

경륜장 내부의 화재발생에 따른 열 및 연기 거동에 대한 수치적 연구 Numerical Simulation on the Heat and Smoke Flow Phenomena Due to the Fire in a Cyclodrome

박원희[†] · 김태국* · 손봉세**

Won-Hee Park[†] · Tae-Kuk Kim* · Bong-Sei Son**

중앙대학교 대학원, *중앙대학교 기계공학부,
**경원전문대학교 소방시스템과
(2003. 5. 2. 접수/2003. 8. 19. 채택)

요 약

본 논문에서는 경륜장 내부에서의 열전달과 연기성장 특성에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 화재발생 부분의 속도 및 온도는 플룸 모델로 구하여 졌으며, 난류유동 특성을 예측하기 위하여 표준 k-ε 난류모델이 사용되었다. 본 연구에서는 경륜장 내부에서 화재 발생에 따른 열적 거동과 연기 분포를 보았으며 이러한 결과는 화재방재 설계에 있어 유용한 자료로 이용될 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, numerical calculations are conducted to predict the characteristics of the heat transfer and smoke propagation in a cyclodrome. The gas flow velocity and temperature around the origin of the fire is obtained by using a plume model and the turbulent flow characteristics are considered by standard k-ε turbulent model. In this study, the transient thermal behavior can be used for designing fire detection of large rooms.

Keywords : Fire prevention, Cyclodrome, Smoke propagation, Heat transfer, Plume model

1. 서 론

화재 발생으로 생성되는 열, 연기, 다양한 화재가스 등의 유동 및 분포현상을 사전에 과학적으로 해석하므로 방호공간에 있는 불특정 다수인의 인명 및 재산피해를 최소화하고, 화재를 체계적으로 제어, 소화할 수 있는 최적의 방안으로 방재 선진국에서는 이미 CFD를 이용한 종합적인 소방대책을 수립하고 있는 실정이다. 우리나라의 경우는 본 분야에 대한 산업현장의 관심과 기술축적의 낙후로 아직까지는 초보단계를 벗어나지 못하는 현실이다. 앞으로 첨단산업사회에서 다양한 연소 매카니즘으로 발생하는 화재를 과학적으로 방어 및 소화하기 위해서는 CFD의 활용이 활발하게 이용될 것

로 예상된다. 특히 현대산업사회에는 여러 종류의 화재 위험요소가 우리 생활주변에 폭넓게 산재되어 있기 때문에 이에 대한 과학적인 예방대책이 마련되지 못할 경우 경제활동 전반에 엄청난 손실을 초래하게 될 것이다. 화재에서의 연소현상에 대한 이론적인 연구는 주로 밀폐공간내에서 화재발생 영역을 일정한 크기의 열원으로 가정한 후 부력으로 야기되는 유동장을 해석한 경우가 주를 이루고 있다.^{1,2)} 대공간인 아트리움에서의 화재를 복사를 이용하여 해석한 결과³⁾가 있으며, 컴퓨터를 이용하여 화재현상을 해석한 경우는 여러 참고 문헌에서 볼 수 있다.^{4,8)} 이렇게 컴퓨터를 이용 본 연구에서는 경륜장(돔경기장)에서 화재가 발생하였을 경우에 이에 따른 열 및 연기 유동을 수치적으로 해석하였으며, 이러한 가상화재에 의한 열 및 연기 유동의 결과는 대공간에서의 방재 설계에 도움을 줄 수 있을 것이다.

[†]E-mail: wonee@ms.cau.ac.kr

2. 본 문

2.1 지배방정식

연속방정식

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

운동량방정식

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

여기서, μ_e 는 유효점성계수, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도, u_i 는 속도, p 는 압력을 나타낸다. 유효점성계수는 $\mu_e = \mu + \mu_t$ 와 같이 정의되며, 여기서 μ 는 유체의 점성계수를 그리고 μ_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 ϵ 은 $\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)}$ 로 정의된다.

에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i h - \Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) \\ = -\nabla \cdot \mathbf{q}_r + \bar{\Phi} \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, 유효확산계수 $\Gamma_h = \mu_e / \sigma_h$ 이고 난류모델 상수 σ_h 는 Table 1에 주어졌다. 그리고, $\nabla \cdot \mathbf{q}_r$ 은 복사열 전달의 영향을 나타내는 생성항이며, $\bar{\Phi}$ 는 기계적 에너지의 점성에 의한 확산을 나타내는 항을 나타낸다.

