

클린룸의 연기제어

김윤형*, 안병국**, 김진곤***, Micheal Ferreira, Derek White****
경민대학*, 안국 E&C**, 항공대학교***, Hughes Associates. USA****.

A Smoke Control System for Cleanroom

Kim, W.H.*, An, B.K**, Kim, J.K***, M.Ferreira, D.White****.
Kyung Min College*, Aukug E&C**, Hankuk Aviation Univ.***,
Hughes Associates. USA.****

1. 서론

반도체공장은 제품 특성상 청정한 작업환경을 필요로 한다. 따라서 제품의 생산성 제고와 불량품의 최소화를 위한 급기, 배기 시스템과 더불어 화재 시 재산 피해를 최소화하기 위한 연기제어 시스템의 설계가 매우 중요하다. 제품 생산 및 작업공간에 적용되는 실내 공기의 유동은 화재 발생 장소에서 멀리 떨어진 공간까지 오염된 연기입자의 급속한 확산을 유발하게 되며 이로 인한 물질 피해는 거의 치명적이라 볼 수 있다. 그러나 제연 설계에 적용할 수 있는 관련 법규나 규정의 부재는 설계자에게 큰 장애가 되고 있다. 이러한 배경에서 본 연구는 반도체 공장의 제연설계를 위한 성능 기준(Performance-Based) 설계 방법을 제시하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

- 클린룸의 공조시스템
- 반도체 관련 규정 분석
- 연기 유독성 및 가시거리 성능평가
- 연기제어 시스템 평가

2. 클린룸의 공조설비

클린룸의 공기조화시스템은 일반적으로 천장에 설치된 공기여과장치로 일정 크기 이상(보통 0.1미크론)의 분진을 제거하면서 작업공간(Fab)으로 하향의 층류를 제공한다. 기류는 바닥의 와플 슬랩을 통하여 Sub-Fab으로 진행되고 공간 주변의 환기덕트로 이동한다. 건물상부의 공조유닛에서 공기는 공기여과장치를 통과하면서 위 과정을 반복하게 된다. 경우에 따라서는 개별식 팬 여과장치가 설치되기도 한다.

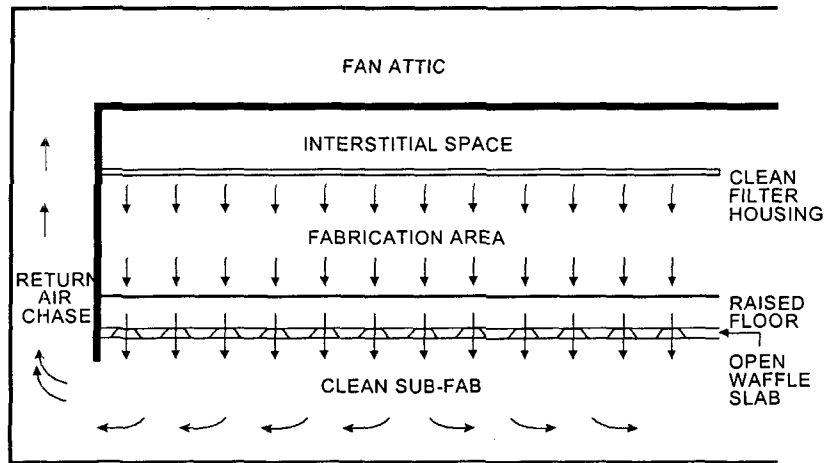


그림 1. 클린룸의 공기순환

3. 클린룸의 제연규정

본 연구에서는 미국의 NFPA 318(클린룸의 방호대책)기준과 Factory Mutual의 Loss Prevention Data Sheet 7-7/17-12의 제연규정을 비교 분석하였다. 현재 설계에 적용할 수 있는 상세한 시방기준보다는 개념적인 내용을 기술하고 있어 체계적인 제연설계 진행이 어려운 실정이다. NFPA 318과 FM 규정에서 발견되는 중요한 문제점은 표 1과 같다.

표 1. NFPA 318 과 FM 7-7/17-12의 비교

	NFPA 318	FM 7-7/17-12
주요 기준	<ul style="list-style-type: none"> 0 청정실의 배연설비규정 0 배연용량을 갖춘 공조시설과 겸용 또는 전용설비 요구 0 이를 위한 설계기준이나 참고자료가 제시 안됨 0 Fume 배기 시스템으로 배연 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 0 자세한 시방규정 미비 (1997년 법규) 0 연기 감지장치 자동 연동 배연 설비 요구 0 단 배연용량이 가능한 공조설비 또는 Fume 시스템(FM 승인 조건)사용 가능 0 세부적인 시스템 성능 평가기준 미비
적용상 문제점	<ul style="list-style-type: none"> 0 제연설계 적용 시 배기 시스템의 효율성에 대한 과도한 신뢰성 부여 <ul style="list-style-type: none"> : 배기구 설치위치가 낮아 배연효과가 적으며 화재규모에 따라 존의 배연용량이 부족할 수 있음 0 배기덕트로 연기 침입을 막기 위한 하강기류 적용 시 유속의 효과에 관한 비 현실적인 기대 <ul style="list-style-type: none"> : 플럼의 부력을 억제하는 하강기류로 연기입자가 분산되고 하부 배기구 도달 이전에 냉각되어 광범위한 연기오염 가능성 0 환기덕트로 연기 배출하는 경우 배기 경로를 따라 광범위한 표면적에서 연기입자가 확산됨. (대만 화재사례) <ul style="list-style-type: none"> : 전체 제연 구역으로 오염될 수 있으며 인접 Fab으로 연기 유동 가능. 	

