

**A-9**

**관람시설 내부공간에서 가상의 화재발생으로 인한  
화재 확산현상에 관한 수치적 연구**

**손봉세, 김태국\*, 박원희\*\***

경원대학교 \*중앙대학교 \*\*중앙대학교 대학원

**A Numerical Study on the Fire Propagation Phenomena  
in the inner Space of The Cinema**

**Bong-sei Son, Tae Kuk Kim\*, and Won-Hee Park\*\***

*Kyungwon college, \*\*\*Chung-Ang Univ.*

**I. 서론**

영화관의 방화특성은 무대부분, 분장실, 조명시설, 연습실 등 부속실이 없어 화재발생의 우려가 극장에 비교적 적지만 객석부분의 천장이 높고 긴스팬으로 연결되어 2~3개 층이 개방된 공간 형태로 되어 있어 화재시 관람석 전체에 화염 및 연기가 빠르게 확산될 위험성이 매우 높은 방화공간이라 할 수 있다. 특히 객석 바닥재료 및 소파의 재질이 일반가연성 물질보다 높은 발열량과 유독성 가스가 발생할 우려가 있는 제품으로 설치되어 있으며 창이 없는 벽면으로 둘러싸여 있고 천장이 높아 화재감기가 늦어지고 피난통로가 경사로 되어 피난동선의 확보가 어려운 근본적인 문제점을 안고 있다. 또한 관람객의 특성으로 다양한 인원이 군집되어 전원이 피난하는데 좀더 많은 시간이 소요되고 출입구 부분이나 피난계단 부분에서 병목으로 패닉현상이 발생할 가능성이 높다. 행정자치부 2001년도 화재통계자료에 의하면 36,169건의 화재가 발생하여 2,376명(사망 516명, 부상 1,860명)의 인명피해

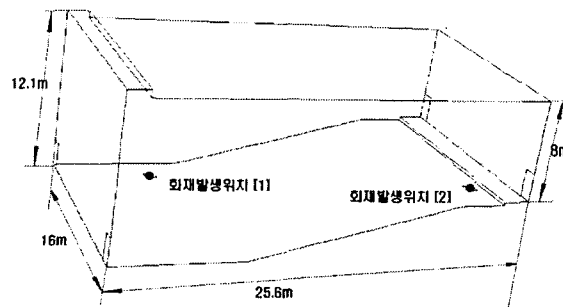


Fig. 1. The schematic of cinema house.

와 1,697억 5천만원의 재산피해가 발생한 것으로 나타났다. 이 중에서 관람·집회 및 운동 시설에서 발생한 화재 건수는 20건으로 1명이 사망하고 약 2억원의 손실이 발생하였으며 발생원인은 불티, 전기 및 담뱃불, 방화에 의해 발생한 것으로 나타났다. 즉, 관람시설의 경우 화재발생 빈도는 다른 방호공간에 비하여 낮지만 관람시설의 특성상 불특정다수인이 출입하는 장소이므로 피난시설은 물론 각종 소방관련 시설을 완벽하게 설치하지 않을 경우 인명 및 재산피해의 우려가 높은 공간이라 할 수 있다.

## II. 이론적 접근

다음과 같은 방호공간에서 화재가 발생하였을 경우에 대한 화재온도분포 및 유동 현상 등 화재특성을 분석하기 위하여 질량, 운동량, 에너지, 난류운동에너지 및 난류에너지소멸률 등의 방정식이 필요하며 이러한 스칼라량의 보존방정식들을 시간 평균하였을 경우 다음과 같은 형태의 시간평균방정식들로 정리될 수가 있다.

### 연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

### 운동량방정식

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} u_i - \mu_e \nabla u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g \quad (2)$$

여기서,  $\mu_e$ 는 유효점성계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\rho$ 는 밀도,  $u_i$ 는 속도,  $p$ 는 압력을 나타낸다. 유효점성계수는  $\mu_e = \mu + \mu_t$  이와 같이 정의되며, 여기서  $\mu$ 는 유체의 점성계수를 그리고  $\mu_t$ 는 난류점성계수로서  $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 와 같이 정의된다. 또한 난류운동에너지  $k$ 는  $k = \overline{u_i' u_i'}/2$ 이며, 난류에너지손실률  $\epsilon$ 은  $\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)$  로 정의된다.

