

반도체 공장의 청정실 화재확산현상에 대한 수치해석적 연구

민동호*, 손봉세**

중앙대학교 대학원*, 경원전문대학 소방학과**

A Numerical Study on the Fire Propagation Phenomena in The Clean Room of the Semi-conductor Factory

Dong-ho Min*, Bong-sei Son**

Chungang Univ.*, Kyungwon College**

1. 서론

반도체 산업의 기술은 매우 빠르게 변화하기 때문에 방재안전대책을 수립하는데 있어서도 많은 제한과 어려움을 겪고 있는 실정이다. 특히 반도체 제조공정에서 사용되는 가연성 물질이 다양할 뿐만 아니라 연소효율도 높기 때문에 정확한 화재양상을 해석하는 것이 매우 복잡한 문제라 할 수 있다. 따라서 공정에서 사용하는 가연성 액체 및 자연발화성 가스로 인한 화재는 소화와 구조 등 필요한 방재활동이 어렵고 다른 물질과의 반응으로 2차적인 피해를 가져 올 수 있기 때문에 사전에 충분한 화재안전대책을 수립하는 것이 필요하다. 특히 반도체 공정에는 고가의 설비와 장치가 설치되어 있어 한번의 사고로도 대형 손실의 위험성이 있으며 공정상 know-how로 막대한 복구비와 기간으로 인한 간접피해를 고려한다면 화재안전은 더욱 중요하다. 반도체 공정 중에서도 가장 중요한 공정라인으로서 소방훈련이 불가능한 Clean Room 화재에 대한 적절한 안전대책을 수립하지 못할 경우 경영에 심각한 타격을 받게 될 것이다. 화재분석은 여러 차례의 실제 화재실험을 통하여 필요한 정보를 확보하기는 것이 가장 바람직하지만 많은 연구비와 시간이 소요되기 때문에 최근에는 컴퓨터를 이용하여 화재성상을 연구하는 것이 일반적인 추세이다. 따라서 본 연구에서는 반도체 공정에서 가장 중요한 공정라인 청정실의 내부공간에서 가상 화재가 발생하였을 경우 온도분포와 속도분포, 연기의 분포상태를 파악하여 특수 방호공간의 방재안전대책에 필요한 기초자료를 제공하는데 있다.

2. 이론적 배경**2.1 해석모델**

본 연구에서는 반도체 공장의 Clean Room에서 사용하는 가스가 누출되었을 때 발생하는 화재 확산현상을 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 해석하였다. Clean Room은 고정밀도 제품을 생산하는 공정라인이기 때문에 청정상태를 유지하도록 천장에서 깨끗한 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

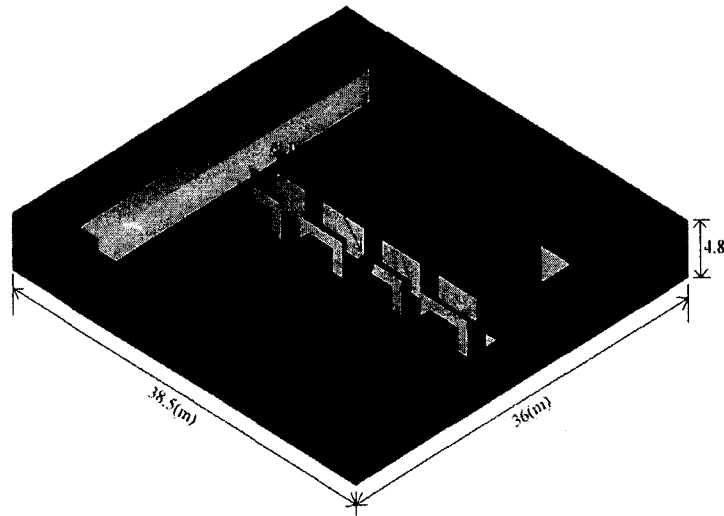


Fig. 1. The schematic of clean room

실시하였다. 또한 제조실 내부에서 화재가 발생할 경우에 대한 Fire Simulation은 가스누출 사고로 인하여 화재가 발생하는 것으로 가정하였고, 화재화중은 3MW로서 화재발생 75초까지 선형적으로 성장하여 Fully Development 상태로 가정하였다. 이러한 가상화재에 대한 Clean Room 내부의 온도분포, 연기유동 및 유동속도를 시간에 따라 3차원으로 해석하였다. Fig.1은 가상화재 시뮬레이션의 대상인 Clean Room의 내부 구조에 대한 개략적인 형상이다. 화재위치는 청정실의 중앙부분으로 Fig.1에 붉은 색으로 표시하였다.

