

플래시오버와 백드래프트의 발생 및 성장특성

김성윤, 꺾지현, 안병호, 김동석
방재시험연구원

Appearance and growth characteristics of flashover and backdraft

KIM, S.Y, Kwark, J.H, Ahn, B.H, Kim, D.S
Fire Insurers Laboratories of Korea

1. 서 론

최근 화재거동에 관한 기초연구로 여러 가연물질의 기초 연소특성과 연소반응기구에 관한 연구가 수행되기도 하였는데, 여기서 더 나아가 화재시 화염의 성장과 확산기구의 고찰은 화재거동 메커니즘을 규명하기 위한 필수적인 과정이라 할 수 있다. 따라서 이 연구는 소화활동시 발생하는 이상현상인 플래시오버 및 백드래프트의 발생 및 성장특성을 분석하여 소화활동의 안전과 효과적인 화재진압을 위한 기술개발에 큰 역할을 하고 국내 화재관련 연구의 발전을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 이 론

화재시 발생하는 이상현상 중 대표적인 것으로 화염이 일순간에 확대되는 플래시오버 현상과, 소멸된 화염이 산소가 공급되면서 순식간에 되살아나는 백드래프트 현상이 있다. 이러한 현상의 차이점은 우선 플래시오버는 급격한 가연성 가스의 착화로서 폭발이나 충격파는 없으나, 백드래프트는 진행이 빠른 화학반응으로서 대기의 급격한 온도상승, 팽창, 압력상승 등을 일으키고 폭발 혹은 충격파를 수반한다.

또한 플래시오버는 화재성장단계 중 성장기인 제1단계에 발생하나 백드래프트는 감쇠기인 제3단계에서 발생하며, 플래시오버의 발생은 열의 공급이 원인이 되나 백드래프트는 산소의 공급이 원인이 된다. 순발 연소라고도 하는 플래시오버 현상은 고층건물 화재시 흔히 나타나는 양상으로서 실내의 가연물이 연소에 의해서 온도를 높이고 동시에 다량의 가연성 가스를 수반하는 연기를 방출하며, 어느 시간에 그 실내의 온도상승에 의해서 일시에 연소하여 화재의 진행을 순간적으로 실내 전체에 확산시키는 현상이다.

플래시오버는 구획 내 전체가 불꽃에 휩싸이는 급격한 연소현상으로 커다란 온도상승이 관측된다. 구획 내의 열적 조건이 만족되었을 때 발생하며, 경우에 따라서는 개구부에서 화염이 분출한다. 따라서 개구부에서의 화염 분출현상만으로는 백드래프트와 플래시오버와의 차이가 명확하지 않으며 이 둘을 혼동하는 경우도 적지 않은 것으로 보인다.

이 연구를 통해 2.93m(W)×2.97m(D)×2.1m(H) 크기의 모형화재실에 가구와 전자제품

등 생활에서 흔히 사용하는 각종 가연물을 배치한 뒤 화재를 발생시켜 플래시오버의 발생 기구와 연소특성을 고찰하고 화재실의 가연물이나 환기조건, 구조 등에 따른 백드래프트 발생현상을 구현하고 연소특성을 살펴보기 위해 모형화재실에서 화재시험을 수행했다.

3. 실험

아래 그림 1은 플래시오버 실험을 위한 모형화재실과 각종 가연물들을 나타낸 것이다. 화재실 내에 가구와 전자제품 등을 배치하고, 소파에 점화용 휘발유를 묻혀 착화시킨 다음 시간에 따른 화재실 내 온도변화 특성을 살펴보았다.

화재실 내의 온도측정에는 피복형 K열전대(0.8φ)를 이용하였는데 열전대는 그림 2와 같이 앵글로 지지한 열전대 트리를 화재실의 중앙에 고정하여 바닥과, 화재실 중심, 천장 등에 설치했다. 열전대는 전면 개구부 상단과 측벽의 상단에도 2개 설치하여 합계 5개소에서 온도를 계측하였다. 열전대의 출력은 PC 레코더(R1M-GH2T-M2, 16채널)로 0.5초마다 1회씩 기록하였다.

