

## 木材燃焼時の 室内火災性狀과 安全待避時間

### Fire Growth of Wood Cribs and Available Safe Egress Time

정길순\* · 태순호\*\* · 이병곤\*\*\*

Gil-Soon Jung · Soon-Ho Tae · Byung-Kon Lee

#### ABSTRACT

Available Safe Egress Time(ASET) is the time available for occupants to evacuate safely in compartment fire, and it depends on the time of fire detection and hazardous conditions.

The purpose of this study is to provide an analytical basis and experimental data for estimating the fire growth in compartments and the available safe egress time, and to compare the experimental data with those proposed equations.

As a result, hazard order is poison to CO, descent of smoke layer, poison to CO<sub>2</sub>, burn to hot smoke layer, and lack of O<sub>2</sub>, ASET is lengthened in this order. Also, The more fire load is increased, the more ASET is shorted.

#### 1. 서 론

한국화재보험협회의 통계에 의하면<sup>1)</sup>, 화재건수와 인명 및 재산피해는 해마다 증가하여 93년도의 화재발생건수는 17,458건, 인명피해는 사망 510명, 부상 1,237명, 재산피해는 526억원에 달하고 있어, 방재에 각별한 관심을 갖지 않으면 귀중한 인명과 막대한 재산 손실을 가져와 공들여 쌓은 발전과 국력을 하루 아침에 소실하는 우를 범하게 된다.

안전대피시간(Available Safe Egress Time : ASET)이란 건축물내에서 화재발견 또는 화재감지시간으로부터 위험한 상태로 돌입하는 시간과의 차이로서 안전하게 대피할 수 있는 시간이다. 위험한 상태에는 여러가지 제안이 있으나, 상부의 연기층이 일정높이 이하(사람의 눈높이 : 일반적으로 150cm)로 내려올 때의 시계불량과 고온(115℃ 이상)의 연기층으로 인한 직접화상, 연기층의 유독가스(CO의 허용농도 50ppm이하, CO<sub>2</sub>의 허용농도 5000ppm이하)로 인한 질식이나 산소의 결핍(O<sub>2</sub>의

\* 충북대학교 대학원

\*\* 서울산업대학교 산업안전공학과

\*\*\* 충북대학교 산업안전공학과

허용농도 18%), 일정높이 이상에서 고온가스(약 180°C 이상)의 복사열로 인한 간접화상 등이 있다.

본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 소화기의 소화능력 판정등에 사용하는 wood cribs을 연료로 하여 실제규모의 실내화재 실험을 통하여 질량감소율, 연기층의 온도, 연기층의 높이, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>의 농도변화 등을 측정하여 안전대피시간을 구하고, 기존의 화재관계식들과 비교하여 그 적합성을 검토한다.

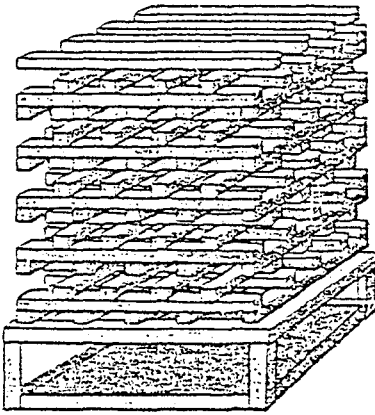


Fig. 1 Sketch of a wood cribs

## 2. 기존의 화재 관계식

복잡한 화재현상을 과학적으로 규명하여 간단한 수식으로 표시하려는 화재 모델에 관한 연구가 계속되어 왔으며, 1985년 Lawson과 Quintiere<sup>2)</sup>는 이러한 화재관계식들을 정리하여 발표하였다. 이들 중 본 연구와 관련된 식들은 다음과 같다.

### 2.1 질량감소율

질량감소율(g/min)은 wood cribs의 연소속도로서 화재 계산에 중요한 인자이다.

