

청정실 화재의 시뮬레이션

I. 방연커튼의 효과

Simulation of a Clean Room Fire

I. Effects of Smoke Curtain

박 외 철†

Woe-Chul Park†

부경대학교 공과대학 안전공학과
(2005. 2. 21. 접수/2005. 4. 22. 채택)

요 약

청정실의 화재는 연기입자의 확산으로 인해 큰 피해를 초래할 수 있다. 청정실내 화재가 발생한 구역에서 다른 구역으로 연기가 확산되는 것을 방지하기 위해 구역경계에 방연커튼을 설치할 때, 그 폭이 연기의 확산에 미치는 영향을 전산유체역학 프로그램을 사용하여 조사하였다. 청정실 내 크기 30 m×10 m×4 m의 구역에 1 MW의 메탄올 화재가 발생한 것으로 화재시나리오를 설정하였다. 구역 경계에 방연커튼을 설치하지 않은 경우와 각각 폭이 1, 2, 3 m인 방연커튼을 설치한 경우에 대한 결과를 비교하였다. 커튼이 설치되지 않은 경우에는 연기가 구역경계를 통해 확산됨을 확인하였다. 또, 방연커튼의 폭이 클수록 연기확산을 지연시키지만, 연기확산을 차단하기 위해서는 경계 칸막이를 설치해야 함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

A fire in a clean room may cause a serious loss by spreading smoke particles. The effects of the width of smoke curtains on delay in smoke spread, which is located the work area boundaries, were investigated by using a computational fluid dynamics, for loss prevention by smoke spreading from one fire area to another. The fire scenario was set to a 1 MW methanol fire in a space of 30 m×10 m floor and 4 m high. Distributions of temperature and smoke particles were compared for the width of the smoke curtains 0 (without smoke curtains), 1, 2, 3 m. It was confirmed that a larger width of the smoke curtain delays spread of smoke more, and that making the work areas compartments is necessary to confine the smoke in the fire area.

Keywords : Clean room, Fire, Spread of smoke, Smoke curtain, Computational fluid dynamics

1. 서 론

반도체 제조용 청정실(clean room)에는 실내에서 발생한 미세입자를 제거하기 위해 천장에서 공기가 들어와 바닥을 통해 배출된다. 청정실에는 이소프로필 알코올(isopropyl alcohol)과 같은 알코올류 가연성물질이 있어서 화재발생의 위험이 있다. 청정실에 화재가 발생하면 비록 적은 양이지만 연기가 청정실 내에서 급속히 확산되므로 큰 피해를 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 소화뿐만 아니라 연기를 신속히 제거하기 위한 제연설비가 필요하다.

국내에서는 청정실내 기류에 대한 연구¹⁻³⁾가 수행되었으나 화재와 연기확산에 대한 연구는 보고된 바가 없다. Nam⁴⁾은 청정실에서의 연기거동에 대해 수치 시뮬레이션을 수행했다. 메탄화재 250, 400 kW와 청정실 배기유속 0.1, 0.46, 0.91 m/s에 대하여 이산화탄소의 농도를 비교하였다. 이 연구에서는 정상상태에서 계산된 화원 주위 이산화탄소 농도로부터 연기의 분포를 구했다. Heskestad⁵⁾는 4.88 m×6.1 m×0.975 m 크기의 실내에서 배기유속 0.46 m/s일 때, 메탄화재 9~900 kW에 대한 실험을 통해 이산화탄소의 농도를 측정하였다. 이상의 두 연구에서는 정상상태에서의 화원 주위의 연기 분포를 구한 것으로, 화재가 발생했을 때 시간경과에 따라 청정실 내에서 연기가 이동하는 과정을 알 수 없다.