### 에너지방정식(Static Enthalpy)

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h - \Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x_i}) = -\nabla \cdot q_r + \overline{\Phi} \quad (3)$$

여기서, 유효확산계수  $\Gamma_h = \mu_e / \sigma_h$ 이고 난류모델 상수  $\sigma_h$ 는 표 1에 주어져 있다. 그리고,  $\nabla \cdot q_r$ 은 복사열전달의 영향을 나타내는 생성항이며,  $\overline{\Phi}$ 는 기계적에너지의 점성에 의한 확산을 나타내는 항을 나타낸다.

**화학종 방정식**

$$\frac{\partial \rho Y_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_s - \rho D \frac{\partial Y_s}{\partial x_i}) = S \quad (4)$$

여기서,  $Y_s$ 는 화학종  $s$ 의 질량분율을 나타내며  $D$ 는 공기에 혼합된 화학종  $s$ 의 확산계수를 나타낸다.

**난류에너지 방정식**

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k - \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) &= \mu_t \left\{ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{g}{\sigma_h} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right\} \\ &- \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \chi \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 난류에너지의 유효확산계수는  $\Gamma_k = \mu_e / \sigma_k$ 이며,  $\sigma_k$ 는 Table 1에 주어진 난류모델상수이다.

**난류에너지 소멸율 방정식**

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon - \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) \\ = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left\{ \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right. \\ \left. - \mu_t C_{\epsilon 3} \frac{g}{\sigma_h} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left( \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \chi \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\} - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, 난류에너지소멸율의 난류확산계수는  $\Gamma_\epsilon = \mu_e / \sigma_\epsilon$ 과 같으며, 난류모델상수  $\sigma_\epsilon$ 은 Table 1에 주어져 있다.

화재를 풀(pool)화재로 가정하며, 이때 열발생률에 대한 무차원 parameter는 다음과 같이 정의한다.

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_c c_{P_\infty} T_\infty (gD)^{1/2} D^2} \quad (7)$$

**Table 1. Standard  $k-\epsilon$  Turbulent Model Coefficient**

$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_h$	$\sigma_\epsilon$	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	$C_{\epsilon 4}$	$\chi$ (Von Karman상수)
0.09	1.0	0.7	1.3	1.44	1.92	1.44 for $\partial \rho / \partial x_i > 0$ 0.0 for $\partial \rho / \partial x_i < 0$	-0.33	0.42

여기서,  $\rho_\infty, T_\infty, C_{p\infty}, g$ 는 각각 외부공기의 밀도 온도 및 정압비율을 나타내며, 그 값들은 각각  $1.255 \text{ kg/m}^3, 293\text{K}, 1.006\text{kJ/kgK}$ 를 갖는다. 또한  $\dot{Q}, D$ 는 열발생률과 풀화재의 특성 길이를 나타낸다. 화염 높이는 화재 하중, 모양 및 대기조건 및 당량비 등 많은 인자에 영향을 받으며 많은 연료의 경우 사용할 수 있는 화염 높이  $Z_{fl}$ 은 열발생률과 풀의 특성길이  $D$ 에 의한  $Q_D^*$ 이 1보다 큰 경우와 작은 경우에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$Q_D^* > 1.0 \text{의 경우 } \frac{Z_{fl}}{D} = 3.3 Q_D^{*2/5} \quad (8a)$$

$$Q_D^* < 1.0 \text{의 경우 } \frac{Z_{fl}}{D} = 3.3 Q_D^{*2/3} \quad (8b)$$

화재 밑의 가상화염(virtual flame) 높이,  $\Delta Z_f$ 는 Heskestad에 의해 다음 식으로 정의된다.

$$\Delta Z_f = 1.02D - 0.083 Q_D^{*2/5} \quad (9)$$

위에서 구해진 화염높이에 따른 질량 유동률,  $\dot{m}$ 은 화염 높이와 유효 발열량 및 virtual origin이 고려된 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\dot{m} = 0.59(Z + \Delta Z_f)^{3/2} D \quad (10)$$

Plume의 평균 온도  $T_{zf}$ 와 수직 상승속도  $w$ 는 열역학 제 1법칙을 적용하여 구할 수 있다. 즉 운동에너지와 포텐셜에너지의 변화를 무시함으로써 다음과 같은 plume의 온도 방정식과 속도 방정식을 구할 수 있다.

$$T_{zf} = T_\infty + \frac{\dot{Q}}{C_p \dot{m} Z_{fl}} \quad (11)$$

$$w = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \pi \frac{D^2}{4} C_p \Delta T} \quad (12)$$

위에서 얻어진 온도와 속도를 이용하여 각 시간에 따른 온도와 속도를 화재에 입구조건으로 놓고 해석을 시행한다.