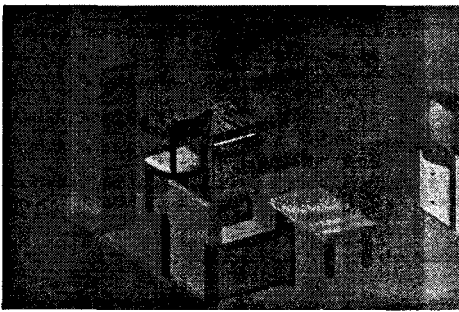


그림 1 화재실 및 가연물 배치도

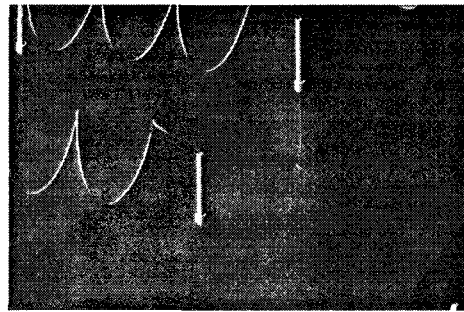


그림 2 열전대 설치 모습

아래 그림 3은 백드래프트실험에 이용한 모형화재실로서 전면 벽 중앙에 개구부(창)이 있고 좌측벽에 문이 달려있는 구조이다. 모형화재실 A의 내부치수는 2.93m(W)×2.97m(D)×2.1m(H)이고, 모형화재실 B의 내부크기는 6m(L)×3m(W)×2.3m(H)이다. 벽면은 두 가지 소재로 구성되어 있는데 안쪽부터 내화단열 보드($t=25\text{mm}$)와 합판($t=9\text{mm}$)을 겹친 것이다. 천장도 같은 방식으로 제작하였으며 각 보드 사이의 빈 간격은 기밀성을 유지하기 위해 내화 실리콘재와 고온용 알루미늄 테이프로 막았다.

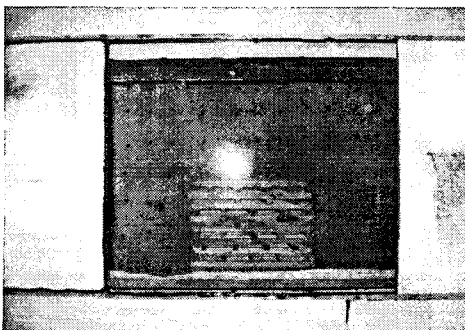


그림 3 모형화재실 A

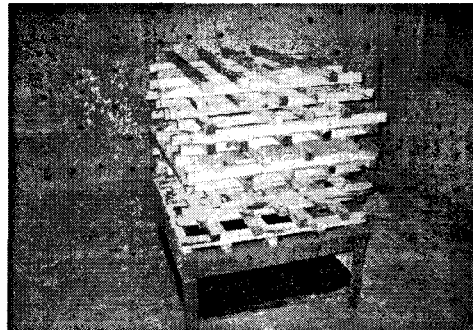


그림 4 연소재(목재 크립)

화재용 연소재는 그림 4와 같이 크기 30×35×730(mm)의 소나무 크립을 이용해 20단으로 쌓아 A급 화재모형을 적용하였으며 정면에서 볼 때 구획 내 중앙에 하나 또는 2개를 나란히 놓았다. 크립 점화용 연료는 휘발유를 사용하였다.

구획 내의 온도측정에는 피복형 K열전대(0.8φ)를 이용했다. 열전대의 위치는 화재실 A의 경우 바닥과, 천장면 2개소에 설치했다. 또한 화재실 B에서는 천장 부근 6개소에 설치하여 PC 레코더(R1M-GH2T-M2, 16채널)로 0.5초마다 1회씩 기록했다.

구획 내의 산소농도 측정은 전기화학식 확산형 가스 애널라이저(KM 900, Kane-May)를 이용하였는데 측정 위치는 바닥과 천장면 부근이다. 샘플링 루프는 외경 8mm, 내경 6mm의 동관으로 필터를 통해 공기 펌프로 구획 내 연소시 가스를 흡입했다. 측정 데이터는 PC레코더로 기록하였다.

4. 실험결과 및 토론

앞의 실험방법과 같이 모형화재실에서의 플래시오버 발생 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수가 있었다.

