Clean Room 기류순환에 따른 피난 연구
(Study on the evacuation by air stream in clean room)

이동영 · 윤여송 · 김성민 · 윤명오* · 송윤석*

삼성전기(주) 환경안전팀 · *서울시립대학교 도시방재안전연구소

1. 서 론

우리나라는 IT 강국으로 관련 부품 등을 생산하기 위한 Clean Room 시설이 기하급수적으로 증가하고 있으나, 열·연기 확산에 대한 과학적인 분석이 멀티플렉스, 할인점, 고층 빌딩 등에만 국한되고 있어 생산시설에 대한 적극적인 검증이 이루어지지 않고 있다. 또한 Clean Room 시설이 가장 많은 국가로 우리나라와 더불어 미국, 일본, 대만 정도에 지나지 않아 국제적으로 Clean Room에 대한 많은 방재기준 제정 및 연구가 미흡하다.

화재시 열·연기 기류 이동은 일반적으로 상부와 하부의 온도차에 의해 수직이동 및 수평이동을 하여 실내 전체를 연소에 의한 열·연기로 충만하게 된다. 이에 반해 Clean Room은 이와 같은 인자에 외부보다 30% 이상 높은 내부압력과 Top-down 방식의 고풍량 공조시스템으로 인해 열·연기 확산 형태가 상이하게 발생할 수 있다.

Clean Room은 청정도에 관련된 공조시설로만 구성되어 있고, 가스누설 및 연기발생시에 작동하는 긴급배출시설이 일부 설치되고 운영되어지고 있으나 감지기에 의한 동작에 의한 제품 불량 발생이 많아 사용이 되지 않고 있는 실정이다.

본 연구를 통해 가스누출, 연기발생시에 기류에 대한 영향을 파악하고, 공조시설의 활용을 통한 재실자의 피난 방안을 제시하여 향후 Clean Room에 대한 안전성을 확보하는데 기여하고자 한다.

2. 사고사례의 분석

다음의 [표 2-1]은 일본 Clean Room을 사용하는 반도체 공장에서 공개된 사고를 통계화한 것으로 대부분 가스 누출 및 화재 발생으로 인한 내용이다.

[표 2-1] 반도체 가스에 의한 사고 종류별 분류

사고 종류	건 수	백분율	사고 종류	건 수	백분율
누설 발화	17	42.5%	누설 중독	2	5%
폭 발	8	20%	산소 결핍	1	2.5%
누설 화재	7	17.5%	자연 발화	2	5%
누설 폭발	2	5%	발 화	1	2.5%

[표2-1]에서는 반도체 공정에서의 SiH4, PH3 등 특수가스에 의한 사고만을 정리한것 일뿐 일반 유기용제, 플라스틱 용기, 장비 등에 의한 사고는 제외한 것이지만, 거의 모든 사고에서 인명 피해가 발생한 것으로 알려지고 있다. 또한 불량 발생으로 인한 기업의 손실은 상당한 수준인 것으로 알려져 있다.

Clean Room에서의 사고는 외부와의 밀폐로 전원이 차단되면 피난 방향을 찾지 못하며, 사고의 원인이 일반 생산시설보다 다양하다.

유독성/발화성/가연성 화학물질을 다량 사용, 저장하고 있으며, 내실자는 모두 방진복을 착용하며, 작업자가 상주 관리하는 장비가 아니라 화재 사고 등 사고 발생에 대한 감시가 늦어져 대형 참사를 발생할 요인이 있다.

3. 규정, 기준의 비교 분석

Clean Room에 대한 국내 법규는 산업시설군의 공장, 연구시설에 포함되어 있으며,소방법에서의 화재 제어시설로는 일반건축물과 똑같은 규정을 적용받고 있는 상황이다. 국외의 기준은 미국의 FM(Factory Mutual Loss Prevention Data Sheet), NFPA와 국제 반도체 기준인 Semi-Codes에서 안전에 대한 시설기준이 제시되고 있으나, 상세한 기술기준은 제공되지 않고 있다. 가장 상세한 기준을 제시하고 있는 기준은 FM으로서 안전에 관련된 기준의 요약은 [표3-1]과 같다.

