

고층건물의 수직방향 연기거동에 미치는 발코니의 영향에 관한 실험적 연구

양승신 · 김성찬* · 유홍선^{†**} · 심상훈^{**}

중앙대학교 대학원 · *중앙대학교 미래신기술연구소 · **중앙대학교 기계공학부
(2004. 11. 1. 접수 / 2005. 2. 14. 채택)

An Experimental Study on the Effect of the Balcony on the Vertical Smoke Movement of the High Rise Building

Seung-Shin Yang · Sung-Chan Kim* · Hong-Sun Ryou^{†**} · Sang-Hoon Shim^{**}

Graduate School of ChungAng University

*Frontier Technology Innovation Centre, ChungAng University

**Mechanical of Engineering, ChungAng University

(Received November 1, 2004 / Accepted February 14, 2005)

Abstract : The present study investigates the effect of balcony on external smoke movement of high rise building through the fire tests of the 1/10 reduced model scale using Froude scaling. A hexane pool fire is used to examine the smoke movement for various opening sizes of balcony and temperature distributions are measured by T-type thermocouples. Also, hydrogen bubble technique is applied to visualize the smoke movement near the balcony. Measured temperatures of the closed balcony is 2.5 times higher than those of the open balcony because the external smoke in case of the closed balcony rise along the vertical wall. The maximum vertical temperature of partially closed balcony is similar with fully closed balcony and mean temperature inside of balcony increases as opening size of balcony decreases. The experimental results show that the balcony space plays an important roles in preventing fire propagation and cooling of smoke layer. In order to ensure the fire safety in high rise building design, a series of systematic researches are required to examine the various type of balconies.

Key Words : balcony, smoke movement, froude scaling, hydrogen bubble, pool fire

기호설명

- Q : Heat release rate [kW]
- η : Combustion efficiency
- m_f^* : Mass burning rate [kg/m^2s]
- ΔH_C : Heat of combustion [kJ/kg]
- A_f : Surface area of fuel [m^2]
- V : Velocity [m/s]
- t : Time [s]

1. 서론

현대 사회는 산업의 급속한 발전으로 인하여 인구가 대도시로 집중되었고 지난 10여년간 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 화재중 약 3/4 정도가 주거용 고층건물에서 발생하고 있으며 고층건물 화재의 약 70%정도가 4층이하의 저층부에서 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이중 약 60%가 대표적인 주거용 고층건물인 아파트에서 발생하였다. 이러한 아파트 주거공간은 거주자의 밀집도가 높고 각

[†]To whom correspondence should be addressed.
cfdmcc@cau.ac.kr

층간 이동통로가 제한적일 뿐만 아니라 공간내부에 화재 발생 위험요소가 많기 때문에 화재 발생시 많은 재산 및 인명피해를 야기시킬 수 있다.

대표적인 고층건물 화재 사례로는 미국 맨하탄 아파트 19층에서 전기난로로 화재가 발생하여 4명이 사망하였고(1998), 국내에서 발생한 서울의 대연각호텔 화재(1972)와 뉴남산 관광호텔 화재(1974), 부산의 대아호텔 화재(1984) 등 대형 화재가 발생하였다¹⁾. 특히 대연각 호텔 화재에서는 호텔 로비편의 커피숍에서 프로판 가스 누출로 인한 화재가 발생하여 163명이 사망하는 대형사고가 발생하였다. 한편 최근에는 청주 보성 트윈힐 아파트에서 방화로 인하여 1명이 사망하고 10여명이 부상당하는 사고가 발생하였다. 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 화재시 연기 및 화염거동에 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 등은²⁾ 발열량 크기를 변화시키며 축소 모형 실험을 실시하여 발코니 깊이의 증가에 따른 발코니 공간 내부의 온도분포를 측정하여 발코니 깊이 따른 화재발생 상층부에서의 열적특성을 파악하였다. Mammoser 등은³⁾ 화재 전용 수치해석 프로그램인 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 이용하여 발코니의 깊이 및 형상 변화에 따른 화재 발생부와 상층부에서의 연기거동 및 온도분포를 비교 분석하였다. 하지만 아직도 발코니 공간의 기하학적 형태가 화재시 연기거동에 미치는 영향을 정량적으로 파악하기에 부족한 실정이며 특히 건물의 외부를 통한 연기전파를 해석하는 경우는 아직 초기 연구 단계이다.