4. 연기오염도 평가

00 반도체 공장을 선정하여 연기농도와 가시거리를 기준으로 예상 피해정도를 공학적으로 예측하였다.

대상 공장의 청정도 기준은 Fab의 경우에 photolithography 공간은 Class 1 (0.1 마이크론), 그 외 공간은 Class 100 (0.3마이크론)이다. 클린룸의 연기피해는 불꽃연소 시 발생하는 soot으로 예상되며 그 밀도는 $2.25 \times 10^6 \text{ g/m}^3$ (탄소-graphite 형태)이다.⁴⁾ 대표적인 가연물인 폴리프로필렌의 연소 시 평균 soot 입자의 직경이 0.8 μm 정도이며 이것은 표 2의 기준치를 초과한다. 클린룸의 피해 정도는 화재 시 발생하는 연기의 질량농도를 기준으로 평가할 수 있다. 여기서 질량농도 1.46×10^{-6} 내지 $3.36 \times 10^{-4} \mu\text{g/m}^3$ 은 (청정도) x (입자부피) x (입자 밀도)로 계산한 값이다.

표 2. 클린룸의 청정도 기준

Class SI(English)	분진 직경 (μm)	청정도 (입자 수/ m^3)	질량농도 ($\mu\text{g}_{\text{soot}}/\text{m}^3$)
M 1.5 (1)	0.1	1,240	1.46×10^{-6}
M 3.5 (100)	0.3	10,600	3.36×10^{-4}

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

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

여기서 V = 가시거리 (m)

$C V_K$ = Mulholland의 비례상수 (무차원)

일반물체(2) 반사판(3) 발광판(8)

K_m = 연기의 입자 단면적 ($\text{m}^2/\text{g}_{\text{soot}}$)

C_S = 연기 질량농도 ($\text{g}_{\text{soot}}/\text{m}^3_{\text{연기}}$)

T = 단위 길이 x(m) 당 빛의 투과비율 (%)

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

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

연기의 인식은 사람마다 주관적이다. 식(1)에서 $T=0.99$ (투과율 99%)를 가시적 연기한도로 가정하면 연기의 질량농도는 $1,250 \mu\text{g/m}^3$ 이며 가시거리는 약 200m

로 매우 낮게 예측된다. 이것은 표 2의 한계기준인 1.46×10^{-6} 내지 $3.36 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 상당히 초과된다. 이온화식 또는 광전식 연감지기의 작동범위를 투과율 95%로 기준한 경우에 배연용량 계산식을 적용하는 연기층 경계면 (smoke layer interface) 부근의 예상 질량농도는 $6410 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 가시거리는 약 39m 정도로 예측된다.

5. 클린룸의 제연설비

사레공장에서는 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.⁶⁾ 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)

화재크기 5-500kW, 화원직경 0.5-2.0m를 기준으로 Fab 3.8m Sub-Fab 10.3 m 천장고에 적용한 예상유속은 0.77- 5.28 m/s 로 계산되었다. 사레공장의 평균 유속은 Fab 0.13 m/s, photolithography 공간 0.4m/s 이다. 따라서 최소 화재크기의 경우에도 하강기류의 제연효과는 한계가 있다.

6. 제 안

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. 따라서 향후 반도체 공장의 설계 시 각각의 화재안전 목표를 충족하는 성능기준 제연설계 프로세스를 적용한 필요가 있다. 이러한 관점에서 본 연구의 접근방법은 현행 시방규정 중심의 법규의 한계를 극복하고 향후 반도체 공장의 제연 설계 지침으로 적용이 기대된다.

참고문헌

- 1) NFPA 318, A Standard for the Protection of Cleanrooms, NFPA, 1995.

- 2) Factory Mutual Loss Prevention Data Sheet 7-7/17-12, Semiconductor Fabrication Facilities, Factory Mutual Engineering Corporation, 1997.
- 3) FDE-STD-209E, Federal Standard 209E.
- 4) Considine, D.M. (editor), *Van Nostrands 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, 1995.
- 6) Beyler, C.L., Fire Plumes and Ceiling Jets, *Fire Safety Journal*, Vol. 11, Nos. 1&2, July/September, 1986.