

반도체 C/R FAB 화재시 비상배연시스템

이정구, 조재형, 윤재훈, 단희웅*, 김원국**, 김환진**, 이상곤***

삼성물산 건설부문 건축사업본부 건축기전팀

*삼성전자 반도체부문

**서울대학교 화재안전공학센터

***리스크 매니지먼트 써포트

A Study On the Emergency Exhaust Venting System in Clean Room

Jung Coo Lee, Jae Hyoung Cho, Jae Hun Yoon, Hee Woong Dan*

Won Kook Kim**, Hwan Jin Kim**, Sang Kun Lee***

Samsung Engineering & Construction Corporation

**Samsung Electronic Corporation*

***Seoul National University Fire Safety Engineering Center*

****Risk Management Support Co.*

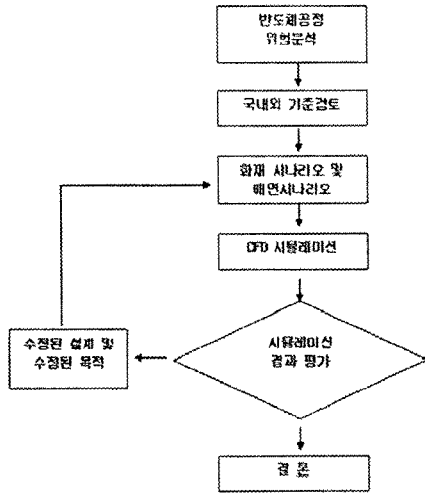
1. 서 론

반도체 생산을 위한 FAB내부는 제품불량을 방지하기 위하여 공정별로 항상 CLASS1 ~CLASS1000정도의 청정도를 유지하여야 한다. 따라서, 이러한 반도체 공정은 무창층의 밀폐 공간으로서 공기질의 관리를 위하여 HVAC시스템의 가동하고 공기 통로상에 HEPA 필터를 사용하여 먼지나 미세입자를 걸러내고 있다. 이러한 시설내부에 화재가 발생할 경우 값비싼 생산설비를 급속히 오염시켜 막대한 피해를 초래할 수 있다. 또한 열/연기로 인한 인명피해를 야기 시킴으로써 안전조업에 차질을 빚게 한다. 주요피해는 열/연기로 인한 직접적인 피해뿐만 아니라 기업휴지손실 및 대외 신용도 감소 등을 야기시켜 기업의 존립에도 심각한 영향을 미칠 수 있게 된다. 이에 반도체 클린룸내 공조 방식에 따른 배연 시스템의 구성과 효율적인 측면을 CFD 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하여 최적의 긴급배기 시스템과 화재 시 최적의 공조시스템 운영방안을 수립 하고자 한다.

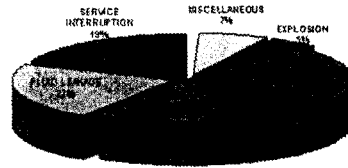
2. 수행절차

이 연구의 수행절차는 크게 반도체공정위험분석, 국내외 기준검토, 화재시나리오 개발 및 설계화재, CFD 화재 시뮬레이션, 시뮬레이션 결과 평가, 문제점 있는 설계 안 수정 및 재평가 및 결론으로 나누며, 절차도에 관한 순서는 [그림-1]에 정리하였다.

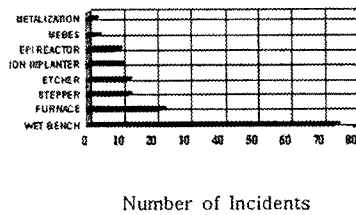
[그림-1] 수행절차



[그림-2] 반도체공정 사고종류별 비율



[그림-3] 장비별 사고사례통계



2.1 반도체 공정 위험분석

2.1.1 사고통계 분석

국내의 경우 반도체 공정 및 클린룸에 관한 사고통계를 제시하지 않고 있으며, 해외의 경우 FMRC 에서 제공하는 통계자료가 있으며 이에 관한 자료는 [그림-2]에 반도체공정 사고종류를 [그림-3]에 장비별 사고사례를 정리하였다. 또한 해외의 FM Global, Industrial Insures, 그리고 Munich Reinsurance Company등에서의 사고통계자료를 보면 1980~2000년 까지 총 사고발생건수 407건에 달하며, 실제사고는 이들 보험사에 보고 된 사고를 제외하 고 약 5배로 추정되고 있다.