본 연구에서는 고층건물의 화재 전파특성을 해석하는 초기 단계로써 아파트 공간에서 화재 발생시 발코니의 개방정도 (완전폐쇄, 완전개방, 1/2, 1/3 부분 폐쇄)에 따른 연기거동 및 온도분포를 실험적인

접근을 통하여 파악하고자 한다. 특히 발코니 공간과 상층부의 온도분포는 모형실험을 통하여 측정되었으며 발코니 공간 내·외부의 연기거동은 축소기포법을 이용하여 연기 유동을 가시화하였다. 이러한 축소 모형 실험을 통하여 건물 외부와 발코니에서의 열적특성 및 연기 거동을 해석하여 고층 건물 화재시 발코니 공간 유무에 따른 화재 거동 특성을 파악하고자 한다. 따라서 본 연구의 실험결과를 바탕으로 고층 건물의 방재 계획 수립과 방재 시스템의 설계시 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험

2.1. 모형화재 실험

모형공간은 실물 대상 폭 6m, 높이 9m, 길이 9m의 크기를 1/10로 축소하여 폭 0.6m, 높이 0.9m, 길이 0.9m로 전체 3층 모형 건물에 대하여 발코니 부분이 개방 정도에 따라 (완전폐쇄, 1/3, 1/2 부분 폐쇄, 완전개방) 화재 실험을 각각 수행하였다. Fig. 1은 발코니가 개방된 모형 화재 실험 대상공간의 주요 치수와 형상을 나타내고 있다. 화재실 상층부 발코니의 외벽으로부터 온도 변화를 측정하기 위하여 0.3mm 두께의 T-type 열전대(구리-콘스탄탄, 측정범위 : -270~400℃)를 이용하였으며 열전대의 위치는 2층과 3층의 발코니 바닥에서 5cm 간격으로 발코니 외기쪽과 안쪽을 나누어 각각 10개씩 설치하였다. 모형 화재 실험에서 적용된 화원은 각변의 길이가 6.5cm인 정사각형 풀을 이용하였으며 연료로는 n-Hexane을 사용하였다. 화원의 위치는 1층의 주거공간에서 화재가 발생한 것으로 가정하여 우측벽면에서 30cm 떨어진 위치에 화원을 고정하였다. 모형실험에 적용된 화원의 발열량은 다음식에 의해 계산되어진다⁴⁾.

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

여기서, Q_M 은 축소실험의 발열량, η 는 연소효율, m_f'' 은 연료의 증발율, ΔH_c 는 연소열 그리고 A_f 는 화원의 면적을 나타낸다. 연료의 연소율은 로드셀을 이용하여 시간에 따른 질량 변화를 측정한 후 정상상태에서의 시간 변화에 따른 질량 변화를 파악하여 연소율을 산정 하였다. 이때 증발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 연소 효율을 0.7로 고려하여 유효 발열량을 산정하였다.

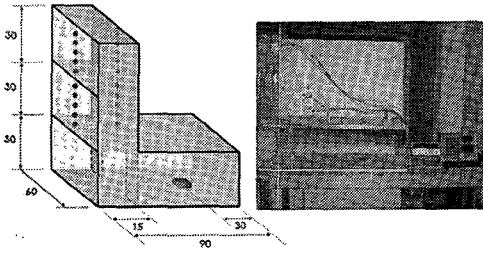


Fig. 1. Experimental setup of the tested balcony.

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

모형실험의 결과를 실제크기의 화재에 상사시키기 위하여 본 연구에서는 Froude scaling을 적용하여 실제공간에서의 화재 발열량, 연기전파 속도, 연기선단 도달시간을 추측하였다. 축소모형과 실물 대상의 발열량 Q_M 과 Q_F , 속도 V_M 과 V_F , 시간 t_M 과 t_F 사이의 관계는 다음과 같다⁵⁾.