2.2 지배방정식

화재현상을 해석에 필요한 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 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 와 같이 정의된다. 또한 난류운동에너지 k 는 $k = \overline{u_i' u_i'} / 2$ 이며, 난류에너지손실을 ϵ 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)

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h - \Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x_i}) = -\nabla \cdot q_r + \bar{\Phi} \quad (2.3)$$

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

· 난류에너지 방정식

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

여기서, 난류에너지의 유효확산계수는 $\Gamma_k = \mu_e / \sigma_k$ 이며, σ_k 는 Table 2.1에 주어진 난류모델상수이다.

· 난류에너지 소멸률 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon - \Gamma_\epsilon \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i}) \\ = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left\{ \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right. \\ \left. - \mu_t C_{\epsilon 3} \frac{g}{\sigma_h} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \chi \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right\} \\ - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - C_{\epsilon 4} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서, 난류에너지소멸율의 난류확산계수는 $\Gamma_\epsilon = \mu_e / \sigma_\epsilon$ 과 같으며, 난류모델상수 σ_ϵ 은 Table 2.1에 주어져 있다.

Table 2.1. Standard $k-\epsilon$ Turbulent Model Coefficient

C_μ	σ_k	σ_h	σ_ϵ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	$C_{\epsilon 3}$	$C_{\epsilon 4}$	χ (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

· 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

본 해석 모델은 Fig.2와 같으며 화재 시뮬레이션을 실시할 공간의 실제크기는 가로, 세로 및 높이가 각각 $36(m) \times 38.5(m) \times 4.8(m)$ 로 단순화한 기하학적 형상으로 각각의 길이 방향에 대하여 등간격의 격자를 생성하였으며, 총 격자수는 약 14만개정도이다.

벽과 기타 격막은 단일조건을 적용하였으며 화재강도는 Ultra Fast로 화재가 성장하는 것으로 화재발생 후 75초가 되면 3MW로 완전히 성장하는 것으로 하였다. 화재 발생 2분 30초까지는 공기가 천장면의 전체에서 균일하게 공급되고 같은 조건으로 바닥에서도 공기가 배기가 되는 것으로 하였다. 또한 화재발생 150초 후에는 청정실의 공조설비가 정지되는 것으로 하였다. 유동매체는 공기이며, 초기의 온도 및 압력은 표준대기압 상태로 고려하였다. 화재현상으로 발생하는 열전달 및 유동장의 해석은 PISO 알고리즘을 이용하여 Transient State를 계산하였으며 난류유동장 해석에는 표준 $k-\epsilon$ 을 적용하였다.

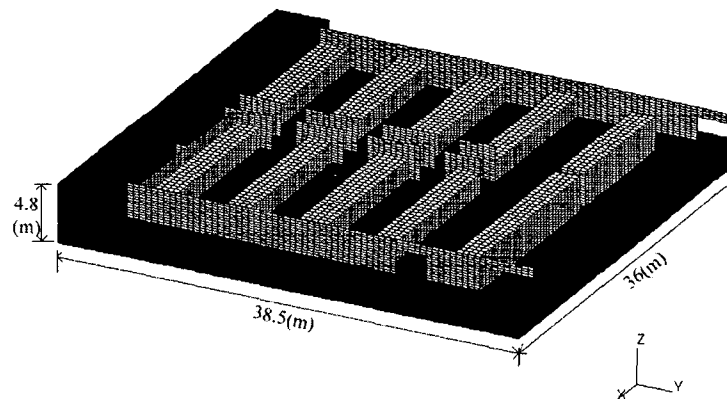


Fig. 2. Grid system considered for numerical analysis

4. 결과 및 고찰

온도분포는 Fig.3에서 보여주고 있으며 화재발생위치에서 가스가 누출되어 주위로 확산되면서 연소가 이루어지며 60초가 경과되었을 때 최고 화재온도는 약 1600 K 정도이고 확산범위는 좌. 우로 약 6M, 수직방향으로는 약 3까지 확산된 것으로 나타났다.

화재초기(Fig.3(a))에는 급기와 배기로 인하여 부력의 영향이 약하기 때문에 천장 부로 상승하기보다는 좌우로 확산되는 경향이 크다. 화재하중이 3MW로 성장되는 75초의 경우에 화염부분에서 1700K의 온도까지 상승하는 것으로 나타났다.

