

화재시 연기중에서의 가시도에 대한 연구

김동은 · 서동구 · 홍해리 · 권영진
호서대학교 소방방재학과

A Study on the Visibility in fire smoke

Kim, Dong Eun · Seo, Dong Goo · Hong, Hae Ri · Kwon, Young Jin
Dept. Fire & Disaster Prevention of Hoseo Univ.

요 약

최근 건축물은 초고층화·대형화·지하심층화 등으로 변모하고, 더 나아가 복합화가 진행되고 있다. 이러한 건축물은 화재 발생 시 기존의 건축물보다 큰 인재로서 다가오며, 특히 연기로 인한 피해가 주를 이루고 있다. 하지만 국내에서는 화재시 피난과 연기의 상관성에 대한 연구 중 이론적 연구는 미흡한 편이다. 따라서 본 연구에서는 화재시 피난과 연기의 상관성에 대한 연구에 기초자료를 제시하고 향후 피난과 연기의 상관성 연구에 대한 하나의 방안을 제시하고자 한다.

1. 서 론

최근 사회에 있어서 건축물의 용도는 다양해지면서 초고층화 및 대형화로 변화되어가고 있는 추세이다. 이는 사회적 발전을 의미하면서 반면으로 화재안전에 대한 위험요소가 증가되고 있음을 의미하고 있다. 이러한 초고층화 및 대형화되어가는 건축물의 경우 다수의 수용인원으로 인하여 화재 발생시 다수의 인명피해가 발생할 우려가 크며, 이러한 인명피해의 원인으로는 연기에 의한 질식 및 중독에 대한 것은 자명한 사실이다. 이에 대하여 국외의 경우 건축물의 화재에 대한 안전을 확보하기 위하여 성능적 화재안전설계(PBD)를 도입하여 건축물의 화재안전성을 확보하고 있다. PBD는 1985년 영국을 필두로 시작하여 미국(2000), 일본(2000) 등 많은 국가들이 화재안전성을 확보하기 위하여 피난행동과 연기와의 상관성 분석을 하여, 구체적인 연구가 진행되고 있다. 국내의 경우도 소방법에 PBD를 도입하였으나 현재 그에 대한 구체적인 방법론이 미흡하고, 연기와 피난의 상관성에 대한 이론적 연구는 부족한 현실이다.

따라서 본 연구에서는 화재시 피난과 연기의 상관성을 연구하기 위한 기초적 자료를 제시하고 향후 연구에 대한 하나의 방안을 제시하고자 한다.

2. 화재시 연기의 가시도에 대한 기존 연구

2.1 SFPE에서의 연구

SFPE에서는 다양한 종류의 연기에 대해 화재 연기 중 가시도와 연기 농도간의 관계를 연구해 실용적으로 활용할 수 있는 식1를 제안하였다.

$$V \approx \frac{1}{C_s} \ln \left(\frac{B_{EO}}{\delta_c k L} \right) \quad (\text{식1}) \quad V \approx \frac{1}{C_s} \ln \left(\frac{\alpha}{\delta_c k} \right) \quad (\text{식2})$$

여기서 V=불명료화 한계(Obscuration threshold)에서의 표지판의 가시도
 C_s = 소멸계수(Extinction coefficient)로 표시된 연기농도(l/m)
 B_{EO} =표지판의 휘도(Brightness)(cd/m²)
 δ_c = 불명료화 한계를 갖은 연기 중에서 표지판의 대비한계(Contrast threshold)(0.01~0.05)
 $k = \delta_c / C_s (0.4 \sim 1.0)$ 및 $C_s = \delta_s + \delta_{ab}$ (δ_s : 산란계수 / δ_{ab} : 흡수계수)
 L = 연기 중 전방위로부터 입사되는 조명등 평균조도의 $1/\pi$ (lm/m²)
 α = 표지판의 반사율

위 식1은 일본 Tadashisa jin에 의해 제안되었으며, 식1은 화재 연기 중에 보이는 표지판에 적용되는 가시도 모델이다. 또한 반사형으로 되어 있는 경우는 식2를 제안하였다. 또한 SFPE에서는 화재 연기 중의 가시도는 흡광도 뿐만 아니라 연기의 자극성이 증가할수록 시력이 급속히 저하됨을 고려하여야 함을 제안하였다.

