

박사학위논문

반도체 공장 화재안전성 향상을 위한
소방시설의 특성분석

Characteristic Analysis of Fire-Fighting System for
Improving Fire Safety in a Semiconductor Factory

2025년 2월

우석대학교 일반대학원

소방·안전공학과

홍 상 혁

반도체 공장 화재안전성 향상을 위한
소방시설의 특성분석

지도교수 공 하 성

이 논문을 공학박사 학위 청구논문으로 제출함

2024년 11월 일

우석대학교 일반대학원

소방·안전공학과

홍 상 혁

홍상혁의 공학박사 학위논문을 인준함.

심사위원장 임 상 준 인

심 사 위 원 김 찬 영 인

심 사 위 원 김 정 훈 인

심 사 위 원 우 용 득 인

심 사 위 원 공 하 성 인

2024년 12월 일

우석대학교 일반대학원

감사의 글

박사학위 논문을 완성하기까지 많은 분의 도움과 격려가 있었습니다. 이에 감사의 마음을 담아 인사를 전합니다.

먼저, 저를 지도해 주신 공하성 지도 교수님께 감사드립니다. 교수님께서서는 제가 연구를 진행하는 동안 항상 곁에서 세심한 조언과 지도, 격려를 해주셨습니다. 교수님의 열정적인 가르침 덕분에 제가 논문을 완성할 수 있었습니다. 또한 학문적 지도 및 조언을 아끼지 않으시고 많은 배려를 해주신 서울대학교 임상준 교수님, 우석대학교 우용득 교수님, 김찬영 교수님, 김정훈 교수님께도 고개 숙여 감사드립니다. 그리고 논문 작성에 도움을 주신 선후배님들과 회사 동료들에게도 감사드립니다. 아낌없는 조언과 도움 덕분에 논문을 더욱 완성도 높게 작성할 수 있었습니다.

일과 학업을 병행하며 평택에서 전주로 매주 학교에 다니는 것이 생각보다 쉽지 않았습니다. 몸이 지쳐 학교가는 중간에 차를 세워두고 쪽잠을 자는 날도 늘어나고, 어떤 날엔 너무 힘이 들어 왜 이 고생을 하는지 스스로를 자책하며 중도 포기하고 싶다는 생각도 무척이나 많이 들었습니다. 그럴 때마다 마음을 다잡고 버틸 수 있었던 건 가족들의 응원과 지지가 있었기 때문입니다. 아내 박은하는 제가 연구를 진행하는 동안 항상 곁에서 응원해 주고, 주말에 아이들과 함께하는 시간이 그만큼 부족했지만 내색하지 않고 묵묵히 내조해 주어 제가 연구에 집중할 수 있게 해주었습니다. 또한 사춘기를 겪고 있는 까칠한 딸 홍라연과 귀염둥이 아들 홍진원의 응원과 사랑이 있었기에 제가 포기하지 않고 끝까지 논문을 완성할 수 있었습니다. 마지막으로 저를 무한으로 사랑해 주시고 믿어주시는 아버지, 어머니에게 감사드립니다. 그리고 홍 서방을 항상 응원해 주시는 장인어른, 장모님에게도 감사 인사드립니다.

앞으로 제가 연구를 통해 얻은 지식과 경험을 바탕으로 사회에 기여할 수 있는 인재가 되도록 노력하겠습니다.

목 차

표목차	iv
그림목차	vi
ABSTRACT	ix
I. 서론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
2. 연구범위와 방법	5
II. 관련 연구 동향	7
1. 반도체공장 화재	7
2. 비화재보	8
3. 스프링클러 헤드	11
4. 선행연구 종합분석 및 독창성	16
III. 이론적 고찰	17
1. 반도체공장	17
가. 국내외 반도체공장 현황	17
나. 반도체공장 화재 특성 및 사례	26
2. 자동화재탐지설비 및 NFPA 921 과학적 방법론	42
가. 자동화재탐지설비	42
나. 화재감지기 동작 원리	42
다. 화재감지기 비화재보	47
라. NFPA 921 과학적 방법론	47

3. 스프링클러 설비	51
가. 스프링클러 설비의 개요 및 종류	51
나. 스프링클러 설비 동작 원리	52
다. 스프링클러 헤드 특성	56
IV. 실험 모델	60
1. NFPA 921을 통한 비화재보 분석 실험	60
2. 유리벌브형 헤드 내구성 및 내압성 실험	61
3. 반도체 실 화재 실험	62
4. 통합 실험 모델	63
V. 반도체공장의 안전성 평가	65
1. 반도체공장의 NFPA 921에 의한 비화재보 분석	65
가. NFPA 921 과학적 방법론의 필요성 및 구성	66
나. 반도체공장 비화재보 원인조사 분석 방법	69
다. 비화재보 원인조사 방안	73
라. 결과의 고찰	78
2. 유리벌브형 스프링클러 헤드 내구성 및 내압 실험	80
가. 실험조건 및 실험방법	81
나. 실험 결과	84
다. 결과의 고찰	93
3. 반도체 클린룸의 실화재실험	95
가. FAB 상부실 현장 조사	96
나. 화재 발생 시나리오 및 시험체	97
다. 주요 가연물 연소시험 방법 및 결과	99
라. 클린룸 화재실증실험 방법 및 결과	118
사. 결과의 고찰	136

VI. 결론	140
참고문헌	142
국문 초록	147

표 목 차

<표 1> 주요 가연물 연소시험 및 모형실 화재실증시험	5
<표 2> 비화재보 분석에 관한 선행연구	9
<표 3> 스프링클러 관련 선행연구 분석 결과	13
<표 4> 내화시간에 관한 기준	18
<표 5> 자동소화설비에 관한 기준	19
<표 6> 내장 마감재에 관한 기준	20
<표 7> 화재 감지 설비에 관한 기준	20
<표 8> 소화기에 관한 기준	21
<표 9> NFPA 13 스프링클러 설치 제외 장소	22
<표 10> 공정별 주요 화재위험분석	30
<표 11> 반도체 공정에 주로 사용되는 화학물질	34
<표 12> 전국 공장시설 화재통계	35
<표 13> 반도체공장 화재 사고 현황	37
<표 14> 국내 주요 FAB 스프링클러 설비 설치현황	41
<표 15> 화재조사 과학적 방법론	48
<표 16> 스프링클러 설비 동작 원리 비교	56
<표 17> 과학적 방법론의 구성	69
<표 18> 연도별 비교	70
<표 19> 감지기 종류별 비교	71
<표 20> t-검증 결과	71
<표 21> 비화재보 원인분석 체크리스트	75
<표 22> 오동작 개선검증 Tool	77
<표 23> Universal 인장기계사양	82
<표 24> 정적하중 실험 결과	85
<표 25> 동적하중 Case 1 프레임 워 부분 낙하	87
<표 26> 동적하중 Case 2 프레임 몸체 부분 낙하	88

<표 27> 동적하중 Case 3 유리별브 직접 낙하	89
<표 28> 유리별브 손상 깊이에 따른 내압 영양평가 결과	92
<표 29> 콘칼로리미터 시험체의 종류 및 측정항목	98
<표 30> 열방출율시험 시 측정항목	99
<표 31> FFU 착화실험 방법	103
<표 32> FFU 착화방법 세부 사항	103
<표 33> FFU 구성품 및 가연성물질의 착화시간	104
<표 34> FFU 구성품의 발열량(1대 기준)	105
<표 35> 상부실 가연성물질의 발열량(단위길이/단위수량 기준)	105
<표 36> FAB 상부실 바닥부 단위 면적당 발열량	106
<표 37> FFU 구성품 및 가연성물질의 최대열방출율	107
<표 38> VESDA 설치 사양	121
<표 39> 화재실증실험용 계측기의 종류 및 관찰사항	124
<표 40> 가연물의 대표적 임계열유속	132
<표 41> 단위면적당 총발열량	137

그림 목차

[그림 1] 반도체 FAB 구조	26
[그림 2] 반도체 제조공정	28
[그림 3] 특수건물 주요 화재 원인	36
[그림 4] 공기식 차동식스포츠형감지기	43
[그림 5] 열원별 스펙트럼 분포비교	43
[그림 6] 분광분포 특성	44
[그림 7] 정온식 감지선형 감지기 구조	45
[그림 8] 광전식 감지기 구조	45
[그림 9] 광전식 감지기	46
[그림 10] 스프링클러 설비 종류	52
[그림 11] 습식스프링클러 설비	53
[그림 12] 건식스프링클러설비	54
[그림 13] 액셀레이터 동작 원리	54
[그림 14] 준비 작동식 스프링클러 설비 동작 원리	55
[그림 15] 스프링클러 헤드 종류	57
[그림 16] 감열체 종류에 따른 헤드 유형	57
[그림 17] 유리벌브형 스프링클러 헤드	58
[그림 18] 설치 방식에 따른 헤드 종류	59
[그림 19] NFPA 921을 통한 비화재보 분석 실험 모델	60
[그림 20] 유리벌브형 헤드 내구성 및 내압성 실험 모델	61
[그림 21] 반도체 실화재실험 모델	62
[그림 22] 통합 실험 모델	64
[그림 23] 화재조사 과학적 방법론	67
[그림 24] 통합방재시스템	73
[그림 25] 오동작 개선검증 프로세스	77
[그림 26] 정적하중 실험 장치	82

[그림 27] 동적하중 실험 장치	83
[그림 28] 다이아몬드 연삭 막대	84
[그림 29] 정적하중 실험 결과 평균값	85
[그림 30] 프레임 윙 부분 낙하지점	87
[그림 31] 프레임 몸체 부분 낙하지점	88
[그림 32] 글라스밸브 표면 낙하지점	89
[그림 33] 유리밸브 손상	91
[그림 34] IEEE 1202 시험장치 개략도	100
[그림 35] FFU 완성품 및 표준 점화원	101
[그림 36] FFU 착화실험 시료	102
[그림 37] FFU 구성품의 최대열방출율	108
[그림 38] 상부실 그 밖의 가연물 최대열방출율	108
[그림 39] 연소시험 결과	112
[그림 40] FFU 완성품의 연소시험 장면	113
[그림 41] FFU 완성품의 열방출율 및 총 발열량	114
[그림 42] FFU 착화실험 장면(1차)	115
[그림 43] 모터 연결부 및 필터 상부 온도 (1차 착화실험)	116
[그림 44] FFU 착화실험 장면(2차)	117
[그림 45] 전원 접속부 온도(2차 착화실험)	117
[그림 46] 모형화재실 개략도	118
[그림 47] 실증실험용 모형화재실 및 계측기	120
[그림 48] 공기흡입형 화재감지기 설치 모습	121
[그림 49] 클린룸 화재실증실험 절차	122
[그림 50] 온도센서 위치 개략도	123
[그림 51] FFU 내부 온도 및 FFU 인근 표면온도(1차)	125
[그림 52] FFU 내부 온도 및 FFU 인근 표면온도(2차)	126
[그림 53] FFU 전원 접속부 화재 시 열화상 이미지(2차 실험)	127
[그림 54] 천장 주위온도(1차)	128

[그림 55] 천장 주위온도(2차)	129
[그림 56] FFU 하부 및 상부 필터 온도(1차)	130
[그림 57] FFU 하부 및 상부 필터 온도(2차)	130
[그림 58] 임계열유속 변화	133
[그림 59] 산소농도 변화	135

ABSTRACT

Characteristic Analysis of Fire-Fighting System for Improving Fire Safety in a Semiconductor Factory

Hong, Sanghyuk

Department of Fire Protection & Safety Engineering

Graduate School of Woosuk University

Supervised by Professor Kong, Hasung

The Korean semiconductor industry emerging has emerged as a global leader, driving the world's semiconductor production and making notable advancements in technology. To further develop and sustain this industry, it is essential to focus not only on technological innovation but also on establishing the necessary infrastructure to ensure safe production.