Fig.3(c)는 급기와 배기가 정지된 150초 이후에는 화재확산은 상당히 빠르게 실

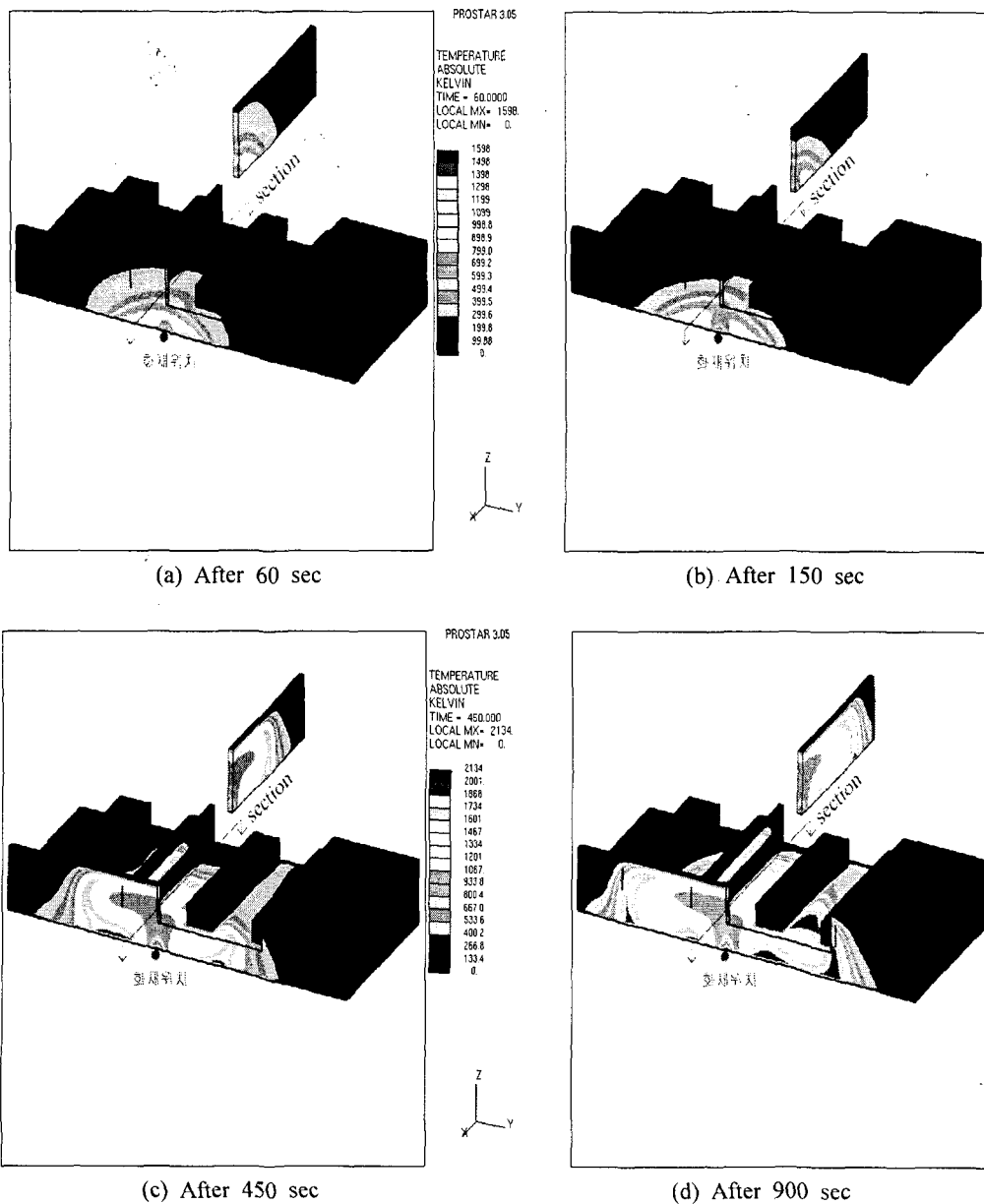
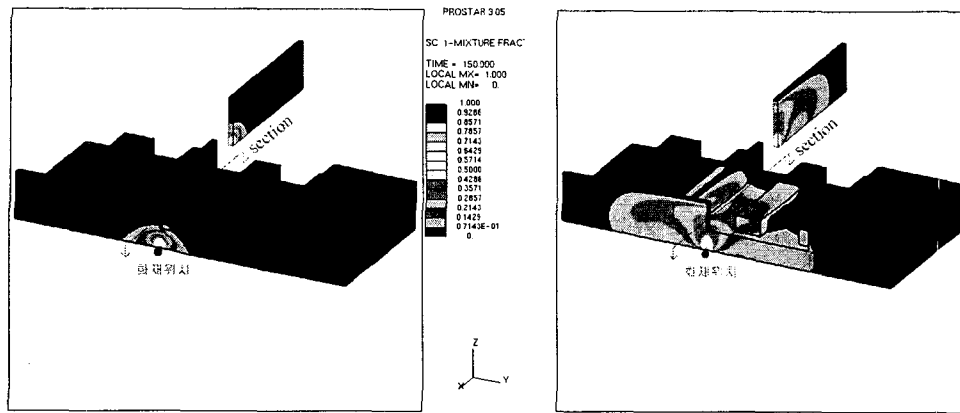


