

대규모 클린룸 화재의 시뮬레이션

박외철

부경대학교 소방공학과

Simulation of Fire in Large Cleanrooms

Woe-Chul Park

Dept. of Fire Protection Engineering, Pukyong National University

(Received February 11, 2014; Revised June 16, 2014; Accepted June 16, 2014)

요 약

FDS를 사용하여 대규모 클린룸에서의 화재에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 격자크기를 검토하여 크기가 $0.5 \times 0.5 \times 0.2 \text{ m}^3$ 인 격자를 사용하였다. 화재가 발생했을 때 온도와 가시거리, 일산화탄소의 성능위주설계 인명안전기준에 따라 안전을 확인하기 위하여 3개의 대규모 클린룸에서의 화재를 대상으로 하였다. 스프링클러가 작동하지 않는 경우에도 클린룸 모두 온도가 기준보다 낮아 안전함을 확인하였다. 또한 화재로 인한 가시거리의 감소와 일산화탄소농도도 무시할 수 있었다.

ABSTRACT

Cleanroom fires were simulated by using Fire Dynamics Simulator. A grid size of $0.5 \times 0.5 \times 0.2 \text{ m}^3$ was selected following review of grid sizes. Fires in three large cleanrooms were investigated to confirm safety by applying the requirements on temperature, visibility, and carbon monoxide concentration in performance based design. The worst situation without sprinkler system and air flow of 0.1 m/s downward in the cleanrooms was considered. It was confirmed that all the three cleanrooms were safe in case without sprinklers since the temperature was below the safety requirement. Decrease in visibility and carbon monoxide concentration due to the fires were negligible.

Keywords : Fire simulation, Cleanrooms, Available safe egress time, Life safety requirements

1. 서 론

성능위주설계가 시행되면서 대규모 클린룸에도 화재 시뮬레이션을 적용하여 유효피난시간(available safe egress time)을 산정한다. 건축물의 규모가 큰 경우에, 화재 시뮬레이션에 작은 격자를 사용하면 계산에 많은 시간이 소요되므로, 대규모 클린룸의 화재 시뮬레이션에서도 적절한 격자크기를 선정할 필요가 있다. 한편, 클린룸 화재에서는 가연성물질의 특성상 연기 발생량은 많지 않지만, 연기입자로 인해 큰 피해를 입게 된다.

국내 대부분의 화재 시뮬레이션에 사용하고 있는 Fire Dynamics Simulator (FDS)⁽¹⁾를 대규모 건축물에 적용할 때 격자크기에 대한 연구⁽²⁾에서 적정격자크기는 z방향의 크기가 0.2 m일 때 x, y방향은 각각 0.5 m 이내로 제시하였다. 이 값은 중형비 2.5 이내로, FDS의 권장 중형비 2~3 이내와 일치한다. Chiu et al.⁽³⁾은 FDS를 사용하여 바닥면적 3600 m^2 , 높이 12 m의 클린룸에 발생한 화재의 시뮬레

이션에서 격자크기는 0.125 m^3 이었고, 클린룸에서 화재가 발생하더라도 안전한 것으로 보고하였다.

본 연구에서는 3개의 대규모 클린룸에서 화재가 발생했을 때, 성능위주설계의 인명안전기준⁽⁴⁾에 따른 안전을 확인하고자 한다. 이를 위해 클린룸 내 화원으로부터 가장 먼 출입구에서의 온도와 가시거리, 일산화탄소농도의 세가지 기준치 중 어느 하나라도 초과하기 시작하는데 걸리는 시간, 즉 유효피난시간을 조사하였다. 일반적으로, 유효피난시간이 요구피난시간(required safe egress time)보다 커야 안전하다. 그러나 본 연구에서는 유효피난시간이 화재 시뮬레이션 시간인 300초보다 길게 나타나 요구피난시간을 산정하기 위한 피난 시뮬레이션이 불필요하므로, 피난 시뮬레이션에 대한 내용은 제시하지 않았다.