### III. 수치해석 및 방법

[1]의 경우는 영화관의 앞쪽 부분서 화재가 발생한 경우로서 화재면적은  $0.64\text{m}^2$ 로서 한번

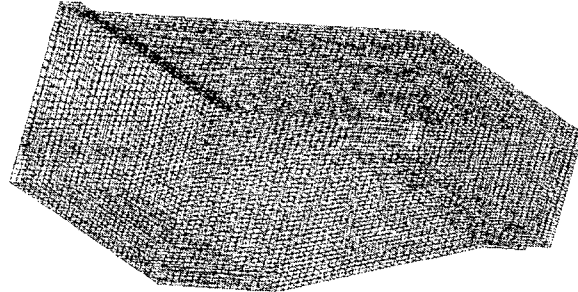


Fig. 2. Grid system considered for numerical analysis.

의 길이가 0.8m인 정사각형 공간에서 화재가 발생하는 것으로 고려하였으며, 화재하중은 3.5MW, 화재성장속도는 Fast로 가정하였다. [2]인 경우는 영화관 후면의 통로부분에서 화재가 발생한 것으로 화재발생위치[1]인 경우 같은 화재면적과 화재하중을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터의 계산속도와 하드웨어적인 면을 고려하여 벽에서는 열전달이 없는 단열조건으로 하였고 유동매체는 공기이며, 초기의 온도 및 압력은 표준대기압력 상태로 고려하였다. 화재현상으로 발생하는 열전달 및 유동장의 해석은 Transient state를 계산하였으며 난류 유동장 해석에는 표준  $k-\epsilon$  모델을 적용하였다. 본 해석 모델은 실물과 같은 크기[25.6(L)×16(W)×12.1(H)]로서 화재 시뮬레이션을 실시할 부분의 격자는 Fig. 2와 같이 단순화한 기하학적 형상으로 격자를 형성하였다. 여기서 사용된 격자 수는 약 7만개이다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 4-1) Case [1]인 경우

Figure 3은 화재 발생이후 60, 120, 240, 420, 600, 900초 이후의 여러 단면에서의 온도 분포를 나타내고 있으며, 각각의 그림은 여러 단면들에 대한 분포를 나타낸 것이다. 화재 초기 상태에서는 화재의 성장이 천장이 있는 상부로 확산하는 영향이 높으며, 화재발생 120초 이후에는 영화관 뒤쪽 천장(약 400K)을 타고 화재 열이 전파되는 과정을 볼 수 있으며 또한 연기의 전파는 스크린 벽을 타고 아래로 연기가 하강하기 시작한다. 240초일 때 화재 발생지점의 최고온도는 약 1,100K까지 상승하여 영화관 후면(천장부분의 온도 약 400K)까지 화재 열이 확산되는 것으로 나타났다. 화재발생 240초 이후부터는 연기가 영화관의 천장을 타고 점점 뒤쪽으로 접근하기 시작하였다. 이 시간 때의 피난허용 높이 1.5M까지는 화재발생 중심부분을 제외하고는 기타부분에서는 피난에 거의 지장이 없는 것으로 나타났다. 화재발생 420초 이후에는 화재가 발생한 천장 지점으로부터 약 10M 부분까지 화재온도는 약 630K로 상승하는 것으로 나타났다. 또한 영화관 1층 부분에는 연기가 거의 확산되기 때문에 1층에 있는 관람자는 피난이 완료되어야 한다. 600초 이후에는 모든 방호구간에 연기가 확산되는 것으로 나타났으며 방호공간의 온도는 약 550K 이상이 되며 화재발생 900초 이후부터는 더이상의 화재성장이 없는 최성기 상태가 되는 것으로 나타났다.

