

# 고층건물의 외부연기 거동에 미치는 발코니의 영향에 관한 실험적 연구

양승신 · 김성찬\* · 유홍선\*\* · 김정후\*\* · 이호열\*\* · 이승호\*\* · 허문수\*\*

중앙대학교 대학원 · \*중앙대학교 미래신기술연구소 · \*\*중앙대학교 기계공학부

## 1. 서론

현대 사회는 산업의 급속한 발전으로 인하여 인구가 대도시로 집중되었고 지난 10여 년간 도시의 인구는 2배 이상 증가하였다. 이러한 도시 집중화 현상으로 인하여 공간의 효율적인 활용이 요구되고 있으며 이에 따라 도시 내 건축물은 더욱 고층화되고 향후 수적인 증가가 지속될 전망이다.

매년 고층 건물에서 발생하는 화재 중 약 3/4 정도가 주거용 고층건물에서 발생하고 있으며 고층건물화재의 약 70%정도가 4층 이하의 저층부에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이중 약 60%가 대표적인 주거용 고층건물인 아파트에서 발생하였다. 이러한 아파트 주거공간은 거주자의 밀집도가 높고 각 층간 이동통로가 제한적일 뿐만 아니라 공간내부에 화재 발생 위험요소가 많기 때문에 화재 발생시 많은 재산 및 인명피해를 야기시킬수 있다.

대표적인 고층건물 화재 사례로는 미국 맨하탄 아파트 19층에서 전기난로로 화재가 발생하여 4명이 사망 하였고(1998), 국내에서 발생한 서울의 대연각호텔 화재(1972)와 뉴남산 관광호텔 화재(1974), 부산의 대아호텔 화재(1984)등 대형 화재가 발생 하였다<sup>1)</sup>. 특히 대연각 호텔 화재에서는 호텔 로비편의 커피숍에서 프로판 가스 누출로 인한 화재가 발생하여 163명이 사망하는 대형사고가 발생 하였다. 이처럼 고층건물 화재는 발생빈도에 비해 대형 참사를 초래하는 경우가 많기 때문에 적절한 화재감지 설비, 소화설비 및 피난 대책의 수립이 필수적이지만 국내에서는 인식의 부족으로 이에 대한 연구가 미흡한 상태이다. 뿐만 아니라 최근 국내의 경우 부족한 주거공간을 확대하고 방음 및 단열효과를 증대시키기 위하여 아파트의 발코니 공간을 외부와 분리하는 용도변경이 빈번히 이루어지고 있다. 그러나 이러한 용도변경에 따른 화재 시 연기 및 화염 거동에 대한 정량적인 검증이 이루어지지 않은 상태이며 아파트 공간의 화재 안전성 확보를 위하여 다양한 방식의 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

고층건물의 발코니 화재에 대한 대표적인 연구로 Suzuki 와 Sekizawa등<sup>2)</sup>은 발열량 크기를 변화시켜가며 축소 모형 실험을 실시하여 발코니 깊이의 증가에 따른 발코니 공간 내부의 온도분포를 측정하여 발코니 깊이에 따른 화재발생 상층부에서의 열적특성을 파악하였다. Mammoser와 Battaglia등<sup>3)</sup>은 화재 전용 해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 발코니의 깊이 및 형상 변화에 따른 화재 발생부와

상층부에서의 연기거동 및 온도분포를 비교 분석하였다. 그러나 아직도 발코니 공간의 기하학적 형태가 화재시 연기거동에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기에 부족한 실정이며 특히 건물의 외부를 통한 연기전파를 해석하는 경우는 아직 초기 연구 단계이다.

