A-16

경륜장에서의 가상 화재시 화재성장 및 거동에 대한 연구

손봉세, 박원희*, 조종대**
*경원대학교 소방안전학과, *중앙대학교 대학원, **경기대학교 대학원*

Study on the Fire Growth and Propagation in the Cyclodrome

Bong-Sei Son, Won-Hee Park*, Jong-Dae Cho**
Kyung-Won College, Graduate Student,
**Graduate Student, Chung-Ang University, Professor, **Kyunggi University*

1. 서론

화재 발생으로 생성되는 열, 연기, 다양한 화재가스 등의 유동 및 분포현상을 사전에 공학적으로 해석하므로 방호공간에 있는 불특정 다수인의 인명 및 재산피해를 최소화하고, 화재를 체계적으로 제어, 소화 할 수 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 최단산업사회에서 다양한 연소 메카니즘으로 발생하는 화재를 과학적으로 방어 및 소화하기 위해서는 CFD의 활용이 활발하게 이용될 것으로 예상된다. 특히 현대 산업사회에는 여러 종류의 화재위험요소가 우리 생활주변에 폭넓게 산재되어 있기 때문에 이에 대한 과학적인 예방대책이 마련되지 못할 경우 경제활동 전반에 엄청난 손실을 초래하게 될 것이다. 이와 같은 결과는 최근 5년 간 우리나라에서 발생한 화재통계에서 알 수 있는 바와 같이 화재발생 건수는 연평균 약3만6천 여건으로 매년 약 10%씩 증가하고 있으며 이로 인한 화재피해는 GNP 증가율을 훨씬 넘어서는 것으로 나타나고 있다. 더욱 심각한 문제는 선진국에 비교하여 우리나라가 화재발생 건수 당 인명피해가 약 7~8배 되는 정도로 매우 높다는 것이다. 따라서 방호공간에 대한 정확한 방재계획 및 소방시설을 설치하지 않을 경우 화재로 인한 인명 및 재산피해를 줄 일 수 없을 것이다. 즉 방호공간에 대하여 사전에 가상화재시의 연기 및 다양한 유동가스의 흐름을 과학적으로 분석하여 소방대책을 수립하는데 반영한다면 무모한 인명 및 재산피해를 줄일 수 있을 것이다. 일부 우리나라에서도 대형 건축물 등 특수공간을 건설하거나 리모델링을 하는 경우에 소방대책을 수립하는데 반영하고 있는 실정이다. 또한 화재발생의 원인 및 분석을 하기 위해서는 실제 화재실험을 통하여 필요한 정보를 확보하는 것이 가장 바람직하겠지만 실험을 하는데는 엄청난 예산과 시간이 소요될 뿐 아니라 정보를 얻더라도 극히 제한적이기 때문에 선진국에서도 단순화한 실제화재실험에서 얻은 기초자료를 이용한 컴퓨터

시뮬레이션에 의한 화재확산이나 피난특성을 설계에 적극 활용하고 있다. 따라서 본 연구에서도 이상에서 언급한 각 방호공간의 화재유동 및 피난특성을 분석하므로 설계에 필요한 방재 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 본문

2.1. 지배방정식

연속방정식

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

운동량방정식

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

여기서, μ_e는 유효점성계수, g는 중력가속도, ρ는 밀도, u_i는 속도, p는 압력을 나타낸다. 유효점성계수는 $\mu_e = \mu + \mu_t$ 이와 같이 정의되며, 여기서 μ는 유체의 점성계수를 그리고 μ_t는 난류점성계수로서 $\mu_t = C_\mu \rho k^2/\varepsilon$ 와 같이 정의된다. 또한 난류운동에너지 k는 $k = \overline{u_i' u_i'}/2$ 이며, 난류에너지손실율 ε은 $\varepsilon = \frac{\mu}{\rho}\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\frac{\partial u_j'}{\partial x_i}\right)}$ 로 정의된다.