2. 연구방법

화재 시뮬레이션 대상의 클린룸은 반도체 제조용으로,

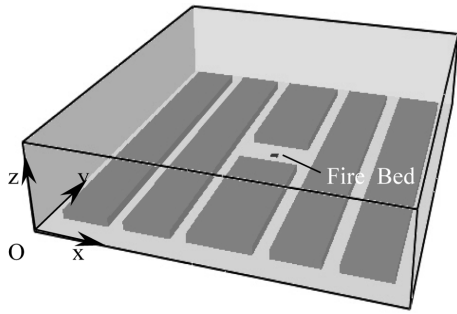


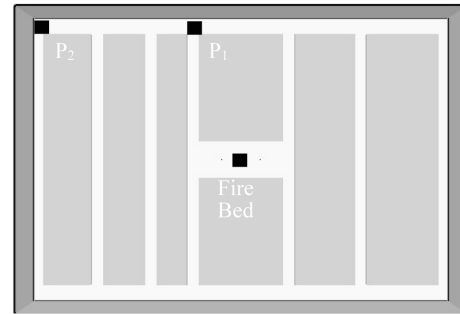
Figure 1. Computational domain and coordinates.

Table 1. Cleanroom Dimensions and Fire

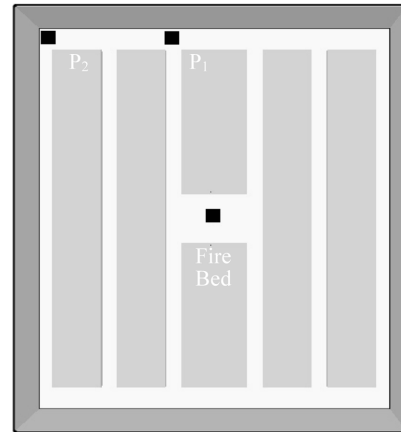
No.	Dimensions, m ³	Fire source
1	70 × 48 × 10	Polypropylene, 800 kW
2	44 × 48 × 10	Isopropyl alcohol, 3 MW
3	44 × 34 × 8	Isopropyl alcohol, 3 MW

사용되는 이소프로필 알콜(isopropyl alcohol) 등의 가연성 물질에 화재가 발생했을 때 연기입자가 경계 밖으로 이동하지 않도록 격벽(contamination wall)으로 둘러싸여 있다. 정상시에는 천장에서 공기가 유입되어 바닥을 통해 밖으로 배출되는 유속이 0.5 m/s이지만, 화재가 발생하면 내부 기류속도가 0.1 m/s로 유지되는 하향배연시스템(downward desmoke system)이 작동하게 된다. 본 화재 시뮬레이션은 화재발생 이후부터 화재 및 연기의 확산과정을 조사하므로, 내부공기의 하강속도를 0.1 m/s로 하였다. FDS에서는 공기의 유입구와 유출구를 정의할 필요 없이 간단히 천장과 바닥면에서의 속도를 입력하면 된다. 유입공기의 온도(기본값 20 °C) 등 기타 경계조건은 FDS의 기본값을 수정하지 않고 사용하므로 제시하지 않았다.