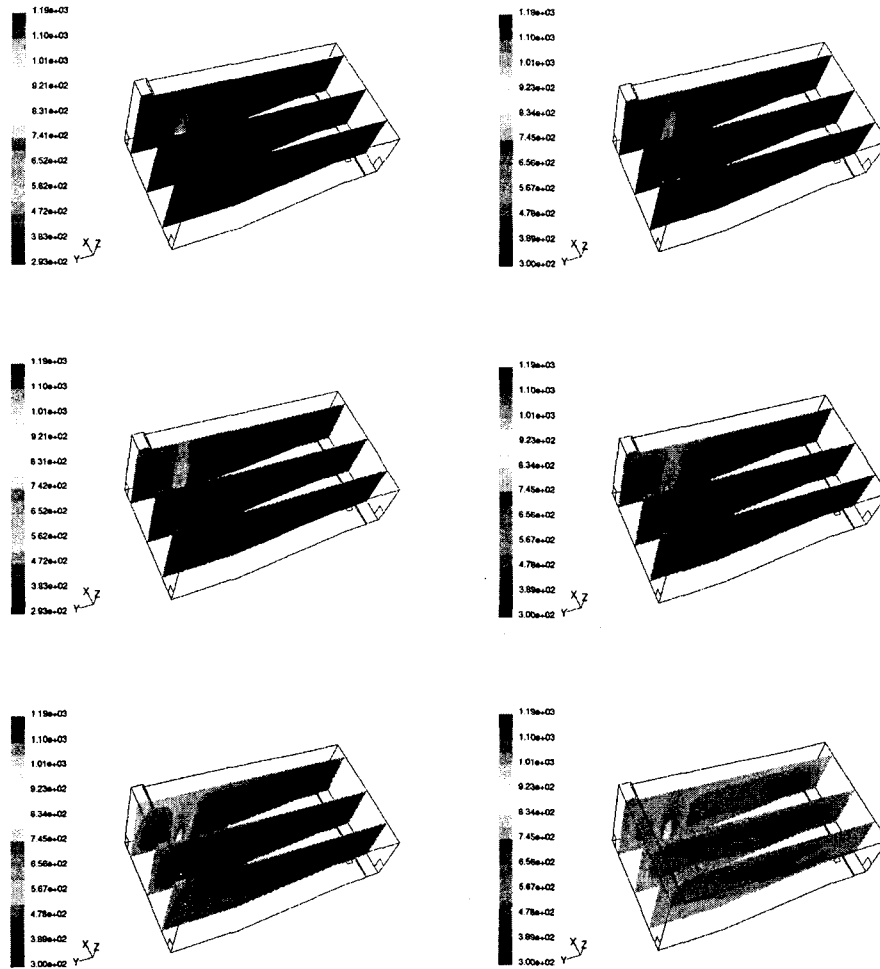


Fig. 3. 화재발생 60, 120, 240, 420, 600, 900초 후의 여러 단면에서의 온도 분포(화재1의 경우)

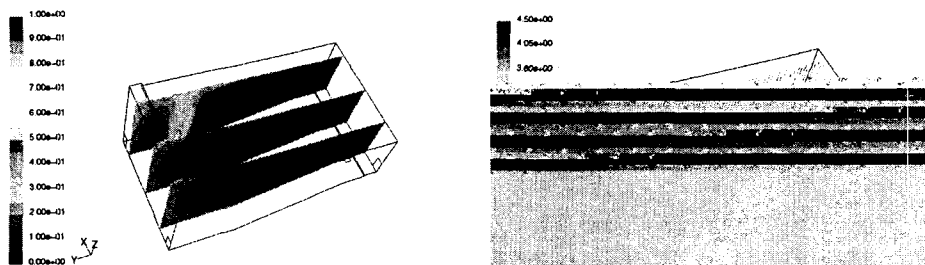


Fig. 4. 화재발생 420초 후의 연기분포 및 속도장(화재1의 경우).