에너지방정식(Static Enthalpy)

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

여기서, 유효확산계수 $\Gamma_h = \mu_e/\sigma_h$ 이고 난류모델 상수 σ_h는 표 2.1에 주어져 있다. 그리고, $\nabla \cdot q_r$은 복사열전달의 영향을 나타내는 생성항이며, $\overline{\Phi}$는 기계적 에너지의 점성에 의한 확산을 나타내는 항을 나타낸다.

난류에너지 방정식

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k - \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) = \mu_t\left\{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{g}{\sigma_h}\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i}\right\} - \rho\varepsilon - \frac{2}{3}\left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho x\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{4}$$

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

난류에너지 소멸율 방정식

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon - \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\left\{\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \mu_t C_{\varepsilon 3}\frac{g}{\sigma_h}\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\left(\mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}+\rho x\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right\} - C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} - C_{\varepsilon 4}\rho\varepsilon\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (5)$$

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

Table 1. Standard $k-\varepsilon$ Turbulent Model Coefficient

C_μ	σ_k	σ_h	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	$C_{\varepsilon 4}$	κ (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

화학종 방정식

$$\frac{\partial \rho Y_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y - \rho D\frac{\partial Y_s}{\partial x_i}) = S \quad (6)$$

여기서, Y_s는 화학종 s의 질량분율을 나타내며 D는 공기에 혼합된 화학종 s의 확산계수를 나타낸다.

2.2. Plume 모델

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

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

여기서, ρ_∞, T_∞, $C_{p\infty}$, g는 각각 외부공기의 밀도 온도 및 정압비율을 나타내며, 그 값들은 각각 1.255 kg/m³, 293K, 1.006kJ/kgK을 갖는다. 또한 $\dot{Q}$, D는 열발생율과풀 화재의 특성길이를 나타낸다.

화염 높이는 화재 하중, 모양 및 대기조건 및 당량비 등 많은 인자에 영향을 받으며 많

은 연료의 경우 사용할 수 있는 화염 높이 Z_{fl}은 열발생율과 풀의 특성길이 D에 의한 Q_D^*이 1보다 큰 경우와 작은 경우에 따라 다음과 같이 구해진다.

$Q_D^* > 1.0$의 경우 $$\frac{Z_{fl}}{D} = 3.3\, Q_D^{*2/5} \tag{8a}$$

$Q_D^* < 1.0$의 경우 $$\frac{Z_{fl}}{D} = 3.3\, Q_D^{*2/3} \tag{8b}$$

화재 밑의 가상화염(virtual flame) 높이, ΔZ_f는 Heskestad에 의해 다음 식으로 정의된다.

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

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

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

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

$$T_{zf} = T_\infty + \frac{\dot{Q}}{c_P \dot{m}} \tag{11}$$

$$w = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \pi \frac{D^2}{4} c_P \Delta T} \tag{12}$$