소파에서 착화한 화염은 점점 성장하여 벽으로 전이되고 책상을 착화시켜 화재를 확대시켰다. 천장과 화재실 중앙, 바닥의 온도가 일정하게 서서히 증가하기 시작하였으며 착화 후 약 100초가 지나면서 화재는 빠른 속도로 확대되었다. 천장부 가연성 가스의 농도가 높아지며 연소가 지속되던 화염은 착화 후 약 150초 시점에 화재실 전체를 감싸는 화염이 분출되며 바닥의 온도를 급상승 시켰다. 아래 그래프에서 보듯이 빨간 점선으로 그려진 바닥 중앙의 온도변화는 플래시오버 발생과 함께 급격히 증가하고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 그림 5와 같이 플래시오버 발생시 실내 최고온도는 1000℃에 육박하였으며, 창문이 깨지면서 신선한 공기가 유입되어 연소는 지속되었다.

한편 천장부의 온도분포를 비교해보면 천장 중심이 화재실 전면부나 측벽 상단 보다 100℃ 이상 높은 온도를 나타내었으며, 특히 플래시오버 발생시에는 천장부근 보다 화재실 중단과 바닥의 온도가 더 높게 나타나 화염이 실내 전체로 확대되는 플래시오버 발생 순간에는 바닥의 가연물이 일시에 연소하며 큰 열원이 형성되고 최고 온도지점이 일시적으로 아래쪽으로 옮겨가는 것을 발견할 수가 있다.

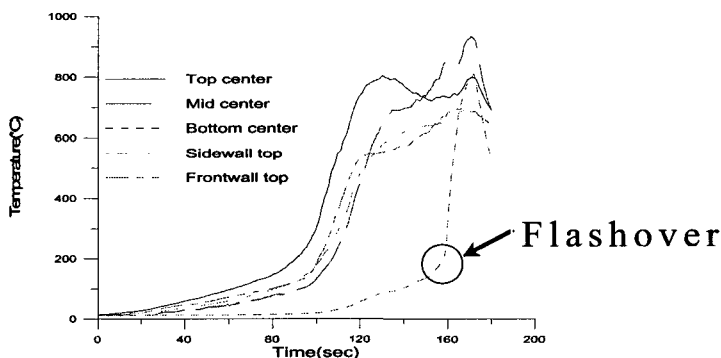


그림 5 플래시오버 발생시 온도 그래프

세 번의 플래시오버 화재실험 결과를 정리해보면 표 1과 같다. 화재실 A의 경우 가연물의 양의 부족과, 큰 개구부로 인해 산소공급이 원활하여 천장부에 가연 가스의 축적이

다소 부족하였던 것으로 추측된다. 화재성상은 플래시오버 없이 성장기를 거쳐 최성기에 달한 다음 점점 쇠퇴해갔다.

그러나 화재실 B의 경우는 점화 후 약 150초 경에 앞의 그림 5와 같이 플래시오버가 발생하였다. 급격한 화염확대와 함께 창 밖으로 화염이 분출되며 화재실 전체에 화염이 휩싸였다. 반면에 같은 화재실에서 개구부의 크기를 약간 줄인 C의 경우는 플래시오버가 발생하지 않았다. 개구율이 너무 낮아서 연소확대에 필요한 공기가 충분히 공급되지 못했던 것으로 판단된다.

이상에서 플래시오버의 발생은 화재실 내의 가연물의 양과 개구부의 크기에 따라 결정되는 것으로 사료된다.

표 1 플래시오버 실험 결과

분류	화재실 규모(m)	개구부 크기(cm)	개구율(%)	최대 열방출율(MW)	비 고
A	2×2×2	100×100	25	1.5~2	실패
B	2.9×2.9×2.1	145×65	15	2.5~3	FO 발생
C	2.9×2.9×2.1	95×65	10	2.5~3	실패

백드래프트는 점화 직후 각 측정점에서 온도가 상승하며 천장 부근에서의 O₂농도는 저하된다. 점화 후 30초 정도에 연기에 의해 차단되어 개구부에서 화염은 보이지 않게 되었다. 그러나 다시 연소재가 타는 것이 관찰되며 연기의 양이 서서히 증가하였다. 이후 연기의 양이 더 늘어나고 연기 색은 노랗게 되며 일시 휴식 현상이 발생하는데, 시간이 지남에 따라 연기의 색은 더 진해지고 갈색으로 변한 뒤 화염이 점차 소멸되었다. 이 때 좌측문을 개방하자 곧 화염과 연기를 분출하며 백드래프트 현상이 일어났다. 화염은 수 분간 계속 지속되었으며 이후 연기 색이 서서히 옅어지고, 백드래프트에 의한 화염의 크기는 점차 작아져 폭풍도 약해졌다.

