

# 반도체 공장의 제연설계 A Smoke Management System Design For Semiconductor Fabrication Facilities

김운형<sup>†</sup> · Michael J. Ferreira\* · 안병국\*\*

Kim, Woon Hyung<sup>†</sup> · Michael J. Ferreira\* · An, Byung Kuk\*\*

경민대학 소방안전관리과

\*Hughes Associates, Inc., USA

\*\*안국 E & C

## 요 약

반도체 공장의 제연설계를 위한 성능기준 설계를 분석하였다. 사례분석을 통하여 제연 설계 시스템의 성능평가 기준을 설정하고 최적의 배연 방법을 분석하기 위한 FDS 화재모델링을 수행하였다. 제연 설계 지침이나 관련 법규 또는 표준화된 기준이 부족한 한국과 미국의 현실에서 본 연구의 성능기준 설계 방법은 반도체공장의 제연 설계를 위한 현실적인 적용과 활용이 기대된다.

## ABSTRACT

A performance-based design of smoke management systems for semiconductor fabrication facilities is described in this paper. The example of one such facility is discussed. Performance criteria for smoke control systems were established, effective smoke removal system features were identified, and optimal system exhaust capacity requirements were developed by applying engineering tools including Fire Dynamic Simulator model. Considering the fact that the absence of relevant design guide, codes or consensus standards for semiconductor smoke design in Korea and United States, this performance based approach can and should be applied to other fabrication facilities designs.

**Keywords :** Semiconductor, Smoke Management, Fire Dynamic Simulator model

## 1. 서 론

현재 우리나라는 세계 메모리 반도체 시장에서 삼성 전자가 1위, 그리고 LG 반도체와 통합한 현대전자가 2위를 차지하고 있어 명실상부한 세계 제일의 자리를 지키고 있다. 하루 24시간 공장 작업이 진행되는 상황에서 전체 수출물량의 약 17%를 반도체 분야가 차지하고 있어 국내 경제에 미치는 영향은 타 분야와 비교가 불가능한 정도이다. 따라서 각종 안전사고 및 예상 재해에 대한 대책은 최우선으로 선결되어야 할 설계 요소이다. 위험관리 측면에서 반도체 공장의 최악의 시나리오는 지진 또는 화재발생으로 인하여 천문학적 재산손실과 공장 가동이 중단되고 해당 기업의 이미지가 실추하는 경우라고 볼 수 있다. 특히 공장의 제품특성

상 연기로 인한 피해는 치명적이며 최근 타이완 반도체 공장에서 보여준 유형, 무형의 손실은 대표적인 예가 된다. 현재 반도체 공장의 제연 설계를 위한 국내외의 관련 법규나 일관성 있는 설계 기준의 부재는 설계진행에 큰 장애가 되고 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 반도체 공장의 최적 설계를 위한 성능 기준 (Performance-Based) 설계 방법을 제시하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

- NFPA 및 FM 반도체 규정 분석
- 클린룸의 화재 시나리오 제시
- 성능 평가 기준 설정
- 사례분석 통한 제연성능 평가
- 컴퓨터 화재 모델링을 통한 대안 제시

본 연구의 접근방법은 현행 시방규정 중심의 법규의 한계를 극복하고 향후 반도체 공장의 제연 설계 지

<sup>†</sup>E-mail: kimwoon@netsgo.com

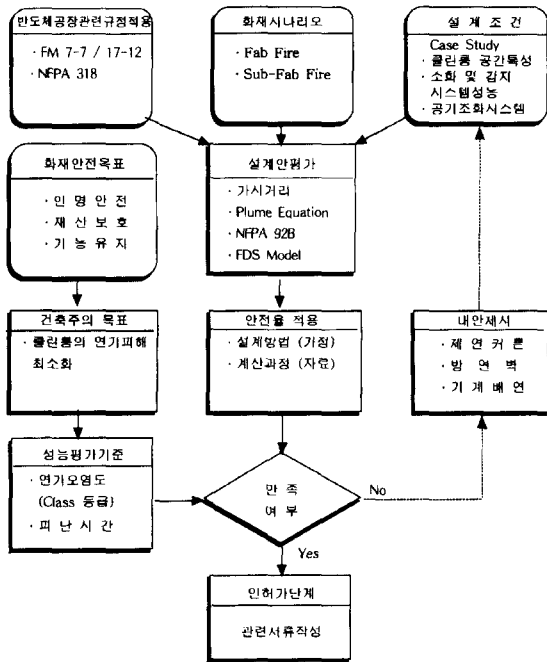


그림 1. 반도체공장의 성능기준 화재안전설계 프로세스  
침으로 적용이 기대된다.

