 실험을 수행하고 분석하였다.

콘칼로리미터 실험

실험 계획

2013년에 포항에서 발생한 산불로 산림에 인접한 피해시설물 중에서 일반 주택은 89건으로 70%를 차지하였고, 건축자재는 목조지붕틀 골슬레이트와 조립식 샌드위치 패널이 72.1%의 피해를 차지하였다(Chae et al., 2019). 이를 바탕으로 산불로 인한 피해가 예상되는 산림 인접 건축물의 연소 성능을 평가하기 위해서 EPS 패널 3종(일반, 난연, 준불연)과 지붕재 2종(렉산 골판, 아스팔트 싱글)을 실험 대상으로 선정하였다. 실험은 ISO 5660-1:2015(2015)에 따라 실시하였으며 5종 각 재료의 연소특성을 확인하기 위해 50 kW/m²의 복사열에 노출하여 3회씩 실시하였다. 각각의 실험에서 사용된 실험체의 형상은 Fig. 1과 같으며, 실험체의 크기와 가열시간은 Table 1과 같다. 각 실험을 통해 착화시간, 총 방출열량, 열방출율을 측정하여 결과를 비교·분석하여 재료의 연소특성을 파악하였다.

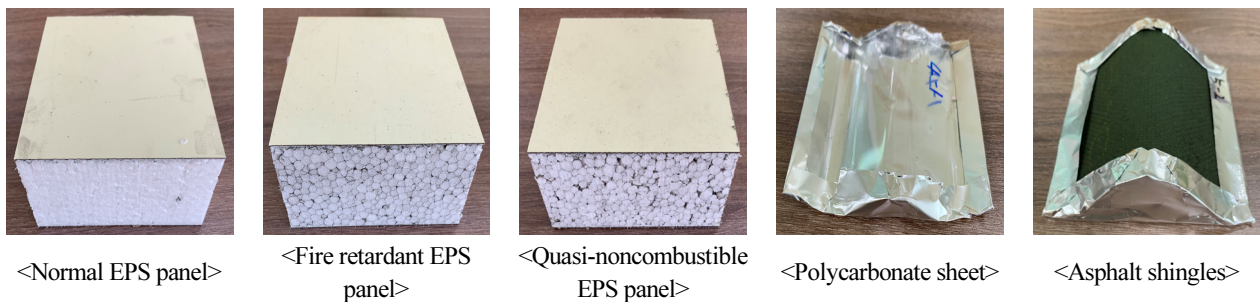


Fig. 1. Test specimens

Table 1. Cone calorimeter test and measurement items

No.	실험체	크기 [W×D×H] (mm)	가열시간 (분)	측정항목
1	일반 EPS 패널		5	
2				
3				
4	난연 EPS 패널	100×100×50	5	
5				
6				
7	준불연 EPS 패널		10	TTI (착화시간), THR (총 방출열량), HRR (열방출률)
8				
9				
10	렉산 골판	100×100×0.8	5	
11				
12				
13	아스팔트 싱글	100×100×3	10	
14				
15				

실험 결과

외장재로 사용되는 EPS 패널과 지붕재에 대한 시간에 따른 열방출률과 총 방출열량의 콘칼로리미터 실험 결과는 각각 Fig. 2 및 Fig. 3과 같으며, 자세한 실험결과는 다음과 같다.

일반 EPS 패널

일반 EPS 패널에 대한 실험 결과 실험체 1과 3은 착화까지 30초가 걸렸으며 평균 열방출률은 7.31 kW/m²이며, 평균적으로 2.24 MJ/m²의 총 방출열량이 나타나는 것을 확인하였다. 실험체 2는 착화까지 40초가 걸렸으나 미소화염으로 적은 총 방출열량(0.53 MJ/m²)을 나타내었다.

난연 EPS 패널

실험체 4, 5, 6은 착화까지 각 41초, 45초, 40초가 걸렸으며 평균적으로 42초에 착화되는 것을 확인하였다. 난연 EPS 패널은 평균 착화시간이 일반 EPS 패널에 비해 약 9초 정도 늦게 착화되었지만, 총 방출열량은 약 2.27배 더 높게 나타났다.

