

## 청정실 화재의 시뮬레이션 II. 제연설비와 스프링클러설비의 필요성 Simulation of a Clean Room Fire II. Needs of Smoke Control System and Sprinkler System

박외철<sup>†</sup> · 이만근\* · 박헌식\*

Woo-Chul Park<sup>†</sup> · Man-Geun Lee\* · Hun-Sik Park\*

부경대학교 안전공학부, \*(주)한국방재엔지니어링  
(2006. 2. 20. 접수/2006. 4. 11. 채택)

### 요 약

제연설비와 스프링클러설비의 필요성을 확인하고 연기확산 가능성을 조사하기 위해 청정실 화재의 시뮬레이션을 수행하였다. 바닥면적 39 m×13 m, 높이 4 m의 작업구역에 1 MW의 메탄올 화재가 발생했을 때, 제연설비와 스프링클러설비의 정상작동과 작동실패에 따른 연기누출 여부를 조사하였다. 제연설비가 정상적으로 작동하는 경우에는 스프링클러설비에 관계없이 연기가 안전하게 배출됨을 알 수 있었다. 화재 확산과 연기발생을 억제하고 발생한 연기를 신속히 배출하기 위해 스프링클러설비가 필요하며, 스프링클러설비와 제연설비가 신속하게 작동할 수 있도록 신뢰도가 높은 스프링클러설비 헤드와 자동화재탐지설비가 필요함을 확인하였다.

### ABSTRACT

Numerical simulations were carried out for a fire in a clean room to confirm needs of a smoke control system and a sprinkler system, and to investigate a possible smoke spread-out. For a 1 MW methanol fire in a space of 39 m × 13 m floor and 4 m high, smoke spread-out was scrutinized for failure of the sprinkler system and/or the smoke control system. It was shown that the smoke control system removes smoke safely without the sprinkler system and that the sprinkler system is required to suppress smoke generation and spread of the fire, and to remove the smoke quickly. It was also confirmed that highly reliable sprinkler heads and automatic fire detection system are required for the sprinkler and smoke control systems.

**Key words :** Clean room, Fire, Sprinkler system, Smoke control, Numerical simulations

### 1. 서 론

실내에서 발생한 미세입자를 밖으로 배출하는 반도체 제조용 청정실(clean room)에는 일정한 유속의 공기가 천장에서 바닥으로 흐른다. 청정실에 화재가 발생하면 연기 속에 포함된 미세입자가 실내에 급속히 확산되어 큰 피해를 초래할 수 있다. 천장에서 바닥으로 일정한 유속으로 공기가 흐르지만, 화재로 발생한 입자는 부력으로 인해 연기가 위로 올라가 인접 작업구역으로 이동하게 된다.

청정실 화재의 피해를 줄이기 위해, 화재를 초기에

소화하는 스프링클러설비와 연기를 신속하게 배출하기 위한 제연설비가 설치되어 있다. 그러나 두 가지 설비가 모두 신속하게 작동하더라도 청정실 내 한 작업구역에서 다른 구역으로 연기가 확산된다. 이에 따라 박외철<sup>1)</sup>은 바닥넓이 30 m×15 m, 높이 4 m의 청정실 부분에 대한 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 이 연구에서 1 MW의 메탄올 화재가 발생하였을 때, 작업구역 경계에 설치한 제연경계벽이 연기의 확산을 지연시킴을 확인하였으며, 연기의 확산을 차단하기 위해서는 구역경계에 천장에서 바닥까지 칸막이, 방화셔터 또는 제연경계벽을 설치할 필요가 있음을 밝혔다. 그러나 작업구역 경계를 칸막이나 제연경계벽으로 완전히 차단하면 반도체 제조공정에 불편한 점이 많게 된다. 이러

<sup>†</sup>E-mail: wcpark@pknu.ac.kr

한 불편을 해소하면서 연기의 확산을 방지하기 위해서는 방화셔터를 설치하는 것이 바람직하다.