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

2.3 경륜장에서의 가상화재

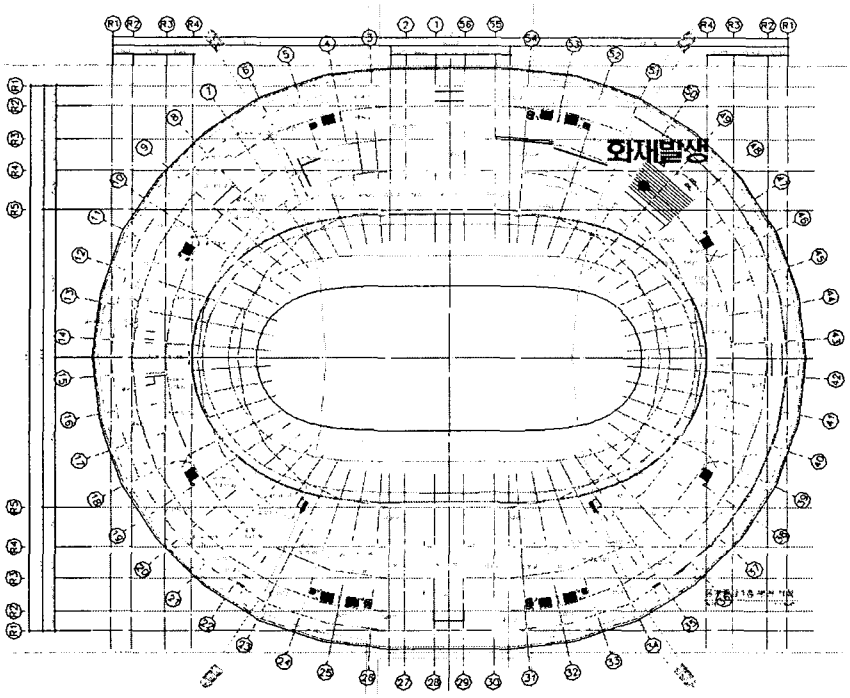


그림. 1. 돔 경륜장 화재발생 위치

화재발생 위치는 그림. 1(1층평면도)에 나타내었으며 1층의 무대 부분(북동쪽 1층 높이에 위치, 돔경륜장 중앙에서 북쪽으로 45m 및 서쪽으로 약 43m 떨어진 부분)에서 화재가 발생하였으며, 화재의 면적은 $1m^2$로서 한면의 길이가 1.0m인 공간에서 화재하중은 3MW의 화재가 발생하는 것으로 가정하였다. 컴퓨터의 계산속도와 하드웨어적인 면을 고려하여 벽에서는 열전달이 없는 단열조건을 사용하였다. 유동매체는 공기이며, 초기의 온도 및 압력은 표준대기압 상태로 고려하였다. 화재현상으로 발생되는 열전달 및 유동장의 해석은 Transient state를 계산하였으며 난류유동장 해석에는 표준 $k-\varepsilon$ 모델을 적용하였다. 본 해석 모델은 아래의 그림과 같으며 화재 시뮬레이션을 실시할 부분 격자는 그림. 2와 같이 단순화한 기하학적 형상으로 격자를 형성하였다. 격자는 사면체 모양으로 생성시켰으며 여기서 사용된 격자 수는 약 21만개이다.

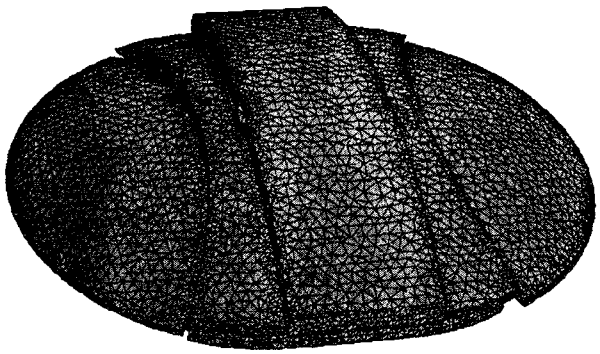
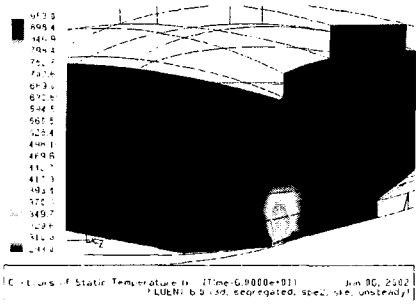