† E-mail: wcpark@pknu.ac.kr

반도체 제조용 청정실은 여러 개의 작업구역으로 구성되어 있는데, 한 구역에서 화재가 발생했을 때 다른 구역으로 연기가 확산되어 피해가 확대되는 것을 방지하기 위해서는 소화설비 외에 비상배기시스템이 필요하다. 그러나 청정실 화재의 시뮬레이션에 관한 예비조사에서 소화설비와 제연설비가 작동하더라도 방연커튼(또는 방연 칸막이)이 없으면 연기가 인접구역으로 급속히 확산되는 것으로 나타났다. 이에 따라 본 연구는 청정실 화재의 수치적 연구의 일부로서, 본 연구의 목적은 연기확산을 방지하기 위한 방연커튼의 필요성을 확인하는 것이다. 전산유체역학을 이용하여, 방연커튼의 폭이 청정실에서의 연기확산 지연에 미치는 영향을 조사하고, 경계 칸막이를 설치하지 않았을 때 연기가 인접구역으로 확산됨을 확인한다.

2. 연구방법

본 연구에서는 넓은 청정실의 전체를 대상으로 하지 않고, Fig. 1과 같이 계산영역을 바닥면적 30 m×15 m, 높이 4 m로 하였다. 한 개의 구역은 30 m×10 m×4 m이지만, 구역경계에서 속도경계조건을 반영하기 위해, y 방향으로 양쪽에 2.5 m씩 추가한 치수이다. 전체 좌우 양쪽에 벽이 있고, y 방향으로는 방연커튼이나 경계 칸막이가 설치되어 있지 않고 다른 구역에 개방되어 있다. 폭이 3 m인 중앙통로의 양쪽에는 높이 3 m의 칸막이가 설치되어 있고, 중앙통로의 좌측 벽에는 폭 3 m, 높이 4 m의 출입구가 있다. 중앙통로 칸막이와 천장 사이는 1 m의 공간이 있어, 중앙통로에서 화재가 발생하면 연기가 천장을 따라 다른 구역으로 확산된다. 천장에서 바닥으로 공기가 일정한 속도 0.1 m/s로 흐르므로, 속도경계조건으로 천장에서 0.1 m/s 유입, 바닥에서 0.1 m/s 유출로 하였다. 또 천장과 바닥, 유입공기의 온도는 모두 20°C로 하였다. 방연커튼의 길이에 따른 연기확산의 지연효과와 칸막이의 필요성을 확인하기 위해 두 구역경계에 각각 폭 1, 2, 3 m의 방연커튼을 설

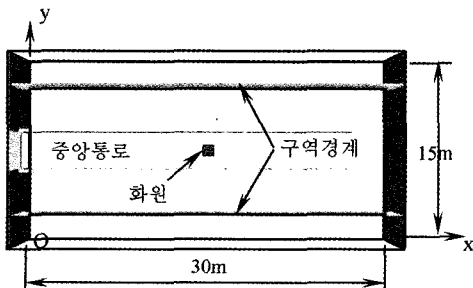


Fig. 1. Computational domain (30 m × 15 m × 4 m).

치했을 때, 고온공기와 연기의 이동을 조사하였다.

화재 시나리오는 청정실내의 가연성물질과 유사한 메탄올(methanol) 20l가 약 400초 동안 일정한 율로 연소하는 것으로 가정하였다. 이것은 화재규모 1 MW에 해당한다. 화원은 앞의 Fig. 1과 같이 중앙통로의 바닥 중앙에 위치하며, 화원의 크기는 1 m×1 m로 하였다. 전산유체역학 프로그램으로 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)의 Fire Dynamics Simulator⁶⁾ Version 3.1을 사용하였다. 가연성물질을 메탄올로 정의하고, 나머지는 모두 기본 설정값을 그대로 사용하였다. 격자의 크기는 균일하게 0.2 m×0.2 m×0.1 m(격자수 150×75×40개)로 하였다. 알코올류는 연소할 때 연기가 거의 발생하지 않으므로, 시뮬레이션에서 연기이동을 관찰할 수 있도록 화원에서 유동장에 연기입자를 투입하여 이들의 위치를 시간에 따라 파악하였다. 방연커튼은 양쪽 구역경계의 천장에 설치하며, 폭 L=0, 1, 2, 3 m일 때 연기입자의 이동과 공간 내 입자수의 변화, 온도의 변화를 비교하였다.