구역경계에 칸막이나 방화셔터가 설치되면 연기가 다른 구역으로 유출될 수 있는 공간은 작업구역의 출입문뿐이다. 스프링클러설비와 제연설비가 설치되어 두 설비 모두 정상적으로 작동할 때 출입구를 통한 연기의 확산여부를 확인할 필요가 있다. 또, 스프링클러설비와 제연설비 중에서 한가지 이상이 정상작동에 실패하는 경우에 연기확산도 조사할 필요가 있다. 이를 통해 제연설비와 스프링클러설비의 필요성을 확인할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 스프링클러설비와 제연설비가 모두 정상적으로 작동하는 경우와 어느 하나 또는 양자 모두 작동하지 않는 경우에 연기가 다른 구역으로 유출되는가를 전산유체역학을 이용하여 분석한다. 또한 화재발생 위치와 화재규모에 따라 연기의 유출 가능성도 검토하였다.

## 2. 연구방법

이전의 연구<sup>1)</sup>와 같이 메탄올(methanol) 1 MW의 화재가 중앙 바닥에서 발생한 것으로 가정하였다. 화재가 진행되면서 천장 부근의 온도가 올라가면, 높이 3.9 m에 3.6 m×2.4 m 간격으로 설치되어 있는 반응지수(response time index, RTI) 50 m<sup>0.5</sup>s<sup>0.5</sup>, 작동온도 68°C의 속도형 스프링클러 헤드가 개방되고 각 헤드에서 80 l/min의 살수로 소화된다. 연기의 일부는 천장에서 바닥으로 흐르는 공기에 의해 밖으로 배출되지만, 연기가 다른 작업구역으로 확산되지 않도록 제연설비가 설치되어있다. 화재가 발생하여 제연설비가 가동되면 바닥에 설치되어 있는 배연구를 통해 연기가 배출된다.

본 연구의 대상은 Fig. 1과 같이 넓은 청정실의 한 작업구역으로, 바닥면적 39 m×13 m, 높이 4 m이다. 폭 3 m의 중앙통로 양쪽에는 높이 3 m의 칸막이가 설치되어 있으며, 칸막이에서 천장까지 높이 1 m는 비어 있어 중앙통로에서 화재가 발생하면 연기가 천장을 따라 구역내에 확산된다. 중앙통로 양쪽 칸막이의 뒤쪽에는 반도체 제조장비가 있다. 청정실에는 항상 천장에서 바닥으로 일정한 유속 0.1 m/s의 공기가 흐른다. 제연설비의 배연구는 크기가 각각 0.6 m×0.6 m이고 9개가 바닥에 배열되어 있다. 중앙통로의 좌측에는 폭 3 m, 높이 4 m의 출입구가 있고, 출입구에는 아래쪽에 높이 2 m의 개구부만 남기고 칸막이가 설치되어 있다. 화재가 발생했을 때 다른 구역으로 확산되는 연기는 이 출입구를 통해서 유출될 연기뿐이다. 따라서 스프링클러설비와 제연설비의 정상작동과 한가지 이상의 작동실

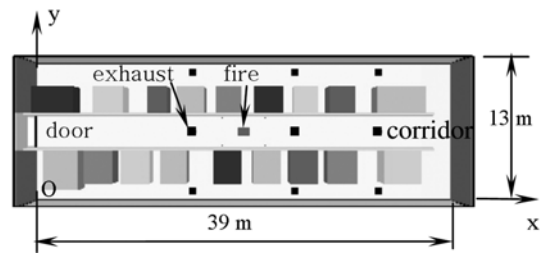


Fig. 1. Computational domain (39 m×13 m×4 m).

패에 따른 연기의 확산여부는 이 출입구를 통한 연기 유출을 확인하면 된다. 제연설비가 작동하면 바닥의 배연구를 통해 연기가 배출되고 출입구를 통해 공기가 유입되므로, 배연구는 연기배출이 쉽도록 Fig. 1과 같이 안쪽 바닥에 9개를 배열하였다.

화재 시나리오는 청정실내의 가연성물질과 유사한 메탄올 20 l가 약 400초 동안 일정한 율로 연소하는 것으로 가정하였다. 이것은 화재규모 1 MW에 해당한다. 화원은 중앙통로의 바닥 중앙에 위치하며, 화원의 크기는 편의상 1 m×1 m로 하였다.