그림. 2 해석 시스템 및 계산격자

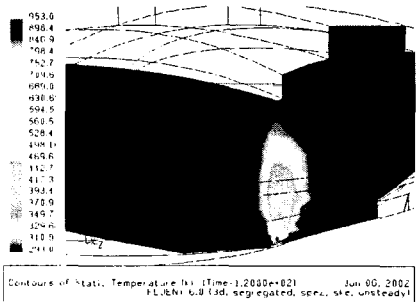
3. 결과 및 고찰

그림. 3에서는 화재발생 후 60초, 120초, 180초, 300초, 420초, 600초, 900초, 1200초 이후의 화재단면을 포함한 가로축과 평행하는 면, 세로축과 평행하는 면의 온도분포를 나타내고 있다. 그림. 5 에서는 세로축(단축)을 포함하는 단면에서의 온도본포를 나타내고 있으며, 그림. 4-그림. 5에서 시간에 따른 화재 성장을 확인할 수 있었다. 또한 그림.6에서는 그림. 5에서와 같은 단면에서의 시간에 따른 유동장을 나타내었다. 본 시뮬레이션에서 화재발생지에서의 최고온도는 953K이다. 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 펴져가는 것을 확인할 수가 있다. 화재발생 400초 후에는 북쪽의 지붕으로 화재열이 확산되었으며, 600초 이후의 시간 대에서는 고온의 화재열이 돔 경륜장의 중앙의 지붕까지 성장해 나가는 것을 확인할 수 있었다. 본 방호 구역은 높이가 높으며(약 50m), 전체 부피도 매우 크므로(약 60,000㎥) 화재의 영향이 전체 방호구간에 미치지는 못한다.

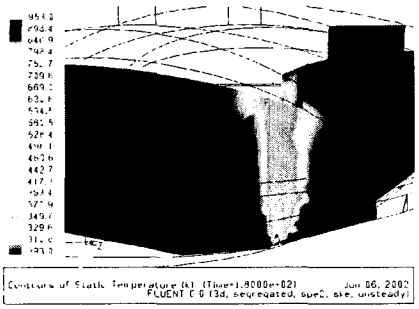
그림. 4에서는 화재발생 후 180초, 300초, 420초, 600초, 900초, 1200초 이후에서의 돔 경륜장 지붕에서의 온도분포를 나타내고 있다. 화재발생 후 시간이 지날 수록 지붕부분에 화재발생 부근을 중심으로 온도가 상승됨을 알 수 있다. 화재가 발생한 후 지붕에 위치한 환기구가 열려서 고온의 화재기류가 외부로 유출되므로 900초 이후에 고온의 온도영역이 그다지 확장되지 않는 것을 확인할 수가 있었다.