As facilities and buildings become more advanced and diverse, the firefighting and safety systems installed on-site are also diversifying to meet specific conditions. However, these developments have led to ongoing disruptions in on-site production due to equipment malfunctions and human errors.

This study applies the scientific methodology outlined in the NFPA 921 to analyze and identify the various causes of false alarms in automated fire detection systems, which are crucial components of fire protection facilities. Furthermore, management plans were proposed to mitigate damage to sprinkler heads through both static load tests and dynamic load tests. Additionally, to minimize water damage from leakage of the upper sprinkler in a clean room of a semiconductor factory, a safety evaluation was conducted to enhance fire safety through combustion tests and real-scale fire demonstration test of combustibles present in the supply plenum of clean room.

The findings of this study aim to strengthen non-fire alarm standards for fire detection systems in South Korea and to establish systematic storage and management standards for sprinkler heads. These proposals seek to reduce human and property damage caused by malfunctions and to enhance the reliability of firefighting facilities.

Keywords: Semiconductor Plant, NFPA921, Glass Bulb Sprinkler Head, False Alarm, Clean Room Fire Safety Assessment

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

반도체산업은 1947년 미국에서 처음 트랜지스터(Transistor)의 발명을 시작으로 그 형태를 갖추기 시작하였다. 이후 1958년 미국의 잭 킬비에 의해 고체상태의 게르마늄 기관 위에 여러 가지 전자소자를 집적한 최초의 집적회로가 개발되었으며, 1990년 반도체 기술의 응용 분야가 가전에서 컴퓨터로 이동하고 메모리 시장보다 마이크로프로세스와 같은 비메모리 시장의 빠른 성장이 이루어졌다(조양규, 2008).[1]

한국 반도체산업은 1960년대 반도체 포장, 조립으로부터 시작되었으며, 1970년대에 정부에서 전자통신연구소를 설립하여 반도체산업을 육성하기 시작하였다. 이후 1983년 경기도 기흥에 있는 S 전자에서 64K DRAM을 독자 개발하며 한국에서 본격적인 반도체 시대가 열렸다. 지속적인 성장을 거듭하여 세계 1등 반도체 국가로 부상하여 세계의 반도체산업을 견인하고, 기술을 선도하였다.

이러한 반도체산업을 더욱 발전시키고 유지하기 위해서는 기술개발뿐만 아니라 제품을 생산하는데 필요한 환경조건을 잘 구축하는 것도 매우 중요하다. 특히 화재 및 사고 등은 산업의 근간을 흔들 수 있는 매우 중요한 사안으로 완벽하게 대비하고 관리되어야 한다. 현재 반도체 제조 공장은 건축물의 구조, 내진, 방염, 소방시설과 같은 설비들을 매우 엄격한 기준에 의거하여 설치·운영하고 있다.

하지만 시설, 건축물들이 고도화 및 다양화됨에 따라 현장에 설치되고 있는 소방, 안전시설 또한 현장 상황과 여건에 맞게 다양화되고 있으며, 그로 인한 설비 오동작, 휴먼에러 등으로 현장 생산에 지속해서 차질이 발생하고 있다.

반도체 공장의 생산라인 FAB(Fabrication Facility)에는 소화 시설로 스

프링클러가 설치되어 있으며, 스프링클러는 습식시스템(Alarm Valve)으로 구성되어 있다. 생산라인 FAB의 상부층은 주로 지붕 트러스(Truss) 구조 또는 데크 플레이트(Deck Plate) 형태이며, 건물 구조의 특성상 강재, 콘크리트 등 불연성 재질로 이루어져 있다. 대형 FAB 내부 구조는 연속적인 대형 설비가 설치되어 있어 공간을 효율적으로 사용할 수 있도록 장 스패ن 슬래브(Long Spanned Slab) 형성을 위해 강재 트러스 또는 데크 플레이트 형태로 설계되고 있다.

이러한 FAB 상부 공간에 스프링클러 헤드가 설치되고 헤드의 파손 또는 원인 미상의 오방출로 인해 소화수가 방출될 때 소화수는 천 장면을 따라 흘러 FAB 전체로 퍼지고 하부 클린룸의 고가장비에 직접적인 수손피해 및 기업 휴지 등의 간접피해를 발생시킨다.

그러나 국내 소방법에서 스프링클러 설비에 대한 설치기준은 스프링클러 설비의 화재안전기준 성능 기준 (NFPC)과 기술기준(NFTC)에 있다. 그중 스프링클러 헤드 설치 제외 규정은 NFTC 103 에 기술되어 있으며, 천장과 반자 사이의 벽이 불연재료이고 천장과 반자 사이의 거리가 2m 이상으로서 그 사이에 가연물이 존재하지 않는 부분으로 규정하였다(소방청, 2022).[2]

NFPA 13 에 따르면 화재하중이 11.4MJ/m^2 이하인 단열재를 쓰는 경우 소화설비의 설치를 면제해 주고 있다. 이는 구획된 공간의 가연물의 화재하중이 일정 크기 이하면 화재가 발생한 경우에도 연소 확대 가능성이 적어 위험성이 낮다고 판단하는 것으로 이해된다(NFPA 13, 2019).[3]

국내에서는 스프링클러 헤드 설치 제외 규정에 대한 기준이 부족하고, 화재 안전성 확보에 따른 스프링클러 헤드 설치 제외에 관한 연구 또한 부족한 것이 현실이다.

또한 습식 스프링클러 시스템의 헤드는 $68\text{ }^{\circ}\text{C}$ 조기 반응형 유리벌브 헤드를 설치하며, 감열체인 유리벌브가 작동온도에 파손되어 소화수가 방출되는 방식이다.

스프링클러 유리밸브 헤드의 국내시험 기준은 「스프링클러 헤드의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」에 명시되어 있다. 그중 헤드 파손과 관련된 검사는 2.5 MPa의 정수 압력을 5분간 가압하여 물이 새는지를 검사하고 헤드를 고정대에 고정한 후 헤드에 15 g 이상 더한 중량의 원동형 추를 디플렉타의 중심으로부터 1 m 높이에서 헤드의 축심방향으로 1회를 가하고 35 kg 무게를 헤드의 축심방향으로 가할 때 후레임의 변위를 0.001 mm까지 측정하는 강도 검사, 유리밸브에 설계하중의 4배인 하중을 헤드의 축심방향으로 외부에서 가하여 이상 유무를 검사하는 유리밸브 강도 검사로 진행되고 있다(소방청, 2022).[4]

NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler System에 설치된 스프링클러 시스템은 NFPA 25 Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems Chapter 5 Sprinkler Systems에 명시되어 있다. 또한 헤드를 특정하고 있지는 않지만 누수(Leak), 부식, 물리적 손상, 유리밸브 내 액체 손상, 스프링클러 헤드 성능에 해로운 영향, 스프링클러 헤드 제조사에 의해 적용된 것과 다른 페인트가 묻은 헤드는 교체가 필요하다고 명시되어 있다(NFPA 13, 2019; NFPA 25, 2017).[5][6]

스프링클러 헤드는 제조된 후 차량, 선박, 항공 등의 교통수단을 통해 보관창고로 이동되고 시공사들의 자체 검수 등을 진행한 후 시공 현장으로 이동하여 별도 보관 및 설치되는 과정을 거치게 된다. 이 과정에 헤드의 유리밸브에 충격과 손상이 발생하고 고온의 환경에 노출되고 있음이 확인되었고, 손상된 헤드 및 비정상 헤드가 고가장비를 운용하고 있는 현장에 설치되면 많은 수손피해가 발생할 것이다.

그러나 국내·외 기준에서는 스프링클러 헤드의 유리밸브에 대한 직접적인 강도시험 기준과 유리밸브 손상 방지에 대한 기준은 부족하고, 손상된 헤드가 설치되면 발생할 수 있는 비화재보에 관한 연구 또한 부족한 것이 현실이다.

또한 반도체 공장에는 연기를 조기에 감지할 수 있는 아날로그 연기·

열 감지기가 약 4 만개 이상 설치되어 운영 중에 있다. 화재가 아닌 빗물, 습기, 작업 현장에서 발생하는 용접 흠, 먼지, 불빛 등의 환경적 요인과 설비 자체 고장에 의한 기계적 요인 등에 의해 2019년 1월부터 2021년 12월까지 163건의 화재 비화재보가 발생하고 있다. 이러한 비화재보로 인해 근로자 대피를 통한 업무손실(LOSS), 자체소방대 출동에 따른 인력손실 등이 발생하고 있다.

국내 소방 관련 법령에서는 비화재보에 대한 명확한 정의와 비화재보 원인조사에 관한 내용은 매우 부족하며, 그나마 「감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」에 감지기의 비화재보를 방지하는 실험 기준과, 「자동화재탐지설비 및 시각경보장치의 화재 안전 기술기준」에 부착 높이에 따른 감지기의 종류 및 설치장소별 감지기를 구분하여 오동작을 예방할 수 있도록 규정한 것이 전부이다. [7][8]

이러한 문제점에 착안하여 이 연구에서는 실효적 대안으로 국내외 기준 및 관련 자료 비교분석, FAB 상부 공간에 존재하는 가연물 실 화재 실험을 통한 화재재현실험 비교 검증 등을 분석하여 FAB 클린룸 상부 공간이 객관적으로 안전하고 스프링클러 제외 요건임을 입증하고 효과적인 화재 방호 및 FAB의 화재 안전 증대를 위한 방안을 제안하였다. 스프링클러 헤드 유리벌브에 직접 충격을 가하는 정적 하중 실험과 동적 하중 실험으로 구분한 내구성실험과 유리벌브 손상 정도에 따른 유리벌브 헤드의 파손 여부를 검증하는 유리벌브 내압 영향실험을 통해 손상된 유리벌브 비화재보 가능성을 검증하고 현장에서 발생 될 헤드 손상을 최소화할 관리방안을 제시하였다.