Delichatsios<sup>3)</sup>는 개방된 공간에서 wood cribs 밑 부분의 중앙에서 점화할 때의 질량감소율(mf)에 대하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_f &= \dot{m}'' A_s \left( \frac{\pi}{2} \right) \left( \frac{t}{t_o} \right)^2 \text{ (g/sec) : } t < t_o \text{인 경우} \\
 \dot{m}_f &= \dot{m}'' A_s \text{ (g/sec) : } t > t_o \text{인 경우}
 \end{aligned} \quad (1)$$

### 2.2 연기층의 높이

Zukoski<sup>4)</sup>는 바닥에서 천정까지의 높이 H, 바닥 면에서 연기층까지의 높이 Z인 실내화재에서 연기층의 열손실을 무시하여 다음과 같은 미분식을 제안하였다.

$$\frac{dy}{d\tau} + Q^* + \alpha(Q^*)^{1/3} \cdot y^{5/3} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

### 2.3 연기층의 온도상승

Quintiere<sup>5)</sup>는 연기층의 온도상승(ΔT)에 대하여 환기를 고려하여 다음 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta T}{T_o} &= 1.6 \left\{ \frac{Q}{g^{1/2} C_p \rho_o T_o A_o H_o^{1/2}} \right\}^{2/3} \\
 &\quad \left\{ \frac{hk A}{g^{1/2} C_p \rho_o T_o A_o H_o^{1/2}} \right\}^{-1/3} \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

### 2.4 실외 연기방출량

Steckler<sup>6)</sup>등은 환기에 의하여 실외로 배출되는 연기의 질량유량( $\dot{m}_o$ )에 대하여 다음 식을 제안하였다.

$$\dot{m}_o = \frac{2}{3} C M_o \rho_o \sqrt{2g} W_o H_o^{3/2} \dots\dots\dots (4)$$

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

실험장치는 Fig. 2와 같이 길이 450cm, 폭 320cm, 높이 260cm, 개구부의 폭 130cm의 실제규모로서 벽은 내화벽돌, 천정은 단열재를 넣은 철량 구조이다.

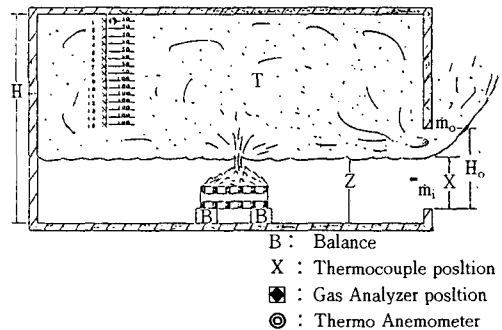


Fig. 2 Schematic diagram for compartment

질량감소율은 wood cribs의 받침대 밑에 10kg짜리 저울 2개를 사용하였고, 온도는 0.5mm K형 열전대를 그림과 같은 간격으로 설치하여 data logger와 Labtech software를 사용하여 연속적으로 측정하였다. CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>의 농도변화는 개구부에서 바닥으로부터 높이가 1.5m되는 부분에 가스분석기(IMR사 3000P형)를 설치하여 측정하였다.

유속은 digital micromanometer와 휴대용 열선유속계로, 천정으로부터 5cm 떨어진 위치의 실내 연기유동속도와 개구부로 방출되는 연기의 유속을 측정하였다.

### 3.2 실험방법

Table 1과 같이 한 변의 길이가 2.73cm인 각재를 사용하여 목재의 길이, 층수, 개수를 달리하여 실험하였으며, 점화는 연기발생이 없는 소량의 알코올을 사용하였다.

Table 1 Sticks of wood crib per layer for length

Length(cm)	stick/layer (fire load)(kg)	stick/layer (fire load)(kg)
30	5/4(2.0)	6/4(2.4)
	5/6(3.0)	6/6(3.6)
	5/8(4.0)	6/8(4.8)
45	5/4(3.0)	6/4(3.6)
	5/6(4.5)	6/6(5.4)
	5/8(6.0)	6/8(7.2)

개구부의 높이 변화에 대한 영향을 고려하기 위하여 개구부의 높이를 80, 120, 180cm로 달리하여 실험하였다. 실내화재에서는 개구부의 높이와 면적에 따라 환기가 불충분한 환기 지배형 화재와 환기가 충분하여 연료특성에 따라 연소하는 연료 지배형 화재로 분류하는데<sup>7)</sup>, 본 실험의  $AH^{1/2}/As$ 를 구하여 비교해 본 결과 연료 지배형 화재로 분류되었다. 또한, 목재연료의 위치를 내부벽쪽(왼쪽), 중앙부, 개구부쪽(오른쪽)으로 화염원의 위치를 달리하여 실험하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 질량감소율

Fig. 3은 wood cribs의 층별 질량감소율로서,

점화 후 약 6-7분의 화재전성기까지 증가한 후 일정한 경향을 보이다가 화재소멸과 함께 감소하며 약 15-20분 후 완전히 소멸한다.