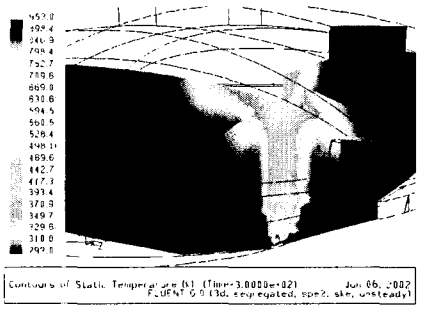
(a) 60초 후



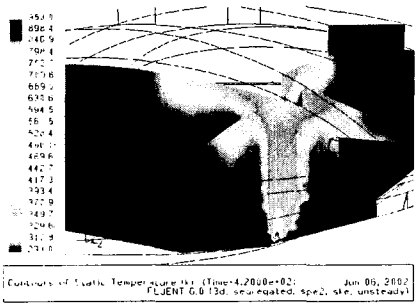
(b) 120초 후



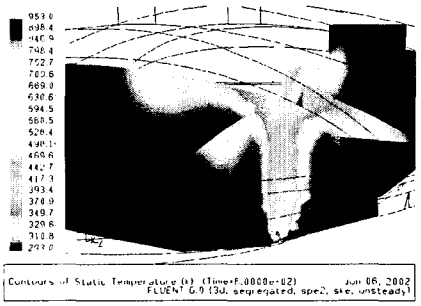
(c) 180초 후



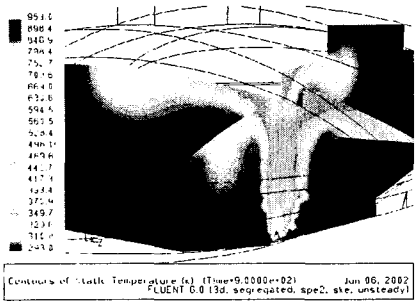
(d) 300초 후



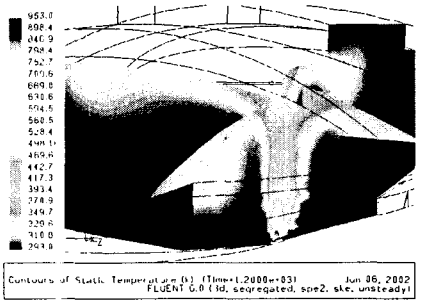
(e) 420초 후



(f) 600초 후



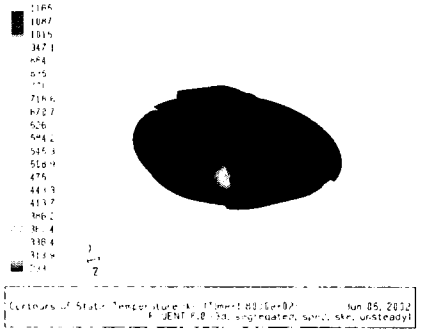
(g) 900초 후



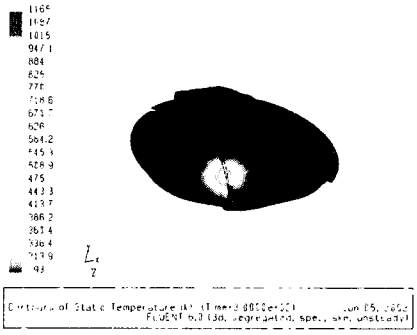
(h) 1200초 후

그림. 3 각 시간 대에 따른 화재단면을 포함한 단면에서의 온도분포

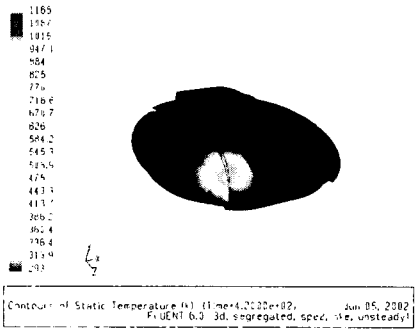
그림. 5에서는 그림. 4와 같은 단면들에서의 연기분포를 나타내었다. 그림에서 흰색으로 나타낸 부분이 가장화재로 인한 연기이며, 각 시간에 따른 연기분포를 확인할 수가 있다. 화재 발생 420초 이후에 화재발생 부근(북동쪽) 6층의 객석부분으로 연기가 하강하기 시작하는 것을 알 수 있다. 그러나 그 확산속도는 빠르지 않으며 화재발생 1200초가 지난 이후에 북쪽의 객석으로 연기가 하강되는 것을 확인할 수 있었다.