### 2. NFPA/FM 규정분석

반도체공장의 제연 설계에 적용할 수 있는 국내 법 규정은 전무한 현실이다. 미국의 경우, 3대 모델 건축 규정 (BOCA, SBC, UBC)이나 IBC 규정 역시 반도체 공장을 위한 별도의 규정은 없다. 따라서 개별적인 보험회사의 규정이나 NFPA 318(클린룸의 방호대책)기준의 비상 배연설비 시스템을 적용하고 있다. 미국 Factory Mutual의 반도체 공장 규정인 Loss Prevention

표 1. NFPA 318과 FM 7-7/17-12의 비교

	NFPA 318	FM 7-7/17-12
주요 기준	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 청정실의 배연설비규정</li> <li>· 배연용량을 갖춘 공조시설과 검용 또는 전용설비 요구</li> <li>· 이를 위한 설계기준이나 참고자료가 제시 안됨</li> <li>· Fume 배기 시스템으로 배연 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 자세한 시방규정 미비(1997년 법규)</li> <li>· 연기 감지장치 자동 연동 배연 설비 요구단 배연용량이 가능한 공조설비 또는 Fume 시스템(FM 승인 조건)사용 가능</li> <li>· 세부적인 시스템 성능 평가기준 미비</li> </ul>
적용상 문제점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 제연설계 적용 시 배기 시스템의 효율성에 대한 과도한 신뢰성 부여: 배기구 설치위치가 낮아 배연효과가 적으며 화재규모에 따라 존의 배연용량이 부족할 수 있음</li> <li>· 배기덕트로 연기 침입을 막기 위한 하강기류 적용 시 유속의 효과에 관한 비 현실적인 기대: 플럼의 부력을 억제하는 하강기류로 연기입자가 분산되고 하부 배기구 도달 이전에 냉각되어 광범위한 연기오염 가능성</li> <li>· 환기덕트로 연기 배출하는 경우 배기 경로를 따라 광범위한 표면적에서 연기입자가 확산됨. (대만 화재사례): 전체 제연 구역으로 오염될 수 있으며 인접 Fab으로 연기 유동 가능.</li> </ul>	

한국화재 · 소방학회, 제14권 제4호, 2000년

Data Sheet 7-7/17-12에서는 제연설비에 관하여 상세한 시방기준보다는 개념적인 내용을 기술하고 있어 체계적인 제연설계 진행이 어려운 실정이다. NFPA 318과 FM 규정에서 발견되는 중요한 문제점은 표 1과 같다.

### 3. 사례 분석

○○ 반도체 공장을 대상으로 연기오염도, 가시거리 및 현재 적용된 제연방법에 대한 성능평가를 수행하였다.

#### 3.1 연기 농도 및 가시거리 평가

대상 공장의 청정도 또는 오염도 기준은 Fab의 경우에 photolithography 공간은 Class 1(0.1미크론), 그 외 공간은 Class 100(0.3미크론)이다(표 2 참조).<sup>3)</sup>

클린룸의 연기피해는 불꽃연소 시 발생하는 soot으로 예상되며 그 밀도는  $2.25 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ (탄소-graphite 형태)이다.<sup>4)</sup> 대표적인 가연물인 폴리프로필렌의 연소 시 평균 soot 입자의 직경이 0.8  $\mu\text{m}$ 정도이며 이것은 표 2의 기준치를 초과한다. 클린룸의 피해 정도는 화재 시 발생하는 연기의 질량농도를 기준으로 평가할 수 있다. 여기서 질량농도  $1.46 \times 10^6$  내지  $3.36 \times 10^4 \mu\text{g/m}^3$ 은 (청정도)×(입자부피)×(입자 밀도)로 계산한 값이다.