1) 반도체공정 사고종류

반도체공정 사고종류를 살펴보면 화재로 인한 사고가 47%로 가장 빈번 하였으며, 액체의 누출이22%, 서비스 인터럽션이 19%, 기타가 7%, 폭발이 5% 순으로 나타났다. 또한 전기적 원인이나 유기용제의 발화 또는 누출 및 확산 등과 같은 위험 형태가 반도체공정 내 늘 존재하는 것으로 판단되어진다.

2) 장비별 사고발생통계

반도체공정 내 장비별 사고발생통계를 살펴보면, Wet Bench의 경우 74건으로 가장 많은 화재를 발생시켰으며, Furnace 22건, Stepper와 Etcher가 각 12건, ION IMPLANTER 10 건, EPI REACTOR 9건, MEBES 3건, 그리고 METALIZATION 2건 순으로 나타났다.¹⁾

2.1.2 주요가연성 물질

반도체공정 내 주요 가연성 재질의 장비 및 물질은 다음과 같다.

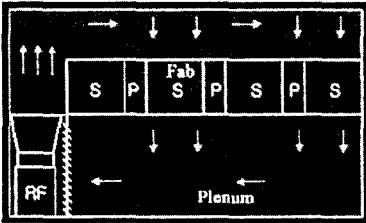
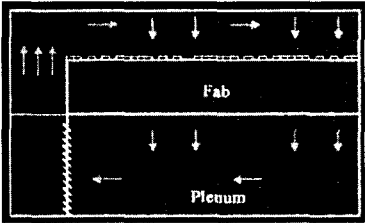
- Wet bench/stations
- Spin rinse dryers
- Reticle storage units, wafer boxes, etc
- 가연성 플라스틱 재질의 덕트
- 가연성재질의 주요구조부재
- 천장(HEPA, ULPA필터)/벽(FRP, 아크릴 등)
- 덕트마감재질(FRP)
- 아크릴 또는 투명판넬

이러한 물질들에 대한 화재에 관련된 기준은 FM 4910, ASTM E-2058, NFPA 287 등에서 규정하고, 특히 FM4910에서는 Wet Bench, CMP, Tube Cleaner, 배연덕트, 파티션 등에 관한 화재전파 및 난연성 시험기준을 마련하고 있으나, 현재 대부분의 장비 및 가연성물질들은 이러한 기준을 만족 시키지 못하는 것으로 판단된다.

2.1.3 공조설비 시스템

반도체공정의 공조설비 시스템은 크게 Axial Fan 방식과 Fan Filter Unit (이후 FFU 라 한다) 방식의 2가지 경우로 나누어 볼 수가 있으며, 각 공조방식에 관한 간략한 그림과 공조 방식의 설명은 [표-1]에 정리하였다.

[표-1] 반도체공정의 공조설비 시스템

< Axial Fan 공조 방식 >	<FFU 공조방식 >
	
<p>Axial Fan 방식은 Plenum에 팬 후단을 통하여 공정라인을 거쳐 온 공기를 흡수하고 전단을 통하여 재순환시키는 방식의 공조시스템이며, Fab 내부에 위치하고 있는 서비스 공간과 프로세스 공간의 경우 각각 Class1000과 Class1의 청정도가 요구된다</p>	<p>FFU 방식은 별도의 Fan과 HEPA 또는 ULFA 필터를 결합함으로써 Suspended Ceiling을 구성하여 실내의 청정도를 유지한다. FFU Fan 후단을 통하여 흡수된 공기는 Fab와 Plenum 그리고 수직샤프트를 통하여 송출되고, 이 공기는 다시 FFU전단을 통하여 재순환된다.</p>

*S:서비스 공간, P: 프로세스 공간, RF: 순환공조 팬

2.1.4 소방설비

1) 자동 탐지 설비

반도체 공정에 일반적으로 설치되는 자동 화재탐지설비는 크게 장비 내부 감지기와 장비외부 감지기의 2가지로 분류할 수 있다. 장비내부 감지기는 UV-IR 감지기가 부착되어 있으며, 장비외부의 경우 연감지기 및 공기흡입형 VESDA 감지기가 설치된다. 또한 실내 공기 청정도를 감시하기 위하여 Ambient 감지기가 설치되어 있다. 따라서 장비에 의한 화재는 일차적으로 UV-IR감지기에 의하여 일차 감지되고, 외부의 공기흡입형 감지기에 의하여 2차 감지된다.