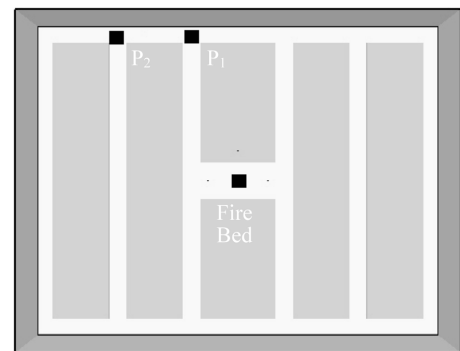
각 클린룸의 좌표계는 Figure 1에 나타나있는 바와 같고, 화원의 위치를 바닥의 중앙으로, 화원의 크기를 1 × 1 m²로 가정하였다. 또 본 연구에 사용한 각 클린룸의 크기와 가연성물질 및 열방출률은 Table 1과 같다. 각 클린룸의 크기에 따라 Figure 1의 원점의 좌표를 (0, 0, 0), 반대편 모서리의 좌표를 각각 (70, 48, 10), (44, 48, 10), (44, 34, 8)이 되도록 하였다. 여기서 좌표의 단위는 m이다. 가연성 물질은 각 클린룸에서 사용하는 물질 중 대표적인 것으로 폴리프로필렌(polypropylene)과 이소프로필 알콜(isopropyl alcohol, C₃H₈O)로 설정하였다. Chiu 등⁽³⁾의 화재 시뮬레이션 대상 클린룸에서도 가연성물질을 폴리프로필렌과 이소프로필 알콜로 설정하였다. 열방출률에 대한 선정기준이 없으므로 Chiu 등⁽³⁾의 연구와 유사하게 클린룸 1은 800 kW, 클린룸 2와 3은 3 MW로 하였다. 화재성장곡선은 폴리프로필렌과 이소프로필 알콜이 연소할 때 ultra fast⁽⁵⁾이며, Chiu 등⁽³⁾의 연구에서도 동일한 화재성장곡선을 적용하였다. 각 클린룸에서의 화재성장곡선은 결과 및 토론에



(a) Cleanroom 1



(b) Cleanroom 2



(c) Cleanroom 3

Figure 2. Cleanrooms and locations of measuring points P₁ and P₂ (no scale).

제시하였다.

격자크기 선정과 관련하여 이전연구⁽²⁾에서 수행했던 내용을 참고하였다. 즉, (1) z방향 격자크기를 0.2 m, 화염플룸 부근인 20 ≤ x ≤ 24, 22 ≤ y ≤ 26(단위 m)에는 x, y방향 격자크기를 0.25 m, 나머지 영역에는 0.5 m, (2) 클린룸 전체의 격자크기를 z방향 0.2 m, x, y방향 0.5 m의 2가지 격자로 각각 클린룸 2의 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 두 가지 격자크기에 대한 결과를 비교하기 위해 열방출률과 천장중심 부근의 점(z = 9.5 m)에서의 온도변화를 출력하였다. 이때 화재규모와 성장곡선은 Chiu 등⁽³⁾이 화재 시뮬레이션을 수행한 클린룸과 비슷한 규모이므로, 이와 동일

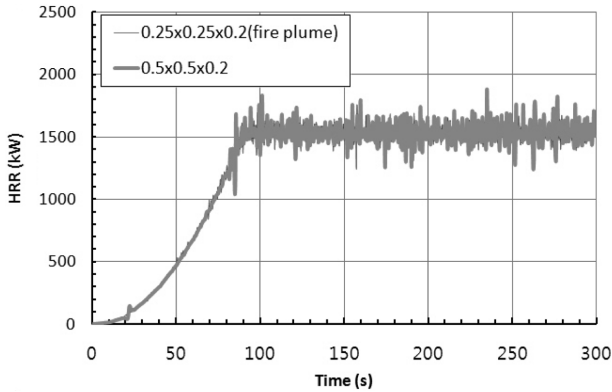


Figure 3. Comparison of heat release rate for selection of grid size.

하게 이소프로필 알콜이 연소하여 최성기 열방출률 3 MW까지 ultra fast⁽⁵⁾로 성장하다가 화재발생 90초 이후부터 1.54 MW를 유지하도록 하였다. 이 때의 열방출률 변화는 결과 및 토론의 Figure 3에 제시하였다.

클린룸 1~3의 화재 시뮬레이션에는 격자크기의 비교로부터 선정된 격자를 사용하였다. 또한 악조건에서의 안전을 확인하기 위해 스프링클러가 개방되지 않는 것으로 설정하였다. 스프링클러가 개방되면 온도와 일산화탄소 농도가 낮아지고 가시거리도 정상상태로 복귀하기 때문이다.

