

A-04

Clean Room 위험성 평가에 따른 안전성 확보에 관한 연구

송윤석, 윤명오, 윤여송*, 김성민*

서울시립대학교 도시방재안전연구소, 삼성전기(주) 환경안전팀 *

A Study on Safety by Risk Assessment of Clean Room

Yun-Suk Song, Myong-O Yoon, Yo-Song Yoon*, Sung-Min Kim*

1. 서론

현대 산업은 과학산업, 첨단 기술 산업의 시대로 첨단 제품의 수율과 성능을 향상시키기 위하여 첨단기술의 고도화, 초정밀화, 고순도화, 무균화의 추세로 Clean Room 시설은 급속히 증가하고 있다. 또한, Clean Room은 반도체 산업, 정밀산업, 전자산업, 정보통신, 광학기계, 우주항공, 병원, 실험실, 의약품제조산업, 식품제조산업 등 광범위한 범위까지 다양하게 요구된다. Clean Room 시설이 가장 많은 국가로 우리나라와 더불어 미국, 일본, 대만 정도에 지나지 않아 국제적으로 Clean Room에 대한 방재기준 제정 및 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구대상인 Clean Room은 약 800평으로 외부보다 30% 이상 높은 내부압력과 Top-Down 방식의 고품량 공조설비이다. 또한, Clean Room은 청정도에 관련된 공조설비로만 구성되어 있고, 유사시에 공조설비와 자동 연동된 감지기에 의한 동작이 제품 불량 발생이 많아 사용이 되지 않고 있는 실정이다.

이에, 본 연구에서 피난시뮬레이션, 열·연기시뮬레이션 평가 및 Clean Room의 안전성 확보를 위한 시설 및 설비 기준으로 Clean Room에 대한 안전성을 확보하는데 기여하고자 한다.

2. 사고사례분석

2.1 국내사고사례분석

국내 Clean Room 주요 사고 발생 공정은 특수가스(SiH₄, AsH₃, PH₃ 등) 사용공정, 기타 가스(질소, 수소) 사용 공정, 식각 작업 등 산류, 유기용제 사용공정, 기타 공정 등이고, 주요 국내사고사례는 Table 1과 같다.

Table 1. 국내사고사례

일시	사고개요	사고원인	피해현황
1992. 5	반배기 분기 배관의 배기 정압이 Drop 되어 설비가 Down	산배기 분기배관 내부에서 산과 알칼리 반응물이 생성되어 배기덕트가 하중을 이기지 못하여 Crack이 발생하고, 배기 정압이 Drop 되어 설비가 Down	산배기 Duct 막힘으로 외부 PVC Duct 파손, 하부 H - Beam 부식
1999. 10	배관 오인으로 인한 가스 누출로 화재 발생	배관 신설작업 중 용접을 위하여 Fitting을 Open하는 과정에서 SiH ₄ 배관을 타 배관으로 오인하여 Fitting을 Open하여 SiH ₄ 의 자연발화로 화재 발생	SiH ₄ 공급을 즉시 차단하여 피해 없음
2000. 7	반도체 장비 Vent Line PVC관에서 폭발이 발생	사용가스(SiH ₄ , SiHCl ₃ , SiH ₂ Cl ₂)의 미세입자가 PVC 관벽에 붙어 입상관 관벽에서 이탈되어 낙하하는 도중 낙하 충격에 의해 폭발	반도체 장비 및 Scrubber 파손
2001.	공정 장비에서 SiH ₄ 가 자연발화	공정장비는 반응을 멈춘 채 SiH ₄ 가스가 계속 공급되어 Plenum Area(지하 Utility실)의 가동 중인 Mini Scrubber의 흡입부의 Bellows Type 배관에서 자연발화되어 화재 발생	Mini Scrubber의 진공펌프, 덕트 배관의 파손, 공정장비 사용중단, 진공펌프 파손
2001. 3	반응 후의 적린 이 공기 중에 노출되어 화재 발생	CVD에서 PH ₃ 반응 후 Scrubber Chamber에 적린 미립자가 누적된 상태에서 수작업으로 Chamber 교체 중 공기에 노출 화재 발생	인명피해 없으며, 공정 중단
2001. 6	가스 캐비닛의 가스용기 교체시 독성가스의 누출	용기의 End Cap을 Open 하는 순간 Cap 내부에 체류된 가스 또는 Valve의 단힘이 불량하여 가스 누출	작업자의 대피로 인한 작업 중지
2002.	유기용제 사용 Wet Station의 전기 누전으로 화재 발생	틀루엔 등을 사용하는 유기 Wet Station의 하단부에 물이 흘러 전기 합선이 발생하여 화재 발생	화재로 인한 피해는 없었으나, 연기에 의한 오염이 오래 지속