3. 결과 및 토의

화재가 발생하면 연기는 고온공기와 함께 위로 올라가 2개의 중앙 칸막이(높이 3 m)와 천장(높이 4 m) 사

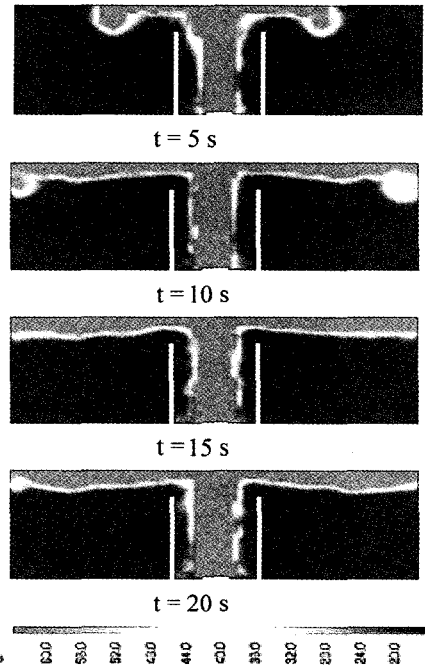


Fig. 2. Temperature distribution without smoke curtains (L=0) at x=15 m.

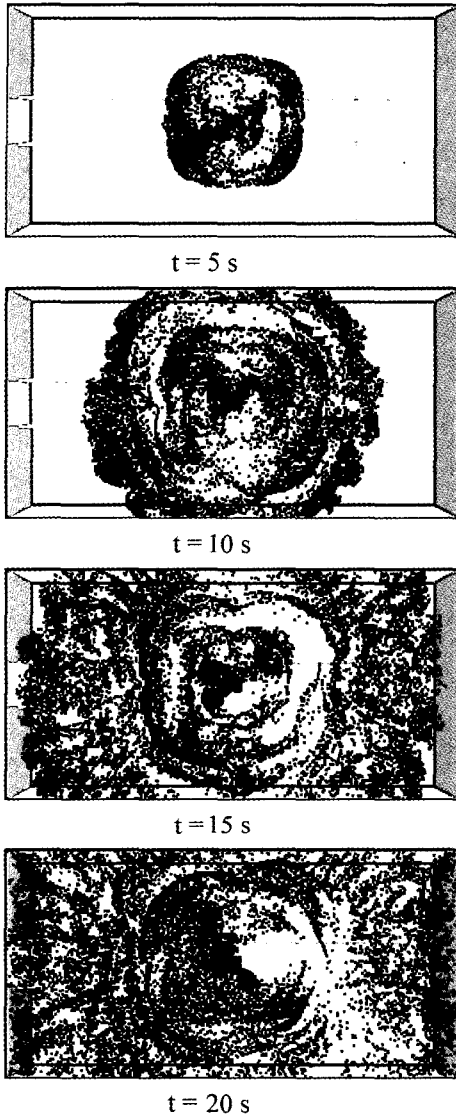


Fig. 3. Particle distribution without smoke curtains.

이 1 m의 공간을 통해 천장을 따라 확산된다. Fig. 2는 방연커튼이 없을 때 수직중앙평면($x=15\text{ m}$)에서 60°C 이상의 고온공기가 시간에 따라 이동하는 과정을 나타낸 그림이다.

화재발생 후 10초($t=10\text{ s}$)에 이미 고온공기가 계산영역을 빠져 나갔음을 볼 수 있다. 또 이 결과로부터 공기가 하향으로 1 m/s로 일정하게 흐르더라도 부력에 의한 고온공기와 연기의 상승을 억제하지 않음을 알 수 있다.

그러나 위로 올라간 연기는 시간이 흐르면 온도가 떨어지므로, 연기의 이동을 확인하는 데는 온도분포보

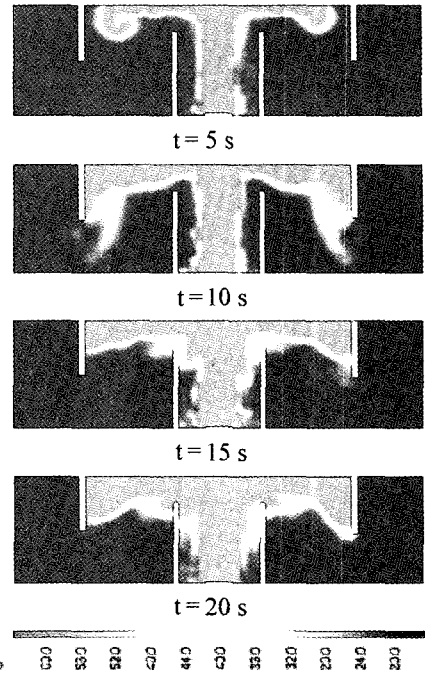


Fig. 4. Temperature distribution for $L=2\text{ m}$ ($x=15\text{ m}$).