따라서 본 연구에서는 고층건물의 화재 전파특성을 해석하는 초기 단계로써 아파트 공간에서 화재 발생시 발코니의 폐쇄 유무에 따른 연기거동을 실험적인 접근을 통하여 파악하고자 한다. 특히 발코니 공간과 상층부의 온도분포는 모형실험을 통하여 측정되었으며 발코니 공간 내외부의 연기거동은 수소기포법을 이용하여 부력 유동을 가시화하였다. 이러한 축소 모형 실험을 통하여 건물 외부와 발코니에서의 열적특성 및 연기거동을 해석하여 고층 건물 화재 시 발코니 공간 유무에 따른 화재 거동 특성을 파악할 수 있다. 본 연구의 실험결과를 바탕으로 고층 건물의 방재 계획 수립과 방재 시스템의 설계 시 기초 자료로 활용 하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 모형 화재 실험

모형공간은 실물 대상 폭 6 m, 높이 9 m, 길이 9 m의 크기를 1/10로 축소하여 폭 0.6 m, 높이 0.9 m, 길이 0.9 m로 전체 3층 모형건물에 대하여 발코니 부분이 외기와 차단된 경우와 개방된 경우에 대하여 각각 화재 실험을 수행 하였다. Fig. 1은 발코니가 개방된 모형 화재 실험 대상공간의 주요 치수와 형상을 나타내고 있다. 화재실 상층부 발코니의 외벽으로부터 온도 변화를 측정하기 위하여 0.3 mm 두께의 T-type 열전대(구리-콘스탄탄, 측정범위 : -270~400℃)를 이용하였으며 열전대의 위치는 2층과 3층의 발코니 바닥에서 5 cm 간격으로 발코니 외기쪽과 안쪽을 나누어 설치하였다.

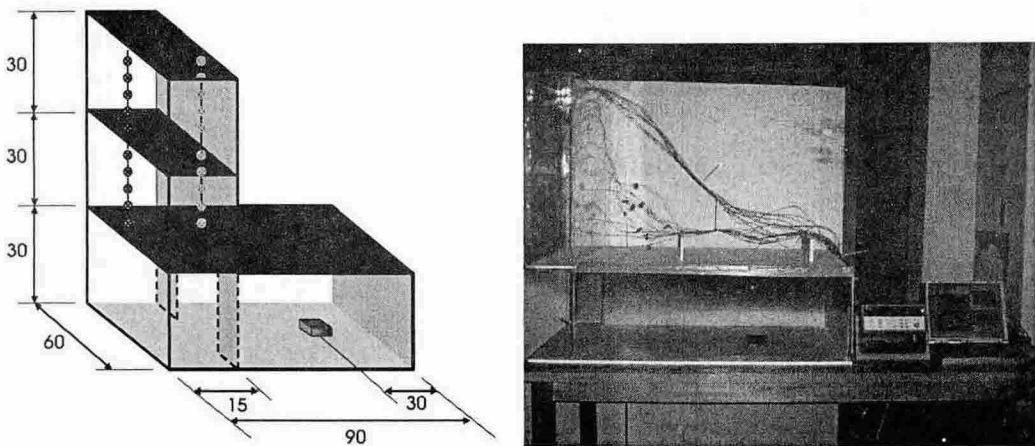


Fig. 1 Experimental setup of the tested balcony.

모형 화재 실험에서 적용된 화원은 각변의 길이가 6.5 cm 인 정사각형 풀을 이용하였으며 연료로는 n-Hexane을 사용하였다. 화원의 위치는 1층의 주거공간에서 화재가 발생한 것으로 가정하여 우측벽면에서 30 cm 떨어진 위치에 화원을 고정하였다. 모형 실험에 적용된 화원의 발열량은 다음식에 의해 계산되어진다[4].

$$Q_M = \eta \cdot m_f'' \cdot \Delta H_c \cdot A_f \quad (1)$$

여기서,  $Q_M$  은 축소실험의 발열량,  $\eta$  는 연소효율,  $m_f''$  는 연료의 증발량,  $\Delta H_c$  는 연소열 그리고  $A_f$ 는 화원의 면적을 나타낸다. 연료의 연소율은 보다 정확한 데이터를 얻기 위해 로드셀을 사용하여 발열량을 구하였다. 이때 증발된 연료가 모두 연소 되는 것은 아니기 때문에 연소 효율을 0.7로 고려하여 유효 발열량을 산정하였다.

모형실험의 결과를 실제크기의 화재에 상사시키기 위하여 본 연구에서는 Froude scaling을 적용하여 실제공간에서의 화재 발열량을 추측하였다. Froude scaling에서 화원의 발열량은 특성길이비의 5/2승에 비례하게 되며 다음과 같이 정리된다<sup>5)</sup>.