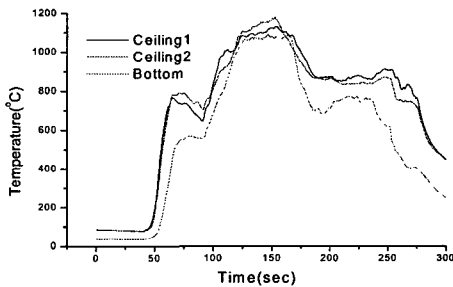


그림 6 화재실 A의 온도변화

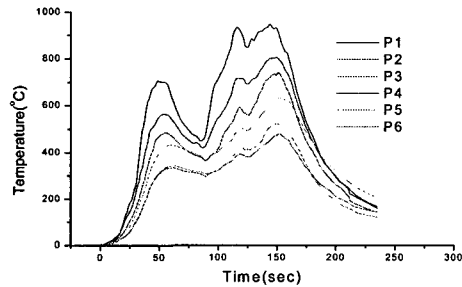


그림 7 화재실 B의 온도변화

화재실 내 온도변화는 그림 6, 7과 같다. 화재실 A의 실험에서 온도는 이미 천장 부근이 바닥에 비해 높았다. 점화 후 실내 온도는 상승하고 자기 소화가 일어난 후, 인위적으로 출입문을 개방시키자 잠시 후 화염이 되살아나 급격한 연소가 지속되었다. 산소농도는 천장부근이 바닥보다 낮고 그 변동도 컸다.

화재실 A의 경우 점화 후 약 30초 후에 최고온도가 되었으며 산소의 부족으로 다시 온도가 하강하였다. 화염이 소화되었음을 육안으로 확인한 후 좌측문을 서서히 개방하였고 잠시 후 폭연과 함께 실내의 온도는 상승하여 1100°C 이상에 도달하였다. 한편, 산소농도는 천장부근에서 연소재의 연소에 의해 14% 정도까지 급격히 저하하였다. 화

염의 소화와 함께 산소농도는 7% 정도까지 저하되고 거의 7% 상태를 유지했다.

화재실 B의 실험은 점화 후 약 50초 후에 최고온도에 도달하고 이후 온도감소와 산소농도의 급격한 변화가 반복 관찰되었다. 이것은 백드래프트 발생 전 그 전조현상에 의한 것이다. 실내 공기의 부족으로 소화가 된지 약 30초 후(점화 후 약 80초)에 문을 개방하였고, 약 5초 이후에 화염이 분출하며 온도는 급상승하기 시작하였고 1000℃ 까지 계속 증가하였다. 또한 산소농도는 약 1.5%에서 10%로 급격히 상승했다.

여기서 자기소화는 연소재에서 발생하는 열분해 가스(pyrolyzate)의 발생속도가 증가함에도 불구하고 개구부에서의 유입공기에 의한 산소공급량이 충분하지 않은 조건 하에서 발생할 수 있다. 즉, 구획 내의 천장부근은 구획 내의 연소 진행과 함께 연료과잉, 무산소 상태에 가까워져 자기소화 하는 것으로 보인다.

한편 백드래프트가 발생하고 급격히 연소한 후 산소농도가 떨어진 상태에서 신선한 공기가 재유입 될 수 있으며, 가연물의 미연소 증기가 남아있다면 제2의 백드래프트가 발생할 수도 있다. 즉 온도저하와 상승, 산소농도의 증가와 감소가 반복되어 수차례의 백드래프트가 일어날 수도 있다는 연구 결과도 있다.

이상에서 천장부근의 급격한 온도저하와 산소농도의 상승은 백드래프트 발생의 중요한 전조현상 중 하나라 할 수 있다.