그림 중의 점선은 식(1)로 계산한 값으로, wood cribs의 중앙부에서 점화하여 그 화염이 cribs의 바깥면까지 도달하는 화염전파시간( $t_0$ )에서 불연속하며,  $t_0$ 까지 급격히 증가한 후 일정한 형태로 크게 예측되어 환기의 영향을 받는 실내화재의 질량감소율을 표시하는 데는 적합하지 않다.

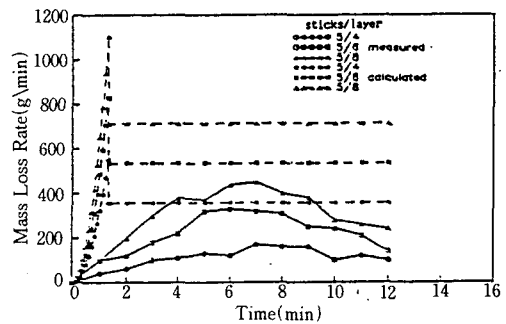


Fig. 3 Mass loss rate (n = 5, N = 4, 6, 8, l = 45cm, Ho = 80cm)

### 4.2 연기층의 온도

Fig. 4는 실내화재의 온도변화의 한 예로서, 화재초기의 낮은 온도상승율이 화재성장과 함께 급격히 커진 후 소멸되기까지 거의 일정하게 변화한다.

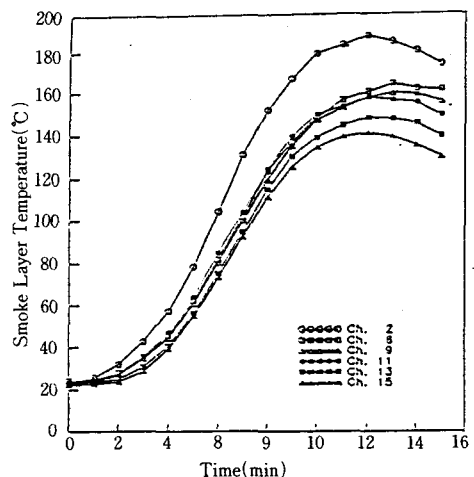


Fig. 4 Smoke layer temperature (n=6, N=6, l=30cm, Ho=80cm)

Fig. 5는 Fig. 4의 각 위치의 온도를 평균한 온도와 식(3)으로 계산한 온도와 비교한 것으로서, 계산시 질량감소율은 실험값을 사용하여 계산하였다. 계산값은 초기 화재시는 다소 높게, 화재 전성기에서는 낮게 예측된다.

그림 중의 점선은 연기층의 온도가 115°C가 되는 안전대피시간으로 실험값에서는 378초, 계산값에서는 279초로 짧게 예측된다.

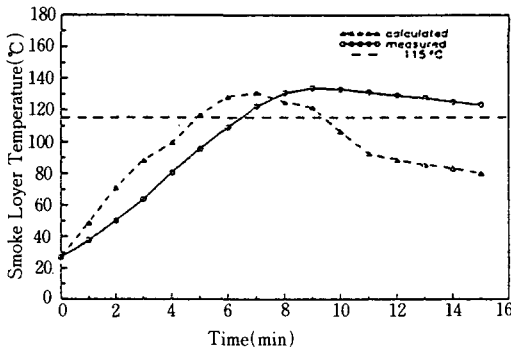


Fig. 5 Comparison smoke layer temperature (n=6, N=4, l=45cm, Ho=80cm)