한편 화재 시 예상되는 가시거리와 연기의 질량농도 및 연기의 투과비율간의 관계는 다음과 같다.

표 2. 클린룸의 청정도 기준

ClassSI (English)	분진직경 ( $\mu\text{m}$ )	청정도 (입자 수/ $\text{m}^3$ )	질량 농도 ( $\mu\text{g}_{\text{soot}}/\text{m}^3$ )
M 1.5 (1)	0.1	1,240	$1.46 \times 10^6$
M 3.5 (100)	0.3	10,600	$3.36 \times 10^4$

표 3. 공기 여과 층에서의 플럼 유속(m/s)

화원위치	공기 여과층 높이 (m)	화재크기 (kW)	화원 직경(m)			
			0.50	1.00	1.50	2.00
Fab	3.80	5	1.11	1.06	1.03	1.00
		10	1.40	1.35	1.30	1.26
		25	1.91	1.84	1.77	1.72
		50	2.43	2.33	2.25	2.18
		100	3.10	2.97	2.86	2.77
		500	5.54	5.28	5.06	4.88
Sub-Fab	10.30	5	0.81	0.80	0.78	0.77
		10	1.02	1.00	0.99	0.98
		25	1.39	1.37	1.35	1.33
		50	1.75	1.73	1.70	1.68
		100	2.22	2.18	2.15	2.12
		500	3.86	3.79	3.73	3.67

$$V = C V_K / K_m \quad C_S = C V_K / (-\ln T/x) \quad (1)$$

여기서 V = 가시거리 (m)

$C V_K$  = Mulholland의 비례상수(무차원)

일반물체(2) 반사판(3) 발광판(8)

$K_m$  = 연기의 입자 단면적( $m^2/g_{soot}$ )

$C_S$  = 연기 질량농도( $g_{soot}/m^3$ 연기)

T = 단위 길이 x(m) 당 빛의 투과비율(%)

$K_m$ 은 가연물 종류와 폴리프로필렌의 연기 생성율,  $\psi_s=0.072$ 에 의해 결정된다.<sup>5)</sup>

$$K_m = 10.75 e^{(-4.95\psi_s)} \quad (2)$$

연기의 인식은 사람마다 주관적이다. 식 (1)에서  $T=0.99$ (투과율 99%)를 가시적 연기한도로 가정하면 연기의 질량농도는  $1,250 \mu g/m^3$ 이며 가시거리는 약 200 m로 매우 낮게 예측된다. 이것은 표 2의 한계기준인  $1.46 \times 10^{-6}$  내지  $3.36 \times 10^{-4} \mu g/m^3$  보다 상당히 초과된다. 이온화식 또는 광전식 연감지기의 작동범위를 투과율 95%로 기준한 경우에 배연용량 계산식을 적용하는 연기층 경계면(smoke layer interface) 부근의 예상 질량농도는  $6410 \mu g/m^3$ 이며 가시거리는 약 39 m 정도로 예측된다.

### 3.2 하강 기류 성능평가

사례공장에서는 FM 규정에 따라 배기구가 설치된 환기 덕트로 상승하는 연기의 침입을 차단하기 위한 강제 하강기류를 적용하고 있다. 화염의 부력을 억제하는 충분한 유속이 확보된다는 가정 하에 플럼 중심

축 상의 기류는 식 (3)으로 계산된다.<sup>6)</sup> 여기서 하강기류와 연기의 혼합이나 연기의 냉각 효과 등은 무시된다.

$$U_m = 1.04 Q^{1/3} / (Z - Z_0)^{1/3} \quad (3)$$

여기서  $U_m$  = 기류속도(m/s)

Q = 열 방출비율(kW)

Z = 유속계산 높이(m)

$Z_0$  = 플럼의 가상 화점(m)

표 3은 다양한 화재크기와 화원직경에 대한 천장 공기여과장치 높이에서의 예상 유속이다. 사례공장에 적용되는 평균 유속은 Fab 0.13 m/s, photolithography 공간 0.4 m/s이다. 따라서 최소 화재크기의 경우에도 하강기류에 의존하는 현 방법의 한계를 보여준다.