또한 화재감지기의 가성 알람의 다양한 원인을 분석·규명하는데 NFPA 921 과학적 방법론을 적용함으로 객관적이고 체계적인 비화재보 원인분석이 이루어질 수 있도록 하여 새로운 비화재보 정의를 규정하고, 비화재보 정의 구분에 따른 효과적인 원인분석 기법(Check List)을 제시하였다.

2 연구범위와 방법

경기도 평택에 있는 반도체 공장을 대상으로 소방시설 및 방호시설, 건축구조, 자재, 피난시설, 건물 시스템에 대한 설계자료 및 현황을 조사하고 국내외 FAB 소방시설 설치기준 등 관련 자료를 검토하였다. 또한 FAB 클린룸 상부 공간의 발화원을 조사하기 위해 공기정화장치(FFU)구조 및 특성을 조사하고 공기 유동 조사를 시행하였다.

FAB 클린룸 상부 공간의 주요 가연물 연소시험 및 모형실 화재실증 실험을 통해 <표 1>과 같은 실험과 분석을 시행하였다.

<표 1> 주요 가연물 연소시험 및 모형실 화재실증실험

No	실험내용
1	조사된 가연물 및 발화원을 토대로 착화실험, 발열량 데이터 도출
2	ISO 5660-1에 따른 공기정화장치(FFU) 구성품 및 그 밖의 가연물의 개별 연소 특성 시험
3	IEEE 1202 시험장치를 이용한 공기정화장치(FFU) 완성품의 열방출율/발열량 측정
4	FAB 상부실 화재 시 바닥 판넬(FAB 상부 반자)의 구조 평가
5	모형실 화재실증실험을 위한 착화실험
6	모형실 화재실증실험을 통한 화재 특성 분석
7	FAB 상부실 온도분포 및 연기 거동 등 분석
8	화재 실험 결과를 통한 화재 안전 성능 개선방안 제시

스프링클러 헤드의 내구성 및 내압 실험을 통해서는 헤드에 정적하중 실험, 동작 하중 실험, 내압 영향실험을 실시하고 정적 파단 하중과 주요 부위의 동적충격시 파손 여부, 유리벨브 손상시 내압에 의한 파손

여부를 정량적으로 평가한다.

비화재보 실태를 조사한 장소는 국내 반도체 공장으로써 비화재보의 대상은 아날로그 연기감지기 22,459대, 아날로그 정온식 감지기 2,538대, 공기흡입형 감지기 1,364대, UV/IR 불꽃 감지기 1,515대, 감지 선형 감지기 766대로, 오동작의 원인분석을 NFPA 921 과학적 방법론을 적용하여 잦은 비화재보로 인한 소방력 낭비, 현장 상황분석의 오류 및 가설수립 시 개인 주관적 의견반영, 비화재보 원인분석 능력 미흡, 비화재보 정의 명확화, 통합감시시스템을 통한 비화재보 인지 시간 단축, 비화재보 정의에 따른 원인분석 및 Check List를 제시하였다.

II. 관련 연구 동향

1. 반도체공장 화재

이대준 등(2023)은 반도체 소재 제조공정에서 아세트산 취급 작업 중에 발생한 화재 및 폭발 사고를 예방하기 위해 Hopper와 같은 설치구축, AOPS 구성설치, 근로자의 인식 변화까지 다양한 관점에서 의견을 제시하였다.[9]

천광수 등(2021)은 반도체 PR 공정 중 화재 사고 발생 시 클린룸 내부에서의 복사열 및 온도 변화 분석을 통해 작업자의 안전이 보장됨을 평가하였다.[10]

Michael J. Ferreira 와 안병국(2000)은 FSD 화재모델링 및 반도체 공장의 사례분석을 통하여 제연 설계 시스템의 성능평가 기준을 설정하였다.[11]

최승복 등(2019)은 반도체 제조공정에서 발생하는 화재 위험성을 분석하고, 이를 예방하기 위한 방안을 제시하였다.[12]

정창욱 등(2022)은 반도체 공장의 화재 예방을 위한 안전관리 시스템을 구축하고, 이를 효과적으로 운영하기 위한 방안을 제시하였다.[13]

2. 비화재보

이건호(2022)는 아날로그 감지기의 비화재보 및 오동작 방지 기술과 자동화재탐지 설비의 IOT화를 통해 상황별 위험상황을 재실자들에게 알려 신속한 대피를 유도하고자 하였다.[14]

이가현 과 이승철(2021)은 습도에 의한 연기감지기의 비화재보 특성에 관한 전산 해석을 통해 감지기 설치장소의 근거를 제시하였다.[15]

서병근과 남상근(2016)은 아날로그 연기감지기에 먼지 등으로 인해 순간적으로 발생하는 비화재보를 예방하기 위해 감지기의 알고리즘 개선과 자기보상기능을 통해 감지기의 먼지 등에 의한 자체 오염과 화재 신호를 구분할 수 있도록 제안하였다.[16]

백동현 등(2010)은 전산센터에서 발생하는 비화재보를 분석하여 노이즈발생, 미세먼지, 항온항습기의 바람, 온도 등이 비화재보의 주원인임을 정의하였다.[17]

Xi He 등(2022)의 연구는 신속한 조기 화재 경보를 위한 스마트 화재 경보 시스템을 분석하고 기존 화재감지기에 비해 민감하고 신뢰할 수 있는 화재 감지기에 대한 동작 메커니즘에 대해 논의하고 준비할 필요성이 있음을 제안하였다.[18]

Sebastian Festag(2016)은 독일의 화재 감지 및 화재 경보 시스템의 오경보 비율에 대한 연구를 진행하였으며, 오경보 비율을 줄이려면 거짓 경보에 대한 공통된 이해와 용어 및 범주의 일관된 사용이 필요함을 제안하였다.[19]

NFPA 921을 적용한 선행연구로는 박경진 등(2018)은 냉동창고 화재 사례를 기반으로 발화원인 조사를 위한 도구로 NFPA 921를 사용하였으며[20], 김경호(2022)는 화재조사 단계의 구분과 세부 조사 방법 제시를 통해 체계적이고 과학적인 화재원인조사가 이루어질 수 있도록 하였다.[21]

Natalia Flores Quiroz 등(2021)은 NFPA 921 기준으로 화재 원인 파악

이 어려운 남아프리카 공화국의 비공식 정착촌의 화재 특성을 분석하여 화재조사를 위한 프레임 워크와 지침을 개발하였다.[22]

선행연구 결과 분석은 <표 2>와 같다.

<표 2> 비화재보 분석에 관한 선행연구

연구자	내용
백동현 등(2010)	전산센터에서 발생하는 비화재보를 분석하여 노이즈발생, 미세먼지, 향온향습기의 바람, 온도 등이 비화재보의 주원인임을 정의하였다.
서병근 등(2016)	현팅성으로 발생 되는 먼지 등으로부터 아날로그 광전식 연기감지기의 비화재보를 예방하기 위해 알고리즘을 개선하고 화재감지기의 자체 보상기능을 통해 먼지 등에 의한 오염과 실제 화재신호를 구분하도록 개선하였다.
Sebastian Festag(2016)	독일의 화재 감지 및 화재 경보 시스템의 오경보 비율에 대한 연구를 진행하였으며, 오경보 비율을 줄이려면 거짓 경보에 대한 공통된 이해와 용어 및 범주의 일관된 사용이 필요함을 제안하였다.
박경진 등(2018)	냉동창고 화재 사례를 기반으로 발화원인 조사를 위한 도구로 NFPA 921를 사용하였다.

Natalia Flores Quiroz 등(2021)	NFPA 921 기준으로 화재원인 파악이 어려운 남아프리카 공화국의 비공식 정착촌의 화재특성을 분석하여 화재 조사를 위한 프레임 워크와 지침을 개발하였다.
이가현 등(2021)	습도에 의한 연기감지기의 비화재보 특성에 관한 전산해석을 통해 감지기 설치 장소의 근거를 제시하였다.
이건호(2022)	아날로그 감지기의 비화재보 및 오동작 방지기술과 자탐설비의 IOT화를 통해 상황별 위험상황을 재실자들에게 알려 신속한 대피를 유도하고자 하였다.
Xi He 등(2022)	신속한 조기 화재 경보를 위한 스마트 화재 경보 시스템을 분석하고 기존 화재감지기에 비해 민감하고 신뢰할 수 있는 화재 감지기에 대한 동작 메커니즘에 대해 논의하고 준비할 필요성이 있음을 제안하였다.
김경호(2022)	화재조사 단계의 구분과 세부 조사방법 제시를 통해 체계적이고 과학적인 화재원인조사가 이루어 질 수 있도록 하였다.

3. 스프링클러 헤드

기존 국내 선행연구를 분석하면 하호진(2021)은 거실피난안전검증법을 활용한 한국과 일본의 화재안전성능평가 비교분석을 통해 배연창의 설치기준에 현행 규정을 강화하고 배연창 하변이 1.8 m 이상에 위치되는 것이 중요하다는 것을 확인하였다.[23]

임동오(2018)는 오피스 빌딩의 화재안전도가 건축가치에 미치는 영향을 연구하여 화재위험도 지수인 KFRI가 낮으면 화재안전도가 높아짐을 확인하고 화재안전도가 건물의 투자가치 정보로 활용되어야 할 당위성을 입증하였다.[24]

국외 선행연구를 분석하면 Zhi Tang 등(2023)은 주거용 건물의 다양한 환기구 설정과 실제 연료 부하를 사용하여 실화재실험을 실시하였고, 침실의 화재 시나리오를 분석하여 개구부 크기가 피크온도, 열 방출 속도에 미치는 영향을 분석하였다.[25]

Yet-Pole 등(2009)은 반도체 공장의 사실적인 모델을 구축하고 전산 유체 역학 알고리즘을 사용하여 가능한 화재/폭발 범위와 심각도를 시뮬레이션 하였고, 가스 방출 사고에 관한 결과 분석을 구현하는 방법에 대한 참조 기준을 제시하였다.[26]

Wen-Yao Chang 등(2008)은 반도체 wet bench 화재에서 물분무스프링클러 시스템의 성능평가를 시행하여 작동 압력과 물 분무 노즐의 위치에 대한 적절한 설계는 초기 화재 단계에서 wet bench 화재를 효과적으로 진압했음을 확인하였고, 노즐은 팬의 위 또는 양쪽에 고정되어 미스트가 충분한 운동량으로 팬 표면을 완전히 덮을 수 있도록 제안하였다.[27]