다 유동장에 투입한 연기입자의 이동을 관찰하는 것이 더 적합하다. Fig. 3은 화재발생 후 시간에 따라 연기의 이동과정을 나타낸 그림이다. 연기가 천장을 따라 이동해 $t=10\text{ s}$ 에 이미 연기가 계산영역 밖으로 확산되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 2와 3에서, 청정실에 화재가 발생하면 공기가 아래쪽으로 일정한 속도로 흐르더라도, 연기가 자연대류에 의해 연기가 위로 올라가 옆 구역으로 쉽게 확산됨을 알 수 있다.

Fig. 4에는 양쪽 구역경계에 설치한 방연커튼의 폭 (L)이 2 m인 경우에 고온공기의 이동을 나타내었다. 화재발생 후 20초에도 고온공기가 방연커튼의 밖으로 이동하지 않아, 연기의 확산을 지연시키는 효과가 뚜렷이 나타나 있다.

방연커튼에 의한 연기의 확산지연은 Fig. 5의 연기입자 분포로도 명확히 확인된다. 방연커튼의 폭 $L=2\text{ m}$ 일 때는 $t=10\text{ s}$ 에서도 방연커튼이 없는 경우($L=0$)인 Fig. 3과 달리, 연기입자가 폭 $L=2\text{ m}$ 의 방연커튼의 안쪽에만 존재한다. $t=15\text{ s}$ 에서도 연기가 구역 밖으로 이동하지 않았다. $t=20\text{ s}$ 에서는 구역의 중앙부근에서는 연기입자가 다른 구역으로 이동하지 않았으나, 양쪽 끝부근에서 바닥과 방연커튼 사이의 공간을 통해 옆 구역으로 빠져 나감을 볼 수 있다. 이것은 구역의 중앙부근에서는 방연커튼에 의해 연기의 확산이 차단되지

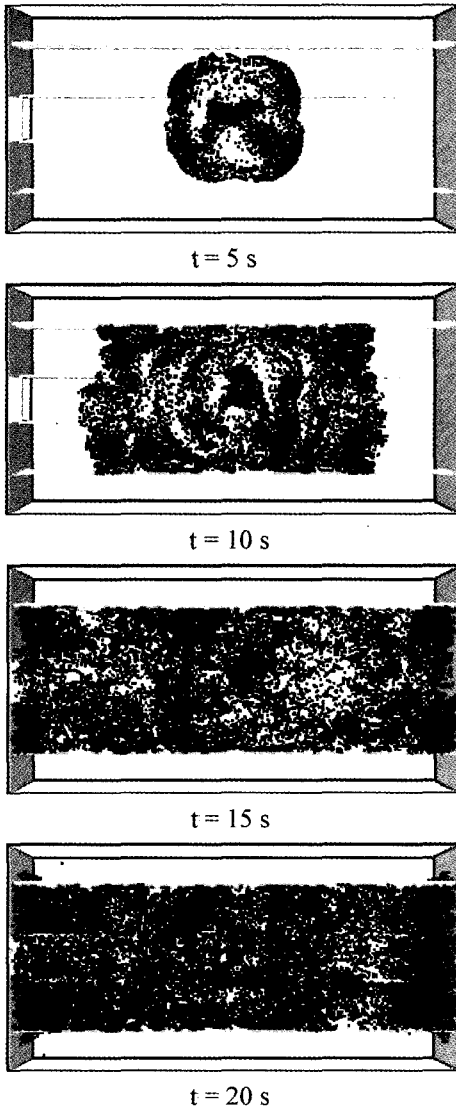


Fig. 5. Particle distribution for $L=2$ m.

만, 시간이 흐름에 따라 연기입자가 일정한 유속 0.1 m/s의 공기와 함께 아래로 이동하면서 양쪽 끝 부근에서는 연기가 방연커튼과 바닥 사이의 2 m의 공간을 통해 옆 구역으로 이동하기 때문이다.