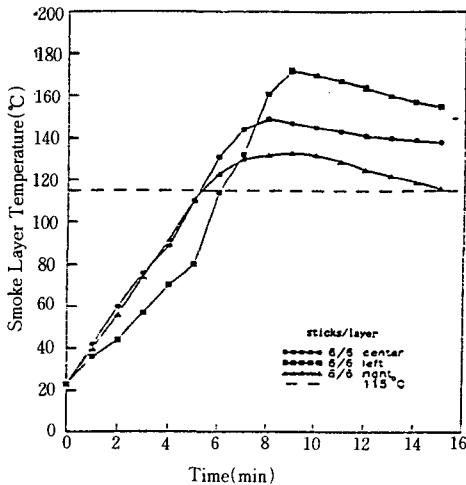


Fig. 6 Smoke layer temperature vs. fire location (n=6, N=8, l=30cm, Ho=80cm)

Fig. 6은 목재연료를 실의 내부벽쪽(왼쪽), 중앙부, 개구부쪽(오른쪽)에 위치했을 때의 평균온도의 변화로서, 개구부쪽은 내부벽쪽보다 초기화재시에는 환기가 잘 되어 연소속도가 커서 평균온도가 높으나, 반대로 화재전성기에서는 고온 연기층의 방

출이 커져서 평균온도가 낮아진다.

점선은 안전대피시간으로 개구부쪽에서는 289초, 중앙부에서는 293초, 내부벽쪽에서는 352초로, 개구부에 가까울수록 안전대피시간이 짧아진다.

### 4.3 연기층의 강하

시간별 연기층 강하는 정확한 측정이 곤란하여 그림 2의 각 위치의 열전대가 초기온도에서 1.5°C 상승했을 때 연기층이 그 열전대 위치에 도달한 것으로 간주하였는데, 많은 육안 실험결과와 거의 일치함을 확인하였다.

Fig. 7은 그 한 예로서, 화재초기를 제외하고 화재전성기에서는 거의 일정한 속도로 강하한다. 실선은 식(1)의 질량감소율을 사용하여 식(2)를 Runge-Kutta법을 사용하여 수치해석한 값으로 실험값과 경향은 유사하나 다소 빠르게 강하한다. 수평의 점선은 바닥으로부터 1.5m가 되는 연기층 강하에 대한 안전대피시간이다.

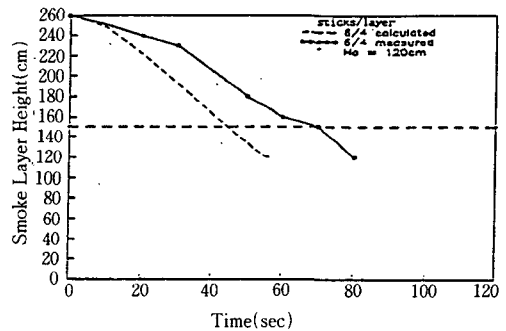


Fig. 7 Smoke layer height (n=6, N=4, l=30cm, Ho=120cm)

Fig. 8은 목재의 층수를 달리하여 화재하중을 변화시켰을 때의 연기층 강하에 대한 안전대피시간으로, 화재하중이 증가할수록 급격히 짧아진다.

계산값은 전반적으로 실험값보다 다소 작게 예측된다.

### 4.4 실내 연기의 농도

Fig. 9는 개구부의 높이가 120cm인 경우로, (a)는 CO의 농도변화로서 화재초기에는 불완전연소로 인하여 급격히 상승하며, 그림 중의 점선은 허용농도인 50ppm이 되는 선으로 이 선과 만나는 시간이 CO농도에 대한 안전대피시간이다. (b)는

CO<sub>2</sub>의 농도변화로써 점선은 허용농도인 5000ppm 이 되는 선이다. (c)는 O<sub>2</sub>의 농도변화로써, 시간이 경과함에 따라 감소하다가 화재소멸기에는 유입공기로 인하여 증가하는 경향을 보여주며, 점선은 산소결핍 허용농도인 18%가 되는 선이다.