$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left( \frac{L_M}{L_F} \right)^{5/2} \quad (2)$$

여기서,  $Q_F$ 는 실제크기의 발열량,  $L_M$ 은 축소크기의 길이척도 그리고  $L_F$ 는 실제크기의 길이척도를 각각 나타낸다. Froude scaling에 의한 모형실험의 발열량과 실제 발열량을 비교한 값은 Table 1과 같다.

Table 1. Comparison of heat release rate between the model and real scale

Fire size [cm]	$Q_M$ [KW]	$Q_F$ [MW]
6.5	4.76	1.5

## 2.2 수소기포법 (Hydrogen bubble technique)

화재발생부에서 생성된 연기 거동과 건물외부에서의 연기거동을 보다 명확하게 가시화하기 위하여 수소기포를 이용하여 화재거동을 모사한후 부력유동을 가시화 하였다. 외부수조의 크기는 길이 90 cm, 폭 40 cm, 높이 50 cm 이며 축소모형은 실물 공간의 1/20 크기인 길이 45 cm, 폭 30 cm, 높이 45cm로 제작하였다. 수소기포를 발생시키기 위하여 양극에는 탄소봉을 이용하였으며 음극에는 구리선을 이용하였다. 수조내 수소기포의 발생을 원활히 하기 위하여 1.8% 염화나트륨(NaCl)을 첨가한 소금물을 이용하였다. Fig. 2는 수소기포법<sup>6,7)</sup>에 의한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

수소기포의 부력유동을 가시화 하기 위하여 광원으로는 200 mmW의 Ar-Ion Laser를 이용하였으며 Laser sheet에 의해 가시부를 형성하였다<sup>8)</sup>. 발생한 수소기포는 디지털 캠코더를 이용하여 수소기포의 부력유동을 실시간으로 기록하였다.

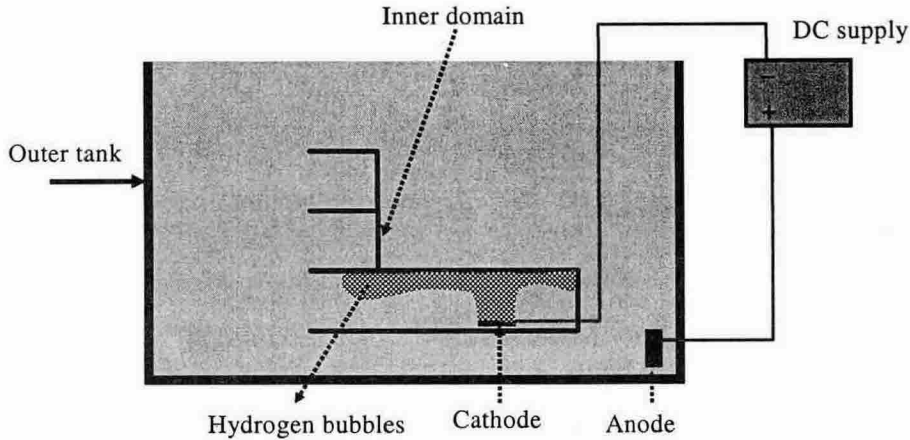


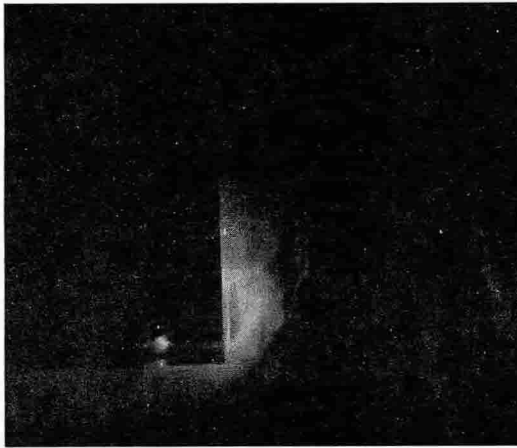
Fig. 2 Schematic view of the hydrogen bubble experiments.