Table 1. Standard k-ε Turbulent Model Coefficient

C_μ	0.09
σ_k	1.0
σ_h	0.7
σ_ϵ	1.3
$C_{\epsilon 1}$	1.44
$C_{\epsilon 2}$	1.92
$C_{\epsilon 3}$	1.44 for $\partial \rho / \partial x_i > 0$ 0.0 for $\partial \rho / \partial x_i < 0$
$C_{\epsilon 4}$	-0.33
χ	0.42

난류에너지 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i k - \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \\ = \mu_t \left\{ \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{g}{\sigma_h \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right\} \\ - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \chi \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \tag{4}$$

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

난류에너지 소멸율 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i \epsilon - \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ = C_{\epsilon 1} \epsilon \left\{ \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right. \\ \left. - \mu_t C_{\epsilon 3} \frac{g}{\sigma_h \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \chi \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\} \\ - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \tag{5}$$

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

화학종 방정식

$$\frac{\partial \rho Y_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho u_i Y_s - \rho D \frac{\partial Y_s}{\partial x_i} \right) = S \tag{6}$$

여기서, Y_s 는 화학종 s 의 질량분율을 나타내며 D 는 공기 에 혼합된 화학종 s 의 확산계수를 나타낸다.

2.2 Plume 모델

화재를 풀(pool)화재로 가정하였으며, 이 때 열발생율에 대한 무차원 Parameter는 다음과 같이 정의한다.⁹⁾

$$Q_D^* = \frac{Q}{\rho_\infty C_{p\infty} T_\infty (gD)^{1/2} D^2} \tag{7}$$

여기서, ρ_∞ , T_∞ , $C_{p\infty}$, g 는 각각 외부공기의 밀도 온도 및 정압비율을 나타내며, 그 값들은 각각 1.255 kg/m³, 293 K, 1.006 kJ/kgK를 갖는다. 또한 \dot{Q} , D 는 열발생율 과풀 화재의 특성길이를 나타낸다.

화염 높이는 화재 하중, 모양 및 대기조건 및 당량

비 등 많은 인자에 영향을 받으며 많은 연료의 경우 사용할 수 있는 화염 높이 Z_{fl} 은 열발생율과 폴의 특성 길이 D 에 의한 Q_D^* 이 1보다 큰 경우와 작은 경우에 따라 다음과 같이 구해진다.

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

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

화재 밑의 가상화염(virtual flame) 높이, ΔZ_f 는 Heskestad¹⁰⁾에 의해 다음 식으로 정의된다.

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

위에서 구해진 화염높이에 따른 질량 유동율, \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.

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

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

Plume 모델에 의하여 얻어진 온도와 속도를 이용하여 각 시간에 따른 온도와 속도를 화재발생 부분에 입구 조건으로 설정하여 해석을 시행하였다.

2.3 경륜장에서의 가상화재

화재발생 위치는 Fig. 1(1층 평면도)에 나타내었으며 1층의 무대 부분(북동쪽 1층 높이에 위치, 돛경륜장 중앙에서 북쪽으로 45 m 및 서쪽으로 약 43 m 떨어진 부분)에서 화재가 발생하였으며, 화재의 면적은 1 m²로서 한면의 길이가 1.0 m인 공간에서 화재하중은 3 MW의 FAST의 화재가 발생하는 것으로 가정하였다. 컴퓨터의 계산속도와 하드웨어적인 면을 고려하여 벽에서는 열전달이 없는 단열조건을 사용하였다. 유동매체는 공기이며, 초기의 온도 및 압력은 표준대기압 상태로 고려하였다. 화재현상으로 발생하는 열전달 및 유동장의 해석은 Transient state를 계산하였으며 난류유동장

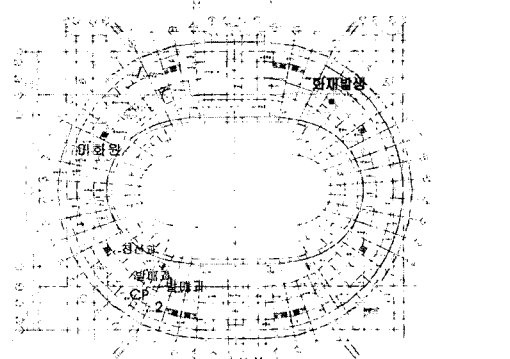


Fig. 1. The origination of fire in the pane figure of cyclodrome.