2.2 국외사고사례분석

국외 Clean Room 사고사례는 Table 2와 같다.

Table 2. 국외사고사례

일시 및 장소	사고개요	사고원인	피해현황
1982. 일본	배기가스 분말 누적에 의한 화재 발생	공정장비에서 Monosilane와 Ammonia의 반응 후에 배출된 상태에서의 미세 분말의 PVC 덕트에 누적되어 화재가 발생	배기덕트손상 및 장비 Shutdown으로 24시간 생산중단
1992. 일본	배기 배관에서 화재	반응 후의 잔류 SiH ₄ 를 배출하기 위한 Fan을 통해 Scrubber로 이송하는 도중 배기덕트 굴곡 부분에서 화재 발생	인명피해는 없었으며, Fan 및 배기덕트 손상
1996. 10 대만	반도체 공장 폭발사고	수소 가스저장소의 수소 누출로 인한 폭발	266백만US\$ 피해
1997. 10 대만	과학기초산업공단 화재발생	연무 배기설비 운전 중에 연무 덕트의 가지덕트(재질 Polypropylene) 신설 작업 후에 화재발생	공정전체에 조업중단 등의 피해
1999. 대만	반도체 공장 화재 발생	공정 내부의 전기 누전으로 인한 화재 발생	전용 배기설비가 없어 Fab 에 연기가 확산
2000. 일본	통산성 공업기술원 종합연구소 가스 누설	극저온 에너지 센터에서 불소가스의 누설 불소 가스는 초전도 실험장치에 사용하는 것이며, 여성보조직원은 열화된 가스를 정기 교환을 위해, 용기에서 관을 통해 장치에 가스를 보내주는 작업도중에 실수로 다른 밸브를 개방하여 가스 누설	직원 6명이 가스를 흡입하여 가스에 중독
2001. 일본	유기용제 Wet Station 화재	유기용제 Wet Station 화재 발생	연기제거시간 60여시간 소요, 5일 조업 중지

국내·외 Clean Room의 사고사례를 분석 결과 화재시 화염에 의한 기업손실뿐만 아니라, 고급장비와 장치, 또한 일정 청정도를 유지하는 Clean Room이라는 특수 시설이므로 연무, 연기에 의한 기업손실이 더욱 막중하다. 특히, 반도체 산업이 주요 산업인 우리나라는 국가적으로 막대한 손실을 입을 수 있다. Clean Room은 유독성, 발화성, 가연성, 인화성 화학물질을 다량 사용, 저장하고 있으며, 근무자의 방진복 착용으로 화재인지가 늦고, 피난의 악영향으로 사고가 발생하면 일반생산시설의 사고에 비해 대형사고를 일으킨다.

3. Clean Room 설계 주요 기준 비교·분석

1999년 청정도에 관한 국제규격인 ISO 14644가 발표되어 세계적 규격의 통일에 한발 전진하게 되었다. 그러나, Clean Room에 대한 표준이 일부 확정되어 있으나, 안전에 대한 사항은 전혀 언급되지 않고 있으며, 청정도를 관리하는 방법 및 공조 방식에 대한 기준만을 제시하고 있다. 미국의 화재보험사인 FM(Factory Mutual Property Loss Prevention Data

Sheets), IRI(Industrial Risk Insurers), NFPA CODE에서 안전에 대한 시설기준이 제시되고 있고, 국내에서는 Clean Room에 대한 국내 법규는 산업시설군의 공장, 연구시설에 포함되어 있으며, 소방법에서는 화재 제어시설로 일반건축물과 동일한 규정을 적용 받고 있는 상황이라 Clean Room에 대한 규정은 전혀 언급이 없는 실정이다. 단, 보험협회에서 Clean Room과 관련된 FM, IRI, NFPA CODE를 기본으로 한 Clean Room 방화기준이 있다. Clean Room 설계 주요 기준 비교·분석이 Table 3과 같다.