백드래프트가 구획 내에서 발생하면, 처음에 개구부에서 한 덩이의 연기가 분출한다. 이어서 더 많은 연기가 분출되면서 작은 혀 모양의 화염이 성장한다. 이 화염에 의해 개구부 부근에 분출한 가연성 가스가 착화되어 럭비공 모양의 커다란 파이어볼이 형성된다. 이 파이어볼의 소멸 후에는 구획 내에서 분출하는 가연성 가스에 의한 연소가 계속되며, 구획 내의 가연성 가스와 산소가 반응해서 이 화염도 결국 소멸되어 간다. 이상의 관찰에서 개구부에서의 연기 분출은 구획 외부에 형성되는 파이어 볼의 전조현상을 알 수 있었는데, 빠른 경우는 연기 분출 후 1초 이내에 파이어 볼이 형성되기 때문에 각별한 주의가 필요하다.

5. 결론

이 연구에서 가연물의 종류와 형태에 따른 화염확산속도 측정, 공기의 유속과 풍향에 따른 화염확산속도의 변화 관찰, 플래시오버와 백드래프트 현상의 연구 등을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화염이 실내 전체로 확대되는 플래시오버의 발생 순간에는 바닥의 가연물이 일시에 연소하여 큰 열원이 형성되고, 최고온도지점이 일시적으로 화재실의 아래쪽으로 옮겨가게 된다.
2. 소멸 단계의 화재는 화재실 내의 천장 부근의 온도와 산소농도의 변화에 따라 백드래프트가 발생할 수 있으며, 특히 개구부 개방시 연기발생의 감지로 이의 발생을 예측할 수 있다. 따라서 안전한 소화활동을 위해 이러한 발생기구를 잘 이해할 필요가 있다.

참고문헌

1. "Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties", ASTM E 1321, in 1996 Annual Book of ASTM Standards, Sec. 4, Construction, (West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1996).

2. J. G. Quintiere, and M. Harkleroad, *New Concepts for Measuring Flame Spread Properties*, NBSIR 84-2943 (Gathisburg, MD: September 1980, National Bureau of Standards, November, 1984).
3. J. G. Quintiere, "A simulation model for Fire Growth on Materials Subject to a Room-Corner Test", *Fire Safety Journal* 20 (1993): 313-339.
4. P. H. Thomas, "Some Aspects of the Growth and Spread of Fire in the Open", *Forestry* 20, No. 2 (1967): 139-164.
5. P. H. Thomas, "Rates of Spread of Some Wind-driven Fires", *Forestry* 44, No. 2 (1971): 155-175.
6. Y. Nagano, "Fires" in *Comprehensive Study of the Great Hanshin Earthquake*, UNCRD Research Report Series No. 12 (Nagoya, Japan: United Nations Center for Regional Development, H. Kaji, Director, 1995), pp. 117.
7. K. Akita, "Some Problems of Flame Spread Along a Liquid Surface", *Fourteenth Symposium (International) on Combustion* (Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1973), pp. 1075-1084.
8. A. Tewarson, "Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires", Chapl 3-4 in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd. ed. edited by P. J. DiNenno (Quincy, MA. National Fire Protection Association, June 1995).
9. J. G. Quintiere, G. Haynes, and B. T. Rhodes, "Applications of a Model to Predict Flame Spread over Interior Finish Materials in a Compartment", *Journal of Fire Protection Engineering* 7, No. 1 (1995)L 1-14
10. R. C. Corlett, and T. M. Fu, "Some Recent Experiments with Pool Fires", *Pyrodynamics* 4 (1966): 253-269.
11. H. C. Kung, and P. Stravrianidis, "Buoyant Plumes of Large-Scale Pool Fires", in *Nineteenth Symposium (International) on Combustion* (Pittsburgh, PA: The Combustion Institute, 1982), pp. 905-912.
12. V. Babrauskas, "Buirning Rates", Chap. 3-1 in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 2nd. ed., edited by P. J. DiNenno (Quincy, MA: National Fire Protection Association, June 1995).
13. G. Quintiere, "Growth of Fire on Building Compartments", in *Fire Standards and Safety*, ASTM STP 614, edited by A. F. Robertson (West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, 1977), pp. 131-167
14. G. Heskestad, "Venting Practices", Sec. 6, Chap. 10 in *Fire Protection Handbook*, 17th ed., edited by A. E. Cote and J. L. Linville (Quincy, MA: National Fire Protection Association, 1991), pp. 6.105-6.106.
15. D. Gross, *Data Sources for Parameters Used in Predictive Modeling of Fire and Growth and Smoke Spread*, NBSIR 85-3223 (Gaithersburg, MD: National Bureau of Standards, September 1985).