### 3. 실험 결과 및 고찰

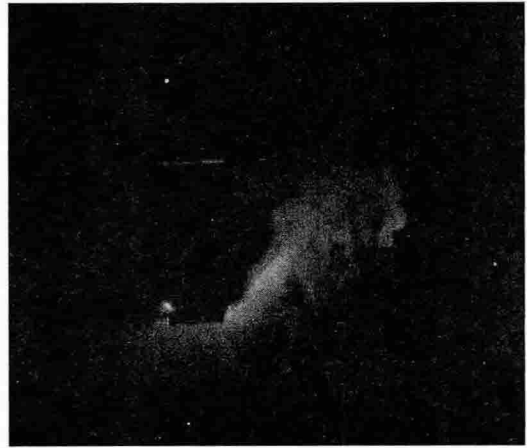
건물내에서 화재가 발생하면 부력에 의해 고온의 연기가 수직으로 상승하여 천정에 도달후 천정을 따라 수평방향으로 출입문이나 발코니 방향으로 전파된다. 이후 발코니 방향으로 전파된 천정제트는 건물 외벽을 따라서 상층부로 급격히 상승하게 되고, 이러한 건물 외부를 통한 연층의 상승은 상층부로의 연기 전파를 일으킬 수 있는 원인이 된다. Fig. 3은 수소기포법에 의해 모사된 연층의 형태를 가시화하여 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 화재부에서 발생한 천정제트가 외부로 방출됨에 따라 건물외부에서는 상승 유동을 형성하게 되고 이러한 상승유동에 의해 주위 공기의 유입이 이루어 진다. Fig. 3 (a)는 폐쇄된 발코니에서 연층의 상승을 보여주고 있으며 유입이 건물 외부방향에서 폐쇄된 벽쪽으로 이루어지기 때문에 벽면을 따라 연층이 상승하게 됨을 알 수 있다. Fig. 3 (b)는 개방된 발코니에서의 유동형태를 보여주고 있으며 유입이 건물외부 뿐만 아니라 발코니 공간에서 상승 유동으로 유입이 이루어 지기 때문에 건물의 외벽에서 상승 연층은 떨어지게 된다. 따라서 발코니가 폐쇄된 경우 건물외벽을 따라 유동이 형성되기 때문에 실제화재에서 건물외부와 발코니 공간을 차단하는 유리창이 열에 의해 파손될 경우 화재는 급격히 상층부의 주거공간으로 전파될 것으로 생각 된다. 그러나 개방된 발코니의 경우 발코니 공간에서 상승유동쪽으로의 지속적인 유입 유동이 형성되기 때문에 폐쇄된 발코니 보다 연층이 주거공간으로 유입되기가 상대적으로 어렵게 되며 화재의 확산을 지연 시키는 효과를 가져 올 수 있다. 또한 실제화재

의 경우 뜨거운 연층이 발코니 공간의 유입유동과 혼합되어 발코니 공간으로 유입되는 연층의 온도는 상대적으로 낮게 될것으로 생각된다.

Fig. 4는 모형화재 실험에 의해 가시화된 연기거동을 보여주고 있다. Fig. 3의 수소 기포법에 의해 가시화된 부력유동과 마찬가지로 폐쇄된 발코니에서의 연기거동은 건물의 벽을 따라 상승하고 있으며 개방된 경우의 발코니에서는 연층이 건물의 발코니에서 분리되어 상승하고 있다. 또한 개방된 발코니에서 상층부로 전파되는 과정에서 주위공기의 유입 및 발코니에서의 공기유입으로 인하여 연기농도가 폐쇄된 발코니에 비해 상대적으로 낮게 보여지고 있다.

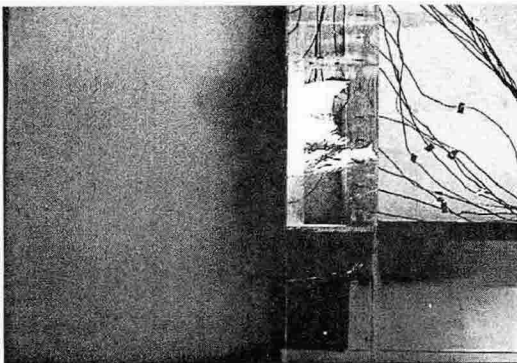


(a) Closed balcony

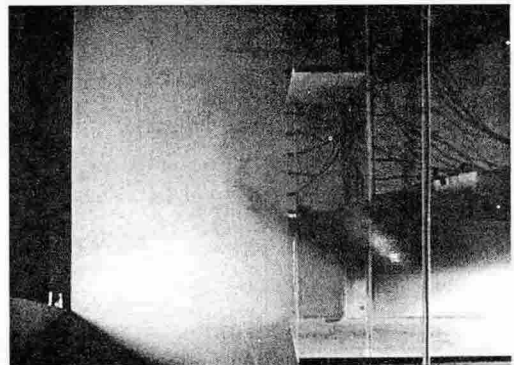


(b) Open balcony

Fig. 3 Flow visualization of hydrogen bubble cloud.