준불연 EPS 패널

실험체 7과 9는 착화까지 각 45초, 50초가 걸렸으며 실험체 8은 착화되지 않았다. 일반 EPS 패널과 난연 EPS 패널에 비해 2배 긴 10분의 가열시간에도 불구하고 총 방출열량은 평균 1.39 MJ/m²로 EPS 패널 중 가장 낮은 값을 나타내었다.

렉산 골판

실험 결과 실험체 10, 11, 12는 착화까지 각 40초, 50초, 43초가 걸렸으며 평균적으로 44초에 착화하는 것을 확인하였다.

렉산 골판 지붕재의 최대 열방출률 평균은 415.55 kW/m²로 외장재에서 가장 높은 난연 EPS 패널의 평균 최대 열방출률 보다 약 8배 높은 결과를 나타내었으며, 평균 총 방출열량은 68.14 MJ/m²로 난연 EPS 패널의 평균 총 방출열량 보다 5.4배 높은 것으로 나타났다.

아스팔트 싱글

실험체 13, 14, 15는 착화까지 각 28초, 25초, 22초가 걸려 대상 실험체 중에 가장 빨리 착화하는 것으로 나타났다. 세 실험체의 최대 열방출률 평균은 393.71 kW/m²이고 총 방출열량 평균은 69.91 MJ/m²로 렉산 골판 지붕재와 비슷한 최대 열방출률을 나타냈으나, 총 방출열량은 아스팔트 싱글 지붕재가 약 3.4배 높은 것으로 나타났다.

콘칼로리미터 실험을 통한 EPS 패널과 지붕재에 대한 착화시간, 총 방출열량, 최대 및 평균 열방출률은 Table 2와 같다.