[표 3-1] FM에서의 안전관련 기준

구 분	내 용	비고
화재 방호 측면	-가스계 소화설비 -스프링클러 소화설비 -가연성 물질 취급 덕트내 소화설비 -소화기, 옥내소화전 설비	
소음, 진동 방호 측면	-65dB 이하 유지관리	
연기제어 시스템 측면 (Fume/Smoke)	-제연설비의 설치 유무 -제연설비가 설치되지 않았을 경우 화재실 주변은 50Pa 유지	
환경 제어 측면	-온도, 습도, 압력차 및 먼지관리 -가연성, 유독성 가스의 배출 유효성	
전원공급에 관한 사항	-UPS(무정전 전원장치) 설치 유무	
건축구조 측면	-내화구조, 방화구획, 안전구획 -내장재의 불연성	

ISO/TC 209에서 Clean Room에 대한 표준이 일부 확정되어 있으나, 안전에 대한 사항은 전혀 언급되지 않고 있으며, 청정도를 관리하는 방법 및 공조 방식에 대한 기준만을 제시하고 있다.

[표 3-2] Clean Room 공조 방식에 따른 구분

Clean Room 방식	궤한수	평균 풍속
난류형 방식	20~80회/Hr	0.4~1.1m/s
AHU(Air Handling Unit) 방식	350~450회/Hr	0.4m/s
CTM(Clean Tunnel Module) 방식	400~600회/Hr	0.4m/s
Open Bay 축류(Axial Fan) 방식	400~600회/Hr	0.4m/s
Open Bay(FFU : Fan Filter Unit) 방식	400~600회/Hr	0.4m/s

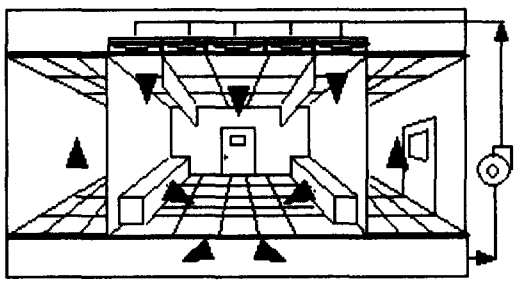
크린룸의 공조 특성은 Class에 따라 궤한수(시간당 실내공기 순환수)가 최소 20회에서 80회로 조정하고 있으며, 공조 방식에 따라 [표 3-2]과 같이 5개로 구분할 수 있다.

또한 연기감지기 및 가스누설 감지기로 인하여 가스 공급을 차단하는 비상정지스위치를 사용하도록 각 국의 기준에서는 제시하고 있으나, 현실적으로 연동하여 사용하는 것은 용이하지가 않다. 그 이유로는 감지기의 오동작 발생의 건수가 적지 않으며, 공정의 중지로 인해 발생하는 피해는 상상을 초래하기 때문이다.

4. 연기, 열 유동에 따른 피난 분석

Fume와 Smoke는 구조로만 본다면 차이점이 있지만, 성상은 유사하다고 볼 수 있으며 실내에서 발생한 경우에는 사람이 투과할 수 있는 가시거리를 급격히 줄이는 역할을 한다.

Clean Room에서의 기류는 [그림4-1]과 같이 상부 급기, 하부 순환으로 되어 있어 연기 발생 및 가스 누출의 경우에는 일반실보다 빠른 시간에 내실자의 호흡기에 도달하게 된다.



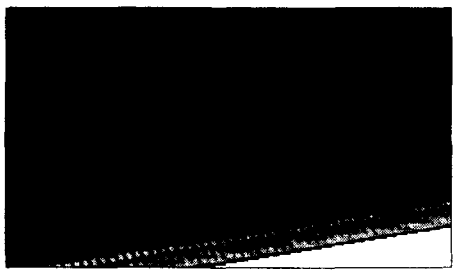
[그림4-1] Clean Room 공조 흐름 방식

미국의 NIST에서 개발된 CFD 모델인 Fire Dynamic Simulator(FDS) 3.0을 사용하였다. FDS의 Large eddy simulation 모델은 기존의 κ-ε 난류모델에 비하여 다양한 화재시나리오에 적용된 화재전용 수치해석 프로그램이다.