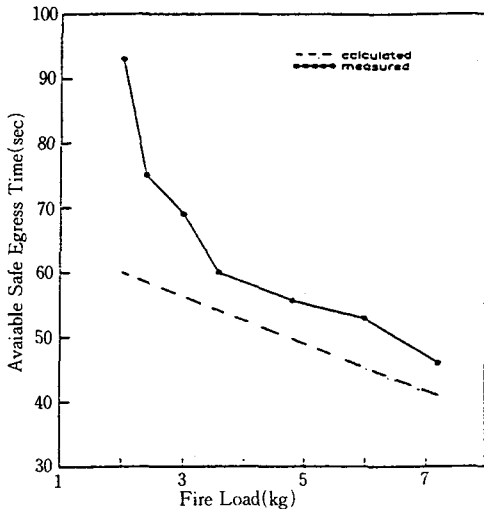
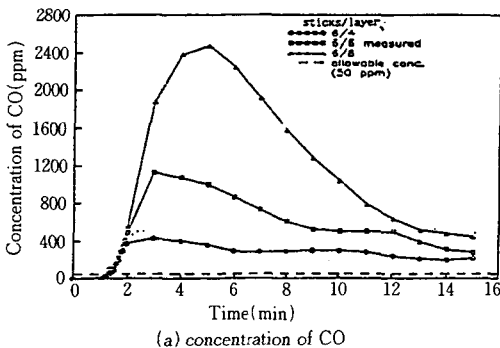
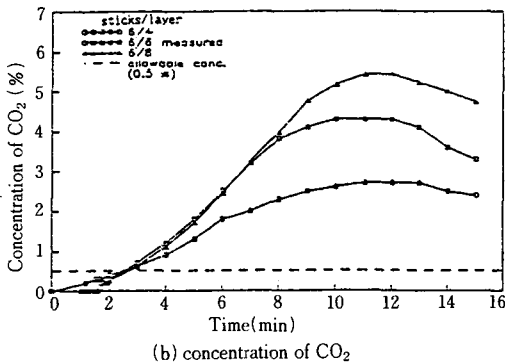


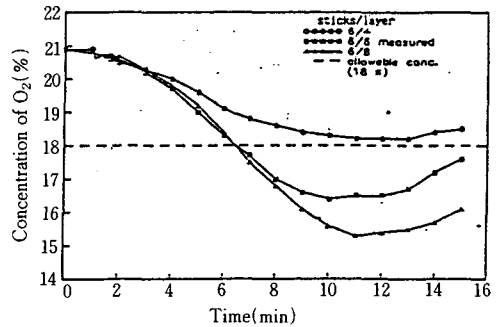
Fig. 8 ASET vs. fire load (l = 30cm, Ho = 120cm)



(a) concentration of CO



(b) concentration of CO<sub>2</sub>



(c) concentration of O<sub>2</sub>

Fig. 9 Concentration  
(N = 4, 6, 8, l = 30cm, Ho = 120cm)

표 3은 그림 9의 안전대피시간을 표로 나타낸 것으로, 화재하중이 커질수록, 개구부 높이가 높을수록 안전대피시간이 짧아지며, 이에 따라 연기로 인한 중독위험은 일산화탄소(CO)가 가장 크며, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>)의 순이다.

Table 3 ASET and fire load for concentration (length = 30cm)

sticks/layer fire load(kg)	opening height cm	available safe egress time(sec)		
		CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
6/4(2.4)	80	101	237	566
	120	85	198	503
	180	78	154	—
6/6(3.6)	80	91	195	447
	120	76	159	375
	180	59	146	—
6/8(4.8)	80	78	130	415
	120	70	124	351
	180	53	115	310

#### 4.5 환기의 영향

그림 10은 개구부의 높이가 80, 120, 180cm일 때 개구부를 통해 배출되는 연기의 배출유량(m<sub>0</sub>)으로, 실선은 개구부에서 측정된 유속들의 평균유속(V)을 구하여 m<sub>0</sub> = ρAV로 계산한 것이다. 여기서 ρ는 연기의 평균온도 130°C에서 공기의 밀도 0.83 kg/m<sup>3</sup>으로 하였다. 개구부 높이가 높을수록 환기가 잘되어 연소속도가 커서 그 연기의 배출유량도 커지며, 화재소멸과 함께 배출유량도 작아진다. 점선은 식(4)에 의해 계산된 값으로 개구부의 높이

가 낮을수록 실험값과 유사하나 개구부가 높은 경우에는 작게 예측된다.