전산유체역학 프로그램은 미국 표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)의 Fire Dynamics Simulator<sup>2)</sup>을 사용하였다. 가연성물질을 메탄올로 정의하고, 나머지는 모두 프로그램의 기본 설정값을 그대로 사용하였다. 격자의 크기는 균일하게 0.2 m×0.2 m×0.1 m로 하였다. 알코올류 가연성물질이 연소할 때 연기가 거의 발생하지 않으므로, 시뮬레이션에서 연기 이동을 관찰할 수 있도록 화재발생시점부터 소화완료까지 화원에서 유동장에 연기입자를 투입하여 추적함으로써 연기의 이동을 알 수 있게 하였다. 연기입자는 질량과 체적뿐만 아니라 물리적 성질이 전혀 없고 공기의 흐름에 따라 이동하므로, 입자의 이동은 연기의 이동을 나타낸다.

스프링클러설비와 제연설비의 필요성과 연기의 확산 여부를 확인하기 위해, 이 두가지 설비의 정상작동과 작동실패에 따른 연기의 유출을 조사하였다. 연기입자의 분포와 공간내 입자수 및 온도의 변화를 비교하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 스프링클러 설비와 제연설비의 정상작동

예비 시뮬레이션에서 화재발생 후 12초(t=12s)에 스프링클러 헤드 1개가 열리고, 14초에 화원에 인접한 4개의 헤드가 개방되었고, 16초에는 화원으로부터 고

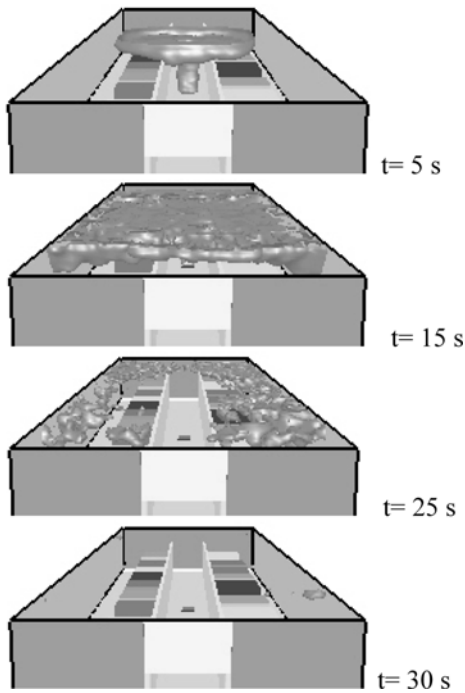


Fig. 2. Evolution of iso-temperature surface of 60°C with normal operation of the sprinkler and smoke control systems.

온공기의 상승이 전혀 없었다. 이 결과로부터 화재발생 후 12초에 소화가 시작되어 16초에 완료되는 것으로 소화과정을 설정하였다. 제연설비는 첫 스프링클러 헤드가 열리는  $t = 12$  s에 기동되도록 설정하였다. 제연설비의 배기풍량은 국가화재안전기준(NFSC) 501<sup>3)</sup>에 따라  $1 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$  (바닥면적  $39 \text{ m} \times 13 \text{ m}$ 에 대하여  $30,420 \text{ m}^3/\text{h}$ )로 하였다. 여기서  $\text{m}^2$ 는 바닥면적을 나타낸다.

Fig. 2는 스프링클러설비와 제연설비가 모두 정상적으로 작동할 때의 화재진행과정을 60°C의 등온표면으로 나타낸 그림이다. 화재발생 후 12초( $t = 12$  s)에 스프링클러 헤드의 살수가 시작되어 15초 이후에는 등온표면이 급격히 소멸되었다.  $T = 30$  s에서는 60°C 이상의 고온공기가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 3는 스프링클러설비와 제연설비가 정상적으로 작동할 경우, 시간에 따른 연기입자의 분포이다. 앞에서 언급한 바와 같이 알콜류의 연소에서는 연기가 거의 발생하지 않지만, 다른 가연성물질의 연소에 의한 연기의 이동을 관찰하기 위해 유동장에 질량이 없는 입자를 투입하여 추적하였다. 화재발생 후 시간이 경과함에 따라 연기입자가 급격히 증가하여,  $t = 30$  s에서