Table 3. 국외 Clean Room 설계 주요 기준 비교·분석

Clean Room 내화시간에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 가연물 용도에 노출된 Clean Room : 최소 2시간 내화벽으로 구획 ◦ 노출이 보다 심각한 Clean Room : 2시간 이상 내화벽으로 구획 ◦ Clean Room 내의 문 : 3시간 이상 내화 방화문
NFPA CODE	◦ 인접 용도로부터의 Clean Room : 1시간 내화구조
FM	◦ Clean Room : 1시간 내화벽으로 구획
Clean Room 건축 재료에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 벽, 바닥, 천장의 내장재 : 승인된 불연재 ◦ 구조 재료와 내부마감재 : 입자 발산 최소화
NFPA CODE	◦ 벽, 바닥, 천장, 칸막이 : 승인된 불연재
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 벽, 바닥, 내부마감재 : 승인된 불연재 ◦ Clean Room 외부벽에 들여다보는 창이 있는 복도 : 불연성 구조
자동식 소화설비에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 스프링클러설비 : Clean Room이 있는 건물 내에 설치, 스프링클러헤드는 배기덕트 개구부 직상에 설치, Access Floor 아래 Plenum Area에 설치 ◦ 고정식 이산화탄소소화설비 : Wet Station의 내부와 위에 설치
NFPA CODE	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 스프링클러설비 : Clean Room, Clean Zoon 전체에 설치, 스프링클러헤드는 승인된 속동형 헤드 사용 ◦ 물분무소화설비 : 개방 분배설비의 실란가스 실린더 위에 설치 ◦ 국소방출방식의 가스소화설비 : 스프링클러설비 대응으로 허용
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 스프링클러설비 : Clean Room 전체 Class 분류에 상관없이 설치, 직경이 150mm 이상인 모든 비급속 덕트설비에 설치, 스프링클러헤드는 57°C 등급의 승인된 속동형 헤드 사용 ◦ 물분무소화설비 : 최소한 방출시간이 2분이 되도록 설치 ◦ 이산화탄소소화설비 : Plenum Area의 방호는 1분내 50% 최저농도를 달성하도록 설계 ◦ FM-200설비 : Plenum Area의 방호는 10초내 7% 최저농도를 달성하도록 설계