오재성 등(2022)은 스프링클러 헤드 실화재시험을 통한 열 유체의 유동 확산 경향에 관한 연구를 통해 외기의 영향을 최소화하여야 스프링클러 헤드에 균일한 열 확산 및 열 축적 상태를 유지할 수 있음을 증명하였다.[28]

김운형 등(2019)은 적층형 대형창고 스프링클러 헤드 개발 및 성능실험을 통해 적재물 전체 및 전면부 방호가 가능하고 최소방수량 115L/min을 가지는 최적의 헤드를 개발하여 방수량 K-115, 방수압 1 Bar 조건에서 1단 소화 실험 결과, 적용된 화재 시나리오에서 적재 물품을 전부 연소시키지 않고 화재를 제어함을 확인하였다.[29]

최용섭과 윤종철(2016)은 저성장속도 화재에서의 스프링클러 헤드 동작 특성에 관한 실험적 연구를 통해 플러쉬형 조기 반응형 스프링클러 헤드에서 Cold Soldering 현상이 발생하면서 불완전하게 개방되는 것을 확인하고, 추가적인 연구를 통해 국내 형식승인 및 제품검사 기준 보완의 필요성을 제시하였다.[30]

K.A.M. Moinuddin(2013)은 호주 고층 건물의 스프링클러 시스템의 신뢰성을 연구하였으며, Fault Tree Analysis를 사용하여 스프링클러 시스템 신뢰성을 미국 및 호주 통계 데이터와 비교분석 하였다. 60층짜리 호주 사무실 건물에서 스프링클러 시스템의 고장 확률은 2.1-3.4%범위로 호주에서 일반적으로 고려되는 값보다 크다는 것을 확인하였다.[31]

Yi Li 등(2012)은 구획 화재 실험에서 건축물 층높이별 스프링클러 헤드 토출률에 따른 열반응 측정에 관한 연구를 진행하였으며, 화재를 제어하거나 진압하는 스프링클러 시스템의 효과는 스프링클러의 실제 전달 밀도에 따라 달라짐을 제안하였다.[32]

Vladislav Reimer 등(2022)은 향상된 화재 스프링클러 시스템으로 스프링클러 헤드의 광섬유 모니터링을 제안하였으며, 제안된 섬유 광학 개념을 활용해 화재 스프링클러 헤드의 활성화를 실시간으로 모니터링할 수 있음을 입증하였다.[33]

선행연구 분석 결과는 <표 3>과 같다.

<표 3> 스프링클러 관련 선행연구 분석 결과

연구자	내용
Wen-Yao Chang 등(2008)	반도체 wet bench 화재에서 물분무스프링클러 시스템의 성능평가를 시행하여 작동 압력과 물분무 노즐의 위치에 대한 적절한 설계는 초기 화재 단계에서 wet bench 화재를 효과적으로 진압했음을 확인하였고, 노즐은 팬의 위 또는 양쪽에 고정되어 미스트가 충분한 운동량으로 팬 표면을 완전히 덮을 수 있도록 제안하였다.
Yet-Pole 등(2009)	반도체 공장의 사실적인 모델을 구축하고 전산 유체 역학 알고리즘을 사용하여 가능한 화재/폭발 범위와 심각도를 시뮬레이션하여 가스 방출 사고에 관한 결과 분석을 구현하는 방법에 대한 참조 기준을 제시하였다.
Yi Li 등(2012)	구획 화재 실험에서 유리별브 열반응 측정에 관한 연구를 진행하였으며, 화재를 제어하거나 진압하는 스프링클러 시스템의 효과는 스프링클러의 실제 전달 밀도에 따라 달라짐을 제안하였다.
K.A.M. Moinuddin(2013)	주 고층 건물의 스프링클러 시스템의 신뢰성을 연구하였으며, Fault Tree Analysis 를 사용하여 스프링클러 시스템 신뢰성을 미국 및 호주 통계 데이터와 비교분석 하였다. 60층짜리 호주 사무실 건물에서 스프링클러 시스템의 고장 확률은 2.1-3.4%범위로 호주에서 일반적으로 고려되는 값보다 크다는 것을 확인하였다.

최용섭 와 윤종칠 (2016)	저성장속도 화재에서의 스프링클러 헤드 동작 특성에 관한 실험적 연구를 통해 플러쉬형 조기 반응형 스프링클러 헤드에서 Cold Soldering 현상이 발생하면서 불완전하게 개방되는 것을 확인하고 추가적인 연구를 통해 국내 형식승인 및 제품검사 기준의 보완의 필요성을 제시하였다.
임동오(2018)	사무용 건물의 화재안전도가 건물 가치에 미치는 영향을 연구하여 화재위험도 지수인 KFRI가 낮으면 화재안전도가 높아짐을 확인하고 화재안전도가 건물의 투자가치 정보로 활용되어야 할 당위성을 입증하였다.
김운형 등(2019)	적층형 대형창고 스프링클러 헤드 개발 및 성능실험을 통해 적재물 전면부 및 전체 방호가 가능하고 115L/min 최소방수량을 가지는 헤드를 개발하여 적용된 시나리오에서 적재된 물품이 전부 연소되지 않고 화재가 제어됨을 확인하였다.
하호진(2021)	거실안전피난검증법을 활용한 화재 안전 성능평가를 한국과 일본을 비교분석을 통해 배연창의 설치기준에 현행 규정을 강화하고 배연창하변이 1.8m 이상에 위치되는 것이 중요하다는 것을 확인하였다.

오재성 등(2022)	스프링클러 헤드 실화재시험을 통한 열 유체의 유동 확산 경향에 관한 연구를 통해 외기의 영향을 최소화하여야 스프링클러 헤드에 균일한 열 확산 및 열 축적 상태를 유지할 수 있음을 증명하였다.
Vladislav Reimer 등(2022)	향상된 화재 스프링클러 시스템으로 스프링클러 헤드의 광섬유 모니터링을 제안하였으며, 제안된 섬유 광학 개념을 활용해 화재 스프링클러 헤드의 활성화를 실시간으로 모니터링 할 수 있음을 입증하였다
Zhi Tang 등(2023)	주거용 건물의 다양한 환기구 설정과 실제 연료 부하를 사용하여 실화재실험을 실시하여 침실의 화재 시나리오를 분석하여 개구부 크기가 피크온도, 열 방출 속도에 미치는 영향을 분석하였다.

4. 선행연구 종합분석 및 독창성

이처럼 스프링클러 시스템 관련 선행연구 및 국내외 기준에서는 헤드의 외관, 구조, 중량측정 등 외형적 결함과 수압, 수력 시험, 물성에 관한 시험, 온도에 관한 시험, 화재성능에 관한 시험, 살수 분포 등 제품성능에 초점이 맞춰져 있고, 스프링클러 헤드의 이동 및 시공 과정에서 발생할 수 있는 유리벌브 손상과 그에 따른 헤드 비화재보 및 반도체 공장 화재 영향성 평가에 관한 연구는 부족한 실정이다.

소방시설 비화재보 관련 선행연구는 비화재보 시 신속한 대피를 유도하는 기술개발, 습도에 의한 비화재보 장소 재정의, 화재감지기 기술 개선, 전산센터 비화재보 주원인 등 비화재보 원인 및 조치에 중점이 맞춰져 있고, 비화재보의 원인조사 방법론과 미국과 영국처럼 비화재보에 대한 명확한 정의 규정에 관한 연구가 부족한 실정이다. 미국은 National Fire Alarm and Signaling Code(NFPA 72) 에서 비화재보를 정의하고 있으며[34], 영국도 Fire Detection and Fire Alarm Systems for Building(BS 5839-1)[35]기준에서 비화재보를 규정하고 있다.

Ⅲ. 이론적 고찰

1. 반도체 공장

가. 국내외 반도체 공장 현황

1) 반도체 FAB 화재 방호 관련 국내의 기준

국내 건축물 설계기준은 건축물의 용도, 면적, 높이/층수, 수용인원에 따라 건축법 및 소방법의 방재 관련 시설기준에 대해 적용 대상 여부를 개별적으로 확인하여 적용하도록 하고 있다. 특히 국내에 적용하는 기준은 법 규정에 의해 강제하는 지방 규정으로 특수 목적으로 설계되는 건축물에 적용 시 화재 안전성 목표 측면에서 상당한 괴리가 발생할 수 있다.

반도체 공장에 대한 해외 선진 기준의 경우 Code에 의한 임의/성능 규정으로 용도, 바닥면적에 대한 단순 기준 적용이 아닌 각 용도에 따른 정량화된 화재위험도를 고려하여 화재 안전 성능을 확보할 수 있도록 기준을 제시하고 있다. 또한 미국방화협회 NFPA의 NFPA13, NFPA72, NFPA90, NFPA99 등이 있으며, FM GLOBAL의 Fire Protection Guide for Semiconductor Manufacturing Facilities, 국제빌딩코드 IBC의 Section 110.4.7.1.1 Semiconductor Manufacturing Facilities 및 Global Asset Protection(GAP) Guidelines의 Semiconductor Manufacturing Facilities 등 해외 선진 기준의 경우 Code에 의한 임의/성능 규정으로 용도, 바닥면적에 대한 단순 기준 적용이 아닌 각 용도에 따른 정량화된 화재위험도를 고려하여 화재 안전 성능을 확보할 수 있도록 기준을 제시하고 있다.

2) 해외 선진기준에 따른 FAB 내부 화재 방호 관련 기준

해외 선진기준에서 제시하는 FAB 클린룸의 내화시간, 스프링클러 설비와 같은 자동 소화설비 설치기준, 마감 재질 기준, 화재감지기 설치기준, 소화기 설치기준의 내용은 <표 4> ~ <표 8>과 같다.

<표 4>는 내화시간에 관한 기준으로 GAP 가이드라인에서는 가연성 수용물이 포함된 클린룸의 경우 최소 2시간 내화벽으로 구획하도록 하고 있고, 가연성 수용물 보관이 많은 클린룸의 경우는 2시간 이상의 내화벽으로 구획하도록 하고 있다. 또한 클린룸 내부의 방화문은 3시간 이상의 내화성능이 있는 것으로 설치하도록 유도하고 있다.

NFPA 기준에서는 클린룸과 인접한 구간의 벽은 1시간 이상의 내화구조로 구획하도록 하고 있다. FM 세계 기준도 NFPA와 같은 기준을 유도하고 있다.