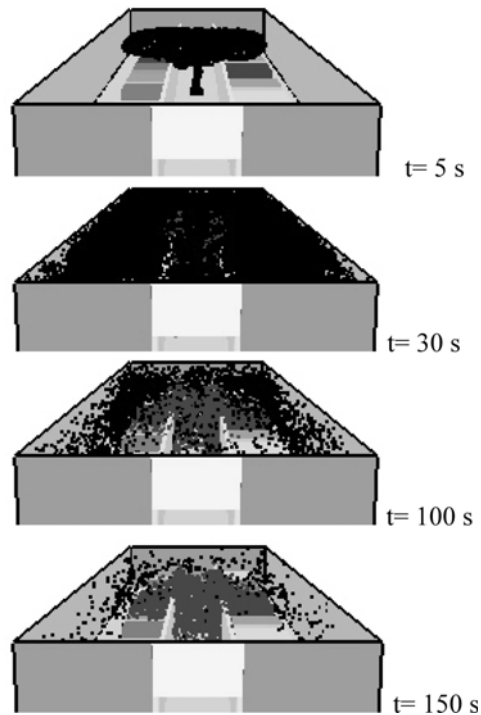


Fig. 3. Evolution of particle distribution with normal operation of the sprinkler and smoke control systems.

는 많은 입자가 구역내에 존재함을 볼 수 있다. 그러나 화재발생 후 12초에 스프링클러 헤드 1개가 열리고 연이어 다른 3개의 헤드도 열려 완전히 소화되면서 연기는 더 이상 발생하지 않는다. 스프링클러 헤드의 개방과 동시에 제연설비가 작동함에 따라 바닥에 위치한 9개의 배연구를 통해 배기풍량  $1 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$ , 즉,  $30,420 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 연기가 배출된다. 화재발생 후 150초에는 공간내 연기입자가 거의 다 배출되었음을 알 수 있다. 소화가 완료된 이후에도 제연설비를 계속 가동할 때, 연기입자를 완전히 배출하는 시간은 화재발생 후 약 180초로 나타났다(Fig. 5 참조). 스프링클러설비와 제연설비가 정상적으로 작동할 때, 출입구를 통한 연기유출은 전혀 없었다.

제연설비와 스프링클러설비가 정상적으로 작동할 때, 시간에 따른 중앙 수직평면( $y = 6.5 \text{ m}$ )에서의 온도 분포 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 스프링클러설비와 제연설비의 작동으로  $t = 20$  s 이후에는 화원으로부터 고온공기의 상승이 사라지고, 천장부근의 고온 공기층이 소멸되었다. 소화가 완료되고 살수와 배기가 계속됨에 따라 공간내 공기의 온도가 급격히 떨어짐을 확인할 수 있다.

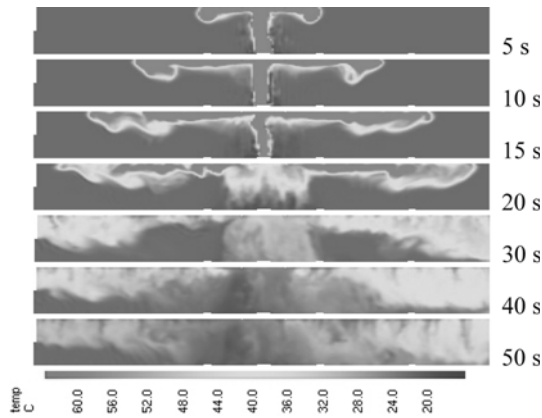


Fig. 4. Evolution of temperature distribution at the vertical plane of  $y = 6.5$  m with normal operation of the sprinkler and smoke control systems.