## 4. 설계 대안

### 4.1 화재 시나리오

화재는 스프링클러가 작동되거나 또는 작동 안되는 정도의 크기로 구분할 수 있으며 Fab 공간 또는 환기 덕트 등에서 발생할 수 있다. 클린룸 특성 상 대부분의 예상 가연물과 점화원은 Fab에 있으며 특히 플라스틱 wet benches는 가장 중요한 가연물이 된다. Fab의 경우 자동식 소화설비로 어느 정도의 화재 제어가 예상되지만 각종 장비의 배치와 생산된 제품은 연기 생성에 따른 오염에 치명적이다. 환기 덕트 화재의 경우 플럼의 공기 유입으로 연기량은 Fab 화재 보다 더욱 증가될 것이나 발화 확률은 매우 낮다. 스프링클러작동이 실패하면 천장의 여과필터부분까지 화염이 도달

하여 상승한 연기가 팬에 의하여 주변 공간으로 유입될 수도 있다. 화재 시나리오는 단일 가연물 또는 2개 이상의 가연물이 포함되는 경우로 구분된다. 본 연구에서 적용한 화재시나리오는 Fab 공간의 Wet bench 화재로 설정하였다. 화재규모는 미국의 FMRC 실대화재 실험을 기준으로 하였다. 실험은 1.0m×1.8m×1.8m(높이)의 가연성 폴리프로필렌 wet bench(280 kg) 연소 시 시간경과에 따른 열 방출 비율과 연소 생성물을 측정하였다. 발화 후 3분만에 10 MW에 도달하였으며 10분 경과 후 가연물은 완전히 연소되었다. 화재 성장은 ultra-fast에 해당된다.

**4.2 제연 커튼과 방연 벽**

사례분석에 따른 하강기류의 문제점을 대신하여 고온의 부력을 가진 연기를 축적하고 연기층을 일정높이로 유지하거나 천장에서 배기시키는 방연 벽을 사용하는 대안을 분석하였다. 제연 커튼은 Fab의 공기여과장치높이 하단에 설치하고 방연 벽은 바닥에서 천장까지 구획하여 인접공간으로의 연기누출을 최소화해야 한다. 제연 커튼은 고온의 연기층을 가두어 두는 것이다. 만일 하강기류나 스프링클러의 작동으로 연층 높이가 제연커튼보다 낮으면 인접공간으로 연기확산이 발생된다. 화재로 인한 천장 열기류(Ceiling jet)효과도 고려되어야 한다. 제연 커튼의 이격거리와 화원 위치에 따라서 천장 열기류에 의한 연기 충전이 촉진될 수 있으며 특히 화원이 제연 커튼에 근접한 경우는 주변으로 연기확산 가능성이 증가된다.

방연벽은 배연구역 마다 바닥에서 천장까지 설치하며 배연구역 간의 차압을 위하여 최소한의 누설면적이

유지되어야 한다. 하강기류나 스프링클러 작동으로 연기 층이 혼합되고 냉각되면 방연 벽의 효과는 증가된다. 배기 시스템이 실패한 경우에도 방연 벽으로 인한 어느 정도의 연기 고립 효과가 기대된다. Sub-Fab 화재 시 그 공간에서 연기를 제어하는 것이 매우 어렵다. 그 이유는 Fab의 하강기류의 억제효과가 미약하며 와플 슬랩의 축연이 불가능하고 건축 구조특성 상 플럼의 상승을 방해하여 천장 열기류 형성을 통한 연기의 수평확산이 촉진되기 때문이다. 따라서 와플 슬랩의 상단에서 공기여과 천장 하단까지 형성되는 방연 벽이나 구조 벽으로 배연 존을 형성하는 방법을 적용하였다. 결과적으로 Sub-Fab 화재 시 배연 성능은 어느 정도 한계를 가진다. 그림 2는 대안으로 제시된 제연시스템을 보여준다. Fab 또는 Sub-Fab의 연기는 Fab 공간에서 제어된다. 비상시 즉시 화재 공간의 공조 팬을 정지하고 배연 팬을 작동하여 상부에 형성되는 연기층의 냉각을 최소화 한다. 천장의 공기 여과부분과 구조 벽, 완전하게 구획된 방연 벽으로 연기는 가두어지고 천장부근의 배기구로 연기를 배출한다. 인접 존의 공조 팬은 계속 작동하면서 연기의 침입을 방지한다. 제연시스템에 의한 공기배출을 고려하여 청정한 보충공기(Make-up air)를 공급한다. 배연 구역 방식은 한 존에 연기가 성공적으로 한정된다는 가정 하에 공간 전체로 오염을 방지할 수 있는 방식이다. 각 존의 최대 배연량을 기준으로 단일 배연 팬을 설계하며 배기덕트에 설치된 댐퍼로 배연 구역을 선택한다.