<표 4> 내화시간에 관한 기준

기준	내용
GAP	☐ 가연성 수용물이 포함된 클린룸 : 최소 2시간 내화벽으로 구획 ☐ 가연성 수용물 보관이 많은 클린룸 : 2시간 이상 내화벽으로 구획 ☐ 클린룸 내의 방화문 : 3시간 이상 내화도
NFPA	☐ 클린룸과 인접 용도 : 1시간 이상 내화구조인 벽으로 구획
FM	☐ 클린룸 : 1시간 이상 내화구조인 벽으로 구획

<표 5>는 자동 자동소화설비에 관한 기준으로 GAP에서는 스프링클러 설비는 클린룸이 있는 건물 내에 설치하게 되어있고, NFPA에서도 클린룸에 스프링클러를 설치하고 조기 반응형 헤드를 설치하도록 하고 있다. 또한 인화성 위험가스 저장 캐비닛과 페가스 덕트, 실란가스 실린

더 상부 등에도 스프링클러를 설치하도록 기준화하고 있다.

FM은 클린룸 전체는 Class 분류에 상관없이 설치하고 지름이 150 mm 이상인 모든 비금속 덕트에는 조기 반응형 헤드를 설치하도록 하고 있다.

<표 5> 자동소화설비에 관한 기준

기준	내용
GAP	☐ 스프링클러 설비 : 클린룸이 있는 건물 내에 설치, 스프링클러 헤드는 배기덕트 개구부 직상에 설치, Access Floor 아래 Plenum Area에 설치 ☐ 고정식 이산화탄소 소화설비 : Wet Station의 내부와 위에 설치
NFPA	☐ 스프링클러 설비 : 클린룸, Clean Zone 전체에 설치, 스프링클러 헤드는 승인된 조기 반응형 헤드 사용 ☐ 인화성의 위험 가스를 저장하는 가스캐비닛 ☐ 0.048m ² (75 in ²) 이상 폐가스 덕트에 헤드 설치(단, 내부에 스프링클러 없이 사용할 수 있도록 인정된 덕트 제외함) ☐ 물분무소화설비 : 개방분배설비의 실란가스 실린더 위에 설치 ☐ 국소방출방식의 가스소화설비 : 스프링클러 대용으로 허용
FM	☐ 스프링클러 설비 : Clean Room전체 Class분류에 상관없이 설치, 지름이 150 mm 이상인 모든 비금속 덕트 설비에 설치, 스프링클러 헤드는 57도 등급의 승인된 속동형 헤드 사용 ☐ 물분무소화설비 : 최소한 방출시간이 2분이 되도록 설치 ☐ 이산화탄소 소화설비 : Plenum Area의 방호는 1분 내 50% 최저농도를 달성하도록 설계 ☐ FM-200설비 : Plenum Area의 방호는 10초 내 7% 최저농도를 달성하도록 설계

<표 6> 은 내장 마감재에 관한 기준으로 벽, 바닥, 천장의 내장재, 칸막이는 모두 승인된 불연재 재질을 사용하도록 규정하고 있으며, FM은 클린룸 외부 벽에 들여다보는 창이 있는 복도는 불연성 구조로 하도록 규정하고 있다.

<표 6> 내장 마감재에 관한 기준

기준	내용
GAP	☐ 벽, 바닥, 천장의 내장재 : 승인된 불연재 ☐ 구조재료와 내부 마감재 : 입자 발산 최소화
NFPA	☐ 벽, 바닥, 천장, 칸막이 : 승인된 불연재
FM	☐ 벽, 바닥, 내부 마감재 : 승인된 불연재 ☐ 클린룸 외부 벽에 들여다보는 창이 있는 복도 : 불연성 구조

<표 7>은 화재 감지 설비에 관한 기준으로 GAP 경우 Air Sampling 감지기를 클린룸 전체에 설치하고 장비부착형 이산화탄소 소화설비는 불꽃 감지기와 연동하도록 하고 있다. NFPA에서는 Air Sampling 감지기는 클린룸 배기 흐름 내에 설치하도록 하고 있고 가스소화설비 등은 불꽃 감지기와 연동되도록 하고 있다. FM 기준은 클린룸에 불꽃 감지기를 설치하도록 규정되어 있고 Air Sampling 감지기는 사용을 고려하도록 하고 있다.

<표 7> 화재 감지 설비에 관한 기준

기준	내용
GAP	☐ Air Sampling 감지기 : 클린룸의 Plenum Area 전체에 설치 ☐ 불꽃감지기 : 이산화탄소 소화설비 작동용
NFPA	☐ Air Sampling 감지기 : 보충 공기로 희석되기 전 클린룸 배기 흐름 내에 설치 ☐ 불꽃감지기 : 가스소화설비, 물분무 소화설비 작동용 자동식 소화설비 방출 시 화재경보설비 작동
FM	☐ 불꽃감지기 : 클린룸의 Plenum Area에 설치 ☐ Air Sampling 감지기, 아날로그 연기감지기 사용 고려

<표 8>은 소화기에 관한 기준으로 GAP 는 클린룸에 이산화탄소 소화기를 설치하도록 하고, FM 기준은 B, C급 화재위험에 승인된 소화기기를 사용하도록 기준화 되어 있다.

<표 8> 소화기에 관한 기준

기준	내용
GAP	☐ 이산화탄소 소화기 : 클린룸 내에 비치 ☐ 옥내소화전 : 옥내소화전 호스함은 클린룸 출구 바깥쪽에 설치
FM	☐ 이산화탄소 소화기 : B급, C급 화재위험에 승인된 소화기 사용, 제조지역 전체에 비치

3) 스프링클러 설비 설치 제외 관련 국내외 기준

국내 화재안전기준 중 자동식 소화설비인 스프링클러 헤드에 대한 상세기준은 「스프링클러설비의 화재안전기술기준(NFTC 103)」에 기술되어 있다. 스프링클러 설비가 화재를 감지하여 자동으로 작동 시 유효한 소화 성능을 발휘할 수 있도록 하는 스프링클러 헤드의 세부 설치장소에 관한 내용으로, 스프링클러 설비의 화재 안전 기술기준 2.12(헤드의 설치제외)에서 정하는 장소를 제외한 모든 부분의 방호를 위하여 스프링클러 헤드를 설치하도록 하고 있다.[36]

국내외 스프링클러 설비의 기준에는 현장 조건에 따라 스프링클러 설비의 설치를 완화할 수 있도록 각 기준을 제시하고 있다. NFPA 13(Standard for the Installation of Sprinkler Systems)에서는 해당 공간의 화재하중(Fuel load), 접근성(Access), 물리적 비적응성(Physically Impractical)을 고려하여 스프링클러 헤드의 설치를 면제할 수 있다. 이러한 공간은 주로 은폐공간(Concealed Space)에 해당하며 해당 공간의 구조 및 화재위험성을 평가한 결과를 바탕으로 관련 기준에 따라 관계기관과 협의하도록 하고 있다.

국내 「스프링클러 설비의 화재 안전 기술기준(NFPA 103)」의 2.12.1.5.2에서는 스프링클러 헤드를 설치하지 아니할 수 있는 장소가 명기되어 있다. 해당 조항은 스프링클러 헤드의 설치가 전혀 필요하지 않은 장소, 스프링클러 헤드를 설치하여도 효율성이 적은 장소 또는 스프링클러 헤드를 설치하였을 때 문제를 일으킬 수 있는 장소에 대해 상세히 기술하고 있다.[37]

NFPA 13 에서는 <표 9>와 같이 스프링클러 헤드 설치 제외 장소를 정하고 있다.[38]

<표 9> NFPA 13 스프링클러 설치 제외 장소 (1/4)

코드	내용
9.2.1.1	접근할 수 없는 공간의 최소한의 화재하중(가연물)이 있는 불연성 및 준 불연성 구조의 숨겨진 공간은 스프링클러 방호가 필요하지 않다.
9.2.1.1.1	플레넘의 리턴 공기로 사용되는 것과 같은 작은 개구부가 있는 경우에도 은폐된 공간으로 간주되어야 한다.
9.2.1.1.2	다음 기준을 모두 만족하는 소규모 개구부는 허용된다. (1) 개구부의 총 면적 합계는 은폐된 공간의 경계를 결정하는 천장, 건축 기능 또는 평면 면적의 20%를 넘지 않아야 한다. (2) 길이가 1.2 m(4 ft)보다 큰 간격은 폭이 200 mm(8 in.)를 넘지 않아야 한다.
9.2.1.2	불연성 및 준불연성의 구조로서 출입이 제한되며 가연성 물질의 취급 또는 보관을 허용하지 않는 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.2.1	플레넘의 리턴 공기로 사용되는 작은 개구부가 있는 공간은 은폐된 공간으로 간주되어야 한다.

<표 9> NFPA 13 스프링클러 설치 제외 장소 (2/4)

코드	내용
9.2.1.3	스터드 또는 장선의 내부 또는 가장자리 근처에 6 in.(150 mm) 미만의 스퍼드 또는 장선에 의해 형성된 은폐 된 공간은 스프링클러 보호 장치가 필요하지 않다.
9.2.1.4	지붕 또는 바닥 데크와 천장 사이에 6 in.(150mm) 미만의 철근 조이스트로 형성된 은폐 된 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.5	나무 장선 또는 유사한 단단한 구조로 직접 부착 된 천장 또는 6 in.(150 mm) 이내의 천장에 의해 형성된 은폐 된 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.6	나무장선 채널이 웨브와 동등한 성능의 재료를 이용하여 각각 160 ft ³ (4.53 m ³) 이하의 체적으로 방화 조치되어 있고, 천장이 금속 채널을 이용하여 부착된 경우에는 장선 채널 밑에 3 1/2 in. (90mm) 이상의 단열재가 설치되어 있을 경우, 합성목재장선구조의 아랫면에 직접 또는 두께 1 in. (25.4mm) 이하의 금속 채널에 부착된 천장으로 인하여 형성된 은폐공간에는 스프링클러헤드 방호가 필요하지 않다.
9.2.1.7	불연성 단열재로 채워진 은폐된 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.7.1	공간 상단에 최대 2 in.(50mm)의 공극은 허용되어야 한다.
9.2.1.8	천장에서 천장부터 바닥까지의 공간에 불연성 단열재가 있는 목재 조이스트 구조 내 은폐된 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.9	천장부터 바닥 가장자리까지의 공간을 채우는 불연성 단열재가 있는 복합 목재 조이스트 구조 내의 은폐 된 공간 또는 각 데크가 아닌 데크가 없는 160 ft ³ (4.5 m ³)의 접합 채널이 분리되어 있음)의 바닥 가장자리까지 웹 구조와 동일한 재료를 사용하여 복합 목재 장선의 전체 깊이까지 스프링클러 보호가 필요하지 않다.