본 연구에서는 FDS V5.5.3을 사용하였고, 시뮬레이션 시간은 300초로 하였다. 화재 시뮬레이션 결과로부터 각 클린룸의 화원으로부터 가장 먼 출입구에서 높이 1.8 m 지점의 온도 80 °C 이하, 가시거리 5 m 이상, 일산화탄소 농도 1400 ppm 이하의 3가지 조건이 각각 유지되는데 걸리는 시간 중 가장 짧은 시간, 즉 유효피난시간을 조사하였다. 클린룸에 있는 출입문 중 화원으로부터 가장 먼 곳에 위치한 2개의 출입문 앞, 즉 Figure 2에 표시되어있는 P₁과 P₂을 측정점으로 하였다. 바닥으로부터 1.8 m 위에 위치한 이 두 점에서의 온도와 일산화탄소 농도, 가시거리의 변화를 출력하였다. 그러나 3개의 클린룸에서 모두 화재가 발생하여도 일산화탄소 농도가 매우 낮고 가시거리 감소도 작은 것으로 나타나 본 논문에는 간단히 언급하고 그 결과를 제시하지 않았다.

3. 결과 및 토론

3.1 격자크기

클린룸 2 (Figure 2b)를 대상으로 먼저 격자크기 0.5 × 0.5 × 0.2 m³를 사용하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 이어 화염플럼(fire plume) 부근에서의 온도구배가 크을 고려하여 화원 중심으로부터 4 × 4 m² 내에는 작은 격자크기 0.25 × 0.25 × 0.2 m³, 나머지 영역에는 격자크기 0.5 × 0.5 × 0.2 m³로 하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

가연성물질의 종류와 열방출률은 이전 연구⁽²⁾와 동일하

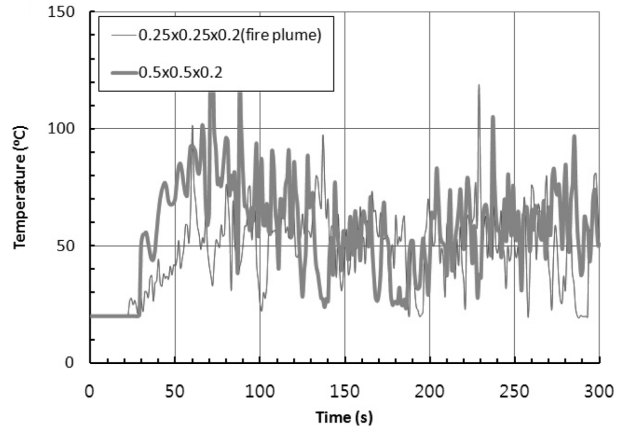


Figure 4. Comparison of temperature variation with time at the center of ceiling.

게 ultra fast⁽⁵⁾ 화재성장으로 최성기에 1.5 MW의 열을 방출하는 이소프로필 알콜 화재이다. 두 가지 격자에 대하여 열방출률을 비교한 Figure 3과 같이 두 가지 격자크기에 따른 열방출률의 차이가 없음을 확인할 수 있다.

Figure 4는 클린룸 천장 중심에서의 시간에 대한 온도변화를 비교한 결과로서, 격자크기에 따른 차이가 작음을 알 수 있다.

따라서 화염플럼 주위에 작은 격자를 사용할 필요가 없으므로, 본 연구에서는 전 계산영역에 같은 격자크기인 0.5 × 0.5 × 0.2 m³를 사용하였다.

3.2 클린룸 1

바닥면적 70 × 48 m², 높이 10 m인 클린룸 1은 바닥의 중앙에 폴리프로필렌이 연소하여 800 kW의 열을 방출한다. 화재성장곡선은 Chiu 등⁽³⁾의 화재 시뮬레이션에서 적용한 열방출률을 참고하여 Figure 5에 나타나있는 바와 같이 발화 후 50초에 400 kW, 217초 이후 800 kW이다. Chiu 등⁽³⁾은 발화 후 217초의 800 kW에서 300초에 0으로 선형적으로 감소하는 것으로 하였으나, 본 연구에서는 악조건에서의 결과를 얻기 위해 217초 이후에도 800 kW를