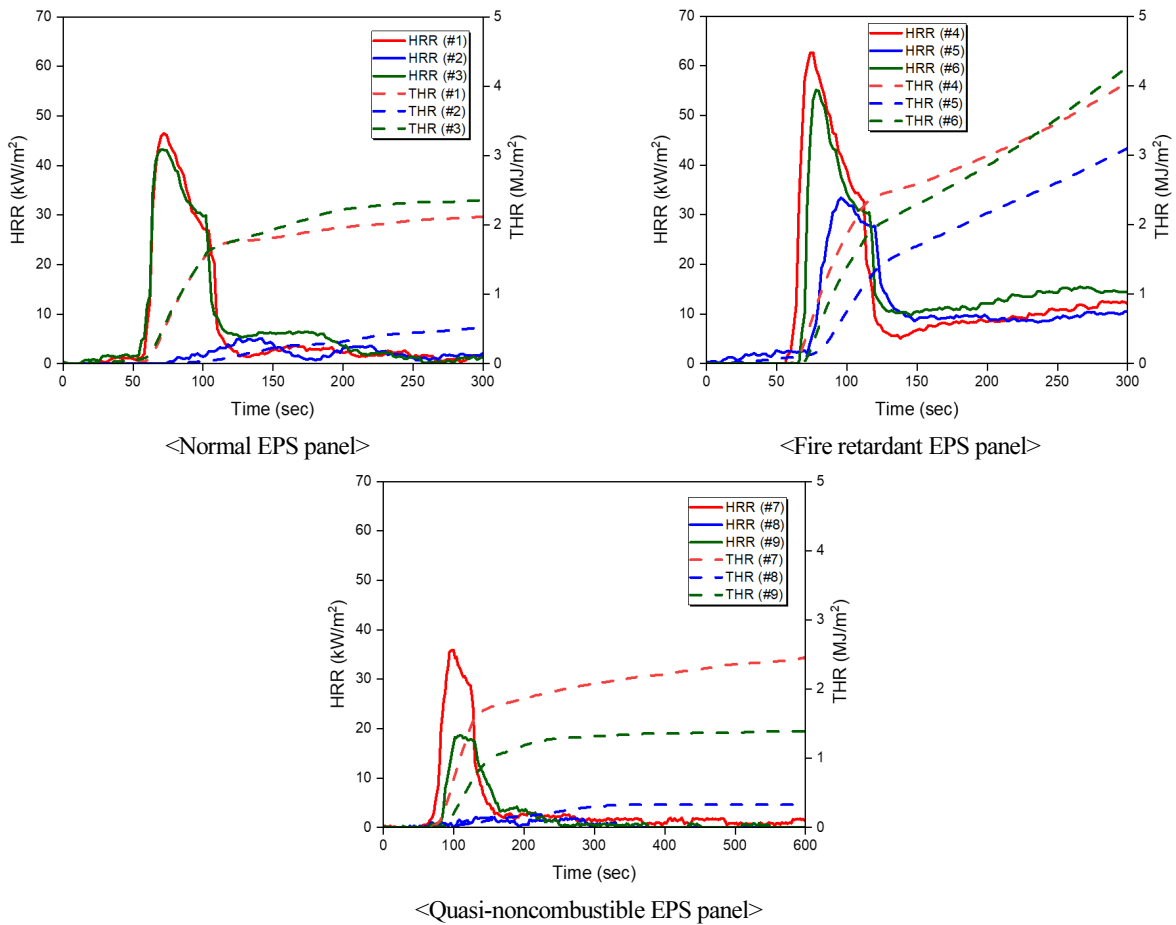


Fig. 2. HRR and THR results for exterior walls

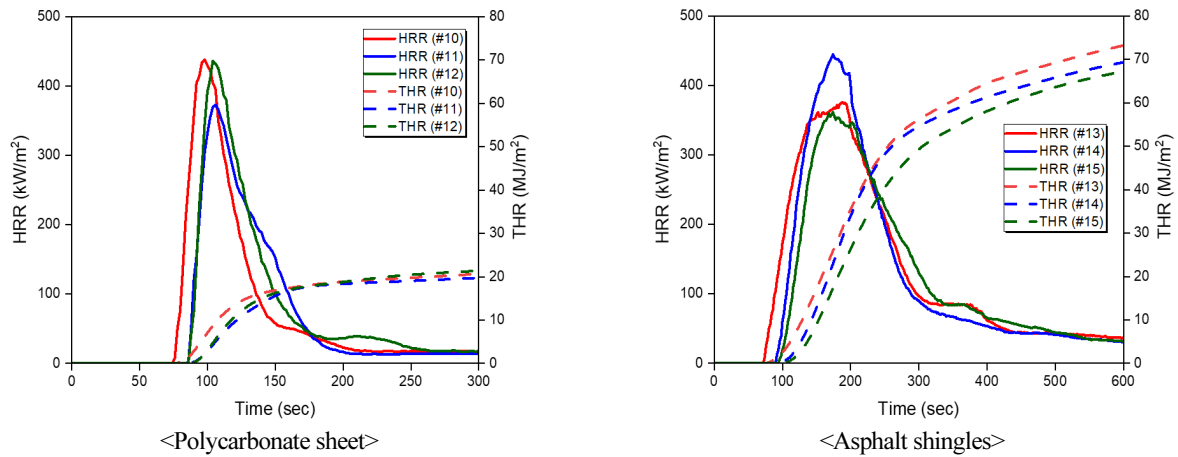


Fig. 3. HRR and THR results for roofing materials

Table 2. Cone calorimeter test results

No.	실험체	착화시간 (s)	총 방출열량 (MJ/m ²)	열방출률 (kW/m ²)	
				최대	평균
1		30	2.12	46.46	7.02
2	일반 EPS 패널	40	0.53	5.13	1.73
3		30	2.36	43.27	7.81
4		41	4.05	62.66	13.42
5	난연 EPS 패널	45	3.10	33.4	10.27
6		40	4.27	55.13	14.13
7		45	2.46	35.9	4.07
8	준불연 EPS 패널	×	0.33	2.16	0.54
9		50	1.39	18.69	2.31
10		40	20.63	437.91	68.3
11	렉산 골판	50	19.73	372.62	65.33
12		43	21.38	436.13	70.80
13		28	73.19	375.91	121.58
14	아스팔트 싱글	25	69.31	444.38	115.13
15		22	67.24	360.83	111.69

콘칼로리미터 실험결과 분석

외장재에 대한 콘칼로리미터 실험에서 총 방출열량과 열방출률은 예상대로 준불연 EPS 패널에서 가장 낮게 나타났다. 난연 EPS 패널의 경우 예상대로 일반 EPS 패널에 비해 착화시간이 더 걸리는 것으로 나타났으나 총 방출열량과 열방출률은 일반 EPS 패널이 더 낮게 나타났다. 일반적인 예상과 다른 이러한 차이는 패널은 철판과 심재로 이루어진 복합자재로 난연 EPS 패널이나 준불연 EPS 패널은 직접 화염이 아닌 복사열을 통해 철판에 전달되어 난연재를 포함한 심재에 열방출이 일어나는 반면에 일반 EPS 패널의 심재는 녹아서 흘러 내리거나 착화가 되더라도 철판의 도막에만 불이 붙거나 심재에 착화가 지속되

지 못하는 경우 때문에 발생할 수 있는 것으로 판단된다.