<표 9> NFPA 13 스프링클러 설치 제외 장소 (3/4)

코드	내용
9.2.1.10	면적이 5.1 m ² (55 ft ²)를 초과하지 않는 격리된 작은 구획 위에 숨겨진 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.11	고정식 재료가 사용되는 은폐된 공간과 노출된 표면이 설치되어 있는 형태로 다음 중 하나를 준수하면 스프링클러 보호가 필요하지 않다. (1)표면재료의 확산 지수가 25개 이하이고, ASTM E84의 표면 특성 테스트방법에 따라 테스트했을 때 3.2 m(10.5 ft) 이상 전파되지 않는 것으로 입증 되었다. 건축 자재 또는 UL723,건축 자재의 표면 연소 특성 테스트를 위한 표준, 추가 20분 동안 연장 (2)표면재료는 ASTM E 2768의 요구사항, 건물재료의 확장된 기간 표면굽기 특성을 위한 표준테스트 방법(30 분 터널테스트)을 준수한다.
9.2.1.12	노출된 재료가 NFPA 703에서 정의한 난연성 처리 목재로 완전히 구성되는 은폐된 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.13	단열재의 표면 및 속면의 열 함량이 1,000 Btu/ft ² (11,400kJ/m ²) 를 초과하지 않는 가연성 단열재가 노출된 불연성 은폐된 공간은 스프링클러 보호가 필요하지 않다.
9.2.1.14	다른 방식의 스프링클러설비가 설치된 은폐공간의 경우, 천장 장선 내부 또는 직상부 단열재 아래의 장선 바닥에 직접 부착된 천장이 있는 은폐공간은 스프링클러 헤드 방호가 필요치 않다.
9.2.1.15	10 ft ² (0.9m ²) 미만의 수직 파이프 피트에는 스프링클러가 필요하지 않다.

<표 9> NFPA 13 스프링클러 설치 제외 장소 (4/4)

코드	내용
9.2.1.15.1	9.2.1.15에 따른 파이프 피트는 점화원을 포함하지 않아야 한다.
9.2.1.15.2	다층 건물에서 각 건물의 파이프 관통부는 바닥 건축과 동등한 자재를 사용하여 복원해야 한다.
9.2.1.16	스프링클러설비로 완전히 방호되는 옥외 캐노피를 지지하는 샛기둥 또는 목재장선으로 둘러싸인 면적이 10ft ² (0.93m ²) 미만인 옥외 기둥에는 스프링클러헤드 방호가 필요하지 않다.
9.2.1.17	목재장선, 합성 목재장선, 목재 바 장선, 목재트러스의 바닥으로부터 연결된 불연성 또는 난연성 이중천장으로 인해 형성된 은폐공간 내에 트러스 또는 장선 바닥면 사이의 모든 틈에 단열재가 충전되어 있고, 트러스 또는 장선에 시공된 단열재 상부에 스프링클러헤드가 설치된 경우에는 스프링클러헤드의 방호가 필요하지 않다.
9.2.1.17.1	천장덮개, 천장판, 단열재 지지대의 화재시 열방출량은 1000Btu/ft ² (11,400 kJ/m ²) 를 초과하지 않아야 한다.
9.2.1.18	최대 공칭 코드 폭이 2in.(50.8 m)인 목재장선과 합성목재장선의 바닥으로부터 연결된 불연성 또는 난연성 천장으로 인해 형성된 은폐공간에서, 장선사이의 공간이 불연성 배트 단열재로 채워져 있고 지붕 바닥 널과 배트 단열재의 최상부 사이의 공간이 최대 2in.(50.8m)인 상황에서는 각 장선의 하현 표면에 불연성 및 난연성 요구사항을 만족하는 표면재가 설치되고 제조자의 지침에 따라 고정된 경우, 스프링클러헤드를 설치할 필요는 없다.
9.2.1.18.1	각 조이스트의 하단 코드 표면을 덮고 제조업체의 권장 사항에 따라 제자리에 고정된 불연성 또는 제한 가연성 재료의 요구사항을 충족하는 부분은 스프링클러가 필요하지 않다.

나. 반도체 공장 화재특성 및 사례

1) FAB 구조 및 화재특성분석

일반적으로 반도체가 제조되는 건물을 라인(Line)이라고 하며, 라인의 구조는 [그림 1]과 같이 클린룸 구조의 FAB을 기준으로 상부층 Plenum 공간과 Clean Sub FAB(CSF) 및 Facility Sub FAB(FSF)의 하부층으로 구분되어 총 3층 구조이다. 생산공정은 주로 FAB의 클린룸에서 작업이 수행되며, 반도체 제품 특성상 미세한 오염에도 제품 결함을 유발하므로 매우 정교한 필터(FFU 등)를 통과한 공기가 천장의 Plenum 통해 바닥으로 순환된다. 또한 외부 오염물질 유입을 방지하기 위하여 클린룸 내부는 양압으로 유지된다. Sub FAB은 생산설비에 가스 및 화학 물질 등 공정에 필요한 물질을 공급하고 공정 진행 후 잔여 물질을 제거(배기)하는 부대설비 등이 설치된 공간으로 CSF(1st Plenum)와 FSF(2nd Plenum)로 구분할 수 있다.



[그림 1] 반도체 FAB 구조

반도체 생산공정은 Photolithography(PHOTO), Dry etching(ETCH), Cleaning(CLN), Metalization(METAL), Chemical vapor deposition (CVD), Diffusion(DIFF), Ion implantation (IMP), 및 Chemical mechanical

polishing(CMP)을 포함한다. 전체적인 생산공정은 400~500여 Step이 포함되며, 특정한 반도체 제품은 같은 생산과정에서 다양한 Step의 변경을 통해 생산될 수 있다.

생산라인 FAB의 상부층은 주로 지붕 트러스 구조 또는 데크 플레이트(Deck Plate) 형태이며, 건물 구조의 특성상 강재, 콘크리트 등 불연성 재질로 이루어져 있다. 대형 FAB 내부 구조는 연속적인 대형 설비가 설치되어 있어 공간을 효율적으로 사용할 수 있도록 장 스패ن 슬래브(Long Spanned Slab) 형성을 위한 강재 트러스(Truss) 또는 데크 플레이트(Deck Plate) 형태로 설계되고 있다.

FAB 상부는 공기가 유동하는 통로(Plenum)의 구조로서 항상 공기가 흐르고 있으며, FAB 내부의 환경조건(온습도, 기류, 차압 등)을 유지하기 위한 공기조화설비 및 공기정화설비(Fan Filter Unit, ULPA Filter 등)가 설치되어 있다. FAB의 규모는 매우 크기 때문에 국부적 공기공급은 난류를 형성하여 이로 인한 오염물질이 유입될 수 있으므로, FAB 내부에 전체적으로 일정한 공기가 원활하게 공급될 수 있도록 전반에 걸쳐 FFU(Fan Filter Unit)가 설치되어 있으며, 설비의 설치 및 변경이 용이할 수 있도록 반자 구조 형태로 구성되어 있다. 대부분의 공조·정화설비는 내구성 증진 및 형태 유지를 위하여 불연성의 외함을 가진 기계설비로 설치되어 있다.

FFU은 공기 정화를 위한 필터에 공기공급을 위한 모터 설비가 부착되어 유닛화된 설비이다. 클린룸 시설 등 내부 양압 조건이 필요한 특수장소는 일반적인 공조설비를 이용한 정압(Static Pressure) 유지가 어렵기 때문에 고효율 모터가 부착된 FFU를 설치하여 FAB 내부에 필요한 양압을 유지할 수 있다. 또한 공급되는 공기는 미세 정화 필터를 거친 청정한 공기로서 반도체 공장, 제약공장, 의료시설 등에 주로 사용되고 있다.

FFU는 TOP-DOWN 방식으로 FAB 내부에 공기를 공급하며, FAB 상부 반자에 설치된다. 각 유닛을 규격화된 설계에 반영해 반자와 일체화

한 신속한 공사가 가능하며, 유닛별로 시스템화 되어 설비의 유지관리가 용이한 장점이 있다. 또한 필요에 따라 케미칼 필터를 추가로 설치하여 FAB 내부에 공급되는 공기의 질을 조정할 수 있다.

반도체 제조공정은 [그림 2]와 같이 웨이퍼 제조, 회로설계, 마스크 제작, 웨이퍼 가공, 조립, 검사 단계로 이루어지고, 웨이퍼 제조는 모래로부터 실리콘 재료의 웨이퍼를 만드는 공정(반도체 원료 -단결정성장 - 규소봉 절단 - 웨이퍼 표면연마)이며, 회로설계는 웨이퍼에 전자회로를 설계하는 과정이다. 마스크 제작은 전자회로를 다층으로 나누어 설계된 전자회로를 유리판 위에 E-Beam설비로 그려서 회로 원판인 마스크(Mask)를 만드는 과정이다. 웨이퍼 가공은 이미 만든 디스크를 사용하여 웨이퍼 표면에 여러 종류의 막을 형성시킨 후 특정 부분을 선택적으로 깎아내는 작업을 반복함으로써 전자회로를 구현해나가는 과정(산화막 형성 - 포토레지스트 코팅 - 노광 - 현상 - 식각 - 이온주입 - 열처리 - 금속 배선 - 절연막 형성 - 광역 평탄화 - 세정 - 시험 및 선별) 이다. 조립은 웨이퍼 상의 칩을 낱개로 잘라서 완제품으로 조립하는 과정(웨이퍼 자동 선별 - 웨이퍼 절단 - 칩 부착 - 금속 연결 - 성형)이다. 최종적으로 조립된 제품에 대해 테스트하는 완성검사를 거쳐 합격된 제품에 한해 제품명과 회사명을 표시한 후 출하된다.



[그림 2] 반도체 제조공정

반도체 생산공정은 다른 공정에 비해 적은 양의 화학 물질을 사용하

지만, 생산공정에서 광범위하게 사용되는 특수 화학 물질이 화재 및 폭발의 원인이 되고 있다. 대부분 사용되고 있는 화학 물질 또는 가스는 NF₃, 실란 등으로 가연성, 자연 발화성, 부식성과 독성을 가진다. 이러한 위험물은 대부분 FAB 내부의 클린룸에 집중되어 있으며, 개방 구조의 클린룸 특성과 열과 연기에 취약한 반도체 장비의 특성상 작은 화재에도 피해 규모가 상당히 커질 수 있다.

FAB 내부의 제조공정 중 사용하는 ‘감광액, 현상액, 스트리퍼’ 등은 대부분 인화성 물질로서 제조공정 중 기계장치의 과열이나 취급 부주의, 누설 등으로 인한 작은 발화원 노출에도 쉽게 화재가 발생할 수 있다. 또한 반도체에서 광범위하게 사용되는 특수가스인 디실란, 실란 등의 가스는 자연 발화하는 특성이 있어 공기 중에 노출 시 위험하며, 이외에도 수소 등 많은 폭발위험 가스를 사용하고 있어 누출사고에 의한 위험이 있다.