(a) Closed balcony



(b) Open balcony

Fig. 4 Photographs of smoke movement for the closed and open balcony.

Fig. 5는 폐쇄된 발코니의 화재실 상층부(2층과 3층)에서의 시간에 따른 수직방향의

온도분포 변화를 나타내고 있다. 그림과 같이 발코니의 하층부의 아래쪽의 온도가 가장 높고 상층부로 갈수록 온도는 감소함을 보이고 있다. Fig. 3 (a)에서 나타난바와 같이 연층의 전파가 건물의 외벽을 따라 상승하기 때문에 상승이 시작되는 하부에서 온도가 가장 높고 상층부로 상승함에 따라 건물외부에서 주위공기의 유입으로 인하여 상승연층의 온도는 하강하게 된다. 2층부와 3층부의 온도 차이는 시간이 지남에 따라 증가하였으며 실험시작후 약 80초 이후 2층부와 3층부의 온도차이는 거의 일정하게 유지되었다. 또한 2층부와 3층부의 최고온도 차이는 약 2배정도로 나타났으며 특히 2층부 하단에서의 온도는 약 150℃정도까지 상승하였다. 한편 개방된 발코니의 경우 화재발생후 80초까지는 시간에 따른 온도변화가 거의 일정하게 나타났다. 그러나 화재발생후 약 100초가 경과하면 2층부의 온도가 약 60℃정도로 상승하게 된다. 또한 2층부와 3층부의 온도차이가 발코니가 폐쇄된 경우에 비해 상대적으로 낮게 나타남을 알수 있고 이는 발코니 공간에서 상승 연층으로의 지속적인 유입이 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 한편 발코니가 폐쇄된 경우의 상층부 최고 온도는 발코니가 개방된 경우에 비해 약 2.5 배정도 높게 나타났으며 이는 앞에서 언급한 바와 같이 발코니 공간과 건물의 외부를 차단하고 있는 유리벽이 높은 온도에 의해 파손될 확률이 높다고 할수 있으며 Fig. 3의 유동 가시화 결과와 비교하여 볼 때 발코니 공간의 폐쇄는 건물 최외각부의 온도를 상승시킬 뿐만 아니라 하층부에서 발생한 연기가 파손된 유리벽을 통해 상층부로 직접 전파될수 있음을 보여주고 있다. 따라서 발코니 공간의 개방은 건물 외부를 통하여 상층부로 화재 확산을 차단하는 역할 뿐만 아니라 상승유동과 주위공기의 혼합을 촉진하여 상승연층의 온도를 하강시킴으로써 고층건물의 화재 안전을 확보하는데 있어 매우 중요한 설계변수로 간주되어야 한다.

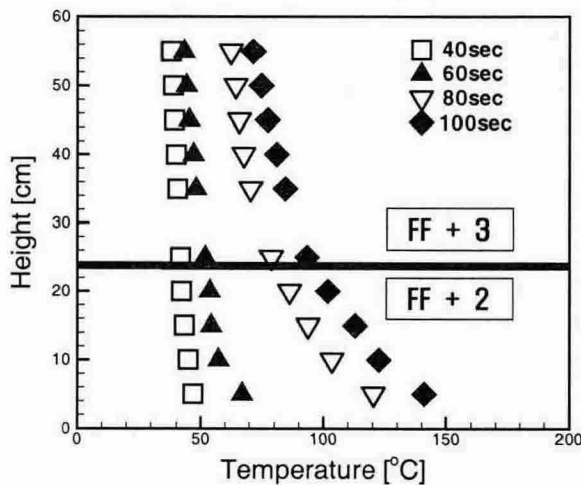


Fig. 5 Vertical temperature distribution for the closed balcony.

