

특수 방호공간에서 가상화재의 발생으로 인한
화재거동에 관한 수치적 연구
A Numerical Study on the Fire Behavior
Phenomena in a Special Fire Protection Compartment

김 태 국* · 손 봉 세**
Kim, Tae-Kuk · Son, Bong-sei

Abstract

The objective of the present study is to predict the characteristics of the fire and smoke propagations in a clean room. Numerical calculations have been performed by using the finite volume method to obtain temperature and velocity distributions in the clean room. In order to account for the turbulent flow characteristics, the standard $k-\epsilon$ model is used. From this study, it was found that the fire propagation could be fully developed only after 150 seconds when the ventilation system in the clean room was off. And the smoke mass fraction showed a similar distribution as the gas temperature. Since the simulated fire was proceeded up to 20~30 % of the room within 60 seconds, it could be recommended that the occupants should be evacuated from the room within 30 seconds.

KeyWords : Fire Prevention, Clean Room, Smoke, Fire behavior, Numerical Study, Flow Phenomena

요 지

본 연구의 목적은 청정실 내부에서 가상의 화재가 발생할 경우 화재 확산 및 연기의 전파 현상을 예측하기 위하여 실시하였다. 청정실 내의 화재로 인한 온도 및 속도분포의 해석은 유한체적법을 이용한 수치적 방법으로 해석하였으며 난류유동장의 계산은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하여 실시하였다. 본 연구 결과는 화재발생 후 150초가 지난 후에는 화재가 완전히 성장한 것으로 나타났으며 이 경우 환기장치는 화재가 완전히 성장한 후에 정지하는 것으로 가정하였다. 연기의 질량분율은 온도 분포와 거의 유사한 것으로 나타났다. 따라서 청정실에서 화재가 발생할 경우 화재 성장이 60초 내에 전공간의 20~30%까지 확산되므로 내부에 있는 사람은 30초 이내에 대피하는 것이 바람직하다.

* 중앙대학교 기계공학과 교수

** 정회원, 경원전문대학 소방학과 교수

1. 서론

첨단장비를 생산하는 공간은 다른 생산공정에 비하여 특수한 환경조건을 필요로 하기 때문에 화재가 발생하는 경우 어떠한 양상으로 화재가 확산 및 성장되는지를 예측하기가 매우 어렵기 때문에 소방 안전대책을 수립하는데 있어서도 많은 제한을 받게 된다. 특히 반도체 제조공정에서 사용하는 가연성 물질들은 다양할 뿐만 아니라 연소열도 높기 때문에 정확한 화재양상을 해석하는 것이 매우 복잡한 문제라 할 수 있다. 따라서 청정실에서 사용하는 가연성 액체나 자연발화성 가스로 인한 가상의 화재가 발생할 경우 화재성상을 예측함으로써 효과적인 피난과 소화대책을 수립할 수가 있다. 특히 청정실은 다른 가연성 물질과의 반응으로 2차적인 피해를 가져 올 수 있기 때문에 사전에 충분한 화재 안전대책을 수립하는 것이 필요하다. 청정실에 설치되어 있는 장비와 설비는 고가이기 때문에 한번의 사고로도 대형 손실의 위험성이 있고 막대한 복구비 및 기간의 소요로 인한 간접피해를 고려한다면 엄청난 손실을 보게 된다. 청정실은 가장 중요한 공정라인으로서 적절한 소방훈련이 불가능하기 때문에 화재에 대한 과학적인 안전대책을 수립하지 못할 경우 생산 및 경영에 심각한 타격을 받게 될 것이다. 특히 화재확산에 대한 분석은 실제 화재실험을 통하여 필요한 정보를 확보하는 것이 가장 바람직하지만 많은 연구비와 시간이 소요되는데 비하여 필요한 정보를 확보하는 것이 매우 미약하므로 최근에는 컴퓨터를 이용한 화재성장을 분석하는 것이 활발하게 진행되고 있는 추세이다.