Sub-Fab의 2.5 MW isopropyl alcohol 화재 시 연기층 높이를 Fab 바닥에서 1m로 유지하기 위해 필요한 배연량은 102,000 m<sup>3</sup>/hr 정도이다.<sup>8)</sup>

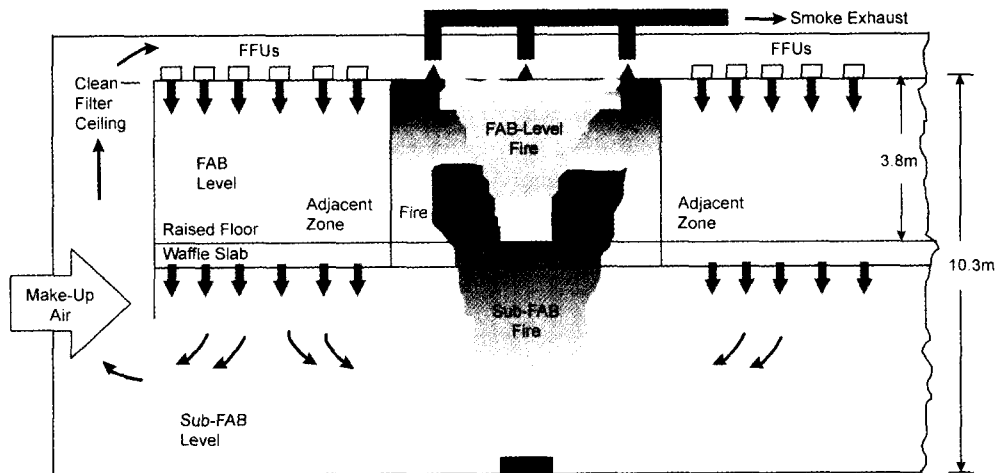


그림 2. 제연 시스템(설계 대안)