2) 소화설비

Wet Bench과 같이 화재 위험성이 높은 장비의 경우 이를 진압하기 위한 가스계 소화설비가 국소 방출 식으로 설치되는 것이 일반적이며, 이 외에도 물 분무 살수설비도 일부 갖추고 있다.

2.2 국내외 기준검토

국내외 제연시스템에 관한 기준 검토는 국내법은 국가화재안전기준 501을 검토하였으며, 해외 기준은 NFPA 318, NFPA 204, FM 7-7, FM 1-56과 SEMI S2-0302를 검토하였으며 각 기준에 관한 세부내용은 [표-2]에 정리하였다.

[표-2] 반도체공정 제연설비 관련 국내외 기준 및 내용

기준	내용
국가화재안전기준 501	제연설비의 화재안전기준
NFPA 318	Standard for the Protection of Semiconductor Fabrication Facilities
NFPA 204	Standard for Smoke and Heat Venting
FM 7-7	Semiconductor Fabrication Facility
FM 1-56	Clean Rooms
FM 1-10	Smoke & Heat Venting in Sprinklered Building
SEMI S2-0302	Semiconductor Equipment & Material International 안전기준

보다 구체적인 기준 검토를 해보면 NFPA 318과 FM 7-7, 그리고 SEMI S2-0302의 경우 반도체 공정의 안전관리를 위한 전반적인 내용을 담고 있으며, NFPA 204와 FM 1-56, FM 1-10의 경우 배연설비 구성에 관한 구체적인 내용을 담고 있다. 배연설비에 관한 국내외의 법규 및 기준에 관한 검토의 결과는 [표-3]에 정리했다.

[표-3] 배연설비 관련 국내의 법규/기준 검토 결과

분 류	국내 소방관련법*	NFPA 318**	FM 7-7***	SEMI S2-0302****
배연설비 설치유무	규정없음	설치	설치	설치
자탐설비연동	○	○	○	○
공조설비연동	규정없음	○	○	규정없음

- * 배연설비 설치에 관한 국내법은 시행령 제15조에 자탐연동은 NFSC 제11조 5의 2항에 규정
- **배연설비 설치에 관한 NFPA 기준은 3.5.5항에 자탐연동은 3.5항에 공조설비연동은 A3.5.5항에 규정
- ***배연설비 설치 및 자탐연동에 관한 FM 기준은 2.2.2항에 공조설비연동은 2.2항에 규정
- ****배연설비 설치 및 자탐연동에 관한 SEMI 기준은 14.4.3.5항에 규정

위의 [표-3]의 결과 이외에도 NFPA와 FM기준에서는 화재감지기와 전체 공조 설비와 연동 및 Shutdown에 관하여 규정을 두고 있다. 그 결과 화재시 열/연기 발생으로 인한 클린룸 전체의 위험확대를 줄이기 위해서는 순환공조 Fan을 정지시켜야 한다.

2.3 화재시나리오 및 배연시나리오

[그림-1]의 사고통계와 가연물의 종류를 고려해 볼 때, Wet Bench화재의 발생가능성이 가장 크며, 또한 주로 PVC로 구성된 가연성재질은 주요 장비 중 가장 많은 량의 연기를 생성할 것으로 판단된다. 이러한 사실을 근거로 판단하여 Wet Bench에서의 화재를 긴급 배연시스템의 기본설계를 위한 화원으로 결정하였다.

반도체 공정에서 Wet Bench은 반도체 표면의 오염을 제거하기 위해 사용되는 장비이다. 이때 웨이퍼를 건조시키는 IPA 물질을 사용하게 되는데 이 물질은 독성 물질인 동시에 화재위험이 많은 물질이다. 이에 IPA에서의 액면화재 연소로 인하여 초기 화재가 진행되고, 이 화재로 인하여 PVC재질의 Wet Bench 외장의 연소로 이어지며, 이로 인하여 간막이 구획의 화재로 이어져 인접 구획인 Process Area로 화재가 확대되는 과정을 이 연구에서 설정한 화재시나리오로 채택했다.

이 연구의 목적은 화재초기에 발생하는 연기를 효과적으로 제어해주는 긴급배연시스템을 설정하는데 있다. 따라서 배연용량은 Sprinkler 작동할 때, 최대 화재크기에서 배출되는 연기량까지 제어하는 것으로 한정한다. CFD 시뮬레이션을 수행하기 위한 시나리오를 위한 가정은 다음과 같다.