2. 이론적 배경

2.1 해석모델

본 연구에서는 제조 공정 중에서도 Clean Room에서 사용하는 가스가 누출되었을 때 발생한 화재에 관한 확산현상을 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 해석하였다. Clean Room은 고정밀도 제품을 생산하는 공정이기 때문에 최상의 청정상태를 유지하기 위하여 천장상부에서 청정 공기를 공급하고 바닥으로 공기를 배출할 수 있는 구조로 되어있다. 하지만 화재가 발생하면 전원공급의 차단으로 공조시설이 작동되지 않는 경우가 발생하고 비상전원이 작동하더라도 배기만이 작동되는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 화재발생 후 150초까지는 정상적으로 공조설비가 작동되고 화재발생 150초가 지난 후에는 상용전원의 공급이 차단되는 조건으로 가정하여 화재 시뮬레이션을 실시하고자 하며, 청정실 내부의 하단부분에서 가스 누출로 인하여 화재가 발생할 경우에 대한 Fire Simulation을 실시한다. 화재하중은 일반 화재하중 보다 높은 3MW로 가정하였고 화재성장은 75초까지 성장하여 Fully Develop된 상태로 가정하였다. 이러한 가상화재에 대한 Clean Room 내부의 온도분포, 연기유동 및 유동속도를 시간에 따라 3차원적으로 해석하였다. Fig.1은 가상화재 시뮬레이션의 대상인 Clean Room의 내부 구조에 대한 개략적인 형상을 나타내고 있으며, 화재발생위치는 청정실의 중앙부분으로 Fig.1에 붉은 색으로 표시하였다.

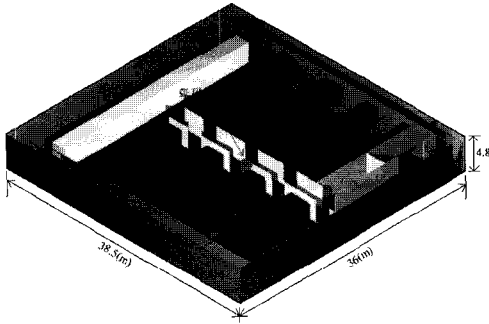


Fig.1. The schematic drawing of the clean room

2.2 지배방정식

화재현상을 해석하는데 고려하여야하는 스칼라량의 보존방정식들을 시간 평균하였을 경우 다음과 같은 형태의 시간평균방정식들로 정리될 수가 있다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} u_i - \mu_e \nabla u_i) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_e \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g \end{aligned} \quad (2.2)$$

여기서, μ_e 는 유효점성계수, g 는 중력가속도, ρ 는 밀도, u_i 는 속도, p 는 압력을 나타낸다. 유효점성계수는 $\mu_e = \mu + \mu_t$ 이와 같이 정의되며, 여기서 μ 는 유체의 점성계수를 그리고 μ_t 는 난류점성계수로서 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ 와 같이 정의된다. 또한 난류

운동에너지 k 는 $k = \overline{u_i' u_i'} / 2$ 이며, 난류에너지손실을 ε 은 $\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)$ 로 정의된다.

에너지방정식(Static Enthalpy)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h - \Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x_i}) \\ &= -\nabla \cdot q_r + \overline{\Phi} \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서, 유효확산계수 $\Gamma_h = \mu_e / \sigma_h$ 이고 난류모델 상수 σ_h 는 Table 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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k - \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i}) \\ &= \mu_t \left\{ \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{g}{\sigma_h} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right\} \\ & - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho x \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2.4)$$

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

난류에너지 소멸률 방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon - \Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) \\ &= C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left\{ \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right\} \end{aligned}$$

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

C_μ	σ_k	σ_h	σ_ϵ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	$C_{\epsilon 4}$	κ (Von Karman 상수)
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

$$\begin{aligned}
 & -\mu_t C_{\epsilon 3} \frac{g}{\sigma_h} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \kappa \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \\
 & - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

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

화학종 방정식

$$\frac{\partial \rho Y_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y - \rho D \frac{\partial Y_s}{\partial x_i}) = S \quad (2.3)$$

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

3. 수치해석

3.1 격자계의 생성 및 수치해석 방법

수치해석을 위하여 생성된 격자는 Fig.2와 같으며 화재시물레이션을 실시할 공간의 크기는 가로, 세로 및 높이가 각각 $36(m) \times 38.5(m) \times 4.8(m)$ 를 단순화한 기하학적 형상으로 각각의 길이 방향에 대하여 등간격의 격자를 생성하였으며, 총 격자수는 약 14만개 정도이다. 벽과 기타 격막은 단열조건을 적용

하였으며 화재강도는 Ultra Fast로 화재가 성장하는 것으로 가정하여 화재발생 후 75초가 되면 3MW로 완전히 성장하는 것으로 하였다. 화재발생 150초까지는 공기가 천장 상부 전체에서 균일하게 공급되고 같은 조건으로 바닥에서도 공기가 배기되는 것으로 하였다. 또한 화재발생 150초 후에는 청정실의 공조 설비가 정지되는 것으로 가정하였다. 유동매체는 공기이며, 초기의 온도 및 압력은 표준 대기압 상태로 고려하였다. 화재현상으로 발생하는 열전달 및 유동장의 해석은 PISO 알고리즘을 이용하여 과도 현상을 계산하였으며 난류유동장 해석에는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 적용하였다.