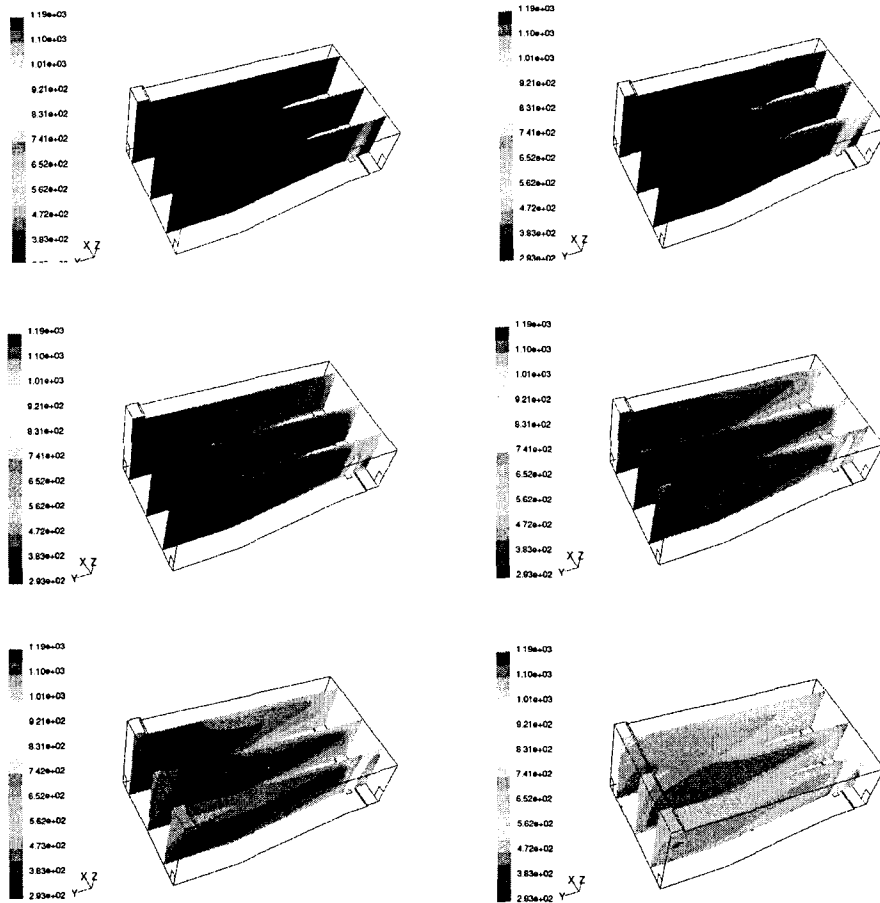


Fig. 5. 화재발생 60, 120, 240, 420, 600, 900초 후의 여러 단면에서의 온도 분포(화재2의 경우).

#### 4-2) Case [2]인 경우

영화관 뒤쪽에서 화재가 발생한 경우의 시뮬레이션으로 Fig. 5에서는 각 평면에 대한 각 단면에서의 화재발생 이후 60초, 120초, 240초, 420초, 600초, 900초일 때의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 6에서는 대표적인 시간(화재발생 후 420초) 시간대에서의 연기분포 및 속도 분포를 나타내고 Case.1과는 달리 영화관 후면에서 화재가 발생한 것으로 가정하였으므로 비교적 온도 및 연기분포가 더 빨리 성장되는 현상을 볼 수 있다. 화재발생 초기 단계인 60초(중심부 최고온도는 약 800K)에서는 수직 벽을 타고 상층부로 빠르게 성장하는 현상을 볼 수 있으며, 120초 이후에 온도 분포 및 연기 분포를 확인 하여보면 화재가 앞쪽으로 성장하기 보다 후면의 측면 벽을 타고 옆으로 더 빨리 전파되어 화재발생지점의 반대편의 천장부분의 온도가 약 380K인 것으로 나타났다. 화재가 천장 및 벽을 타고 전파되므로 화재발생 240초(화재최고온도는 약 1,100K)에서는 화재온도의 영향이 영화관 중간부분 천장(약 400K)부분까지 영향을 미치고 이후(앞부분)부분에서는 온도의 영향이 거의 미치지 못하는

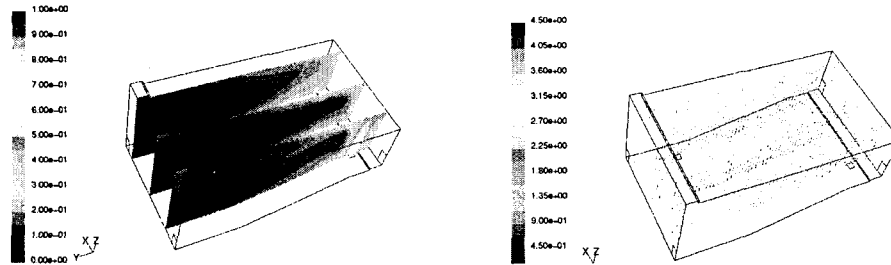


Fig. 6. 화재발생 420초 후의 연기분포 및 속도장(화재2의 경우).

것으로 나타났다. 화재발생 420초 이후부터는 방호구역 가운데 부근에까지 고온(약 500K)의 온도 영역이 생성되고 연기의 확산은 영화관2, 3층 부분까지 전파되는 것을 알 수 있다. 이 시간 이후에는 화재가 더욱 성장하여 600초일 때는 약 600K, 900초일 때는 약 650K까지 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 따라서 영화관 2, 3층에 있는 관람자는 화재발생 420초 전에는 피난을 하여야 한다.