- Wet Bench 장비 내부에 있는 UV-IR 감지기의 고장으로 장비 내 이산화탄소 소화설비는 작동하지 않는다고 가정
- 성장한 화재는 Plenum 상부에 설치된 공기 흡입형 감지기에 의하여 화재를 감지한다고 가정
- Axial Fan 방식의 배연 용량을 검증하기위한 공간크기는 가로 31.1m 세로 27.5m 높

이 8.2m로 가정하며, 이 공간은 공조 Fan이 작동하는 Plenum(높이 5.2m)와 Fab (높이 3m)의 두 공간으로 나뉜다고 가정

- FFU 방식의 배연용량을 검증하기 위한 공간은 가로 36m 세로 18m 높이 9.2m로 가정하고, 그 공간은 Plenum(높이 5.2m)와 Fab (높이 4m)으로 나뉜다고 가정
- 배연설비는 1m²당 1CMM의 배연용량을 갖추었다고 가정했으며, Axial Fan 공조방식 실에서는 각 구획된 실 당 1.2m*0.6m의 크기를 가진 배연구 2개, FFU 공조 방식의 실에서는 0.5m*0.3m의 크기를 가진 배연구 8개가 설치되었다고 가정

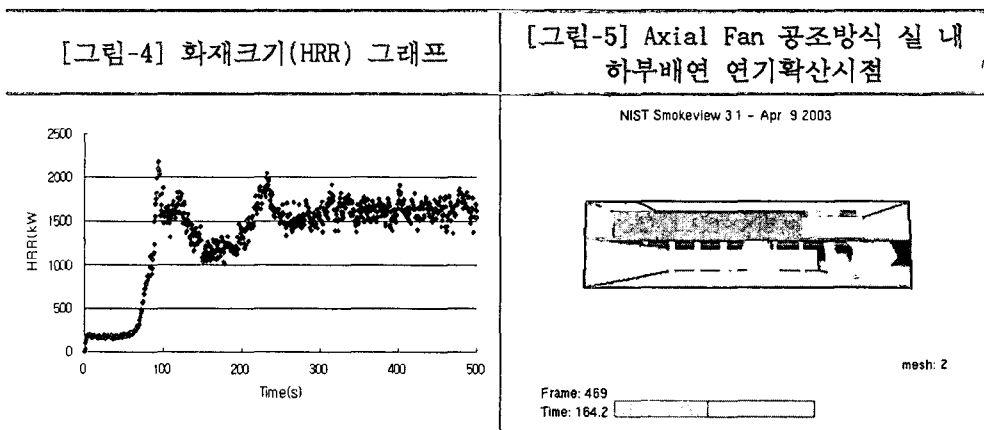
본 연구에서 검토한 시나리오는 Axial Fan 공조방식과 FFU 공조방식으로 각각 하부와 상부배연시스템으로 나뉘며 [표-4]와 같이 정리했다.

[표-4] 검토 시나리오

배연시스템		스프링클러 작동여부	배연용량	배연구크기	공조작동	화재발생시 Working Space 구획 여부
Axial Fan Type	하부	작동	1CMM/1m ²	1.2m*0.6m	작동	구획안됨
	상부	작동	1CMM/1m ²	1.2m*0.6m	작동	구획됨
FFU Type	하부	작동	1CMM/1m ²	0.5m*0.3m	작동	구획안됨
	상부	작동	1CMM/1m ²	0.5m*0.3m	정지	구획안됨

2.4 CFD 시뮬레이션

화재 및 배연시스템을 평가하기위한 CFD 시뮬레이션은 FDS 프로그램으로 평가 했다. 시뮬레이션의 결과 Sprinkler 적용시, 화재의 크기는 최대 2MW까지 성장하는 것으로 나타났으며 결과 그래프는 [그림-4]에 정리했다.



시뮬레이션에 의한 각 시나리오의 결과 값은 [표-5]에 정리했다.