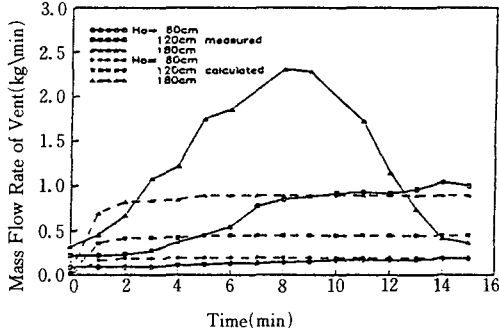


Fig. 10 Mass loss rate of ventilation  
(n = 6, N = 6, l = 30cm, Ho = 80, 120, 180cm)

실내 연기층의 유동속도는 화재전성기때 대략 0.7-1m/s로 일정하게 유지되었다.

### 5. 결 론

wood cribs를 사용하여 실제 규모의 실내화재 실험과 기존의 화재관계식과 비교한 결과 본 실험조건하에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 실내화재에서 가장 치명적인 위험은 일산화탄소(CO)에 의한 중독이고, 그 다음은 연기층의 강하로 인한 시계불량과 화상, 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)에 의한 중독, 고온의 연기층에 의한 화상, 산소(O<sub>2</sub>)결핍 순이며, 이러한 순서로 안전대피시간은 길어진다.
- 2) 연기층은 거의 일정한 속도로 강하하며 화재하중이 커질수록 연기층 높이에 대한 안전대피시간은 급격히 짧아진다. Zukoski의 연기층 높이에 대한 제안식은 다소 작게 예측된다.
- 3) Delichatsios의 질량감소율에 대한 제안식은 화염이 wood cribs바깥면까지 도달하는 화염전파 시간(t<sub>0</sub>)에서 불연속하고, 크게 예측되어 환기의 영향을 받는 실내 화재에는 적합하지 않다.
- 4) 개구부의 높이가 높을수록 연소속도가 커져서 연기의 배출유량도 커지며, Steckler의 배출유량에 대한 제안식은 개구부의 높이가 낮은 경우에는 실험값과 유사하나 개구부가 높은 경우에는

는 작게 예측된다.

- 5) 화염원의 위치가 개구부에 가까울수록 초기화재시의 연소속도가 커져서 연기층 온도에 대한 안전대피시간이 짧아진다.

### 기 호 설 명

- A : total surface area of room
- A<sub>o</sub> : vent area(W<sub>o</sub>H<sub>o</sub>)
- A<sub>s</sub> : total exposed surface area of wood crib
- M<sub>o</sub> : dimensionless mass flow rate
- m<sup>''</sup> : burning rate
- Q\* : dimensionless heat flux
- Q : energy release rate
- W<sub>o</sub> : width of vent
- y : dimensionless height of smoke interface
- α : mass entrainment coefficient
- τ : dimensionless time

### 참 고 문 헌

- 1) 韓國火災保險協會, 防災와 保險, '93년도 여름호, pp. 82, 1993.
- 2) J.R. Lawson and J.G. Quintiere, Slide rule estimates of fire growth, fire technology, Vol. 21, No. 4, pp. 267~292, November 1985.
- 3) Michael A. Delichatsios, Fire growth rates in wood cribs, Combustion and Flame, Vol. 27, pp. 267~278, 1976.
- 4) E.E. Zukoski, Development of a stratified ceiling layer in the early stages of a closed-room fire, Fire and Materials, Vol. 2, No.2, 1978.
- 5) J.G. Quintiere, A simple correlation for predicting temperature in a room fire, National bureau of standards NBSIR 83~2712, 1983.
- 6) K. Steckler, J.G. Quintiere, and D. Corley, An assessment of fire induced flows in compartments, Fire science and Technology, Vol.4, No. 1, pp. 1~14, June 1984.
- 7) 日本火災學會, 火災便覽, pp. 503~504, 1984.