또한 일반적으로 건축물 내에 대한 구조를 인식에 대한 피난자들의 가시도 및 허용 연기농도는 다음 표1에 나타내었다. 화재 발생 건축물의 내부 구조를 알고 있는 사람들은 피난완료에 위해 4m의 가시거리가 확보되어야 하는 반면, 그렇지 않은 피난자들의 경우는 13m의 가시거리가 보장되어야 한다고 제안하였다.

표 1 일반적인 피난완료에 가능한 가시거리 및 허용 연기 농도

건축물 구조 인지 여부	연기농도(l/m)	가시거리(m)
잘 모른다.	0.15	13
잘 알고 있다.	0.5	4

표 2 화재시 피난에 의한 연구자들이 제안한 연기농도 및 가시거리

제안자	연기농도(l/m)	가시거리(m)
Kawagoe	0.1	20
Togawa	0.4	-
Kingman	-	1.2
Rasbash	-	4.5
Los Angeles Fire Department	-	13.5
Shern	0.2	-
Rasbash	0.2	10

또한 화재 연기 발생시 피난에 대한 여러 차례 실험을 수행한 바가 있는 여러 학자들은 다음 표2와 같이 허용 연기농도 및 허용 가시도를 제안하였다. 제안한 수치가 변화 차이는 해당 장소의 다양한 구조와 피난자 구성이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

2.2 BRI 2002

일본의 대표적인 2층 Zone model인 BRI 2002에서 연기 농도 산출 방안을 살펴보게 되면 구획화재에 대하여 실내가 상부의 연기층과 하부의 공기층으로 나누어져 연기층과 공기층이 수평인 경계면에서 명확하게 구분되고 있음을 BRI 2002에서 가정하고 있다. 각층에 있어서 질량변화와 에너지 변화를 고려하는 것으로 연기층의 높이 $Z(m)$ 와 온도 $T_s(K)$ 가 해석될 수 있다.

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Q_c - Q_w + C_p \Sigma (m_{in} T_{\infty} - m_{out} T_s)}{C_p T_s P_s A} \quad (\text{식3})$$

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Q_c - Q_w - C_p m_{in} (T_s - T_{\infty})}{C_p P_s (H - Z) A} \quad (\text{식4})$$

여기서, $Q_c, Q_w [W]$: 발열속도, 손실속도

$m_{in}, m_{out} [kg/s]$: 연기층에서의 공기 유입 · 유출량

$P_s, P_s [kg/m^3]$: 공기층 · 연기층 밀도, $T_{\infty} [K]$: 공기층 온도, C_p : 기체 정수

$A [m^2]$: 화재실의 면적, $H [m]$: 화재실의 높이

BRI 2002에서의 발열량은 연소에 의한 연료의 질량 감소 $m_b [kg/s]$ 에 비례하고 비례정수를 γ_s 로 하면 단위질량당 연기 입자의 흡수 단면적 $\varnothing_s [m^2/kg]$ 은 다음 식 5과 같다.

$$\frac{d\varnothing_s}{dt} = \frac{\gamma_s m_b - \varnothing_s m_{in}}{P_s (H - Z) A} \quad (\text{식5})$$

$$C_s = P_s \varnothing_s \quad (\text{식6})$$

또한 연기층의 농도 $C_s [l/m^2]$ 은 다음 식 6과 같이 구할 수 있다.

2.3 일본 鈴木 · 田中の 연구

일본 京都大의 鈴木 · 田中은 2005년에 화재 성상을 BRI2002을 통하여 파악하고 시간, 공간적별로 피난자의 시야 휘도를 예측하는 모델을 프로그램 해석 및 실험을 통하여 구축하였다. 연기층 강하시의 표지판(피난을 도와주는 용도)을 고려하였을 때 표지판에 연기로 인하여 표지판에 대한 휘도의 저하와 연기를 산란매체로 간주하여 연기층의 투과광의 산란 · 감쇠를 고려하지 않았다. 그림1과 같이 표지판으로부터 피난자의 눈과의 거리를 D 라고 하면 산란 · 감쇠를 받는 거리 D' 는 연기층 높이는 식7과 같이 Z 에 의해서 바뀌는 것을 알 수 있다.

$$D' = \begin{cases} D \frac{h_0 - Z}{h_0 - h_e} & (h_e < Z < h_0) \\ D \frac{h_e - Z}{h_e - h_0} \dots (h_0 < Z < h_e) \\ D \dots (Z \leq h_0 \text{ or } h_e < Z) \end{cases} \quad (\text{식7})$$