[표-5] 시뮬레이션 결과 값

배연시스템		스프링클러 작동시점	Fab 상부로 화재전파시점	공조중지시점	Plenum으로 연기확산시 점	배연용량 적정성
Axial Fan 방식	하부	115초	-	164초	164초	부적합
	상부	115초	-	222초	222초	부적합
FFU 방식	하부	115초	-	192초	192초	부적합
	상부	115초	-	230초	230초	부적합

화재의 전파시점 판단 기준은 상부의 HEPA필터의 점화온도인 345℃로 보았으며, 연기의 확산시점 판단 기준은 1000ppm 농도의 연기가 Plenum로 확산되는 시점으로 보았다. 위의 [표-5]의 시뮬레이션의 결과를 보면 4가지의 시나리오 모두가 연기가 Plenum으로 확산하며, 배연용량이 부적합함을 보여주고 있다. [그림-5]에서는 Axial Fan 방식 실내에서 하부배연시스템의 연기 확산되는 시점을 배연시스템의 부적합한 예로 보여주고 있다. 따라서 배연시스템의 다른 대안이 필요하게 되었다.

2.5 수정 배연시나리오 및 시뮬레이션 결과

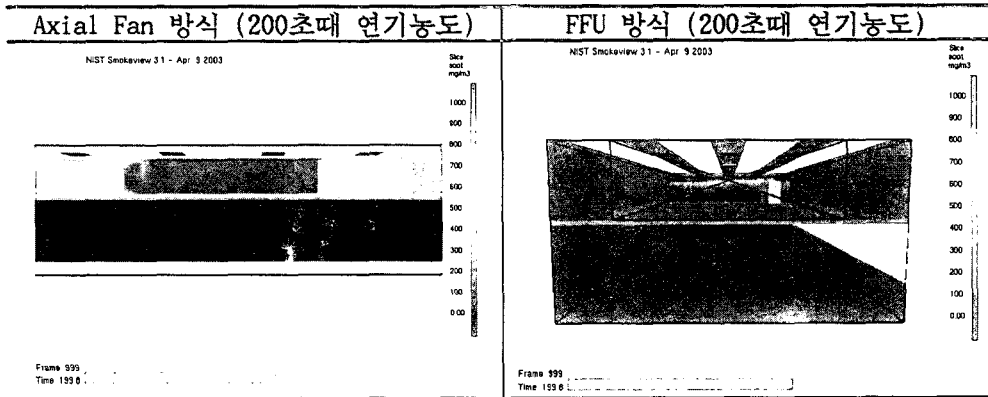
설정된 4가지의 시나리오의 배연시스템을 결과를 분석해 보면 하부배연은 상부배연보다 더 효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 수정설계안은 상부배연으로 대안을 찾아야 할 것으로 판단했다. 그리고 국내의 기준으로 배연설비를 설치하여도 본 연구에서 설정된 화재크기 2MW의 연기량을 효율적으로 배출하지 못하는 것으로 판단되어졌다. 따라서 NFPA 204에서 제시하는 배연용량 기준으로 배연시스템을 수정설계하여 CFD 시뮬레이션을 재수행해 보았다. 수정설계안은 [표-6]과 같다.

[표-6] 수정 시나리오

수정된 상부배연시스템	스프링클러 작동여부	배연용량	배연구크기 및 구획당 배연구개수	공조작동	화재발생시 Fab 구획 여부
Axial Fan 방식	작동	76000CMH	1.2m*0.6m/ 3개	작동	완전구획기준
FFU 방식	작동	76000CMH	1.2m*0.6m/12개	정지	구획안됨

NFPA 204에서는 단위배연구의 면적, 배연구의 크기, 벽 혹은 Smoke 커튼과 배연구간의 이격거리 및 배연구간의 설치간격, Smoke 커튼의 깊이 및 설치간격, 그리고 한개 배연구의 배연속도 등에 관하여 기준을 제시하고 있다. [표-7]에서는 수정된 시나리오의 CFD 시뮬레이션의 결과 그림을 정리하였다.

[표-7] 수정 시나리오의 CFD 시뮬레이션 결과



[표-7]에서 보다 시피 NFPA204 기준으로 배연설비를 설치하면 Axial Fan 방식의 경우 초기 화재 감지하여 배연설비가 가동되기까지를 제외하면 효과적인 배연이 가능한 것으로 보여진다. 또한 FFU 방식의 경우에는 구획이 전혀 되지 않으므로 전 Fab으로 연기가 확산되는 효과는 있지만 연기가 하부로 확산되지는 않는 것으로 판단된다. 하지만 구획이 되어 있지 않을 경우 효과적인 연기제어가 어려운 것으로 판단되며, 이 경우 연기확산으로 인하여 Fab내에서 작업하는 작업자 및 반도체 장비에 영향을 줄 수 있는 가능성이 존재하므로 이에 대한 대응 방안이 요구된다.