수동식 소화설비에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 이산화탄소소화기 : Clean Room내에 비치 ◦ 옥내소화전설비 : 옥내소화전 호스함은 Clean Room 출구 바깥쪽에 설치
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 이산화탄소소화기 : B급, C급 화재 위험에 승인된 소화기 사용, 제조지역 전체에 비치
감지 및 경보설비에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 공기샘플링연기감지기 : Clean Room의 Plenum Area 전체에 설치 ◦ 불꽃감지기 : 고정식이산화탄소소화설비를 자동으로 작동
NFPA CODE	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 공기샘플링연기감지기 : 보충공기로 회석되기전 Clean Room 배기흐름내에 설치 ◦ 불꽃감지기 : 물분무소화설비, 가스소화설비를 작동, 매달 검사 ◦ 자동식소화설비 방출시 화재경보설비 작동
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 불꽃감지기 : Clean Room의 Plenum Area에 설치, 공기샘플링, 주소아날로그형 연기감지기의 사용 고려
연무배기설비에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 불연성 덕트 사용, 최소한 1m/s의 공기속도를 이용 예상되는 모든 오염 방출물을 포착
NFPA CODE	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 배기덕트는 직접 밖으로 유도하고, 일체 완비 ◦ 내화 구조물을 관통하는 덕트는 구조물과 동등한 내화도를 갖는 외함에 수납
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 응축액이 덕트에 축적될 가능성이 있는 경우, 응축액 배수관 설치 ◦ 화재 예상 장소에는 연기국부제어용으로 설계하고, 최소한 압력 50Pa이상으로 화재지역보다 노출된 인접한 지역에 유지할 수 있도록 설계 ◦ 부식된 제품이 배기되는 곳에 설치, 연소성 덕트는 승인된 덕트로 교체, 교체할 수 없을 시 덕트를 방호할 스프링클러설비 설치
연기제어설비에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 공조설비가 연기제어를 위해 사용될 수 없을 때, 별도의 연기제어설비는 1m²당 0.9m³/min 이상 공급하도록 설계 ◦ 공조설비를 겸하는 연기제어설비는 재순환 공기팬을 정지시키기 위해 공조덕트에 연기감지기를 설치 ◦ 덕트는 불연재로 시공, 비상스위치는 각 Clean Room 출구 바깥쪽에 설치
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 연기감지기에 의해 자동적으로 작동되도록 연기제어설비를 설계 ◦ 연기제어설비를 수동으로 작동 가능한 제2방법을 Clean Room 외부에 표시, 접근할 수 있는 구역에 비치 ◦ 덕트는 불연성 재료로 제작, 뎀퍼와 팬을 포함하여 모든 감지기와 연기제어설비의 기능 테스트를 매년 실시
전기설비에 관한 기준	
IRI	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 비상전원은 모든 연무배기설비, 연기제어설비에 설치
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 메인 변전소는 최소한 2개의 독립된 전송라인에 의해 전원을 공급받음 ◦ UPS 시스템을 모든 중요 공정에 설치
기타설비에 관한 기준	
FM	<ul style="list-style-type: none"> ◦ Scrubber는 Clean Room내에 설치 불가, 연소성 자재로 제작시 입구와 개방된 배기구에 스프링클러설비 설치 ◦ 비상운용 절차를 문서화하여, 화재시 비상계획을 Clean Room 입구에 게시 ◦ Clean Room내의 소음레벨은 65dB 이하로 유지

4. 시뮬레이션을 통한 안전성 평가

4.1 피난시뮬레이션 실시

적용된 프로그램은 SIMULEX 11.1.3으로 실제 Clean Room내의 근무자가 방진복 착용하고 근무하는 특수 상황이라 화재시 비상경보에 대한 인지가 늦고, 시야가 좁으며, 피난행동에도 제약을 받아 일반인 평균속도의 1/2인 평균 0.5m/s로 지정하여 실시하였다. 피난인원은 42명으로, 피난출구 개수는 CAD상의 4개소로 다음과 같이 하였다.

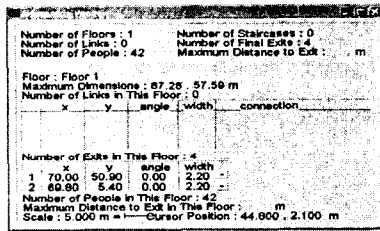
Exit 1 : (70.00,50.90 m), 0.00 degrees, 2.20 m wide

Exit 2 : (69.80,5.40 m), 0.00 degrees, 2.20 m wide

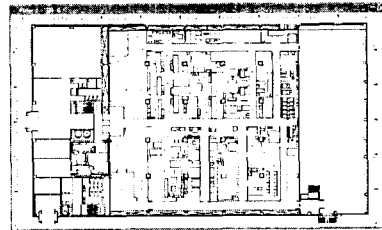
Exit 3 : (11.90,18.10 m), 0.00 degrees, 0.90 m wide

Exit 4 : (16.90,15.05 m), 0.00 degrees, 0.90 m wide

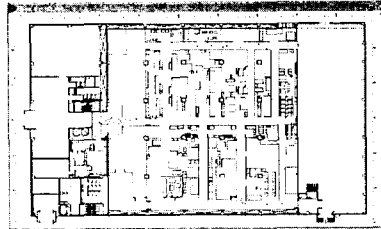
본 좌표값은 피난시뮬레이션상의 위치좌표값임.