지붕재에 대한 실험 결과는 외장재는 외부가 철판으로 이루어지고 심재가 열전달로 인한 간접영향을 받는데 반해 직접적으로 복사열에 노출되어 열방출률과 총 방출열량이 높게 나타나고 복사열에 훨씬 취약한 것으로 판단된다.

불티 비화 실험 장치

장치 개요

콘칼로리미터로 확인된 외장재 및 지붕재의 연소특성에 더해 산불 발생 시 불티의 비화로 인한 화재확산의 영향을 확인하기 위하여 불티 비화 실험 장치를 구축하였다. 구축된 불티 비화 실험 장치는 Fig. 4의 왼쪽과 같이 불티 비화구, 연료 투입구, 송풍기 및 모터(전동팬)로 구성되어 있으며, 오른쪽은 점화구의 상세를 보여준다. 별도의 측정장치 위에 실험체를 설치하고 컨트롤 패널을 통해 제어한다.

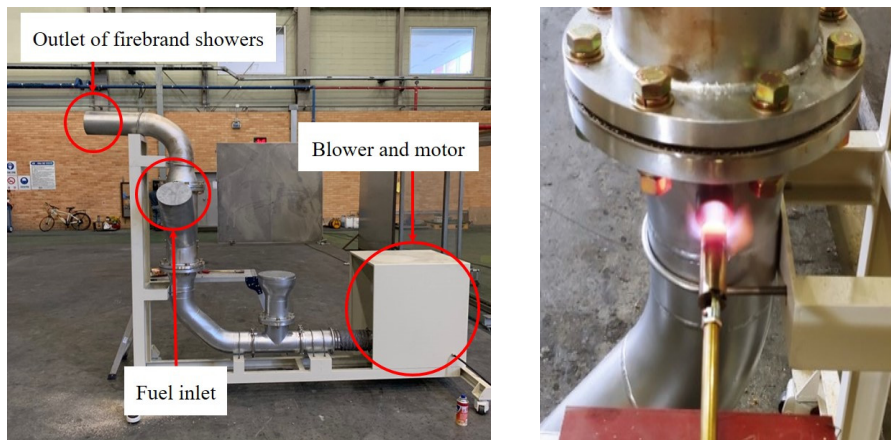


Fig. 4. Structure of forest fire firebrand generator and details of ignition inlet

실험방법

불티 비화 실험에서 불티를 생성하기 위한 목재 펠릿을 1 kg 계량하여 연료 투입구에 넣은 후 부탄가스에 토치를 연결하고 점화구에 점화한다. 이후 산소 유입으로 연소를 원활하게 하기 위해서 전동팬을 가동하여 2 m/s의 풍속으로 2분, 3 m/s의 풍속으로 1분 총 3분 동안 가열한다. 가열 완료 후 풍속을 조절하여 목표 풍속으로 불티를 비화시켜 10분간 불티가 가연물에 도달하도록 한다. 본 연구에서는 국내 주요 산불 당시의 풍속이 10~12 m/s인 점을 고려하여 10 m/s로 설정하였으며, 예비실험을 통해 불티가 가연물 및 외장재(또는 지붕재)까지 충분히 도달할 수 있는 거리(2.5 m)에 실험체를 설치하였다.