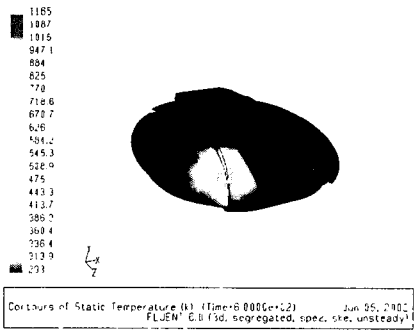
(a)180초 후



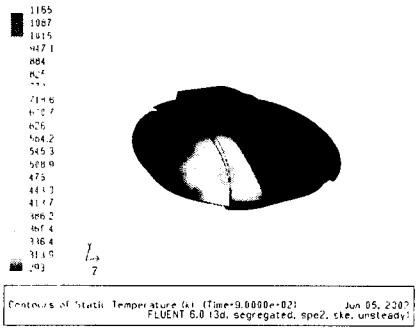
(b) 300초 후



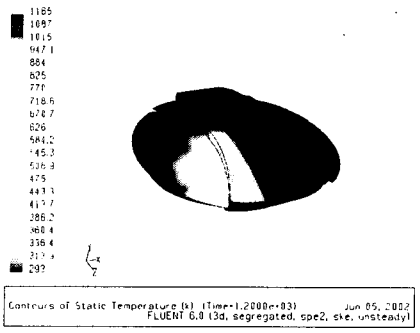
(c) 420초 후



(e) 600초 후

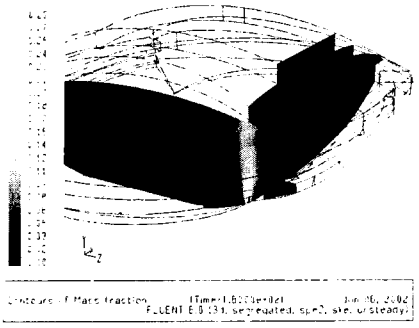


(f) 900초 후

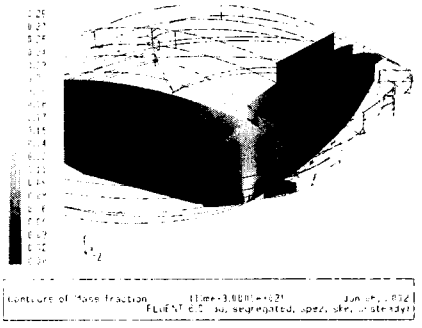


(g) 1200초 후

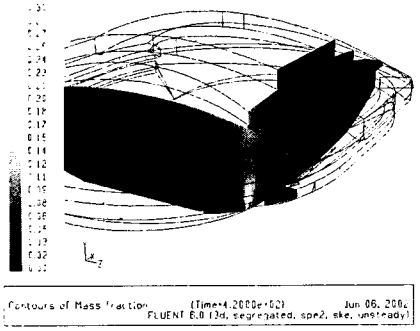
그림. 4 각 시간 대에 따른 지붕에서의 온도분포



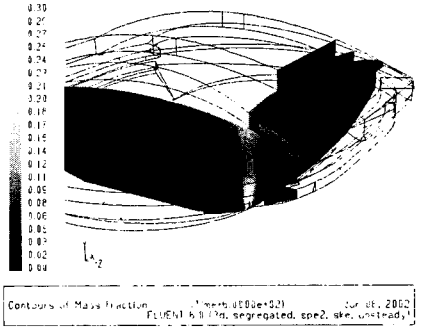
(a) 180초 후



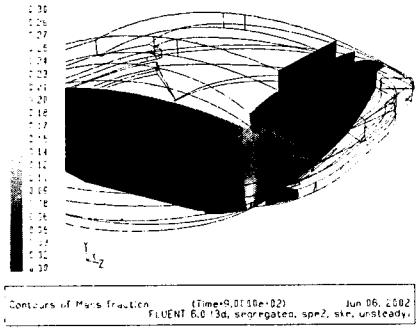
(b) 300초 후



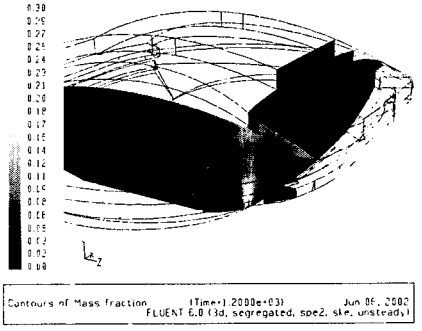
(c) 420초 후



(d) 600초 후



(e) 900초 후



(f) 1200초 후

그림. 5 각 시간 대에 따른 단축 화재단면을 포함한 단면에서의 연기분포

본 시뮬레이션의 결과 돔경륜장과 같이 부피용적이 크며 지붕이 높은 구조물에서는 화재의 대표적인 피해라고 볼 수 있는 유해물질의 흡입으로 인한 피해는 거의 없을 것으로 사료되며 돔경륜장 내부에서의 화재에 대한 피난에는 별 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

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