반도체 제조공정은 먼지 등의 불순물을 최소화하는 청정실로 형성된 FAB에서 이루어진다. 고도의 청정상태를 유지하는 클린룸 내부는 FFU를 통해 공기 순환이 지속해서 이루어지고 있다. 반도체 장비와 웨이퍼(Wafer), 마스크(Mask) 등의 원부자재는 약간의 오염에도 심각한 손상을 입을 수 있다. 이러한 청정지역인 클린룸 내부에서 화재가 발생할 경우 즉시 화재를 진압하고 직접적인 피해를 최소화하더라도 화재로 발생된 연기 등은 클린룸 내부 공기 순환에 따라 움직이며 많은 장비와 웨이퍼 등에 치명적인 피해를 준다.

반도체 장비의 경우 적게는 수억 원에서 수백억 원을 호가하며 특히 노광장비의 경우 세트당 1,000억 원을 넘기도 한다. 공정 중 웨이퍼 및 마스크, 반도체 칩장비, 덕트, 실내 내장재의 재질 반도체 공정에서 사용하는 화학 물질과 가스 등은 화재 위험성 및 부식성이 매우 강하다. 장비와 배기 덕트 등을 난연성 재질 또는 불연성 금속으로 제작할 경우 부식하는 문제가 발생한다. 그래서 국내의 경우 FRP나 PVC 등의 플라스틱으로 제작하는 경우도 있다. 내부 건축자재의 경우도 공사 기간 단

축 및 제작의 편의성을 이유로 플라스틱을 사용하는 경우가 많다. 화재 시 이러한 가연물들이 화재를 더욱 확대할 위험이 있다.

따라서 <표 10>과 같이 각 공정별 제조 장비의 취급 위험물 특성 및 제조 장비의 환경조건(고온, 고압 등)을 고려하여 화재위험을 저감시킬 수 있다.

<표 10> 공정별 주요 화재위험분석 (1/2)

공정	화재위험분석
웨트벤치 (Wet Bench)	웨트벤치(Wet bench) 장비는 인화성 화학 물질로써 웨이퍼 세정을 위해 사용하고 있다. 종류에 따라 히터의 과열이나 히터가 내장되기도 하고 화학 물질의 누설, 온도 조절실패로 인해 화재위험이 있다. 또한, 부식성을 방지하기 위해 장비는 플라스틱 재질로 되어 있어 화재 발생시 연소를 촉진, 확대하는 요소로 작용하고, 장비 내부 화재 발생 시 클린룸 천장에 스프링클러가 동작하여도 장비 내부로 소화수 침투가 어려워 화재를 진압하기 어렵다. 웨트벤치 장비는 화재위험성이 높은 장비로서 다음과 같은 방지대책이 필요하다. 1) 장비의 난연 또는 불연화(인증제품 사용) 2) 장비 내부 별도의 소화시스템 설치 3) 히터과열방지 시스템 및 인터록 구축
스핀 린스 드라이어(SRD)	모터 회전체 등의 과열로 인한 화재위험 및 화학물질의 누출 등 위험성이 있지만, 스프린클러 드라이어에서의 화재 사고는 자주 발생하지 않는다.
파트 클린 (Part clean)	용기나 장비 등을 세척하는 장비이다. 화재 위험성이 매우 높아 다른 구역과 별도로 구획된 장소에서 운용하고 내부 환기시스템이 필요하다. 휴먼에러 등으로 화학물질이 바닥에 누출할 수 있으며 장비가 가연성 재질로 되어 있는 경우 연소확대 위험성이 높다.

<표 10> 공정별 주요 화재위험분석

(2/2)

공정	화재위험분석
포토 장비	반도체 기술의 핵심 공정이 되는 장비로서 노광기(露光機) 또는 스텝퍼(Stepper) 라고도 한다. 고가의 장비로써 렌즈가 내부에 설치되어 있어 연기와 진동에 약하며, 장비 자체는 화재발생 위험성이 적으나 주변의 화재 시에 열이나 연기 등에 쉽게 손상될 수 있다. 장비는 다른 구역과 구획하고 특히 화재 시 연기에 의한 오염방지 대책이 필요하다. 고가 장비로서 운용대수가 적고 부품 조달이 어렵고, 고장시 생산의 큰 차질이 발생한다.
화학물질 저장 및 분배	클린룸 내 화학물질은 캐니스터(Canister)라고 불리는 원통형 용기에 담은 후 이송 장치를 이용하여 사용 장비로 이송시킨다. 이러한 화학물질 저장 및 분배하는 장치의 이음부 등에서 화학물질이 누출될 우려가 있으며, 누출된 화학물질은 바닥까지 흐르고 클린룸 하부의 CSF 까지 흘러서 화재가 발생할 위험이 있다. 방지대책으로는 화학물질 누출에 대비한 방유탱의 설치 및 누유감지기의 설치가 필요하다.
이온 임플란터 (Ion Implanter)	이온 임플란터는 수만 킬로볼트(KV)의 전압을 발생시켜 웨이퍼 표면에 불순물 이온을 주입 시키는 장비이다. 위험성은 고압의 전기를 사용하는 장비로써 내부 변압기의 단락, 화재, 폭발위험이 잠재되어 있으며, 누전 등의 감전위험도 있다.
퍼니스 (爐, Furnace)	Wafer 표면에 불순물 제거를 위해 약 1300도 전기로를 사용하고, 산소와 수소의 결합 불꽃반응을 이용한 산화막 공정으로 과열로 인한 화재위험성이 있다.
드라이 에치 (Dry Etch)	공정에 따라 화학물질을 사용하지 않는 드라이 에치 장비가 사용되며 드라이 에치 장비는 화학물질을 사용 비중이 낮으므로 다른 장비에 비해 화재위험성이 낮다. 다만 전기 사용량이 많아 전기적 원인에 의한 화재 위험성이 있으며 장비 내부 케이블 등이 가연성 물질로 작용할 수 있다.

2) 클린룸 화재폭발 위험

클린룸은 반도체 현장뿐만 아니라 전자산업, 정밀산업, 식품제조, 의약품 제조산업, 광학기계, 실험실, 병원 등 다양하게 적용되고 있다. 클린룸은 고도의 청정기술과 다양한 제어 기술이 집약된 에너지 다소비 설비이다.

반도체 공장에서 생산되는 제품은 미세 입자의 오염될 경우 큰 결함을 유발할 수 있다. 따라서 FAB 내부는 클린룸 시스템을 적용하여 설치되어 있다. 그러나 클린룸의 특성상 집중된 장비 배치, 밀폐된 공간, 다중 구획으로 인한 피난 안전성 저하, 부식방지를 위한 가연재질의 제품, 클린룸 공간 구획용 건축 자재의 재질 등으로 인해 화재에 취약한 부분이 발생할 수 있고 대표적인 위험 특성이 있다.

다른 산업이 발전하는 속도에 비해 반도체 산업의 속도는 매우 빨라 장비의 종류와 화학물질 종류가 급속히 변화되기 때문에 모든 화학물질에 대한 물성 파악이 힘들다. 또한 고가의 장비들이 집중적으로 배치되어 있어 화재 시 피해손실이 크며, 기업 휴지로 인한 복구기간 등 간접손실 또한 매우 크다.

반도체 생산공정에 사용되는 장비들은 화학 물질을 다루고 있어 화재 시 매우 취약하고, 화재 연기나 소화수 등의 물에 의해서도 쉽게 손상될 수 있으므로 피해 범위가 더욱 확대될 우려가 있다. 공정 중에 사용되는 자연 발화성 가스 및 가연성액체, 독가스 등으로 인하여 화재 시 진압이 어려우며, 화학 물질 들 간의 반응으로 2차 재해를 가져오기 쉽다. 규모도 방대하며 제품, 원료, 기자재 등이 고가로 가액밀도가 높아서 오염이나 연기 등 사소한 환경적 요인에 의해서도 큰 피해를 입을 수 있다.

클린룸의 경우는 천장 속, 바닥부에 설치된 여러 덕트 종류는 가연성인 플라스틱 재질로 되어 있어 화재 발생 시 유독가스 및 연소 확대를

발생시켜 손실이 커진다. 또한 내부의 기류 속도가 빠르고 바닥으로 기류가 흘러 상부 화재감지기나 스프링클러 설비의 동작이 지연될 수 있고, 창문이 없고 장비가 많이 배치되어 있어 피난 및 화재진압에 어려움이 있다. 특히 실내에 가스, 전기, 화학 물질 등이 밀집해 있어 화재위험이 크다. 대피 훈련이 쉽지 않은 팩 구조와 피난이 어려운 밀실 구조 또한 화재 시 인명피해와 재산손실 위험을 증가시키는 요인이다.

3) 반도체 제조용 가스 및 주요 위험물

반도체 제조에 필요한 소재는 폴리실리콘 이외에도 고순도의 캐리어 가스(Carrier Gas), 소자 제조용 가스로 성막용 가스, 도핑용 가스 및 드라이 에칭(Dry Etching)용 재료 등과 리소그라피(Lithography)공정에서 사용하는 감광성 수지인 포토레지스트(Photoresist) 재료, 반도체 소자를 열, 충격, 습기 등으로부터 보호하는 외피재료 EMC(Epoxy Molding Compound)가 주로 반도체 성형 몰딩용 봉지재가 사용된다.

고순도의 수소, 질소, 산소, 아르곤, 헬륨 등이 반도체 제조용 가스의 농도 조절 및 환경 조절용 캐리어 가스로 사용되고 있다. 수소는 도핑용, 에피텍셀용 등 밸런스 가스로 모노실란, 디클로로실란의 희석가스로 사용되며, 산소는 플라스마 에칭, 반응성 스퍼터링, 산화, 질화용 밸런스 가스, CVD가스 등 각 제조공정의 열 산화 처리에 사용된다.

성막 및 도핑용 가스로는 Si 기판표면 에피텍셀 성장층 형성을 위해 포스핀(PH₃), 모노실란(SiH₄), 디클로로실란(SiH₂Cl₂), 트리클로로실란(SiHCl₃), 사염화실란(SiCl₄) 등이 사용된다. BPSG(Boron Phosphorus Silicon Glass)와 BSG(Boron Silicon Glass)막 형성을 위해서는 디보란(B₂H₆), 모노실란, 사염화실란, 테트라에톡시실란[(C₂H₅O)₄Si] 등이 사용된다. Si₃N₄ 막 형성에는 삼염화붕소(BCl₃), 암모니아(NH₃), 모노실란, 디클로로실란, 사염화실란 등이 사용된다. Si기판에 As(비소), P(인), B(붕소)의 도핑용 가스는 아르신(AsH₃), 포스핀, 옥시염화인(POCl₃), 삼

염화인(PI3), 삼염화붕소(BCl3), 디보란, 스티빈(SbH3) 등이 사용된다.