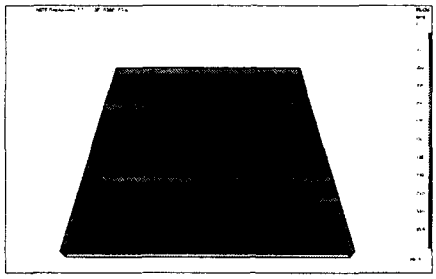
화재 발생공간은 밀폐공간으로 가정하였으며, 공간 내·외부사이의 열 및 물질 전달은 없으며, 초기 상태 공간의 온도는 20℃, 초기의 유동은 전혀 없는 것으로 가정하고, 벽면은 단열조건으로 가정하였고, 열방출량을 3MW로 하였다.

적용된 격자는 균일, 정렬 격자계로 생성된 격자의 개수는 240,000개이며 생성된 격자계와 열, 연기 유동 모델은 [그림 4-2]와 같다.

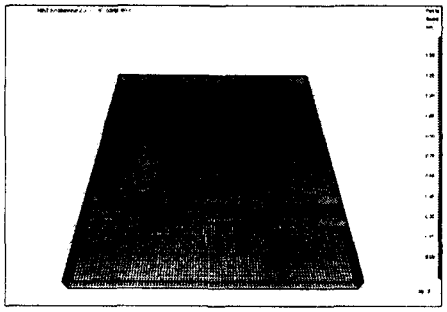
압력에 대한 영향은 실내의 고른 분포로 감안되지 않았으며, 공조에 대한 기류 흐름에 대한 영향은 풍속과 궤한수 등을 고려하여 1.7배의 연기 확산이 가능한 것으로 발연관을 사용하여 실측하였다.



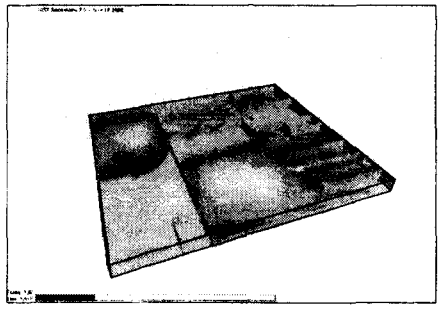
A. 공간 격자계



B. 열온도 분포 [발화300초후, 3MW]



C. 속도분포 [발화300초후, 3MW]



D. 연층하강 [발화130초후, 3MW]

[그림4-2] 열,연기 확산 모델링

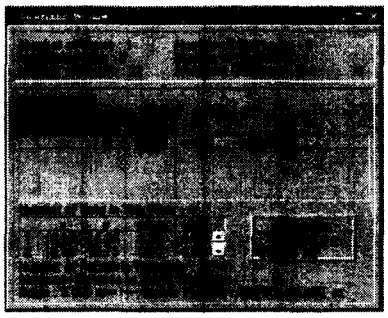
화재시 초기에는 화원 주변과 직상부의 온도가 급격히 상승하고, 시간이 경과함에 따라 차츰 연층이 뜨거워지고, 연층의 영역이 넓어지고 있다.

속도벡터는 화재시 초기에는 천장 부근에 흐름의 작은 와류가 형성되나 시간이 지남에 따라 이 와류는 점점 크게 되는 것을 알 수 있었다. 연층하강은 고온의 화원에 의한 열기류(Plume)는 부력에 의해 상승되고, 주변의 공기를 흡입하여 천장까지 상승한 후 천장을 따라 퍼져나간다. 연기의 온도와 공기의 온도차가 5℃이상의 차이를 갖는 고온 가스층을 연기층으로 취급하였다.