불티 비화 실험 및 결과

실험 조건

Fig. 5와 같이 외장재의 불티 비화 실험을 위해서 비화장치 토출구로부터 패널의 중심이 2.5m 되는 지점에 외장재를 수직

으로 설치하였으며, 지붕재를 30° 각도로 설치한 후 비화장치 토출구로부터 지붕재의 중심이 2.5m 거리에 외장재가 위치하도록 조절하였다. 외장재는 심재만 차이가 있을 뿐 외부 철판은 동일한 재질로 가연물로 인한 영향을 동일하게 하기 위해서 외장재 주변 가연물로 A4용지 100장을 외장재의 정면 하단부에 위치시킨 후 비화 실험 후에 철판의 외부와 내부 단열재의 형상 변화를 확인하였다. 지붕재는 30° 각도로 설치함에 따라 A4용지와 같은 가연물을 고정하여 위치하기 어려울 뿐만 아니라 렉산 골판 지붕과 아스팔트 싱글 지붕의 재질이 서로 다르기 때문에 가연물의 정량적 구성에 큰 의미가 없을 것으로 판단되어 건조된 침엽수를 활용, 실제 환경과 유사하게 가연물을 구성하여 비화 실험 후 지붕재의 연소특성을 확인하였다.



<Exterior wall specimen>



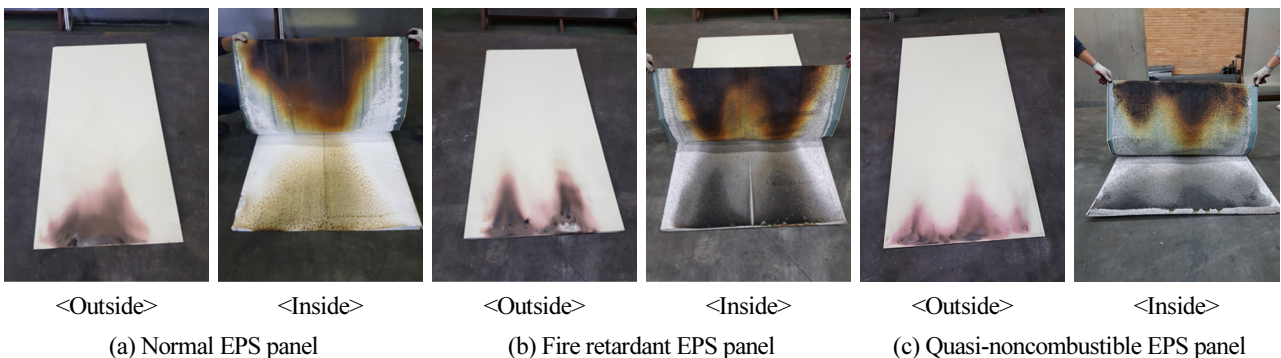
<Roofing material specimen>

Fig. 5. Set-up of specimens for forest fire firebrand

실험 결과

외장재

Fig.6은 산불 불티 비화 실험에 의한 외장재의 외부와 내부의 탄화 모양을 보여준다. 불티 비화 실험 결과 일반 EPS 패널 외부(철판)에는 불길에 그을린 흔적이 나타났으며 패널의 하단부에는 코팅이 벗겨진 형태를 보이고 있다. 내부는 불길로 인



<Outside>

<Inside>

<Outside>

<Inside>

<Outside>

<Inside>

(a) Normal EPS panel

(b) Fire retardant EPS panel

(c) Quasi-noncombustible EPS panel

Fig. 6. Forest fire firebrand test results for exterior walls

해 단열재가 녹았으며 철판 뒷면에는 탄화흔이 보이는 것을 확인하였다. 난연 EPS 패널의 외부(철판)에는 일반 EPS 패널처럼 불에 탄 흔적과 하단부에 코팅이 벗겨진 유사한 형태가 나타났으며, 내부는 단열재가 녹아내린 범위와 탄화흔이 일반 EPS 패널보다 더 크게 나타났다. 준불연 EPS 패널의 외부(철판)에는 다른 패널보다 탄화흔이 적게 나타났으며 코팅이 벗겨진 부분은 없었다. 내부는 육안 상 다른 패널보다 단열재가 녹은 범위나 검게 탄 흔적이 가장 적게 나타나는 것을 확인하였다.

지붕재

렉산 골판은 Fig. 7과 같이 불티로 인해 가연물(건조된 침엽수)에 착화하고 약간의 시간경과 후, 빠른속도로 녹아 내리기 시작한 것을 확인하였다. 실험 후, 렉산 골판 중앙부에 불길기 나타난 범위만큼 지붕재가 녹은 것을 확인하였다. 화염이 직접 닿은 부분은 PVC 재질로 구성됨에 따라 화재에 매우 취약한 것으로 나타났다.