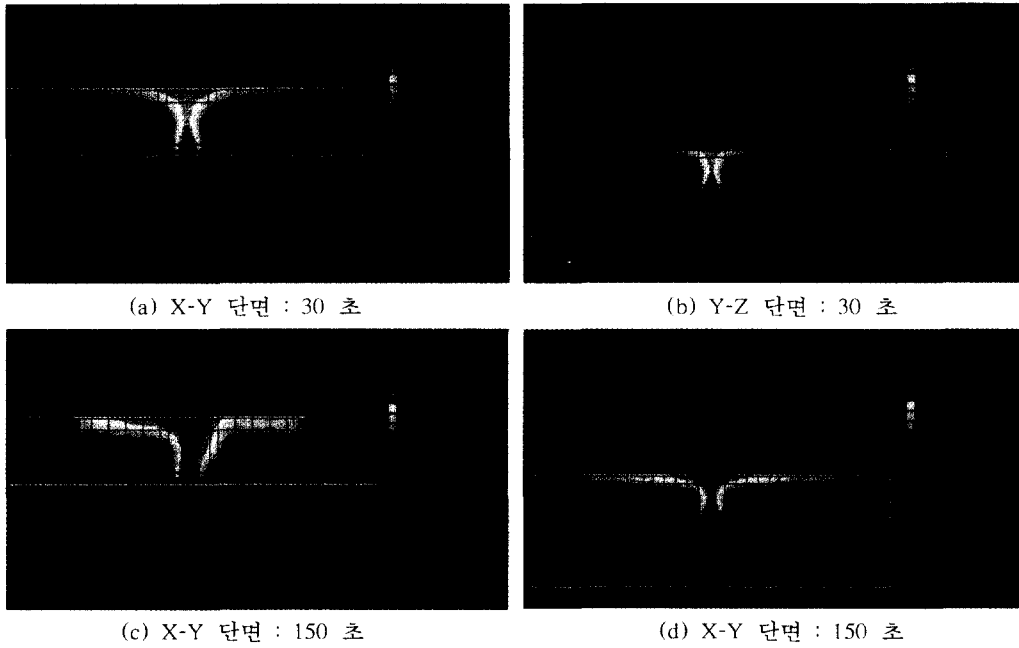


그림 3. Fab의 온도 분포

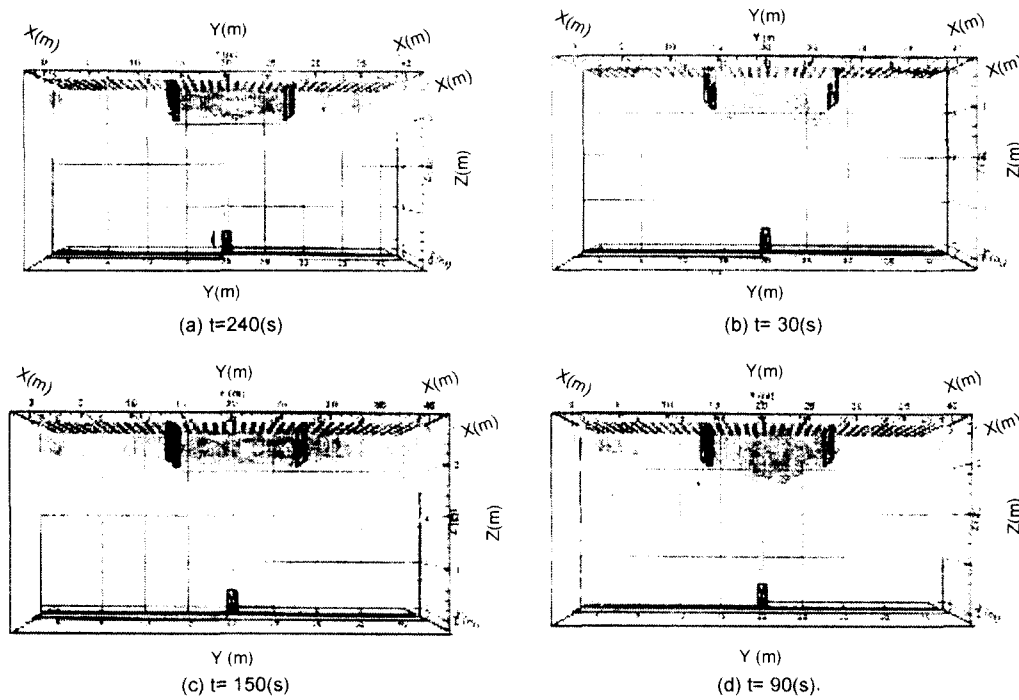


그림 4. Fab의 연기농도

4.3 화재 모델링

제어 가능한 연기 농도 수준을 분석하기 위하여 공

간전체를 구분하고 있는 균질 설계조건의 단일 배연  
존을 대상으로 제연 커튼의 성능을 모델링하였다. 열

분석은 영국의 SMARTFIRE 모델을, 연기분석은 미국의 NIST에서 개발된 CFD 모델인 Fire Dynamic Simulator(FDS)를 사용하였다. FDS의 Large eddy simulation 모델은 기존의  $\kappa-\epsilon$  난류모델에 비하여 다양한 화재 시나리오에 적용할 수 있다.

NFPA 92B의 대수방정식을 적용한 결과 102,000 m<sup>3</sup>/hr 배연량은 제연커튼의 높이 0.75 m와 동일한 것으로 계산되었다.

설계조건과 동일한 하강기류, 배연량, 제연 커튼, 배연구의 수 등을 기준한 주요 모델 입력자료는 다음과 같다.