이 결과로부터 방연커튼의 폭이 클수록 연기확산의 지연효과가 클 것임을 알 수 있다. 또한, 방연커튼의 폭이 크더라도 방연커튼과 바닥사이에 공간이 있는 경우에는, 시간이 지나면 연기가 아래로 이동하여 옆 구역으로 확산될 수 있음을 나타낸다. 이러한 추정은 방연커튼의 길이에 따라 연기입자가 다른 구역으로 이동하기 시작하는 시각을 비교함으로써 확인할 수 있다.

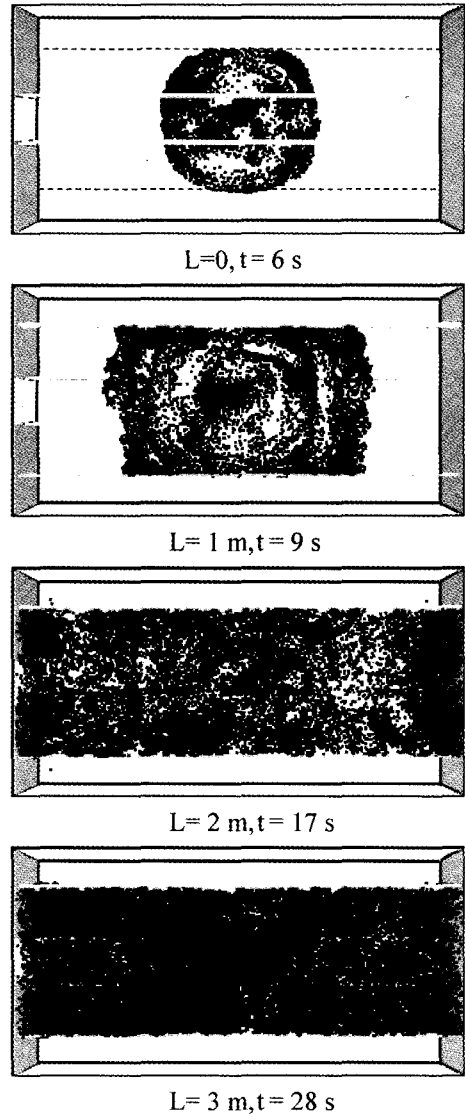


Fig. 6. Comparison of particle distributions when particles start to escape the computational domain for different smoke curtain widths.

Fig. 6은 방연커튼의 폭 L이 각각 0, 1, 2, 3 m일 때 연기입자가 구역경계를 벗어나기 시작하는 순간의 연기입자 분포를 보여 주는 그림이다. 방연커튼이 없는 경우에는 6초에 연기가 구역경계를 지나 다른 구역으로 이동하였다. 그러나 방연커튼의 폭이 클수록 연기가 옆 구역으로 확산하기 시작하는데 걸리는 시간이 점점 늘어남을 알 수 있다. 방연커튼의 폭이 3 m(L=3 m)일 때는 연기입자가 방연커튼에 의해 다른 구역으로 이동하지 못하다가 화재발생 28초 후(t=28 s)에 연

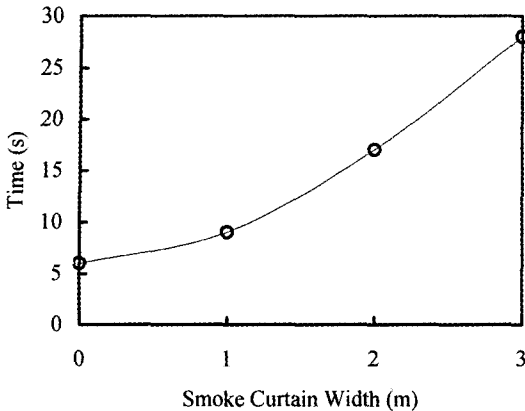


Fig. 7. Comparison of time when particles start to escape the computational domain for different smoke curtain widths.