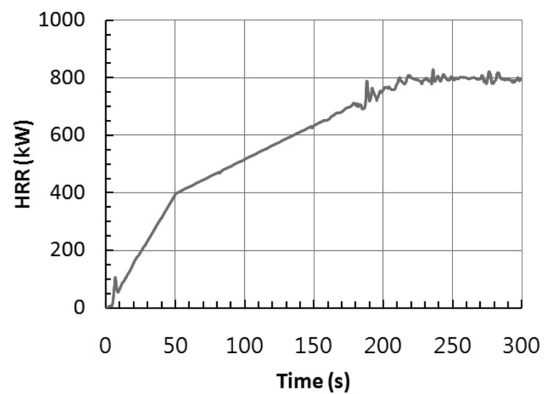


Figure 5. Heat release rate for cleanroom 1.

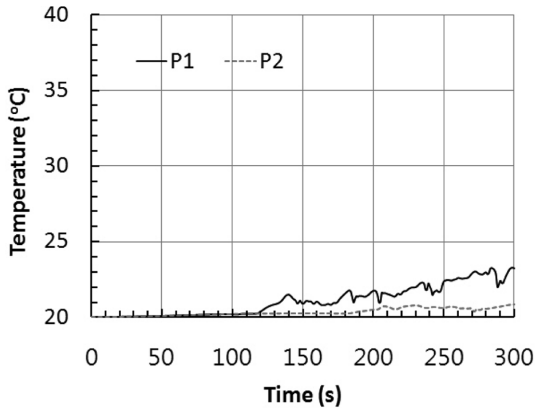


Figure 6. Temperature variation with time at P₁ and P₂ of cleanroom 1.

유지하는 것으로 설정하였다.

Figure 6에는 바닥으로부터 1.8 m 높이에 위치한 두 점 P₁과 P₂에서의 시간에 대한 온도변화를 나타내었다. P₂에서의 온도가 인명안전기준인 80 °C보다 훨씬 낮게 나타났다. P₂에서의 온도가 가까운 P₁보다 낮은 것은 점 P₂가 화원으로부터 더 먼 곳에 위치하기 때문이다. 가시거리는 두 점에서 모두 FDS의 기본값인 30 m이었고, 일산화탄소농도는 0으로, 화재로 인해 가시거리와 일산화탄소농도에 영향을 미치지 않았다. 결과적으로 클린룸 1에서 화재가 발생하더라도 화원으로부터 가장 먼 출입구에서 높이 1.8 m 지점의 온도 80 °C 이하, 가시거리 5 m 이상, 일산화탄소농도 1400 ppm 이하의 3가지의 인명안전기준을 만족함을 알 수 있다.

3.3 클린룸 2

바닥면적 44 × 48 m², 높이 10 m인 클린룸 2에는 이소프로필 알콜과 다른 여러 가지 가연성액체가 혼합되어 있어 이소프로필 알콜 화재로 설정하였다. 열방출률은 Figure 7 과 같이 ultra fast로 성장하여 최성기 3 MW가 되고, 이후 이 열방출률이 계속 유지된다. 스프링클러는 발화 후 57초

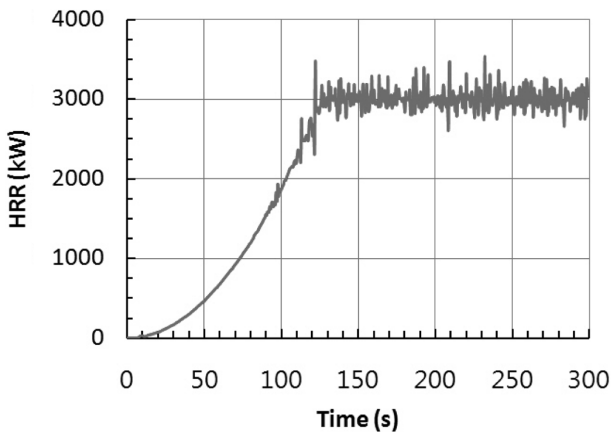


Figure 7. Heat release rate for cleanroom 2.