## V. 결론

본 연구는 영화관에서 가상의 화재가 발생한 경우 화재확산에 대한 화재 시뮬레이션을 통하여 얻은 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

### 1) Case [1]인 경우

화재 발생 240초일 때 화재발생지점의 최고온도는 약 1,100K까지 상승하여 영화관 후면(천장부분의 온도 약400K)까지 화재 열이 확산되는 것으로 나타났다. 화재발생 240초 이후부터는 연기가 영화관의 천장을 타고 점점 뒤쪽으로 접근하기 시작하였다. 이 시간 때의 피난허용 높이 1.5M까지는 화재발생 중심부분을 제외하고는 기타부분에서는 피난에 거의 지장이 없는 것으로 나타났다. 화재발생 420초 이후에는 화재가 발생한 천장 지점으로부터 약 10M 부분까지 화재온도는 약 630K로 상승하는 것으로 나타났으며 영화관 1층 부분에는 연기가 거의 확산되기 때문에 1층에 있는 관람자는 피난이 완료되어야 한다. 600초 이후에는 모든 방호구간에 연기가 확산되는 것으로 나타났으며 방호공간의 온도는 약 550K 이상이 되며 화재발생 900초 이후부터는 더 이상의 화재성장이 없는 최성기 상태가 되는 것으로 나타났다.

### 2) Case [2]인 경우

Case.1과는 달리 영화관 후면에서 화재가 발생한 것으로 가정하였으므로 비교적 온도 및 연기분포가 더 빨리 성장되는 현상을 볼 수 있다. 화재발생 초기 단계인 60초(중심부 최고 온도는 약 800k)에서는 수직 벽을 타고 상층부로 빠르게 성장하는 현상을 볼 수 있으며, 120초 이후에 온도 분포 및 연기 분포현상이 앞쪽으로 성장하기 보다 후면의 측면 벽을 타



고 옆으로 더 빨리 전파되어 화재발생지점의 반대편의 천장부분의 온도가 약 380K인 것으로 나타났다. 화재가 천장 및 벽을 타고 전파되므로 화재발생 240초(화재최고온도는 약 1,100K)에서는 화재온도의 영향이 영화관 중간부분 천장(약 400K)부분까지 영향을 미치고 이후(앞부분)부분에서는 온도의 영향이 거의 미치지 못하는 것으로 나타났다. 화재발생 420초 이후부터는 방호구역 가운데 부근에까지 고온(약 500K)의 온도 영역이 생성되고 연기의 확산은 영화관2, 3층 부분까지 전파되는 것을 알 수 있다. 이 시간 이후에는 화재가 더욱 성장하여 600초일 때는 약 600K, 900초일 때는 약 650K까지 온도가 상승하는 것을 알 수 있다. 따라서 영화관 2, 3층에 있는 관람자는 화재발생 420초 전에는 피난을 하여야 한다.

### 참고문헌

- [1] D. W. Larson and R. Viskanta, "Transient Combined Laminar Free Convection and Radiation in a Rectangular Enclosure," J. Fluid Mech. Vol. 78, Part 1, pp. 65-85, (1976).
- [2] A. Draoui, F. Allard and C. Beghein, "Numerical Analysis of Heat Transfer by Natural Convection and Radiation in Participating Fluids Enclosed in Square Cavities," Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 20, pp. 253-261, (1991).
- [3] A. Yücel, S. Acharya and M .L. Williams, "Natural Convection and Radiation in a Square Enclosure," Numer. Heat Transfer, Part A, Vol. 15, pp. 261-278, (1989).
- [4] 손봉세, 한규익, 서석호, 이재효, 김태국, "발열체가 있는 열린 공간 내에서의 자연대류-복사열전달 현상에 관한 수치적 연구," 한국 화재·소방학회지 9권 1호(통권19호).
- [5] E. Papanicolaou and Y. Jaluria, "Computation of Turbulent Flow in Mixed Convection in a Cavity With a Localized Heat Source," Journal of Heat Transfer, Vol. 117, pp. 649-658 (1995).
- [6] Hoffmann, K. A., 1989, "Computational fluid dynamics for Engineering," A Publication of Engineering Education System(1989).
- [7] Peric, M. "A Finite Volume for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Mech. Eng. Dept., Imperial College, London, pp. 138-143, (1985).
- [8] Patankar, S. V "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," McGrawHill, New York.(1980).
- [9] D. P. DeWitt, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" John Wiley & Sons, Inc.(1990).