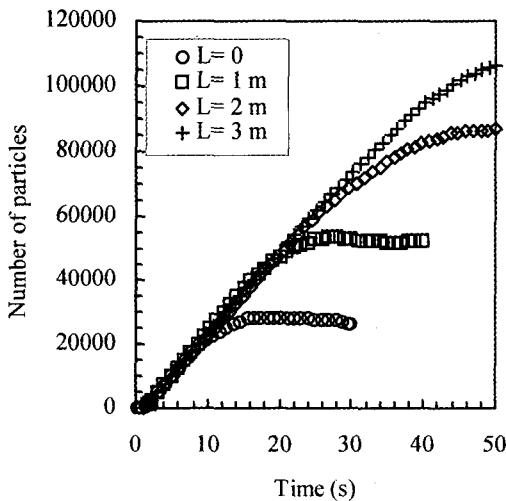


Fig. 8. Comparison of variation of the number of particles in the computational domain in the computational domain for different smoke curtain widths.

기입자가 다른 구역으로 확산하기 시작하였다.

방연커튼의 폭에 따른 연기확산의 지연효과를 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 즉, 연기가 구역경계를 벗어나기 시작하는 시간은 방연커튼의 폭 $L=0, 1, 2, 3$ 일 때 각각 6, 9, 17, 28초로 증가한다. 지연시간은 폭 L 이 증가할수록 더 크게 늘어남을 알 수 있다. 그러나 $L < 4$ m인 경우에는 연기입자가 다른 구역으로 이동하게 되므로, 연기확산을 완전히 차단하기 위해서는 $L=4$ m, 즉, 방연커튼의 폭이 천장 높이와 같아야 함을 의미한다.

Fig. 8에는 방연커튼의 폭에 따라 계산영역내 연기입자수의 시간에 따른 변화를 비교하였다. 방연커튼이

없는 경우($L=0$), 화재발생 후 8초에 연기가 계산영역을 빠져나가기 시작한다. 이에 비해, $L=1, 2, 3$ m일 때는 화재발생 후 각각 약 20, 30, 35초에 연기가 계산영역 밖으로 빠져나가기 시작하여, 방연커튼의 폭이 클수록 연기확산이 지연됨을 알 수 있다. 그러나 화재발생 후 천장 부근에 집중된 연기는 기류에 따라 점차 아래로 이동하며, 방연커튼과 바닥 사이의 공간을 통해 옆 구역으로 흘러 나가게 된다. 방연커튼은 연기확산을 지연시키지만, 완전히 차단할 수 없음을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 청정실에서 화재가 발생했을 때, 다른 구역으로 연기가 확산되지 않게 하기 위해서는 구역경계에 칸막이를 설치해야 함을 확인할 수 있다.

4. 결 론

청정실에 화재가 발생했을 때 구역경계에 설치한 방연커튼의 연기확산 지연효과와 칸막이 설치의 필요성을 확인하기 위해 전산유체역학을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 1 MW의 메탄을 화재가 발생했을 때, 온도와 연기입자의 이동의 조사를 통해, 방연커튼의 폭이 클수록 연기확산이 지연되었고, 다른 구역으로의 연기확산을 방지하기 위해서는 구역경계에 칸막이를 설치할 필요가 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박명식, 이재현, 안강호, 김정호, "Access panel 개폐에 따른 청정실내 유동특성", 설비공학논문집, Vol. 5, No. 1, pp.55-64(1993).
2. 노광철, 이승철, 오명도, "조정정 클린룸 공조방식에 따른 기류특성에 관한 수치해석", 설비공학논문집, Vol. 15, No. 9, pp.751-761(2003).
3. 노광철, 오명도, 이승철, "광식각공정이 있는 클린룸에서의 3차원 기류 및 동적 교차오염에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 B, Vol. 28, No. 5, pp.560-568(2004).
4. S. Nam, "Numerical Simulation of Smoke Movement in Clean Room Environments", Fire Safety J., Vol. 34, pp.169-189(2000).
5. G. Heskestad, "Smoke Distributions from Fire Plumes in Uniform Downdraft from a Ceiling", Fire Safety J., Vol. 39, pp. 358-374(2004).
6. K. B. McGrattan, H. R. Baum, R. G. Rehm, A. Hamins, G. P. Forney, J. E. Floyd, S. Hostikka and K. Prasad, Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide v.3, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.(2002).