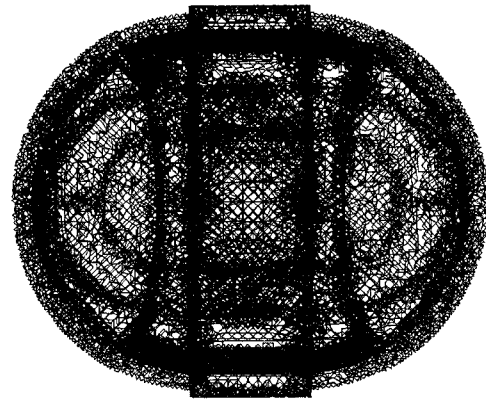


Fig. 2. The grid systems.

해석에는 표준 k-ε 난류모델을 적용하였다. 모든 전산 수치해석은 상용프로그램인 FLUENT를 이용하였다. 본 해석 시스템은 Fig. 1과 같으며 화재 시뮬레이션을 실시할 부분 격자는 Fig. 2와 같이 단순화한 기하학적 형상으로 격자를 형성하였다. 격자는 사면체 모양으로 생성시켰으며 여기서 사용된 격자 수는 약 21만개이다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3에서는 화재발생 후 60초, 120초, 180초, 300초, 420초, 600초, 900초, 1200초 이후의 화재단면을 포함한 가로축과 평행하는 면, 세로축과 평행하는 면의 온도분포를 나타내고 있다. Fig. 4에서는 화재발생 후 180초, 300초, 420초, 600초, 900초, 1200초 이후에서의 돛경륜장 지붕에서의 온도분포를 나타내고 있다. 화재발생 후 시간이 지날수록 지붕부분에 화재발