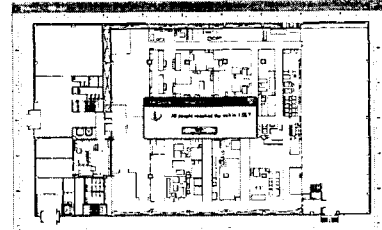
□ 피난시뮬레이션 초기조건 설정



□ 피난출구 및 피난인원배치



□ 피난 시작 40초 후



□ 피난 시작 115초 후(피난완료)

Fig. 1. 피난시뮬레이션 모델링

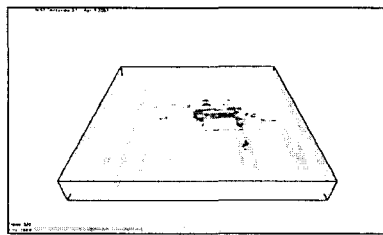
전체공간 면적에 비해 피난인원이 적고, 피난인원의 위치가 적절히 분산되어 있는 상황에서 피난이기 때문에 피난이 시작되면서 특별한 체류나 혼란은 발생되지 않는다. 각 위치에서 가장 가까운 출구로 피난을 시작하며 피난은 정상적으로 이루어진다. 다만 많은 장비 및 기기들이 피난시에는 장애물이 되어 이러한 장애물을 경유해 피난해야 하므로 피난동선이 다소 길어지고, 피난시작 115초에 피난이 완료된다.

4.2 열·연기시뮬레이션 실시

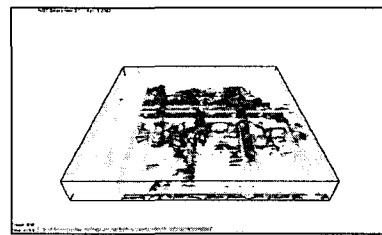
다양한 화재시나리오에 적용된 화재전용 수치해석 프로그램인 FDS3.1을 적용하였다. 화재 발생공간은 밀폐공간으로 가정하였으며, 공간 내·외부 사이의 열 및 물질 전달은 없으며, 초기 상태의 온도는 20°C, 압력에 대한 영향은 실내의 고른 분포로 감안되지 않았으며, 초기의 유동은 없고, 벽면은 단열조건으로 가정하였고, Heskestad가 제안한 화재 성장에 관한 Power Law Relation을 이용하여 화원을 정의하였고, 화재 성장은 Ultra-Fast로 가정하였고, 열방출량을 3MW로 하였고, 적용된 격자는 균일, 정렬 격자계로 생성된 격자의 개수는 약 192,000개이고, 상부 급기시와 상부 급기정지시를 적용해 시뮬레이션을 실시하였다.

4.2.1 상부 급기시

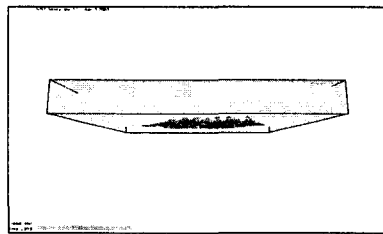
상부 급기 풍속 데이터는 Clean Room내의 A구역, B구역을 선정하여 3일간 각각 4회, 5회 측정된 평균치를 적용하였다.



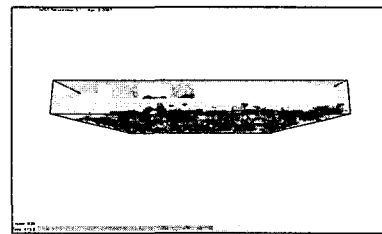
□ Fab Area 연층하강(발화 260초후)



□ Fab Area 연층하강(발화 415초후)



□ Plenum Area 연층하강(발화 230초후)

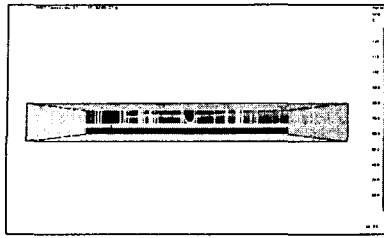


□ Plenum Area 연층하강(발화 415초후)

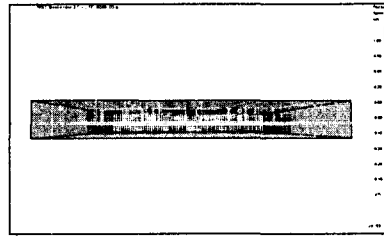
Fig. 2. 상부 급기시 연기시뮬레이션 모델링

연기의 온도와 공기의 온도차가 5°C 이상의 차이를 갖는 고온 가스층을 연기층으로 취급하였고, 상부 급기로 인한 연기의 산란으로 화재 후 약 100초 이내에 Fab Area, Plenum Area 전체에 연기로 휩싸이게 되고, 피해규모가 상상을 초월한다.