- 제연 존의 크기 : 32 m×40 m×3.8 m(높이)
- 제연 커튼 크기 : 32 m(길이)×0.75 m(높이)×2개
- 하강 기류 : 0.122 m/s(실제 기류조건)
- 배연구 설치 : 배연량 102,000 m<sup>3</sup>/hr 기준(각 제연 커튼 당 34,000 m<sup>3</sup>/hr)
- 화재 크기 : 550 kW Steady 조건, Center fire

그림 4에서 옅은 회색은 Fab 공간의 오염한계 기준인 연기농도 0.0003 μg/m<sup>3</sup>를 그리고 짙은 회색은 연기감지기의 작동수준인 6400 μg/m<sup>3</sup>를 표시한다. 90초 경과 시 하강기류는 차단되고 배연 팬이 작동하였다. 모델링 결과 제연 커튼으로 높은 농도의 연기는 효과적으로 가두어 두지만 상당한 연기확산을 보여주고 있다. 배연 팬이 작동한 후 3분 이내(약 270초 경)에 발화 당시 1 m 높이의 연기 층은 3 m까지 상승하였다. 낮은 농도의 연기는 제연 커튼 하부에서 주변공간으로 확산이 예상된다. 특히 화재 초기단계에 하강기류가 정지하는 시간 동안 연기 층은 심하게 뒤섞이고 있어서 배연 존 전체에 걸쳐 심각한 장비와 제품의 오염이 유발될 수 있다.

## 5. 결 론

반도체 공장의 제연 설계에 적용할 수 있는 세부적인 시방기준이 국내외적으로 불충분한 현실에서 설계자는 클린룸의 공간특성과 공조설비를 고려하여 화재 시 연기에 의한 재산피해를 최소화 할 수 있는 최적의 설계를 진행해야 한다. 이를 위하여 본 논문은 클린룸의 성능기준 화재안전설계과정을 연구하였다. 사례분석 결과 현행 반도체 연기규정은 효율적인 연기관리에 한계를 보여주었다. 따라서 반도체 공장의 설계 시 각각의 화재안전 목표를 충족하는 성능기준 제연설계 프로세스를 적용할 필요가 있다. 한편 화재 모델링 결과 클린룸의 재산보호를 위한 제연커튼과 방연벽의 적용 시 연기농도에 따라 피해범위가 결정되므로 설계조건

을 충분히 고려해야 한다. 아울러 연기피해 방지가 우선되는 클린룸의 특성상 본 연구범위에서 제외된 작업 공간의 인명보호를 위한 성능기준 피난설계에 관한 연구가 수반되어야 한다.

## 참고문헌

1. NFPA 318, A Standard for the Protection of Cleanrooms, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995
2. Factory Mutual Loss Prevention Data Sheet 7-7/17-12, Semiconductor Fabrication Facilities, Factory Mutual Engineering Corporation, Norwood, MA, 1997
3. FDE-STD-209E, Federal Standard 209E.
4. Considine, D. M. (editor), Van Nostrand's Scientific Encyclopedia, Sixth Edition, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1983
5. Tewarson, A., Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, Chapter 3-4, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Edition, P. DiNenno, Editor-in-Chief, National Fire Protection Association, Boston, MA, 1995
6. Beyler, C. L., Fire Plumes and Ceiling Jets, Fire Safety Journal, Vol. 11, Nos. 1&2, July/September, 1986
7. Factory Mutual Research Corporation, A Wet Bench Free-Burn Test Under FMRC Fire Products Collector, Technical Note, Factory Mutual Engineering Corporation, Norwood, MA, April 7, 1995
8. NFPA 92B, Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995
9. Evans, D. D., Ceiling Jet Flows, Chapter 2-3, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Edition, P. DiNenno, Editor-in-Chief, National Fire Protection Association, Boston, MA, 1995
10. Michael J. Ferreira et al., Emergency Smoke Control System Design for Semiconductor Fabrication Facilities: Is Property Protection Achievable?, INTERFLAM' 99, 1999
11. Mulholland, G. W., Smoke Production and Properties, Chapter 2-15, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Second Edition, P. DiNenno, Editor-in-Chief, National Fire Protection Association, Boston, MA, 1995
12. 김운형 외 3인, 클린룸의 제연설계, 한국화재소방학회 추계 학술발표대회, 한국화재소방학회, 2000. 11