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

$$\frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\frac{t_M}{t_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2} \quad (4)$$

Froude scaling에 의한 축소 모형실험의 발열량과 실제 발열량을 비교한 값은 Table 1과 같다.

2.2. 수소기포법 (Hydrogen bubble technique)

모형화재 실험에서 발생된 실제 연기거동은 화면에서 발생된 빛과 주위 조건으로 인하여 가시화해

어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 화재 발생부에서 생성된 연기거동과 건물 외부에서의 연기거동을 보다 명확하게 가시화하기 위해 수소기포법^{6,7)}을 이용하여 화재거동을 모사한 후 부력유동을 가시화하였다. 외부수조의 크기는 길이 90cm, 폭 40cm, 높이 50cm이며 축소모형은 실물 공간의 1/20 크기인 길이 45cm, 폭 30cm, 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^{6,7)}에 의한 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 수소기포의 부력유동을 가시화 하기 위하여 광원으로는 200mW의 Ar-Ion Laser를 이용하였으며 Laser sheet에 의해 가시부를 형성하였다⁸⁾. 발생된 수소기포는 디지털 캠코더를 이용하여 수소기포의 부력유동을 실시간으로 기록하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

건물 내에서 화재가 발생하면 부력에 의해 고온의 연기가 수직으로 상승하여 천정에 도달 후 천정을 따라 수평 방향으로 출입문이나 발코니 방향으로 전파된다. 이후 발코니 방향으로 전파된 천정제트는 건물 외벽을 따라서 상층부로 급격히 상승하게 되고, 이러한 건물 외부부를 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 발생된 천정 제트가 외부로 방출됨에 따라 건물외부에서는 상승 유동을 형성하게 되고 이러한 상승유동에 의해 주위 공기의 유입이 이루어진다. Fig. 3(a)는 폐쇄된 발코니에서 연층의 상승을 보여주고 있으며 유입이 건물 외부방향에서 폐쇄된 벽 쪽으로 이루어지기 때문에 벽면을 따라

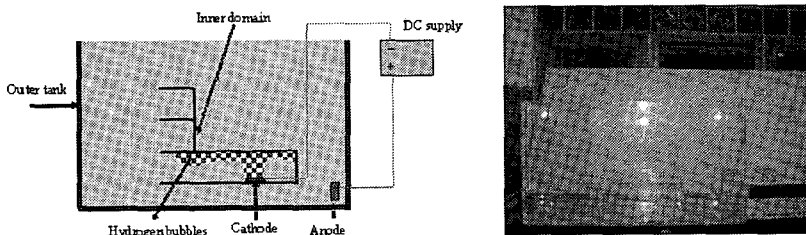


Fig. 2. Schematic view of the hydrogen bubble experiments

연층이 상승하게 됨을 알 수 있다. 따라서 발코니가 폐쇄된 경우 건물의 외벽을 따라 유동이 형성되기 때문에 실제 화재에서 건물 외부와 발코니 공간을 차단하는 유리창이 열에 의해 파손될 경우 화재는 급격히 상층부의 주거공간으로 전파될 것으로 생각된다. Fig. 3(b)는 1/2 부분 폐쇄된 발코니에서 유동 형태를 보여주고 있으며 일부 개방된 발코니 공간으로 공기 유입이 이루어지고 있지만 대체적으로 건물 외부에서 공기 유입이 지배적이기 때문에 연층이 건물 외벽을 따라 상승하게 됨을 알 수 있다. Fig. 3(c)는 1/3 부분 폐쇄된 발코니에서 연층의 상승을 보여주고 있다. 1/3 폐쇄된 발코니는 1/2 폐쇄된 발코니보다 상대적으로 발코니 내부 공간으로 공기유입이 많이 이루어지지만 1/2 폐쇄된 발코니와 마찬가지로 발코니 공간에서 유입되는 공기보다 건물 외벽으로부터 공기 유입이 지배적이기 때문에 발코니 외벽을 따라 연층이 상승하는 것을 볼 수 있다. 또한 1/2 폐쇄된 발코니에서는 1/3 폐쇄된 발코니에 비하여 발코니 공간에서의 공기 유입이 상대적으로 적기 때문에 주거 공간으로 연기의 전파가 빨리 이루어 질 것으로 생각된다. Fig. 3(d)는 개방된 발코니에서의 유동형태를 보여주고 있으며 유입이 건물외부 뿐만 아니라 발코니 공간에서 상승 유동으로 유입이 이루어지기 때문에 건물의 외벽에

