

화재진행에 따른 복사열유속 분포 및 위험인자 연구

박지현, 김홍식*, 최재민*, 오대희*
방재시험연구원, 중앙소방학교*

A Study on the radiative heat distribution according to fire development and the radiative dangerous factor

Ji-Hyun Kwark, Hong-Sik Kim*, Jae-Min Choi*, Dae-Hee Oh*
*Fire Insurers Laboratories of Korea, *Nat'l Fire Service Academy*

1. 서론

화재발생시 화재감지 및 경보, 화재진압, 피난, 소화활동 등을 적절히 하기 위한 여러 가지 소방설비들은 연소현상을 올바로 이해하고 화재성상에 대한 기본 정보를 제대로 갖추고 있어야 효과적이고 합리적인 개발과 적용이 가능하게 된다. 이를 위해 해외 소방선진국에서는 국공립기관 또는 관련 연구소를 중심으로 꾸준한 기초연구가 수행되어 왔으며 이를 바탕으로 상당한 수준에 올라와 있다. 그러나 국내에서는 화재·소방 기술에 관한 역사가 짧으며 기초분야에 대한 연구와 투자가 부족하여 연소현상과 화재성상에 관한 정립된 지식이 많이 부족한 형편이다. 이런 상황에서 최근 화재거동에 관한 기초연구로 여러 가연물질의 기초 연소특성과 연소반응기구에 관한 연구가 수행되기도 하였는데, 여기서 더 나아가 화염의 성장이 주위에 미치는 영향에 대한 고찰은 화재거동 메커니즘을 규명하기 위한 필수적인 과정이라 할 수 있다.

이 연구에서는 특히 화재발생시 화염의 성장에 따른 복사열의 영향을 규명하기 위하여 가연물 종류에 따른 복사열유속의 크기와 화재실내 고온연기층에 의한 화재실 바닥의 복사열유속 분포 등을 고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

화재발생시 실내의 각종 가연물들은 각각 고유의 열방출율을 가지게 되는데 주변에서 흔히 볼 수 있는 24가지 내부마감재료를 선정하여 연소시 방출하는 복사열유속 강도를 측정하고, 또한 화재실에서 발생한 연기나 인근 구획에서 발생하여 유입된 고온의 연기에 의해 전달된 바닥의 복사열의 분포를 측정하여 연기층으로 인한 복사열의 위험인자를 평가하고자 한다.

2.1 가연물 종류와 성장시간에 따른 복사열유속 분포

가연물이 연소시 발생하는 복사열유속 강도를 측정하기 위한 실험장치는 아래 그림과 같이 열유속 센서, 가연물 고정대, 데이터 수집장치 등으로 구성된다. 가로 및 세로

가 모두 1m인 가연물을 고정대에 부착하고 중심부에서 수직방향으로 10cm 거리에 열유속 센서를 설치한다. 가연물을 점화원으로 가열하여 착화시킨 후 화염 성장시 시간에 따른 열유속 강도의 변화를 데이터 수집장치를 통해 측정한다. 열유속 센서(Heat flux meter)는 미국의 Medtherm社에서 개발한 것으로 최대 측정범위는 1140kW/m^2 ($100\text{Btu/ft}^2\text{s}$)이고, 0에서 10mV 사이의 출력값을 가지는데, 이를 A/D 변환 보드에 연결하여 컴퓨터로 1초에 두 번씩 샘플링하여 열유속 값을 계측 및 저장한다.

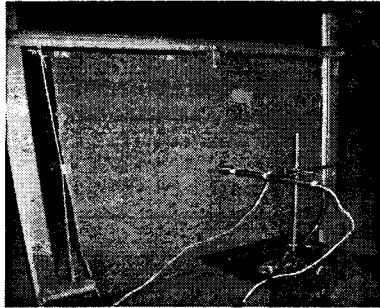


그림 1 복사열유속 측정장치

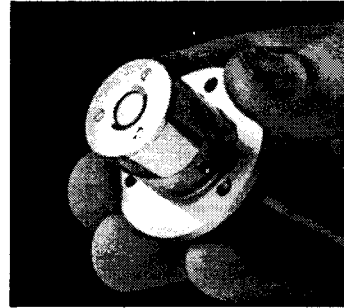


그림 2 Heat flux sensor

아래 표들은 각각 주요 실험장치의 사양과, 실험에 사용한 가연물의 목록을 나타낸다.