Fig. 7. Forest fire firebrand test results for polycarbonate sheet



Fig. 8. Forest fire firebrand test results for asphalt shingles

아스팔트 싱글은 Fig. 8과 같이 불티로 인해 가연물(건조된 침엽수)에 착화하였음에도 가연물만 연소하는 정도로 나타났으며, 가연물이 연소한 부분의 그을린 흔적 외에 주변으로의 화재 확산은 일어나지 않고 특별한 손상은 보이지 않았다. 타르, 모래 등에 섬유를 혼합한 제품으로 비교적 화재에 강한 것으로 나타났다.

불티 비화 실험결과 분석

외장재에 대한 불티 비화 실험에서 불티 자체는 철판과 심재로 이루어진 복합자재에서 외부 철판에 큰 영향을 미치지 못하지만 외장재 하부에 가연물이 존재하는 경우에 외부 온도 상승으로 인해 심재에 영향을 미칠 수 있으나 콘칼로리미터 실험과 같이 일정한 양의 복사열이 상당 시간 동안 지속되지 않아 심재에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다. 또한, 화재확산을 지연시킬 수 있는 심재를 사용하는 경우 수직으로 세워진 외장재에서 상부로의 확산은 제한된다.

지붕재인 렉산 골판이나 아스팔트 싱글도 불티 자체의 비화로 인한 영향은 크지 않은 반면에 외장재와 달리 가연물이 지붕재 위에 골고루 분포하고 있어 주변 가연물에 착화가 일어나게 되면 렉산 골판은 135°C의 낮은 열변형 온도와 함께 주변으로 확산되어 쉽게 녹지만 아스팔트 싱글은 쉽게 녹지 않아 주변으로의 확산도 쉽게 일어나지 않는 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 도심지 인근 산불에서 불티의 비화로 인해 화재확산에 영향을 받을 수 있는 외장재 및 지붕재를 대상으로 콘칼로리미터 실험을 실시하고 불티 비화 실험 장치를 구축하여 불티 비화 실험을 통해 외장재 및 지붕재의 화재확산 가능성을 확인하고 고찰하였다. 실험결과 콘칼로리미터 실험 방법은 건축자재의 연소 특성을 파악하는데 유용한 것으로 나타났으나 산불에서 불티로 인한 화재는 주변 가연물에 착화가 일어나서 화염이 직접 영향을 미치고 적용 건축자재에 따라 배치 형태가 달라 수평으로 놓고 일정한 복사열로 내 외장재의 화재 위험성을 확인하는 콘칼로리미터 방법과 직접적인 연관성을 찾는 것은 어려움이 있는 것으로 판단된다. 또한, 불티의 직접적인 영향은 외장재와 지붕재에 크지 않으나 외장재는 수직으로 위치하고 있어 하부에 일정 높이까지 벽돌과 같은 불연소재를 사용함으로써 가연물의 착화로 인한 화재 확산을 방지할 수 있는 반면에 지붕재는 가연물을 제거하는 것이 어려우므로 화재에 강한 건축재료를 사용할 필요가 있다고 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 - 재난안전플랫폼기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호는 NRF-2017M3D7A10 71840).

References

- [1] Chae, J.-S., Kim, B.-K., Lee, J.-H., Lee, S.-Y. (2019). "A study on mitigation of facilities damage caused by forest fire." *Journal of the Korean Society for Wellness*, Vol. 14, No. 3, pp. 39-51.
- [2] ISO 5660-1:2015 (2015). Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement), International Standard Organization, Switzerland.

- [3] Korea Forest Service (2016). 2016 Forest Basic Statistics, Korea.
- [4] Korea Forest Service (2021). 2020 Statistical Yearbook of Forestry Fire, Korea.
- [5] Yeom, C.-H., Lee, S.-Y., Kwon, C.-H., Park, H.-S. (2015). "Analysis of the characteristics of the behaviour and damaged facilities of Pohang forest fires." *Crisisonomy*, Vol. 11, No. 1, pp. 115-130.
- [6] Yeom, C., Lee, S.-Y., Park, H., Kwon, C.-H. (2019). "A study on facilities damage characteristics caused by forest fire in Goseong-Gun." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 15, No. 4, pp. 469-478.