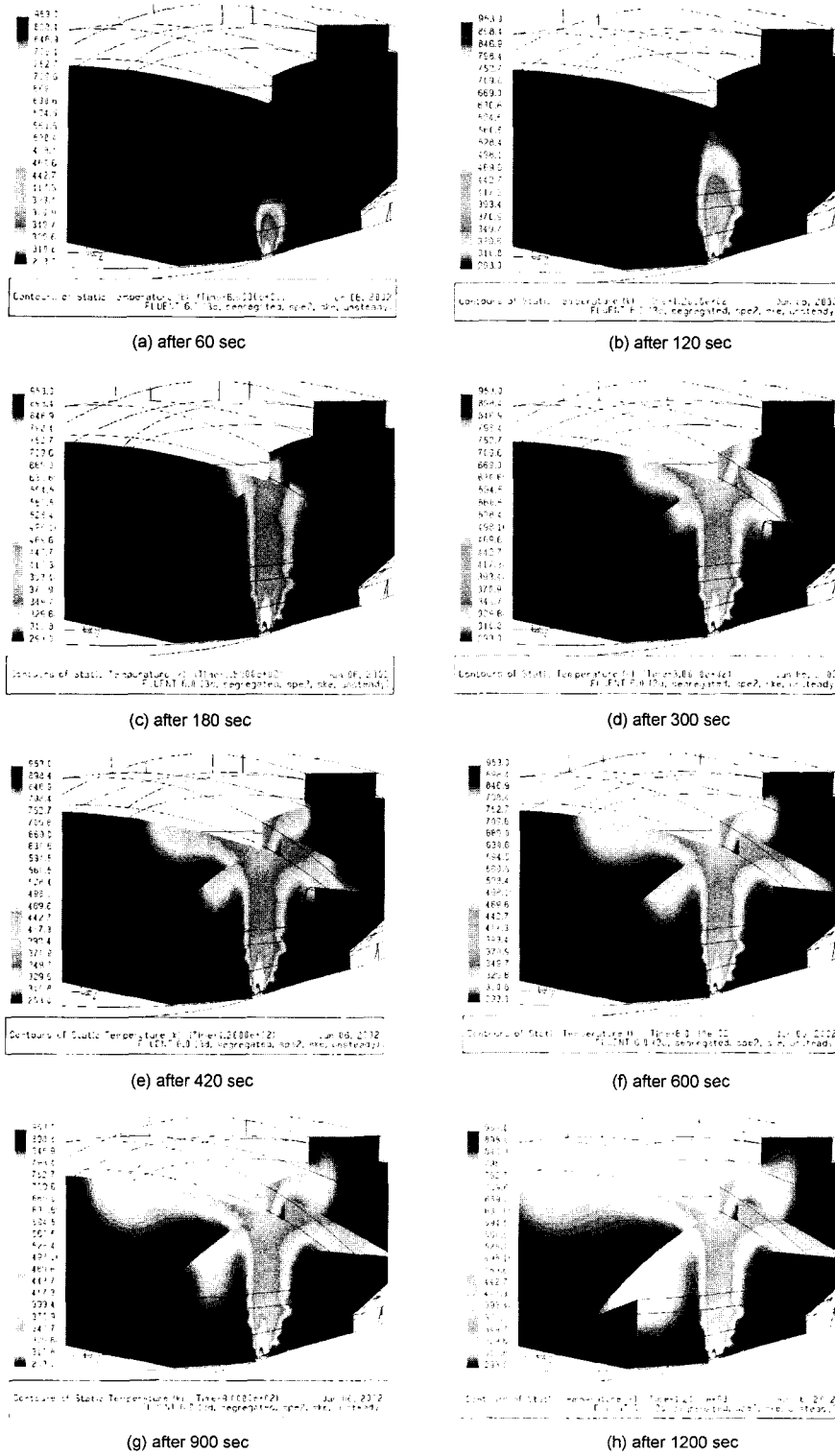


Fig. 3. The temperature distributions of the sections including fire sections for each time.