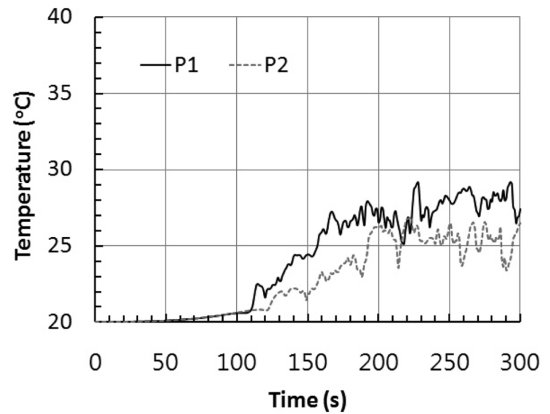


Figure 8. Temperature variation with time at P₁ and P₂ of cleanroom 2.

에 개방되는 것으로 나타났지만, 스프링클러가 열리는 것보다 열리지 않을 때가 재실자들에게 더 위험하므로, 앞에서 언급한 바와 같이 스프링클러가 작동하지 않는 것으로 설정하였다.

Figure 8에는 P₁과 P₂에서의 온도변화가 나타나있다. 클린룸 1에 비해 온도가 높지만, P₂에서의 온도가 인명안전기준의 80 °C보다 훨씬 낮다. 점 P₂에서의 가시거리는 감소하지 않아 기본값인 30 m로 나타났고, 일산화탄소 농도도 매우 낮았다. 점 P₂에서의 결과로부터 유효피난시간은 시뮬레이션 시간인 300초보다 훨씬 더 길 것으로 판단할 수 있고, 따라서 클린룸 2에서 화재가 발생하더라도 가장 먼 출입구에서의 인명안전기준을 초과하지 않으므로 안전함을 확인할 수 있다.

3.4 클린룸 3

클린룸 3은 바닥면적 44 × 34 m, 높이 8 m로 클린룸 2보다 작다. 클린룸 3에서의 작업내용과 가연성물질의 종류가 클린룸 2와 비슷하므로, 클린룸 2와 같이 이소프로필 알콜 화재, 열방출률 3 MW, ultra fast 성장으로 설정하였다. Figure 9은 클린룸 3에서의 열방출률곡선이다.

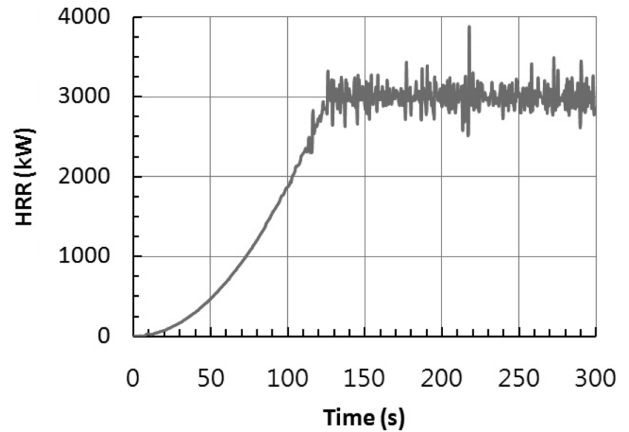


Figure 9. Heat release rate for cleanroom 3.

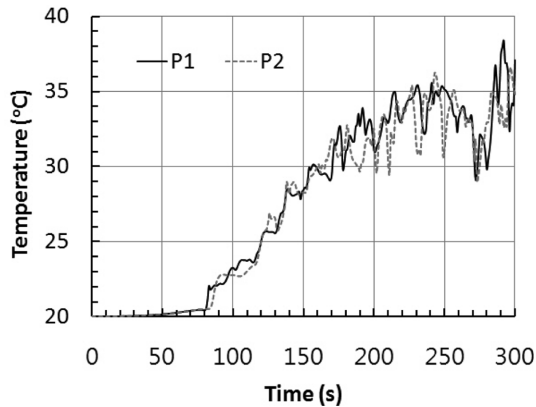


Figure 10. Temperature variation with time at P₁ and P₂ of cleanroom 3.