서 상승 연층은 떨어지게 된다. 따라서 개방된 발코니의 경우 발코니 공간에서 상승 유동 쪽으로의 지속적인 유입유동이 형성되기 때문에 폐쇄된 발코니 보다 연층이 주거공간으로 유입되기가 상대적으로 어렵게 되며 화재의 확산을 지연시키는 효과를 가져 올 수 있다. 또한 실제 화재의 경우 뜨거운 연층이 발코니 공간으로 유입 유동과 혼합되어 발코니 공간으로 유입되는 연층의 온도는 상대적으로 낮게 된다.

Fig. 4는 개방된 발코니와 1/2, 1/3 부분 폐쇄된 발코니의 화재실 상층부(2층과 3층)의 발코니 내부 안쪽 벽에서의 시간에 따른 수직방향의 온도분포 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 발코니의 폐쇄부분이 증가할수록 발코니 내부의 온도는 증가함을 볼 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 3의 유동가시화에서 보는 것과 같이 완전 개방된 발코니의 경우 1/2, 1/3 부분 폐쇄된 발코니보다 건물외부와 발코니 내부에서의 공기 유입이 상대적으로 크게 일어나고 이로 인해 연층의 냉각이 상대적으로 증가하여 수직방향의 온도분포가 낮게 나타나는 것으로 생각된다. 한편 개방된 발코니에서는 화재 발생 후 80초까지는 시간에 따른 온도 변화가 거의 일정하게 나타났고, 약 100초 경과시 2층부의 최고온도는 약 60℃ 정도로 상승했다. 한편 2층부와 3층부의