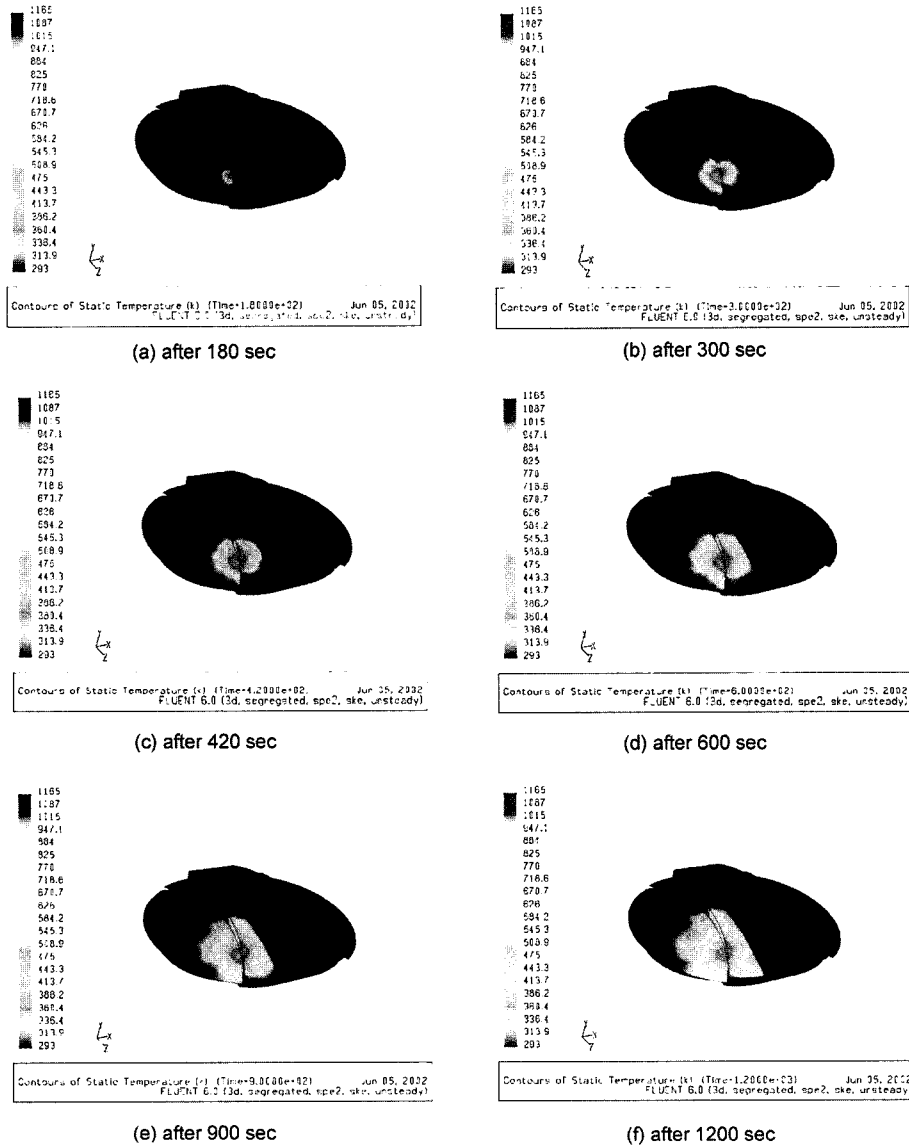


Fig. 4. The temperature distributions of the dome for each time.

생 부근을 중심으로 온도가 상승됨을 알 수 있다.

본 시뮬레이션에서 화재발생지에서의 최고온도는 953 K이다. 화재발생 120초 후에 화재의 뜨거운 열기가 지붕까지 영향을 미치기 시작하며, 화재발생 180초 이후에는 지붕을 타고 화재열이 확산되는 것을 볼 수 있다. 화재발생 300초 후에는 지붕에서 화재발생장소에서 생성된 고온의 화재열이 지붕을 타고 넓게 퍼져 가는 것을 확인할 수가 있다. 화재발생 400초 후에는 북쪽의 지붕으로 화재열이 확산되었으며, 600초 이후

의 시간 대에서는 고온의 화재열이 돔 경륜장의 중앙의 지붕까지 성장해 나가는 것을 확인할 수 있었다. 본 방호 구역은 높이가 높으며(약 50 m), 전체 부피도 매우 크므로 화재의 영향이 전체 방호구간에 미치지 못하는 것이다.

Fig. 5에서는 Fig. 3와 같은 단면들에서의 연기분포를 나타내었다. 그림에서 흰색으로 나타난 부분이 가상화재로 인한 연기이며, 각 시간에 따른 연기분포를 확인할 수가 있다. 화재 발생 420초 이후에 화재발생