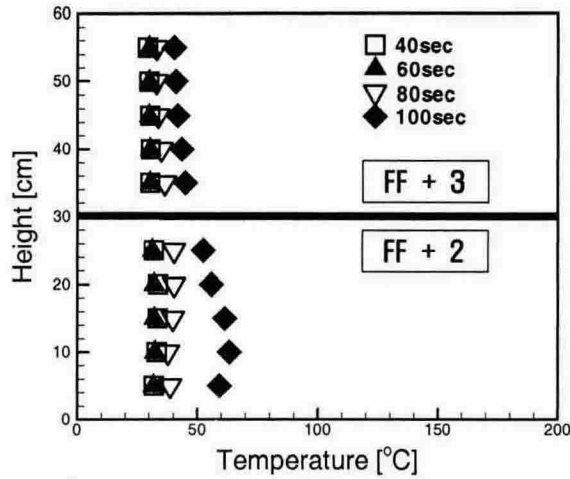


Fig. 6 Vertical temperature distribution for the open balcony.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고층 건물에서의 화재 발생시 발코니의 개방 혹은 폐쇄 상태에 따른 연기거동을 파악하기 위하여 축소 실험과 수소기포실험을 수행하였으며 연기 거동의 가시화와 온도 분포를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 발코니가 폐쇄된 경우 상승 연층은 건물 외부에서의 유입이 지배적이기 때문에 연층이 건물의 유리벽을 따라 전파되게 되고 발코니가 개방된 경우 건물 외부에서의 유입 뿐 만 아니라 발코니 공간에서의 유입이 이루어지기 때문에 상승 연층이 건물의 벽면에서 분리되어 상승하게 된다.
2. 발코니가 폐쇄된 경우 하층부의 최대 온도는 발코니가 개방된 경우에 비해 약 2.5배 이상 높게 나타났으며 2층과 3층에서의 온도차 또한 매우 크게 나타났다. 따라서 폐쇄된 발코니 공간의 경우 유입이 건물외부에서만 이루어지기 때문에 상승연층의 온도가 높고 고온의 연층에 의해 유리벽이 파손될 경우 연층이 주거 공간 내부로 확산될 우려가 있다.

본 연구에서 발코니 공간은 건물 외부를 통하여 상층부로의 연기 확산을 차단하는 역할 뿐 만 아니라 상승유동과 주위공기의 혼합을 촉진하여 상승연층의 온도를 하강시킴으로써 고층건물의 화재 안전도 확보하는데 매우 중요한 역할을 하고 있으며 고층 건물의 설계 시 화재 안전도 확보를 위하여 형상 및 구조에 대한 체계적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 한국화재보험협회, 고층건물 화재예방 대책, 위험물관리정보, 제 122호, 2002.
- [2] Suzuki, T., Sekizawa, A., Yamada, T., Yanai, E., Satoh, H. and Kurioka, Y., "An Experimental study of ejected flames of a high-rise buildings," Technical report, National Research Institute of Fire and Disaster, Japan, pp. 363-373, 2001.
- [3] Mammoser III, J. H. and Battaglia, F., "A computational study on the use of balconies to reduce flame spread in high-rise apartment fires," *Fire Safety Journal*, Vol. 39, No. 4, pp.277-296, 2004.
- [4] Quintiere J. G., "Principles of fire behavior," New york, Delmar Publishers, 1998.
- [5] Quintiere J. G., "Scaling Application in Fire Research," *Proceeding of the International Symposium on Scaling Modeling*.
- [6] Li, Y., V. C. W. Shing and Chen, Z. D., "Fine Bullble modelling of Smoke Flows," *Fire Safety Journal*, Vol. 38. No. 3, pp. 285-298, 2003.
- [7] Z. D. Chen, Y. Li and J. Mahoney, "Experimental modelling of buoyancy-driven flows in buildings using a fine-bubble technique," *Building and Environment*, Vol. 36, No. 4, pp. 447-455, 2000.
- [8] M. B. Kim, Y. S. Han and M. O. Yoon, "Laser-assisted visualization and measurement of corridor smoke spread," *Fire Safety Journal*, Vol. 31. No. 3, pp. 239-251, 1998.