3. 결 론

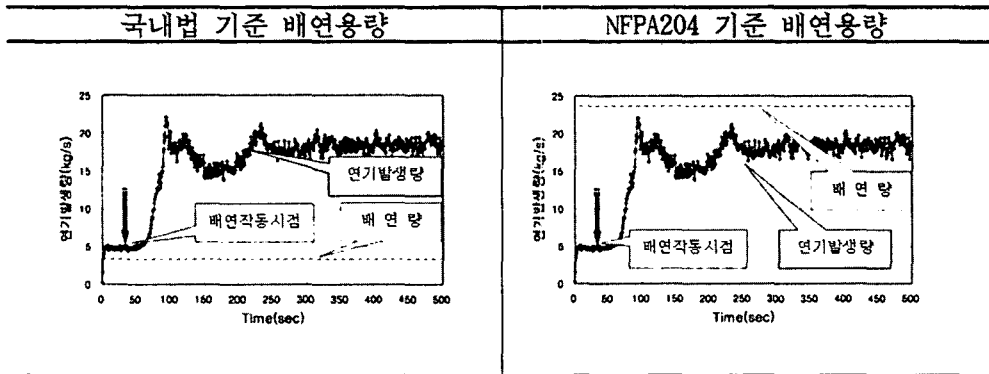
본 연구는 반도체공정내의 긴급배연 시스템을 개발하기 위하여, Sprinkler 적용유무와 화재로 인한 최악의 연기량이 배출 될 수 있는 조건하에서 반도체내의 공조를 크게 Axial Fan 방식과 FFU 방식의 2개로 나누어, 각 유형에 따라 국내기준의 배연설비를 기준으로 하는 하부배연방식과 상부배연방식 그리고 NFPA 204 기준에 의한 상부배연방식으로 배연의 효율성을 검토해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수행결과 가장 사고발생빈도가 높으며, 화재의 규모가 크게 예상되는 Wet Bench의 화재 시 Sprinkler 설비를 적용하지 않았을 경우 24MW의 화재크기로 예측되었으나, Sprinkler 설비를 적용한 경우의 화재크기는 최대 2MW까지 성장하였다.
2. Sprinkler 설비의 적용유무에 관계없이 하부배연시스템과 국내법에 의한 상부 배연시스템의 배연성능은 모두 1000ppm농도의 연기를 Plenum Grating Panel을 통과시킴으로써 만족할 만한 수준의 제연 능력을 발휘하지 못하였다. ([표 -8] 참조)이유는 국내 법상 적용되는 배연설비의 용량이 Wet Bench에서 발생시키는 연기량을 모두 충족시키지 못하고 있으며, 이는 배연구의 설치간격이 너무 넓고 배연구 개수가 부족했기 때문이었다.
3. 2.3항에 가정된 구획되지 않은 FFU 방식 실내에서 시뮬레이션을 통한 공조중지시점 및 운영방안수립이 가능 했으나, 연기제어는 효과적이지 않다고 판단된다. 따라서

연기의 효율적인 제어를 위해서는 구획이 필수적이라 판단된다.

4. 2.3항에 가정된 Axial Fan 방식으로 인한 공조시스템에서는 시뮬레이션에 의한 공조 중지 시점 및 배연설비용량, 배연개수, 배연운용방안 등을 알 수 있었다.
5. NFPA 204 설계 기준을 검토하고 Sprinkler 시스템의 작동을 적용하여 시뮬레이션에 반영하였을 때, 1000ppm농도의 연기를 효과적으로 제어할 수 있는 것으로 확인되었다. ([표 -8] 참조)

[표-8] 국내법 및 NFPA 204 배연량 비교 (화재크기 2MW 기준)



참고문헌

1. Alastair R Brown, "Wet Bench Firesafety", FM, 1999
2. 국가화재안전기준 501", 행정자치부, 2004
3. NFPA 318, "Standard for the Protection of Semiconductor Fabrication Facilities", NFPA, 2002
4. NFPA 204, "Standard for Smoke and Heat Venting", NFPA, 2002
5. FM7-7, "Semiconductor Fabrication Facility", FM, 1998
6. FM 1-56, "Clean Room", FM, 1998
7. SEMI S2-0302, "Semiconductor Equipment & Material International Safety Guideline", SEMI, 2002
8. FM1-10 "Smoke & Heat Venting in Sprinklered Building", FM, 1998