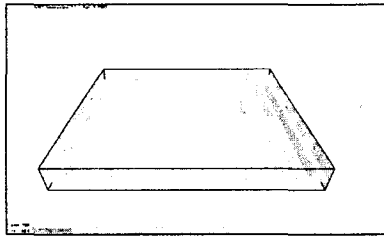
4.2.2 상부 급기정지시



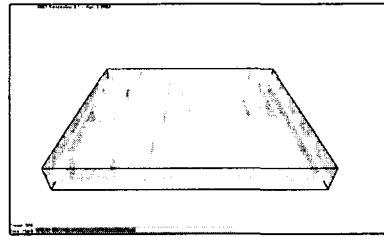
□ 열온도분포 연층하강(발화 240초후)



□ 속도분포(발화 240초후)



□ Fab Area 연층하강(발화 100초후)



□ Fab Area 연층하강(발화 250초후)

Fig. 3. 상부 급기정지시 열·연기시뮬레이션 모델링

Mixture Fraction level = 0.001인 층을 연기층(Smoke Layer Interface)으로 취급하였고, 화재시 초기에 연층이 급속히 상승해 천정면으로 퍼져 나가는 것을 알 수 있고, 화원의 위치 변동에 의해 각 부분의 Clear Height가 차이가 있겠지만, 종합적으로 검토를 해본 결과 약 220초 이후에 연층 Clear Height가 피난조건의 한계를 넘어선다.

4.3 시뮬레이션 분석 결과

피난시작 115초에 피난이 완료되고, 피난준비시간 30초를 가산시에 145초가 된다. 화재시에 상부 급기를 정지시키는 가정하에 연층 Clear Height가 220초로 근무자의 피난안전에는 문제가 없는 것으로 분석된다.

5. 결과

1. Clean Room내에 감지기의 오동작 발생 건수가 적지 않으며, 공정의 중지로 인해 발생하는 피해는 규모가 크지만, Clean Room은 화재시 연기감지기에 의해 공조설비가 자동 정지하도록 연동이 되어야 하고, 수동으로 정지시키는 장치 또한 설치해 근무자의 안전에 우선권을 두고, Clean Room내의 시설물 확대 피해를 최소한으로 줄여야 한다.

2. Clean Room내에 모든 내장재는 승인된 불연재로 하고, 최소한 1시간 이상 내화벽으로 공간을 구획하여 화재시 화재실은 배기, 인접실은 급기자동모드로 전환되는 제연설비를 설치하고, 반드시 승인된 덕트로 전용 연무·연기제어설비를 설치해 연무, 연기를 외

부로 적절히 배출한다.

3. Clean Room내에 스프링클러설비를 설치한다. 화재시 스프링클러설비 작동으로 연층 하강 시간이 빨라지는 우려가 있겠지만, 오히려 연기를 냉각시키고, 화염의 사이즈를 줄일 수 있어 스프링클러설비가 없는 경우보다도 Clean Room내의 근무자가 장시간 머무를 수 있고, 또한 연기제어도 유효한 설비이다.

참고문헌

1. Factory Mutual Property Loss Prevention Data Sheets 1-56, Clean Rooms, 1998 Edition, 7-7/17-12, Semiconductor Fabrication Facilities, 2000 Edition.
2. Industrial Risk Insurers IM.17.1.1 Guiding Principles for the Protection of Semiconductor Manufacturing Facilities 1991 Edition, IM.17.11 Cleanroom 1990 Edition.
3. NFPA 318, Standard for the Protection of Cleanrooms, National Fire Protection Association, 2000 Edition.
4. NFPA 92B, Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas, National Fire Protection Association, 2000 Edition.
5. 이통영 외 4인, Clean Room 기류순환에 따른 피난 연구, 한국산업안전학회 춘계학술 발표회, 한국산업안전학회, 2003. 5.