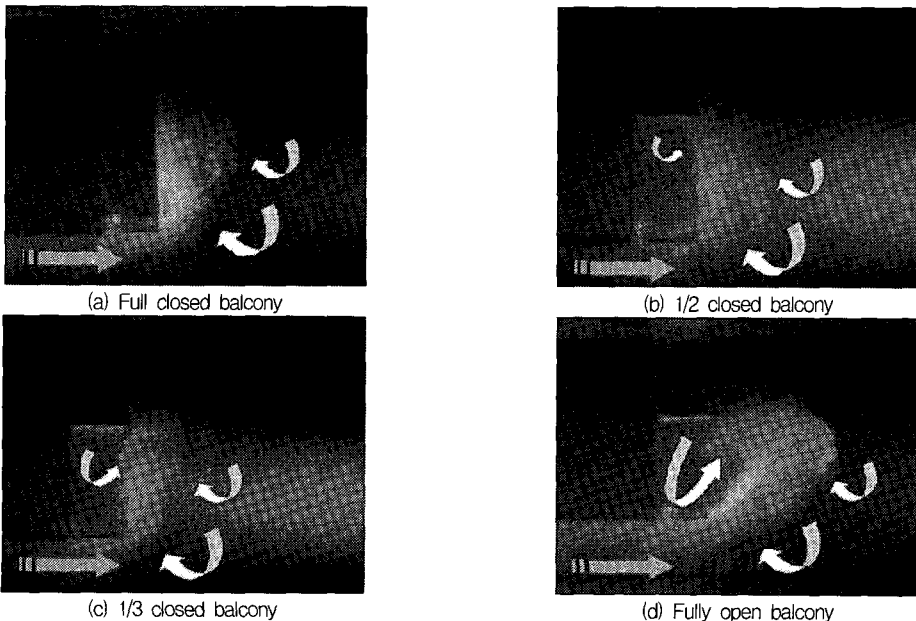


Fig. 3. Flow visualization of hydrogen bubble cloud

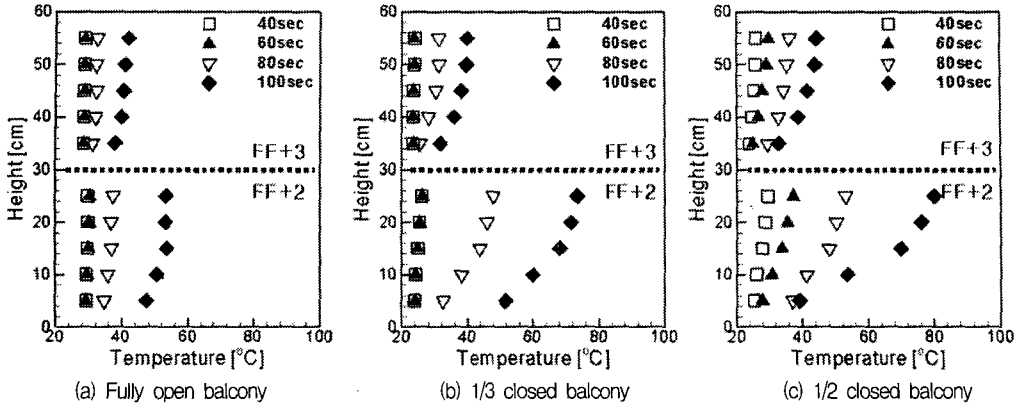


Fig. 4. Vertical temperature distributions for the balconies

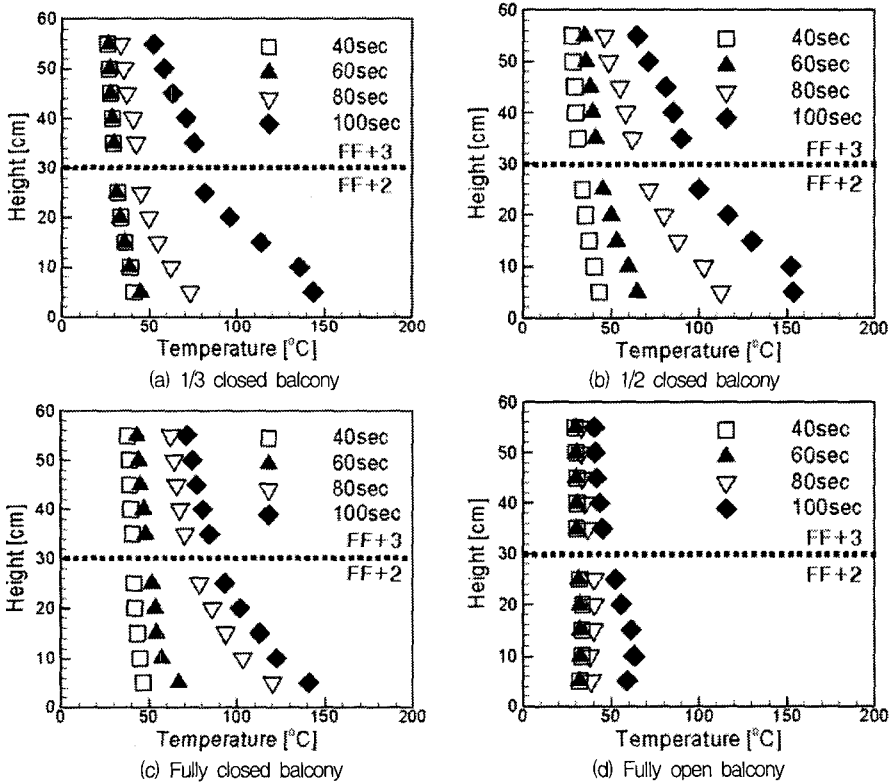


Fig. 5. Vertical temperature distributions for the balconies

온도차이는 완전 개방된 발코니의 경우가 1/2, 1/3 부분 폐쇄된 발코니에 비해 상대적으로 적게 나타남을 알 수 있고 이는 연층의 주유동방향이 발코니에서 분리되어 상승함에 따라 연층이 직접적으로 전파되지 못할 뿐만 아니라 발코니 공간에서 상승연층으로의 지속적인 유입이 발생하기 때문인 것으

로 생각된다. 한편 개방된 발코니와 1/2, 1/3 폐쇄된 발코니의 온도차는 1.5배 정도 차이를 보이고 있다.