Fig. 3. Temperature distribution at various time steps

전체로 전파되는 것을 보여준다. 최고 온도지점이 화재발생위치에서 나타나지 않는 이유는 가스연소에 필요한 산소량이 상대적으로 부족하기 때문이다.

Fig.3(d)는 화재발생 15분 후의 온도분포로 최고 온도가 2200K이며 실내 전반부에 걸쳐 화재가 확산되는 상태를 보여준다.

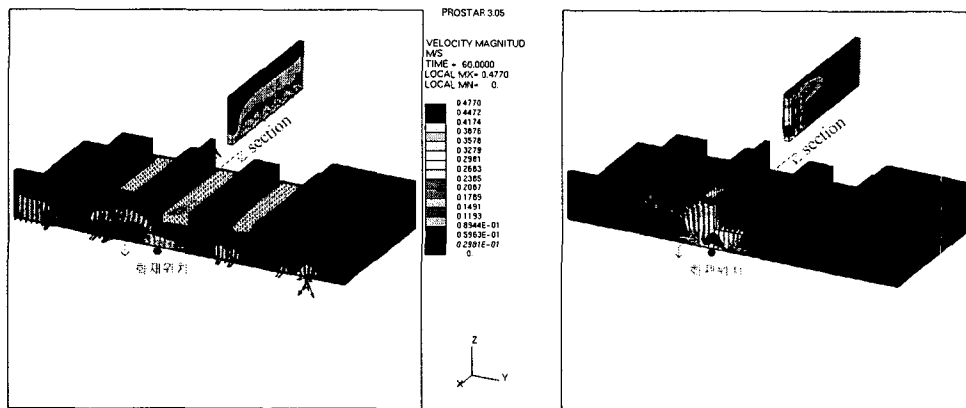
연기의 질량분율을 Fig.4 나타난 바와 같이 연기의 질량분율 분포도 온도의 분포와 비슷한 경향을 보이고 있으나 연기의 확산범위가 다소 약한 것으로 나타났으며 급기와 배기가 정지되는 2분 30초 후는 상대적으로 빠르게 연기가 확산되는 것을 볼 수 있다.



(a) After 150 sec

(b) After 900 sec

Fig. 4. The mass rate of smoke contour



(a) After 60 sec

(b) After 900 sec

Fig. 5. Velocity distribution at various time steps

속도분포를 Fig.5에 나타낸 것으로 Fig.5(a)에서와 같이 급기 및 배기가 작동하는 동안은 화재가 유동장에 별 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. Fig.5(b)는 공기의 유동이 화재발생부분에서 상승한 후 천장을 타고 좌우로 이동하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서 반도체 청정실에서 가상 화재에 관하여 컴퓨터를 이용한 수치적 방법으로 해석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 화재초기의 최고온도는 약 1600K이고 확산범위는 약 6M이고, 수직방향으로는 약 3M까지 확산된 것으로 나타났다.
- 2) 급기와 배기가 작동되는 동안은 부력의 영향이 약하기 때문에 천장부로 상승하기보다는 좌우로 확산되는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 화재하중이 3MW로 성장되는 75초에서는 화염부분에서 온도가 1700K까지 상승하는 것으로 나타났다. 화재발생 15분 후의 최고 온도는 2200K이며 실내 전체에 걸쳐

- 화재가 확산되는 것으로 나타났다.
- 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 배기장치가 정지된 후에는 연기가 상대적으로 빠르게 확산되었다.
 - 5) 급기 및 배기가 작동하는 동안에는 화재가 속도분포에 별 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 급·배기가 정지한 후에는 급속하게 화재가 성장되는 현상을 보였다.
 - 6) 따라서 피난은 화재발생 150초 후부터는 화재확산이 빠르게 진행되는 현상을 보이기 때문에 약 3분 이내에 피난하는 것이 바람직하다.

참고문헌

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," Numer. 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 Vol. 9 No. 1. (1995).
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 Engineering 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.