여기서, h_e : 피난자의 눈까지의 높이

h_0 : 표지판까지의 높이

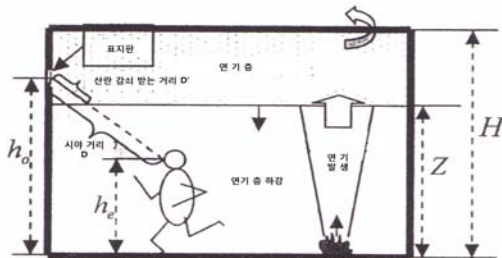


그림 1 화재 연기 층의 피난개념도

鈴木・田中の 경우 BRI 2002를 이용하여 연기층의 높이, 연기 농도를 산출하였다. 그러나 연기층보다 아래에서는 빛의 산란 감쇠는 일어나지 않는다고 가정하였다. 따라서 鈴木・田中은 연기로 인하여 시야를 방해는 것을 고려하여 피난자의 앞에서의 표지판의 휘도 $aL_D[cd/m^2]$ 는 다음 식8과 같은 모델을 제안하였다.

$$\left\{ \begin{array}{l} aL_D = (a\tau_e L_e + a\rho_e L_{smoke})e^{-C_s D'} + L_{smoke}k(1 - e^{-C_s D'}) \\ L_{smoke} = \frac{\sum a\rho_i A_i \sum a F_{smoke}}{\pi(A_{smoke})^2} + \frac{A}{A_{smoke}} \frac{\sum \rho_j A_j \sum F_{air}}{\pi(A_{air})^2} \\ a\tau_e = \left(1 - \int \eta C_s dt\right) \tau_e \\ a\rho_{e,i} = \rho_{e,i} - \int \eta C_s dt (\rho_{e,i} - \rho_{smoke}) \\ \sum a F_{smoke} = \left(1 - \int \eta C_s dt\right) \sum F_{smoke} \end{array} \right. \quad (식8)$$

여기서, $\tau_e, a\tau_e$: 연기 방해 전후로의 표지판의 투과율 $\rho_{e,i}, a\rho_{e,i}$: 연기의 방해 전후로의 표지판의 반사율, L_{smoke} : 연기층의 산란 휘도,
 $F_{smoke}, F_{air}[lm]$: 연기층과 공기층에 존재하는 광속, $A_{smoke}, A_{air}[m^2]$: 연기층과 공기층에 접하는 벽표면적,
 $\eta[m/s]$: 단위연기 농도 시야방해속도, k : 산란계수, $L_e[cd/m^2]$ = 광원휘도

4. 결론

화재시 발생하는 연기와 피난과의 연관성에 대하여 연구의 기초자료로서 기존의 연구를 조사한 결과 SFPE에서는 기존의 Tadashisa jin의 연구 자료를 토대로 식1과 식2와 같은 기본 모델식을 제안하고 그 식을 토대로 피난시 필요한 연기의 농도 및 가시도를 제안하고 있다. 일본의 연구를 살펴보게 되면 鈴木・田中の 연구에서도 BRI-2002의 식3과 식4를 토대로 연기의 농도를 산출하고 피난자에 대한 휘도에 대한 모델을 제시하였다. 또한 鈴木・田中の 전체 연구를 살펴보면 BRI-2002를 이용하여 화재성상을 예측하고 모형실험과 Large-scale 실험을 통하여 제안한 모델에 대한 적정성을 검토하였다. 현재 국내에서는 연기에 대한 연구는 시뮬레이션을 이용한 수치해석에 제한되어 있고 있다. 따라서 본 연구를 기초자료로 활용하여 Zone model인 BRI와 모형실험 및 Large-scale 실험을 실시한 후 국내에서의 연기유동에 대한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청 “건축구조물의 가연물 및 개구조건에 따른 화재(열, 연기)성상 예측 시뮬레이션 개발”에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 鈴木秀和, 煙中における避難標識の視認性低下に関する研究, 日本京都大学部建築学科論文, 2005
2. SFPE, 방화공학 핸드북 I 제2부, 제4장 (화재 연기층에서의 가시도 및 인간거동)
3. T. Jin, T.Yamada "Irritating Effects of Fire Smoke of on Visibility" fire Science & Technology, 5,1, pp79-89, 1985
4. T.Wakamatsu, T. Tanaka(2004). BRI 2002 : 二層ゾーン建物内煙流動モデルと予測計算プログラム建築研究振興協會