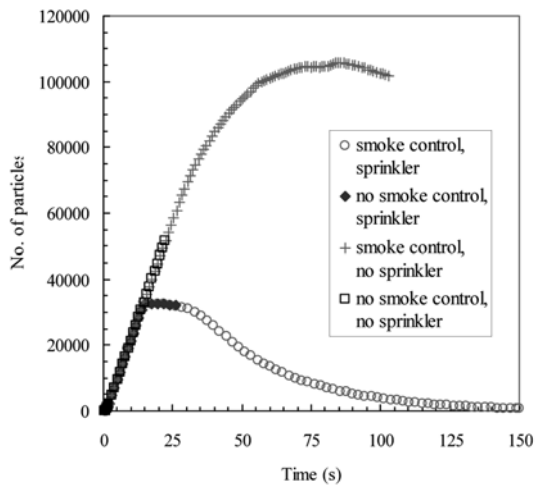
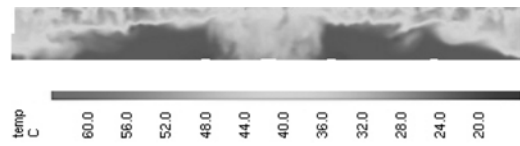


Fig. 5. Comparison of time-variation of the number of particles in the computational domain.

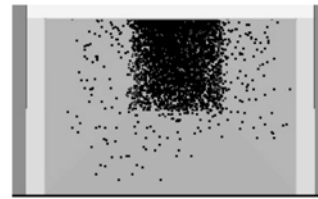
### 3.2 연기의 확산 가능성 검토

위에서 청정실의 작업구역 경계에 칸막이나 방화셔터를 설치하고, 제연설비와 스프링클러설비가 정상적으로 작동하면 연기가 다른 구역으로 전혀 확산되지 않음을 확인하였다. 이것은 공간내 입자수의 변화를 나타낸 Fig. 5의 제연 및 살수(smoke control, sprinkler)에서도 알 수 있다. 즉, 화재가 발생하고 스프링클러설비와 제연설비가 작동하기 전에는 공간 내 입자의 수가 거의 선형적으로 증가하다가 두 설비가 작동하면 연기입자의 수가 지속적으로 감소하여  $t = 150$  s에서 거의 다 밖으로 배출된다.

그러나 스프링클러설비와 제연설비 중에서 어느 하



(a) Temperature distribution at the mid-plane ( $y=6.5$  m)



(b) Smoke spread-out through the door

Fig. 6. Distributions of temperature and particles when the particles start to spread out through the door ( $t = 27.7$  s) due to failure of the smoke control system.

나 또는 모두 작동하지 않는 경우, 그리고 화재발생 위치가 중앙통로 중심이 아닌 경우와 화재규모가 1 MW 보다 훨씬 더 작거나 큰 경우에도 연기가 외부로 확산될 가능성을 확인할 필요가 있다. 이에 따라 스프링클러설비와 제연설비가 작동하지 않는 경우에 대하여 출입구를 통한 연기유출 여부를 조사하였다. 또 화재 발생위치와 화재규모에 따른 연기유출 가능성도 검토하였다.

#### 3.2.1 제연설비의 작동실패

스프링클러설비는 정상적으로 작동하지만 제연설비가 없거나 작동하지 않는 경우에는 연기가 화재발생 후 27.7초에 출입구를 통해 밖으로 유출되기 시작하였다. 이 경우 공간내 입자수의 변화는 Fig. 5의 무제연 및 살수(no smoke control, sprinkler)와 같이 연기가 점점 증가하다가 소화가 완료되는  $t = 16$  s에 연기발생이 중단되며, 이후 청정실 환기에 의해 연기입자수가 약간 줄어들게 된다. 이 그림에서는  $t = 27.7$  s에서 연기의 확산이 시작되므로 이후 연기입자의 수를 표시하지 않았다.

Fig. 6은 연기입자가 출입구를 통해 유출되기 시작하는 순간( $t = 27.7$  s)의 중앙 수직평면에서의 온도분포와 출입구에서의 연기유출 모습이다. 온도분포 (a)에서 좌측 출입구를 통해 공간내의 공기가 외부로 유출되는 모습이 뚜렷이 나타나 있다. 그러므로 연기확산을 방지하기 위해서는  $t = 27.7$  s 이전에 제연설비가 작동해야 함을 알 수 있다. 또 이 결과로부터 스프링클러설

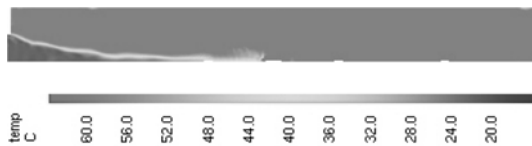
비가 작동하더라도 연기확산을 방지하기 위해서는 제연설비가 반드시 필요하며, 공간에 축적된 연기를 짧은 시간내에 배출하기 위해서도 제연설비가 필요함을 알 수 있다.