표 1 주요 실험장치의 사양

| 구성품 | 주요 사항 | 비고 |
|-----------------|---|--------|
| 열유속 센서 | 측정범위 0~1140kW/m ² 수냉식, 플렌지형 | 전압신호형 |
| 수집장치 (A/D보드) | 16채널, Thermocouple, 전압신호(유량, 압력 등) 변환 | 실시간 입력 |

표 2 최소점화열유속 측정을 위한 가연물 목록

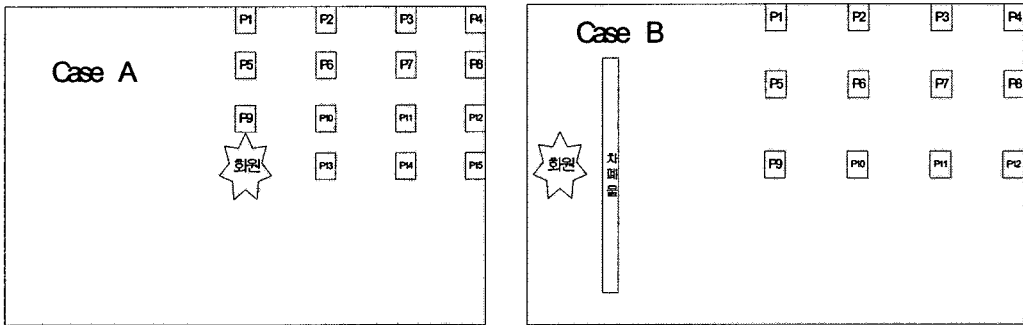
| 연번 | 가연물 | 연번 | 가연물 |
|----|-------|----|--------|
| 1 | MDF | 13 | 방염블라인드 |
| 2 | 합판 | 14 | 인조가죽 |
| 3 | PB | 15 | 천연가죽 |
| 4 | 흡음판 | 16 | 원목마루 |
| 5 | 인조대리석 | 17 | 강화마루 |
| 6 | 벽지 | 18 | 장판 |
| 7 | 방염벽지 | 19 | 플라스틱장판 |
| 8 | 카펫 | 20 | 골판지 |
| 9 | 방염카펫 | 21 | PP |
| 10 | 커튼 | 22 | POM |
| 11 | 방염커튼 | 23 | HDPE |
| 12 | 블라인드 | 24 | UHMWPE |

2.2 고온 연기층에 의한 화재실 바닥의 복사열유속 분포

아래 그림은 모형화재실에서 B급(유류)화재 발생시 생성되는 연기층에 의한 바닥의 복사열유속 분포를 측정하기 위한 개략도이다.

먼저 그림 3(a)처럼 화재실 중앙에 화원(220kW)을 설치하고 복사열유속 센서를 일정한 간격(가로 1m, 세로 0.5m)으로 움직여가며 자연환기 조건시 정상상태에서의 화재실 바닥의 복사열유속 분포를 측정하였다. 이 때 바닥의 복사열은 화원과 연기의 온도로부터 동시에 전달되며, 화염의 온도가 훨씬 더 높기 때문에 화염으로부터 나오는 복사열에 영향을 받는다. 이 복사열은 사방으로 방사되므로 4분의 1면에 대하여 아래 그림과 같이 바닥면의 복사열유속 강도를 측정하였다.

한편 인근 화재실에서 발생하여 유입된 고온의 연기에 의한 복사열전달의 효과를 살펴보기 위하여 화원(600kW)을 화재모형실 좌측문 앞 쪽에 설치하고, 차폐물로 화염을 차단한 채 환기방식에 따라 그림 3(b)와 같이 실험을 수행하였다. 측정 지점은 12곳이며, 환기조건은 자연환기와 천장 중앙의 20m³/min 강제환기 두 가지로 하였다.