스프링클러가 정상적으로 작동하는 경우에는 발화 60초 후에 스프링클러가 개방되는 것으로 나타났지만, 앞의 두 클린룸의 경우와 마찬가지로 스프링클러가 개방되지 않는 것으로 설정하였다. P₁과 P₂에서의 온도는 Figure 10과 같이 발화 후 300초에서도 40°C를 넘지 않았다. 가시거리의 변화도 매우 작고 일산화탄소농도도 미미하여 여기에 제시하지 않았다. 인명안전기준인 온도 80°C 이하, 가시거리 5 m 이상, 일산화탄소농도 1400 ppm 이내를 모두 만족하였다. 따라서 점 P₂에서 이 3가지 기준에 의해 결정되는 유효피난시간은 계산종료시간인 300초보다 훨씬 길다. 이 결과로부터 클린룸 3도 클린룸 1과 2와 같이 안전함을 알 수 있다.

이상과 같이 3개의 대규모 클린룸에서 화재가 발생하더라도 안전한 것은 공간의 크기에 비해 상대적으로 가연성 물질의 양이 적고, 가연성물질에서 발생하는 연기의 양이 많지 않기 때문으로 판단된다. 참고로, 위의 화재 시뮬레이션에서 나타난 유효피난시간은 바닥면적 9 m²당 1명의 인원을 기준으로 Simulex⁽⁶⁾를 사용하여 산정한 클린룸 1~3의 요구피난시간 111초, 182초, 118초보다 훨씬 길므로 안전함을 재확인할 수 있다. 한편, 비록 인명의 안전에는 문제가 없지만, 연기입자로 인해 반도체제조공정에 큰 피해가 발생할 수 있으므로, 인근 공간으로 연기입자의 확산을 방지하는 격벽이 요구되고, 스프링클러도 입자발생을 줄이기 위해 필요하다.

4. 결 론

대규모 클린룸에 화재가 발생할 때, 성능위주설계 인명

안전기준에 따른 안전을 확인하기 위하여 3가지 클린룸 화재에 대하여 FDS를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 격자크기 0.5 × 0.5 × 0.2 m³와 화염플룸 주위에 더 작은 격자 배열한 경우, 시간에 대한 온도변화에 차이가 거의 없으므로, 화염플룸 주위에 작은 격자를 배열할 필요가 없어 0.5 × 0.5 × 0.2 m³의 격자를 사용하였다. 스프링클러가 작동하지 않는 경우에도 바닥에서부터 1.8 m 높이에서의 온도가 3 클린룸에서 모두 40°C를 넘지 않아 안전함을 확인하였다. 또 가시거리의 감소와 일산화탄소농도도 무시할 수 있을 정도로 작아 인명안전기준을 만족하므로 안전함을 알 수 있었다. 3가지 대규모 클린룸에서 모두 안전한 것으로 나타난 것은 공간의 크기에 비해 가연성물질의 양이 적고 연기의 발생량도 많지 않기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(과제번호 C-D-2013-0447)에 의하여 연구되었음.

References

1. K. McGrattan, R. McDermott, S. Hositikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST SP 1019-5, NIST, Gaithersburg, MD, USA (2010).
2. W. C. Park, "Selection of Grid Size in Fire Simulation for Large Scale Buildings by Using FDS", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 67-72 (2012).
3. C. W. Chiu, C. C. Wang and C. H. Chen, "Evaluation of Downward Desmoke System in a Cleanroom", International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, Vol. 7, No. 4, pp. 155-173 (2005).
4. Y. J. Lee, K. C. Ko and W. C. Park, "A Study on Performance-Based Design Enforcement", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 68-73 (2011).
5. NFPA 92B, "Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces", National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA (2008).
6. IES, "Simulex User Guide, Virtual Environment 5.4" (2003).