3.2.2 스프링클러설비의 작동실패

스프링클러설비가 없거나 작동되지 않는 경우에는 연소가 완료될 때까지 화재가 계속된다. 이 경우에 제연설비가 정상적으로 작동하면, Fig. 5의 제연 및 무살수(smoke control, no sprinkler)와 같이 연기가 계속 증가하여 화재발생 후 86.6초에 연기입자수가 최대치로 되고, 이후 서서히 감소한다. 스프링클러설비가 작동하지 않더라도 제연설비가 가동되면 연기는 확산되지 않았으며, 입자수가 많아 많은 계산시간이 소요되므로 화재발생 후 103초에서 계산을 중단하였다.

Fig. 7은 연기입자수가 최대치에 도달한  $t = 86.6$  s에서의 온도 및 연기입자분포와 출입구의 모습이다. 중앙통로의 횡방향 중심평면( $y = 6.5$  m)에서의 온도분포 (a)로부터 좌측 출입구를 통해 외부에서 공기(온도 23°C)가 유입되고 있음을 알 수 있다. 이 그림은 위의 Fig 6(a)와 확연히 구분된다. 그림 (b)에 나타나있는 출입구의 모습에서도 연기 유출이 없음을 확인할 수 있다. 이 결과로부터  $t = 16$  s에 소화가 완료되지 않고 소화가 훨씬 더 지연되는 경우에도 연기확산의 위험이 없음을 알 수 있다.

결과적으로, 스프링클러설비가 작동하지 않더라도 제연설비가 작동하면 연기는 확산되지 않는다. 그러나 제



(a) Temperature distribution at the mid-plane ( $y = 6.5$ m)



(b) No smoke spread-out through the door

Fig. 7. Distributions of temperature and particles when the particles start to spread out through the door ( $t = 86.6$  s) due to failure of the sprinkler system.

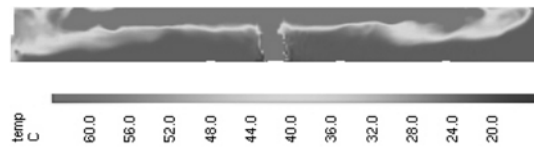
연설비가 공간내의 체류하고 있는 연기를 모두 배출하는데 많은 시간이 소요된다. 또 화재크기가 설정치 1MW보다 훨씬 더 크거나 다른 가연성물질이 청정실내에 있을 때, 스프링클러설비가 작동하지 않으면 화재가 확산될 가능성이 있다. 그러므로 연기의 발생을 억제하고 발생한 연기를 배출하는데 걸리는 시간을 단축하며, 화재의 확산을 방지하기 위해 스프링클러설비가 필요함을 알 수 있다.

3.2.3 제연설비와 스프링클러설비의 작동실패

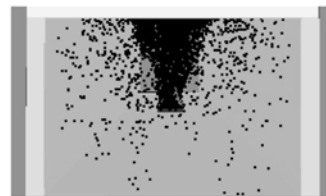
제연설비와 스프링클러설비가 모두 설치되지 않았거나 작동하지 않는 최악의 경우에는 Fig. 5의 무제연 및 무살수(no smoke control, no sprinkler)와 같이 연기입자수가 계속 증가하여 화재발생 22.3초 후에 연기가 출입구를 통해 밖으로 유출되기 시작하였다. 이 순간의 중앙 수직평면의 온도분포 및 연기입자 분포와 출입구의 모습이 Fig. 8에 나타나 있다. 온도분포로부터 공기가 출입구를 통해 외부로 유출됨을 알 수 있고, 출입구 부근에서의 연기입자의 분포로도 이를 확인할 수 있다. 그러므로 스프링클러설비와 제연설비가 모두 작동하지 않는 경우에는 연기가 출입구를 통해 청정실내의 다른 작업구역으로 연기가 확산하게 된다.