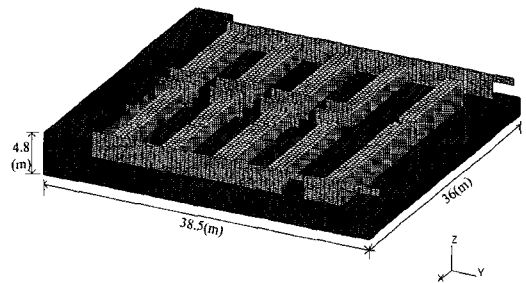
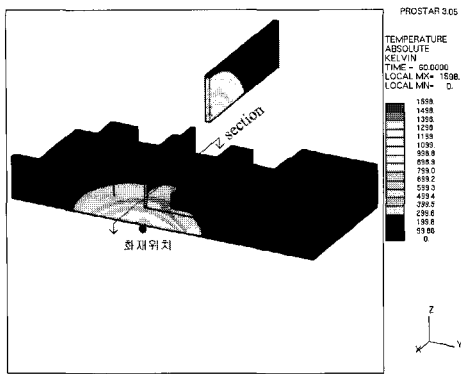


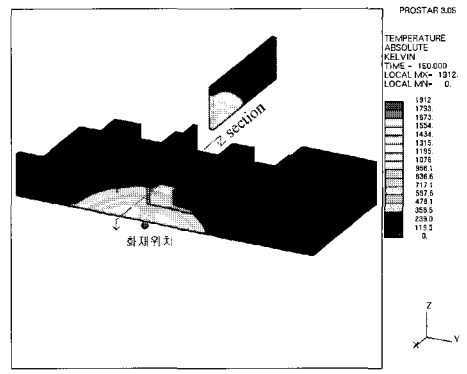
Fig.2 Grid system considered for numerical analysis.

4. 결과 및 고찰

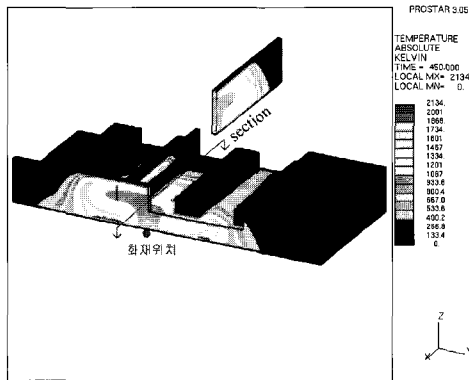
수치해석 결과 얻은 온도분포는 Fig.3에 보여주고 있으며 화재발생위치에서 가스가



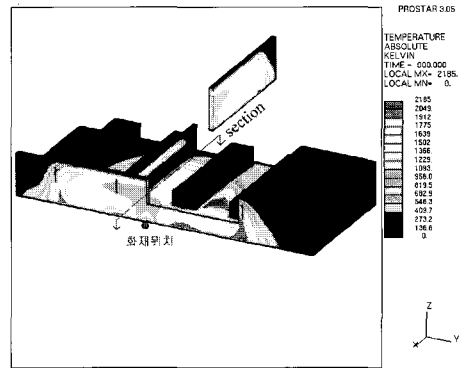
(a) After 60 sec



(b) After 150 sec

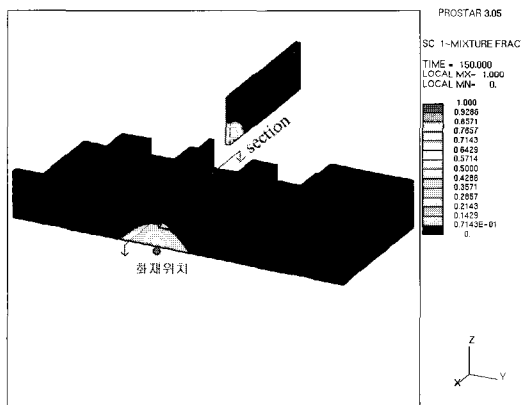


(c) After 450 sec

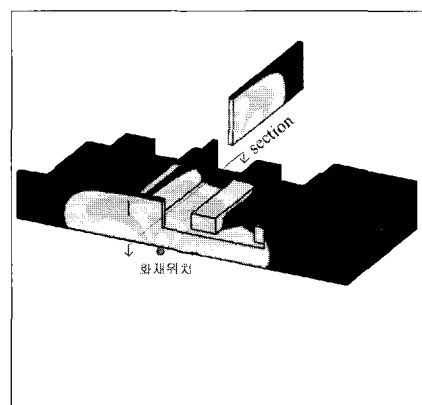


(d) After 900 sec

Fig.3. Temperature distributions at various time steps.