Fig. 5는 발코니 외벽에서의 화재실 상층부 2층과 3층에서의 시간에 따른 수직방향의 온도분포변화를 나타내고 있다. Fig. 5(a),(b),(c)는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 연층의 전파가 건물의 외벽을 따

라 상승하기 때문에 상승이 시작되는 하부에서 온도가 가장 높고 연층이 상승함에 따라 건물외부에서 주위공기의 유입으로 인하여 상승연층의 온도는 하강하게 된다. 2층부와 3층부의 온도 차이는 시간이 지남에 따라 증가하였으며 2층부와 3층부의 최고온도 차이는 약 2배정도로 나타났으며 특히 2층부 하단에서의 온도는 약 150°C정도까지 상승하였다. Fig. 5 (d)의 개방된 발코니의 경우 화재 발생 후 80초까지는 시간에 따른 온도변화가 거의 일정하게 나타났다. 그러나 화재 발생 후 약 100초가 경과하면서 2층부의 온도가 약 60°C정도로 상승하게 된다. 또한 2층부와 3층부의 온도차이가 발코니가 완전개방이나 1/2, 1/3 부분 폐쇄된 경우에 비해 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있고 이는 발코니 공간에서 상승 연층으로의 지속적인 유입에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 발코니 내부 벽과 외부 벽면 근처에서의 최고온도 분포를 나타내고 있다. 발코니가 1/2, 1/3 폐쇄되거나 완전히 폐쇄된 경우 상층부 최고 온도는 발코니가 개방된 경우에 비해 약 2.5배정도 높게 나타났으며 이는 앞에서 언급한 바와 같이 발코니

공간과 건물의 외부를 차단하고 있는 유리벽이 높은 온도에 의해 파손될 확률이 높다고 할 수 있으며 Fig. 3의 유동 가시화 결과와 비교하여 볼 때 발코니 공간의 폐쇄는 건물 최외각부의 온도를 상승시킬 뿐만 아니라 하층부에서 발생된 연기가 파손된 유리벽을 통해 상층부로 직접 전파될 수 있음을 보여 주고 있다. 따라서 발코니 공간의 개방은 건물 외부를 통하여 상층부로의 화재 확산을 차단하는 역할 뿐만 아니라 상승유동과 주위공기의 혼합을 촉진하여 상승연층의 온도를 하강시킴으로써 고층건물의 화재 안전을 확보하는데 있어 매우 중요한 설계변수로 고려되어져야 한다.

고층 건물내 화재가 발생시 높은 온도로 인한 주위의 공기와 밀도차에 의한 부력으로 인해 주위 공기의 유입이 이루어져 연기가 상승해 천장에 도달 후 천정을 따라 천정 제트를 형성하며 수평 방향으로 이동한뒤 발코니 부근에서 천정제트는 다시 수직 방향으로 상승한다. 연층 선단의 수직방향 전파속도를 파악하기 위하여 발코니 외벽에 수직방향으로 설치된 열전대의 온도 반응시간을 연기 선단의 위치로 간주하고 모형 실험에서 측정된 연기 선단의 도착시간과 수직전파 속도를 계산하여 Froude scaling에 의해 실제 화재에서의 연기선단의 도착시간 및 수직 전파속도를 산정하여 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다. 실제 연기선단의 도착시간은 개방된 발코니보다 1/3 폐쇄된 발코니는 1.71초, 1/2 폐쇄된 발코니는 17.12초, 완전히 폐쇄된 발코니는 21.36초로 2층부에서 3층부로 연기 도달시간이 빨랐다. 연기선단의 도착시간을 기초로 계산된 수직전파속도는 완전히 폐쇄된 발코니가 가장 빨랐으며 개방된 발코니에서 수직전파 속도가 가장 느리게 나타났다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 폐쇄된 발코니는 건물 수직방향으로의 전파속도 성분이 크기 때문에 화재 발생시 상층부로 연기 확산이 개방된 발코니에 비해 상대적으로 빠르게 이루어져 연기전파로 인한 피해를 증가시킬 우려가 있으며 빠른 시간 내에 주거자의 대피를 요구하게 된다.