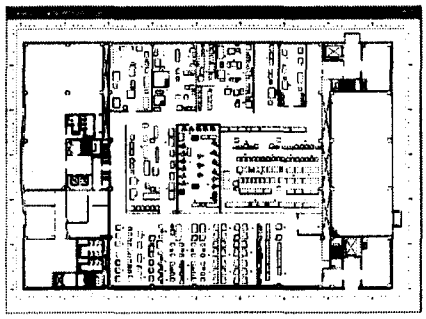
피난속도는 방진복 착용, 정상인보다 거동이 자유롭지 못하며, 시야가 좁은 점 등을 고려하여 일반인 평균속도의 1/2인 평균 0.5m/s로 지정하여 실시하였다.

피난 인원은 70명으로 하였으며, 피난출구 개수는 CAD 상의 Point로 4개소로 다음과 같이 하였다.

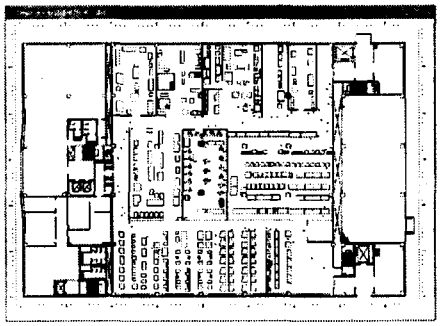
Exit 1 : (10.35,15.38 m), 0.00 degrees, 0.90 m wide
Exit 2 : (10.35,12.73 m), 0.00 degrees, 0.90 m wide
Exit 3 : (68.57,48.63 m), 0.00 degrees, 2.30 m wide
Exit 4 : (68.65,3.15 m), 0.00 degrees, 2.30 m wide



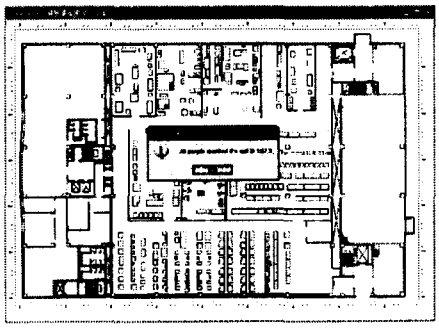
A. 피난시뮬레이션 초기조건 설정



B. 피난출구 및 피난인원배치



C. 피난 시작 30초 후



D. 피난 시작 118초 후

[그림4-3] 피난 모델링

연층의 Clear Height(사람의 키 높이를 기준)가 화원의 위치를 기준으로 우측면까지는 약 120초 후에 피난조건의 한계를 넘어서 있음을 알 수 있고, 열기류가 통로를 따라 퍼져나가는 아래면의 경우는 약 210초 이후에 피난조건의 한계를 넘어서고 있음을 알 수 있었다.

따라서, 화원의 위치 변동에 의해 각 부분의 Clear Height가 차이가 있겠지만, 종합적으로 검토를 해본 결과 약 170초 이후 연층 Clear Height가 피난조건의 한계를 넘어선다

또한 연기 유동에 대한 공조시스템을 적용한다면 피난에 영향을 줄 연층 하강 시간은 빨라질 것으로 예상이 되며, 화재 감지 시간까지를 감안하지 않는다고 보더라도 내실자 피난 시간인 118초를 상회할 것으로 예측된다.

5. 결 론

클린룸의 경우 상주하여 근무하는 인원이 공간면적에 비해 적으며, 공간상황을 모르는 외부인의 출입이 거의 없다는 점 등 비상시 피난에 유리한 점들이 있다. 그러나 많은 장비 및 기기들로 인한 피난동선의 혼잡 및 피난장애는 피난효율을 떨어뜨릴 수 있는 요인이며, 작업장별로 형성된 구획은 피난시 동선을 길게 하여 피난시 피난시간이 늦어지는 원인이 된다.

공조에 대한 감안을 통해 피난 동선의 단순화, 연기 감지기 및 가스 누설 감지기 등과의 공조 시스템 연동에 대한 다양한 연구가 진행되어야 하며, 청정도를 고려한 공조 시스템에 연기의 제어가 가능한 제연 및 배연 시스템에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 하며, 체계적인 기술자료의 축적으로 안전을 확보할 수 있는 기준이 제시되어야 하겠다.