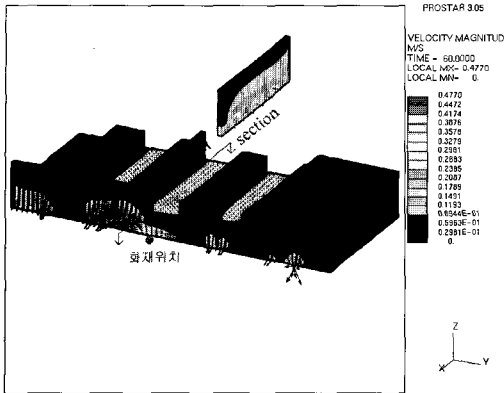


(a) After 150 sec

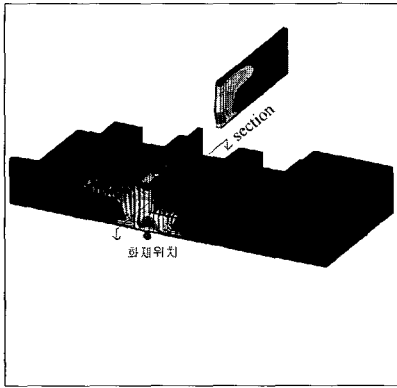


(b) After 900 sec

Fig.4. The smoke mass fraction distributions.



(a) After 60 sec



(b) After 900 sec

Fig.5. Velocity distributions at various time steps.

누출되어 주위로 확산되면서 연소가 이루어지며 60초가 경과되었을 때의 최고 화재온도는 약 1600K 정도이고 확산범위는 좌·우로 약 6M, 수직방향으로는 약 3M까지 확산된 것으로 나타났다.

화재초기(Fig.3(a))에는 급기로 인한 부력의 영향이 약하여 천장부로 상승하기보다는 좌·우로 확산되는 경향이 크다. 3MW로 성장하는 동안 화염부분의 온도는 약 1700K까지 상승하는 것으로 나타났다. Fig.3(c)는

급기와 배기가 정지된 150초 이후부터 화재 확산은 상당히 빠르게 청정실 전체로 전파되는 것을 보여준다. Fig.3(d)는 화재발생 900초 후의 온도분포로 온도가 2200K까지 상승하여 실내 전체에 걸쳐 화재가 확산되는 것으로 나타났다.

연기의 질량분율 분포도는 Fig.4에 나타낸 바와 같이 온도분포와 비슷한 경향을 보이고 있으나 연기의 확산범위가 다소 약한 것으로 나타났으며 급기와 배기가 정지되는 150초 이후부터는 상대적으로 빠르게 연기가 확산되는 것을 볼 수 있다.

해석결과 얻은 속도분포는 Fig.5에 나타나고 있으며 Fig.5(a)에서와 같이 급기 및 배기가 작동하는 동안에는 화재가 유동장에 별 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Fig.5(b)에서는 공기의 유동이 화재발생부분에서 상승한 후 천장을 타고 좌우로 이동하는 것을 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 특수 방호공간인 청정실에서 가상의 화재가 발생한 경우를 고려한 화재거동에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였으며, 해석한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초기화재의 최고온도는 약 1600K이고 거동범위는 수평방향 약 6M, 수직방향으로 약 3M까지 확산된 것으로 나타났다.

2) 급기와 배기가 작동되는 동안은 부력의 영향이 약하기 때문에 천장 상부로 상승하기보다는 좌우로 확산되는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 화재하중이 3MW로 성장되는 75초에서는 화염부분에서 온도가 1700K까지

상승하였으며 15분 후의 방호공간의 최고 온도는 2200K로 실 전체에 걸쳐 화재가 확산되는 현상을 보였다.

3) 일반화재에서와는 다르게 최고 온도점이 화재발생부분에서 나타나지 않는 이유는 가스의 연소에 필요한 산소량이 상대적으로 부족하기 때문임을 알 수 있다.

4) 연기의 질량분율 분포는 온도분포와 비슷한 경향을 보이고 있으나 연기의 확산범위가 다소 좁은 것으로 나타났으며 급기와 배기 장치가 정지된 후에는 연기 및 화재성장이 빠르게 확산되었다.

5) 화재발생 75초 후부터는 화재온도가 높기 때문에 피난은 화재 발생 후 30초 이내에 대피하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] D.W. Larson and R.Viskanta, 1976, "Transient Combined Laminar Free Convection 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 자연 대류-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] K.A. Hoffmann, 1989, "Computational fluid dynamics for Engineering.", A Publication of Engineering Education System.
- [7] M. Peric, 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] S.V. Patankar, 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGrawHill, New York.