(a) Case A (b) Case B
그림 3 연기층에 의한 화재실 바닥의 복사열유속 분포 측정

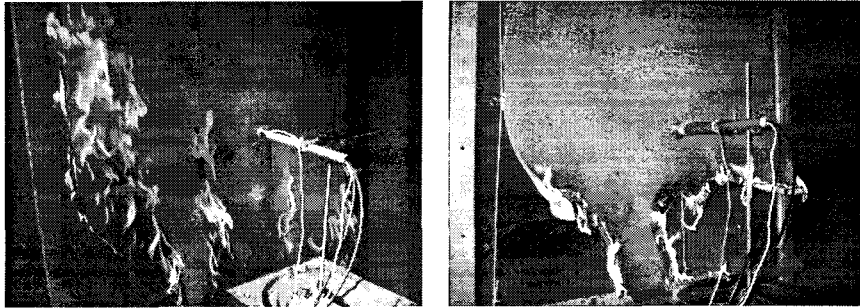
3. 실험결과 및 고찰

3.1 가연물 종류와 성장시간에 따른 복사열유속 분포

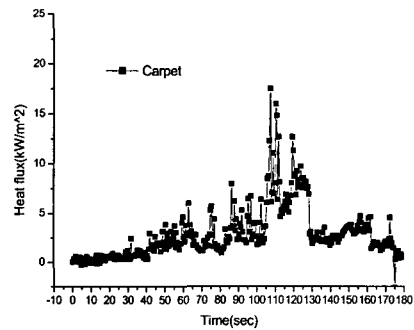
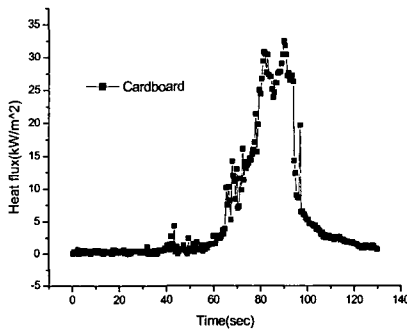
24종의 가연물에 대한 복사열유속 강도측정 결과 대부분의 가연물들은 착화 후 열유속 강도가 서서히 증가하다가 최고값을 나타내고 다시 감소하였는데, 착화되지 않는 가연물들은 복사열의 방출이 거의 없었다.

표 3은 이들 가연물의 최대 복사열유속 강도를 정리한 것이다. 목재는 얇은 판을 여러겹 겹쳐 만든 합판이 MDF에 비해 약간 높았으며 흡음판도 비슷한 강도를 나타내었다. 카펫의 열유속값이 상대적으로 크게 나타났으며, 커튼은 두께가 얇아 연소 전에 용융되어 낮게 나타났다. 특이한 점은 벽지의 열유속이 크게 나옴에 반해 방염벽지는 거의 착화되지 않아 열유속의 방출이 없었으며, 방염 카펫이나 방염 블라인드도 방염처리가 되지 않은 제품보다 열유속 강도가 다소 낮게 나와 방염처리의 중요성을 확인할 수 있었다.

한편 골판지의 열유속이 가장 높게 나왔으며, 마루나 장판은 낮은 열유속 강도를 나타내었다. 가장 두드러진 점은 인조가죽과 천연가죽의 차이로 인조가죽이 높은 열유속을 내 놓는데 비하여 천연가죽은 아주 낮은 강도를 나타내어 인조가죽의 화재위험성이 훨씬 높게 나타났다.



(a) 골판지 (b) 일반 카펫
그림 4 가연물에 따른 복사열유속 측정 장면



(a) 골판지 (b) 일반 카펫
그림 5 화염성장시간에 따른 복사열유속 크기 변화

표 3 각종 가연물의 최대 복사열유속 강도(10cm 이격 지점)

| 가연물 | 최대 열유속 (kW/m ²) | 가연물 | 최대 열유속 (kW/m ²) |
|------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|
| 목재(MDF) | 5 | 방염 블라인드 | 5 |
| 목재(합판) | 8 | 인조가죽 | 21 |
| 목재(PB) | 7 | 천연가죽 | 3 |
| 흡음판(폴리에스터) | 7 | 원목마루 | × |
| 인조대리석 | × | 강화마루 | × |
| 벽지 | 20 | 장판 | × |
| 방염벽지 | × | 플라스틱 장판 | × |
| 카펫 | 17 | 골판지 | 32 |
| 방염카펫 | 11 | 고분자수지(PP) | 3 |
| 커튼 | 2 | POM | 10 |
| 방염커튼 | 2 | HDPE | 6 |
| 블라인드 | 8 | UHMWPE | 5 |

주) × : 거의 연소하지 않아 측정하지 못함

3.2 고온 연기층에 의한 화재실 바닥의 복사열유속 분포

먼저 Case A의 화재실험 결과 측정된 복사열유속의 강도는 아래 표 4와 같다.

표 4 연기층에 의한 바닥의 복사열유속 분포(자연환기, 화원-중앙, 220kW급)

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| P1 | 1.0 | P2 | 0.45 | P3 | 0.4 | P4 | 0.32 |
| P5 | 1.9 | P6 | 1.5 | P7 | 0.8 | P8 | 0.38 |
| P9 | 3.9 | P10 | 2.7 | P11 | 1.4 | P12 | 0.35 |
| 화 원 | | P13 | 3.7 | P14 | 1.5 | P15 | 0.45 |

화원 주위의 복사열에 의한 열유속 강도는 2~4kW/m²에 육박하며 가장자리로 멀어 질수록 크게 낮아졌다. 천장의 연기가 아니라 화염으로부터 직접 복사열이 전달되어 바닥임에도 불구하고 높은 열유속을 받는 것으로 사료된다. 열유속 강도가 2kW/m²가 넘으면 1분 후 통증이 느껴지고, 3kW/m² 이상이 되면 5분을 버티기가 힘들게 되므로 이러한 화재실 조건에서는 즉시 탈출해야 목숨을 건질 수 있다.