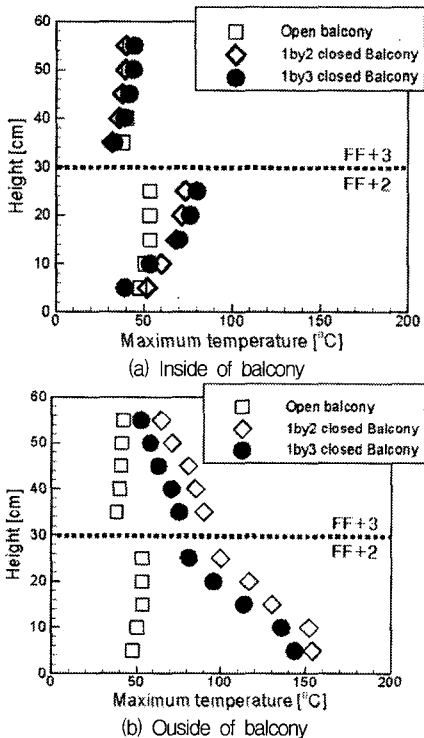


Fig. 6. Maximum temperature distributions for the balconies

Table 2. Comparison of the smoke velocity between the model and real scale (Unit : m/s)

	Closed	1/2 closed	1/3 closed	Open
Smoke velocity (V_M)	0.097	0.077	0.044	0.042
Smoke velocity (V_F)	0.307	0.244	0.139	0.133

Table 3. Comparison of the reaching time between the model and real scale (unit : sec)

	Closed	1/2 closed	1/3 closed	Open
Reaching time (t _m)	5.15	6.49	11.36	11.9
Reaching time (t _r)	16.3	20.54	35.95	37.66

4. 결론

본 연구에서는 고층 건물에서의 화재 발생시 발코니의 개방 혹은 1/2, 1/3 부분폐쇄, 완전폐쇄 상태에 따른 연기거동을 파악하기 위하여 축소 실험과 수소기포실험을 수행하였으며 연기 거동의 가시화와 온도 분포를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 발코니가 1/2, 1/3 폐쇄된 경우와 완전히 폐쇄된 경우 상승 연층은 건물 외부에서의 유입이 지배적이기 때문에 연층이 건물의 유리벽을 따라 전파되게 되고, 발코니가 개방된 경우 건물 외부에서의 유입뿐만 아니라 발코니 공간에서의 유입이 이루어지기 때문에 상승 연층이 건물의 벽면에서 분리되어 상승하게 된다.

2) 발코니가 1/2, 1/3 폐쇄된 경우와 완전히 폐쇄된 경우 하층부의 최대 온도는 발코니가 개방된 경우에 비해 약 2.5배이상 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 주거공간 내부로 확산될 우려가 있다.

3) 발코니 외벽에서의 실제 연기전파 속도는 개방된 발코니보다 1/3 폐쇄된 발코니에서 1.04배, 1/2 폐쇄된 발코니에서 1.83배, 완전히 폐쇄된 발코니에서는 2.3배로 발코니가 폐쇄 될수록 2층부에서 3층부로 연기 전파속도는 증가하였다. 또한 연기 도달 시간도 개방된 발코니보다 1/3 폐쇄된 발코니에서 0.54초, 1/2 폐쇄된 발코니에서 5.41초, 완전히 폐쇄된 발코니에서는 6.75초로 2층부에서 3층부로 연기 도달 시간이 빨랐다.

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

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부 인위재해방재 기술개발사업 (M10113000012-01A2-90000600)지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

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 Bubble 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.