3.2.4 화재발생위치

지금까지 화재의 발생위치는 청정실 내 작업구역의 중앙으로 가정하였다. 제연설비가 작동하는 경우에는 제연설비의 배기량만큼 출입구를 통해 외부공기가 유



(a) Temperature distribution at the mid-plane ( $y = 6.5$ m)



(b) Smoke spread-out through the door

Fig. 8. Distributions of temperature and particles when the particles start to spread out through the door ( $t = 22.3$  s) due to failure of the smoke control and sprinkler systems.

입되기 때문에 출입구를 통해 연기가 확산되지 않는다. 화재발생위치가 중앙이 아니라 출입구에 가까운 곳이라도 출입구를 통한 공기유입은 동일하므로, 제연설비가 작동하면 연기가 다른 구역으로 확산되지 않는다. 따라서 화재발생위치에 관계없이 제연설비가 작동하면 연기는 확산되지 않는다.

### 3.2.5 화재규모

본 연구에서 화재크기를 1MW로 설정하였으나, 이보다 훨씬 더 작은 경우에는 스프링클러 헤드의 작동 온도(68°C)까지 도달하는데 시간이 더 오래 걸리게 된다. 이로 인해 스프링클러 헤드가 개방되는 시기도 늦어지게 된다. 그러나 제연설비를 가동하면 연기확산은 일어나지 않으므로, 작은 규모의 화재도 감지할 수 있는 자동화재탐지설비를 설치할 필요가 있다. 한편, 화재크기가 1MW보다 훨씬 더 큰 경우에는 연기가동이 빠르게 진행되므로 제연설비를 더 신속하게 기동해야 한다. 또한 화재규모에 관계없이 연기의 확산으로 인한 피해를 방지하기 위해서는 스프링클러설비와 제연설비의 작동실패가 일어나지 않아야 한다. 이것은 신뢰도가 높은 스프링클러설비 헤드와 자동화재탐지설비를 설치함으로써 방지할 수 있다.

청정실의 작업구역 경계에 방화셔터를 설치한 경우에 연기가 확산되기 전에 천장에서 방화셔터가 내려와야 한다. 따라서 방화셔터의 하강과 연동하는 고신뢰도의 자동화재탐지설비가 필요하다. 한편, 화재를 탐지해서 방화셔터가 내려오기 시작하는데까지 걸리는 시간을 감안하면 방화셔터와 별도로 작업구역 경계를 따라 일정한 폭의 제연경계벽을 천장에 설치하는 것이 바람직하다. 이전의 연구<sup>1)</sup>에서 밝힌 바와 같이 제연경계벽이 연기확산을 지연시키는 효과가 크기 때문이다.

## 4. 결 론

반도체 제조용 청정실에 1MW의 메탄올 화재가 발생했을 때, 제연설비와 스프링클러설비의 필요성과 연기의 확산 가능성을 확인하기 위해, 전산유체역학을 이용하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 스프링클러설비가 정상적으로 작동할 때는 바닥에 설치한 배연구를 통해 배기풍량  $1 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$  (30,420  $\text{m}^3/\text{h}$ )의 제연설비로 연기를 안전하게 배출할 수 있는 것으로 나타났다. 또 스프링클러설비의 작동여부와 화재발생위치 및 화재규모에 관계없이 제연설비가 작동하면 연기가 청정실 내의 다른 구역으로 확산되지 않음을 알 수 있었다. 스프링클러설비는 연기의 발생을 억제하고 발생한 연기를 배출하는데 걸리는 시간을 단축하며, 화재의 확산을 방지하기 위해 필요함을 확인하였다. 스프링클러설비와 제연설비가 신속하고 정확하게 작동할 수 있도록 신뢰도가 높은 스프링클러설비 헤드와 자동화재탐지설비가 필요하다. 또한 청정실 작업구역 경계에 방화셔터를 설치한 경우에는 방화셔터가 내려오는데 시간이 걸리므로 연기확산을 지연시키는 제연경계벽을 설치하는 것이 요망된다.

## 참고문헌

1. 박외철, "청정실 화재의 시뮬레이션-I. 방연커튼의 효과", 한국화재소방학회 논문지, 제 19권, 제 2호, pp.8-12(2005).
2. K. McGrattan ed., Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.(2005).
3. 제연설비의 화재안전기준, 국가화재안전기준 501 (NFSC 501) (2004).