표 5 바닥의 복사열유속 분포(자연환기, 화원-차폐, 600kW급)

| | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P1 | 1.7 | P2 | 1.2 | P3 | 1.2 | P4 | 0.8 |
| P5 | 1.5 | P6 | 2.1 | P7 | 1.4 | P8 | 1.0 |
| P9 | 1.0 | P10 | 0.8 | P11 | 0.4 | P12 | 0.2 |

표 6 바닥의 복사열유속 분포(강제환기-천장20m³/min, 화원-차폐, 600kW급)

| | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P1 | 1.9 | P2 | 1.6 | P3 | 1.4 | P4 | 1.2 |
| P5 | 3.2 | P6 | 2.6 | P7 | 1.6 | P8 | 1.5 |
| P9 | 2.5 | P10 | 1.6 | P11 | 1.3 | P12 | 1.0 |

Case B와 같이 차폐된 화염의 복사열유속 분포는 천장의 고온 연기층 으로부터의 복사열에 의해 바닥에 전달되는 열유속으로서 환기방식에 따라 강도 및 분포에 있어 차이를 나타내고 있다.

우선 양쪽 측벽의 문을 개방한 자연환기 조건의 열유속 분포는 표 5와 같이 화재실 바닥의 가로 방향 중심(P9~P12)의 열유속 크기가 가장자리(P1~P4) 보다 낮은 값을 가진다. 따라서 개구부에서 들어오는 차가운 공기에 의한 대류열전달 효과는 중심방향 부근의 연기를 급속히 냉각시키고 이로 인해 바닥에 전달되는 열유속도 감소되는 것으로 생각된다. 또한 바닥으로 유입되는 차가운 공기의 영향도 열유속센서의 강도를 떨어뜨리는 것으로 추측된다.

천장에서 강제 환기하는 경우의 열유속 분포는 우측의 문이 닫혀진 상태이므로 비교적 신선한 공기에 의한 영향은 배제되었다고 볼 수 있는데, 특이한 점은 표 6에서 보듯이 화원에서 멀리 갈수록 중심 쪽보다 화재실 가장자리의 열유속이 높은 분포를 보인다. 이것은 화원에서 가까운 쪽은 거리가 가까운 중심선 부근의 연기온도가 높는데, 멀리 갈수록 벽 쪽 가장자리에 연기가 체류하면서 열이 적층되어 연기의 온도가 고온

으로 유지 되어 생기는 결과로 판단된다. 실험에서 일부 지점은 열유속 강도가 3kW/m^2 이상인 곳도 나타나 화재시 인근 구획에서 유입된 고온의 연기에 의한 복사열전달로 목숨이 위태로울 수 있음을 확인하였다.

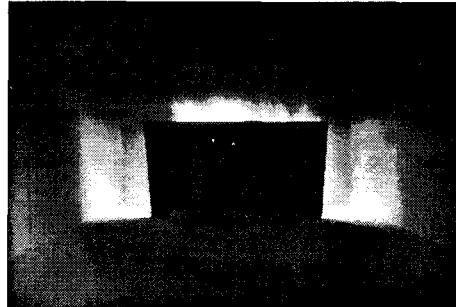


그림 6 화재실 중앙에서의 연기발생 그림 7 구획된 화재로부터의 연기발생

4. 결 론

- 가. 건물 내부마감재료의 연소시 발생하는 복사열유속의 크기는 대부분의 가연물이 착화 후 서서히 증가하다가 최대값을 나타내고 다시 감소하였으며, 특히 방염처리된 제품이 그렇지 아니한 것에 비해 방출되는 열유속의 강도가 다소 낮게 나타났다.
- 나. 일반벽지나 골판지 등 종이류의 복사열유속 강도가 특히 높았으며, 다음으로 목재류, 플라스틱류의 순이었다. 또한 인조가죽은 천연가죽에 비해 훨씬 높은 화재위험성을 가진다.
- 다. 인접구역에서 전해져온 고온의 연기층에 의해 화재실 내부의 복사열유속 강도는 최고 3kW/m^2 을 초과하며, 신속히 탈출하지 못할 경우 치명적일 수 있으므로 적절한 환기방식이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 중앙소방학교의 2006년도 연구개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. D. Drysdale, *An Introduction to Fire Dynamics* (New York: Wiley, 1985), p.36
2. D. G. Hamilton and W. R. Morgan, *Radiant-Interchange Configuration Factors*, NACA Tech. Note 2836. (Washington, DC: December 1952), p.78
3. J. G. Quintiere and B. J. McCaffrey, *The Burning of Wood and Plastic Cribs in an Enclosure: Vol. I*, NBSIR 80-2054 (Gathisburg, MD: September 1980, National Bureau of Standards), p. 118
4. 현성호 외, *화재원론*, 동화기술, 2001.
5. V. Babrauskas and S. J. Grayson, *Heat Release in Fires*, Elsevier applied science, 1992.