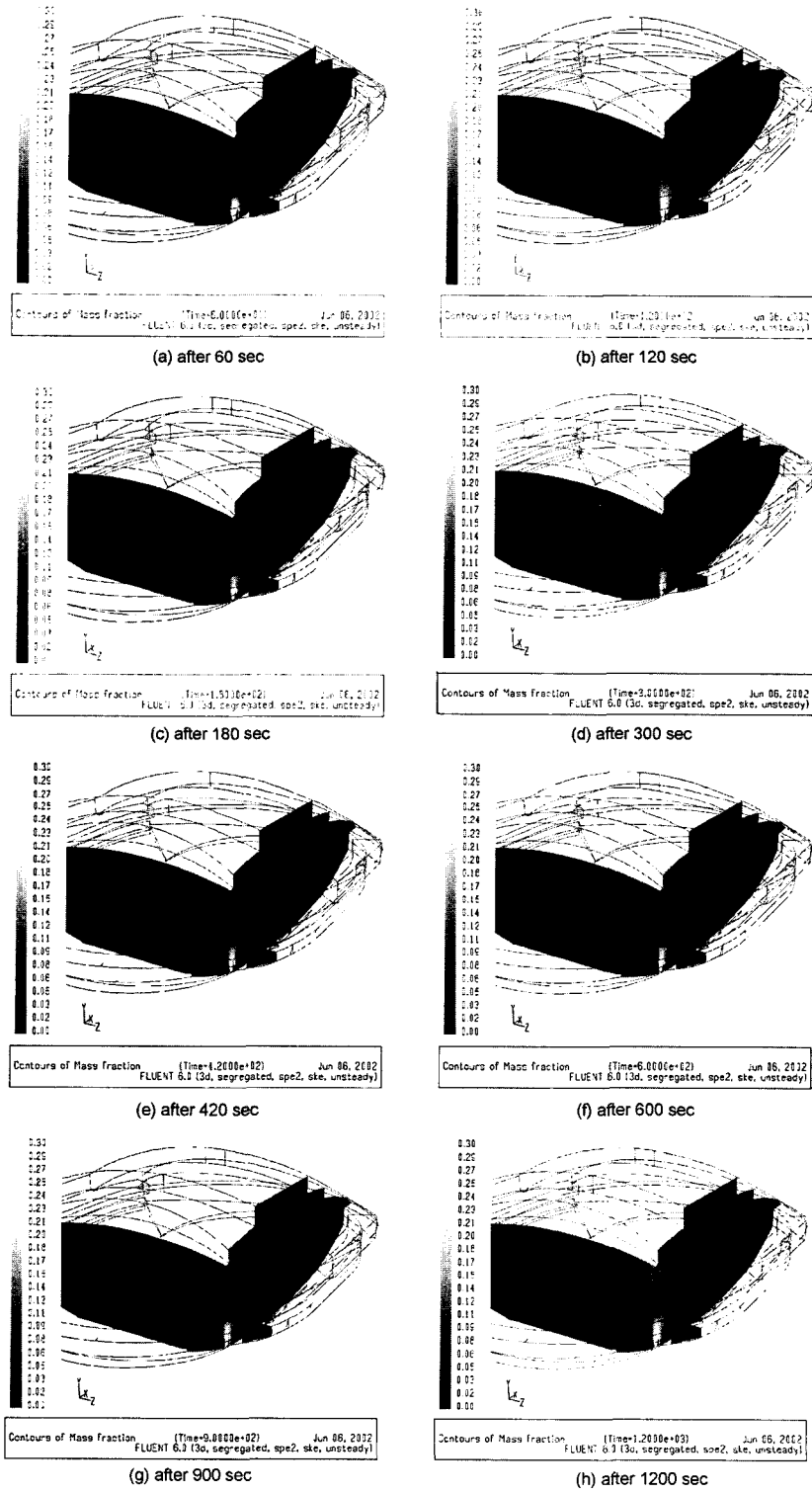


Fig. 5. The smoke distributions of the sections including fire sections for each time.

부근(북동쪽) 6층의 객석부분으로 연기가 하강하기 시작하는 것을 알 수 있다.

그러나 그 확산속도는 빠르지 않으며 화재발생 1200초가 지난 이후에 북쪽의 객석으로 연기가 하강되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 경륜장 내부에서 발생한 가상 화재 발생에 따른 열 및 연기 거동의 특성을 수치해석을 통하여 살펴보았다. 시뮬레이션의 결과 본 연구에서 고려된 돛경륜장과 같이 부피용적이 크며 지붕이 높은 구조물에서는 화재의 대표적인 피해라고 볼 수 있는 유해물질의 흡입으로 인한 피해는 거의 없을 것으로 사료되며 돛경륜장 내부에서의 화재에 대한 피난에는 별 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. J. G. Quintiere, "Perspective on Compartment Fire Growth", *Combustion and Science and Technology*, Vol. 39, pp.11-54(1984).
2. K. D. Steckler, J. G. Quintiere, and W. J. Rinkinen, "Flow Induced by Fire in a Compartment", *Nineteenth Symposium (Int.) on Combustion*, The Combustion Institute, pp.913-920(1993).
3. 정진용, 유홍선, 홍기배, "아트리움에서 화재 발생 시 복사가 고려된 연기거동에 대한 수치해석 연구", *한국화재소방학회지*, 제15권, pp.7-15(2001).
4. H. R. Baum, R. G. Rehm, and G. W. Mullholland, "Prediction of Heat and Smoke Movement in Enclosure Fires", *Fire Safety Journal*, Vol. 6, pp.193-201(1983).
5. L. Y. Cooper, "Smoke Movement in Rooms of Fire Involvement and Adjacent Spaces", *Fire Safety Journal*, Vol. 7, pp.33-46(1984).
6. 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).
7. 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).
8. 이지희, "고층 공동주택의 개구특성에 따른 화재 시 열·연기유동에 관한 연구", *한국화재소방학회지*, 제15권, pp.59-79(2001).
9. G. Cox, *Combustion Fundamentals of Fire*, ACADEMIC PRESS(1995).
10. G. Heskestad, "Virtual Origins of Fire Plumes", *Fire Safety Journal*, Vol. 6, pp.109-114(1983).