표면 에칭용 가스는 사염화실란, 염화수소(HCl), 삼불화질소(NF3), 육불화황(SF6), 사불화탄소(CF4) 등이 사용된다. 위와 같은 반도체 제조 공정에서 사용하는 공정가스는 특수고압가스와 일반가스로 분류할 수 있으며 특수고압가스는 고압가스 안전관리법 시행규칙 제2조(정의)28에 따른 가스로서 화재 위험성이 큰 가스이며, 특수고압가스 이외의 가스를 일반가스라고 할 수 있다. 반도체 공정에 주로 사용되는 화학물질은 <표 11>과 같다.

<표 11> 반도체 공정에 주로 사용되는 화학물질

용매의 명칭	분 류	용매의 명칭	분 류
아세톤	Class IB	부틸 아세테이트	Class IC
클로로벤젠	Class IB	현상액 (에틸렌글리콜)	Class IIIB
에틸 젯산염	Class IB	에틸렌글리콜 모노메틸 에테르	Class II
포름알데히드	Class IIIA	헥사메틸디실라잔 (HMDS)	Class IC
이소프로필알코올	Class IB	메틸알코올	Class IB
메틸 에틸 케톤	Class IB	메틸 이소부틸 케톤 (MIBK)	Class IB
N-메틸 피롤리돈	Class II	페놀	Class IIIA
감광성 수지	Class IB, IC	프로판올	Class IB
테트라에틸오르소 실리케이트	Class II	톨루엔	Class IB
1,1,1-트리클로로에 틸렌	Class IIIB	1,1,1-트리클로로에탄	Class IIIB
트리클로로벤젠	Class IIIB	크실렌	Class IC

4) 반도체 사고사례

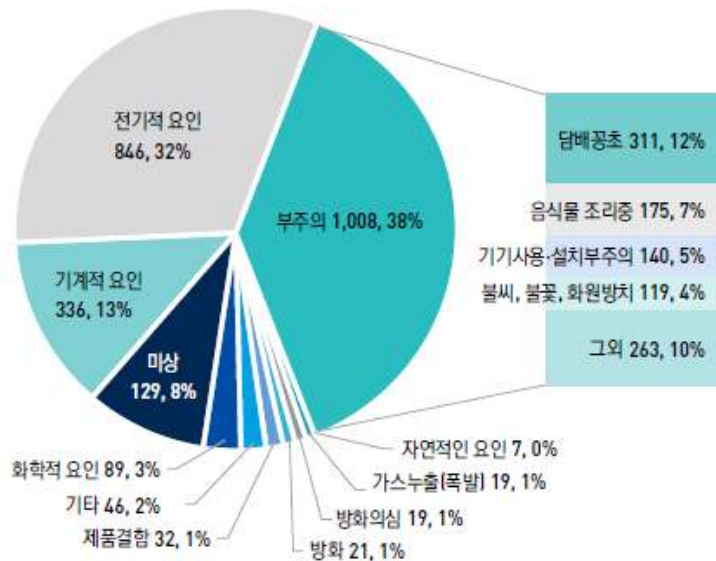
국가화재정보시스템을 통해 2020년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지 전국 공장시설 화재를 분석한 결과 <표 12>와 같이 총 9,129건의 화재가 발생하였으며 그로 인해 사망자 35명, 부상자 653명, 재산피해가 1,278,328,362천원에 이르는 등 막대한 피해가 발생하였다.

<표 12> 전국 공장시설 화재통계

구분		화재 건수	사 망	부 상	인명 피해계	부동산피해 (천원)	재산피해 (천원)
합계		9,129	35	653	688	429,074,090	1,278,929,719
공장 시설	소계	9,129	35	653	688	429,074,090	1,278,929,719
	광업	34	0	2	2	100,204	537,829
	그 밖의 공업	2,844	14	219	233	143,933,096	368,627,313
	금속기계 및 기구공업	2,807	4	144	148	61,987,730	194,523,979
	방직공업	593	0	25	25	19,352,875	59,508,264
	석유공업	56	5	11	16	5,610,083	21,132,386
	식료품공업	780	3	38	41	58,375,187	127,610,773
	요업 및 토석공업	76	0	2	2	968,014	2,294,370
	인쇄업	177	0	18	18	9,977,964	59,662,679
	전기 전자공업	448	2	38	40	11,506,932	46,484,335
	제재 및 목공업	571	1	23	24	23,410,820	58,071,678
	펄프 및 제지공업	167	0	9	9	16,037,941	46,313,651
	화학공업	576	6	124	130	77,813,244	294,162,462

출처: <https://www.nfds.go.kr>

이러한 특수건물 화재 발생 원인으로는 [그림 3]과 같이 부주의가 1,008건으로 가장 많은 부분을 차지하고 있고, 그 다음으로는 전기적 요인, 기계적 요인, 방화 순으로 집계되었다.



출처: <https://www.kfpa.or.kr/>

[그림 3] 특수건물 주요 화재 원인

반도체 공장의 화재 사고는 <표 13>과 같이 발생 건수와 손실액을 FMRC (Factory Mutual Research Corporation)의 1986년부터 1995년 사이 손실통계에서 보면 사고유형별로는 화재 23.9%, 케미컬 누출 18.1%, 전기사고 14.2%, 서비스 중단 9.2%, 도난 5.0%, 스프링클러 누수 4.6%, 폭발 4.2%의 순서이며, 손해액은 케미컬 누출 36.4%, 화재 20.1%, 서비스 중단 18.3%, 전기사고 7.0%의 순서를 나타내고 있다.

또한 손해 사고를 일으킨 공정을 설비(장비)별로 분석하면 Wet bench 73건, Furnace 22건, Stepper 및 Etcher 각각 12건 등 Wet bench와 Furnace가 고위험 공정임을 알 수 있다.

<표 13> 반도체 공장 화재 사고 현황

사고유형	손실사고 건수		손실액	
	건수(건)	비율(%)	금액(천)	비율(%)
화재	62	23.9	42,472	20.1
수손피해	47	18.1	76,841	36.4
서비스 중단	24	9.2	38,632	18.3
전기고장	37	14.2	14,678	7.0
복합사고	21	8.1	12,395	5.9
낙뢰	4	1.5	8,252	3.9
스프링클러 누수	12	4.6	7,033	3.3
폭발	11	4.2	2,183	1.0
태풍	10	3.9	2,051	1.0
지진	3	1.1	1,716	0.8
붕괴	2	0.8	1,571	0.7
범죄	13	5	1,534	0.7
폭동	1	0.4	1,079	0.5
그 밖의	13	5	852	0.4
Total	260	100.0	211,289	100.0

출처:FMRC 손실통계자료

1995년 일본 야마기타현 반도체 공장에 LSI공장 분석실에서 작업 종료 후에 남아있던 유기용제 MEK를 폐기할 때 인접한 폐기 용기를 사용하지 않고 용기형상도 비슷한 폐산용기에 부었다. 이 때문에 MEK(Methyl Ethyl Ketone)가 반응하여 폭발하여 6명이 부상을 입었다. MEK를 폐기할 때 실수로 폐산용기에 버려 혼 축 반응이 일어났다. 직접적 원인은 작업원의 실수였다. MEK와 초산이 접촉하면 MEK는 산화 반응이나 니트로화반응 등을 하는 것으로 이미 알려져 있다. 대책으로

산류 폐액용기에 깔때기가 설치되어 있는 드래프트 챔버를 밀폐식으로 개선하고 산류와 유기용제의 용기 형상을 달리하여 판결하기 쉽게 하였다.

1995년 10월 02일 일본 오사카대학 기초공학부 실험실에서 플라스마 CVD 장치에서 실험 중 모노실란 용기가 폭발하여 사망 2명, 부상 5명의 인명피해가 발생하였다. 학생들이 플라스마 CVD (화학 증산) 장치에서 실험 중 동 장치에 가스를 공급하는 모노실란 용기 내에서 폭발이 발생한 사고로서 역지변의 O-링 열화로 역류가 발생하고 모노 실란 가스와 아산화질소의 혼합가스가 폭발하였다. 이 폭발로 도시가스 및 유기염소계 용제에 인화되고 화재가 발생하였다.

사고원인을 살펴보면 모노실란 용기 내에서 폭발한 것은 모노실란 (SiH_4) 과 아산화질소(N_2O) 의 혼합가스이다. 역지변 CV3 내의 O-링이 아산화질소에 의해 열화해서 역시 기능이 불능이 되었기 때문에 아산화질소 역지변(CV3을 역류해서 각 가스공통의 퍼지 라인 (사용 최후에 질소 등의 불활성가스를 보내 배관 내의 유독가스 나 가연성 가스를 제거하는 배관)을 경유해서 모노실란 용기로 유입되었다. 폭발시의 압력은 $2,000 \sim 3,000 \text{ kgf/cm}^2$ 로 추정되고 용기의 열용단 안전변이 작동되기 전에 폭발하였다.

대책방안으로 아산화질소에 의한 O-링의 열화 방지를 위해 역지변 (CV3) 과 볼밸브 (BV3)의 위치를 변경하였다. 역지변이 가스용기의 가까이 있는 경우 아산화질소의 압력 (50기압) 이 질소압력 (수기압) 보다 높아서 O-링은 항상 아산화질소에 노출되고 열화를 조장한다. 금속 접점을 갖고 있고 열화의 우려가 없는 볼밸브를 가스용기에 접근시켜 배치하였다.

1996년 일본 도야마현 반도체 공장에서 반도체 제조 공정의 배기관을 개방 때 축적물의 폭발로 1명이 사망하는 사고가 있었다. 배기가스의 부생물인 고형분말이 배기관 내에 퇴적된 것을 제거·청소를 위하여 배기관 플랜지를 떼어낸 후 1~5분 후 배기 배관이 폭발하여 폭풍에 직결

된 작업원이 사망하였고, 제해(除害) 장치 밸브 폐지작업자와 2인 작업이었지만 연락 불충분으로 조작순서가 틀려 분진폭발이 유발된 것으로 추정하고 있다. 대책방안으로 부 생성물의 위험 유해성을 조사하고 퇴적물 청소 빈도는 월 1회 실시하며 청소 때 질소를 사전에 주입하여 폭발을 방지하고자 하였다.

2003년 12월 3일 프랑스 P사에서 Diffusion Furnace 공정에서 화재가 발생하여 건물이 전소되었으며 한화 약 7,200억의 손실액이 발생하였다. 1950년 건축된 Fab으로 5인치 wafer 가공 라인으로 확산공정(Diffusion Furnace:웨이를 약 1,300도의 챔버 또는 튜브에 넣고 초별한 후 이온주입을 넣고 반도체 공정 가스를 이용하여 증착, 산화막 공정)에서 화재 발생된 것으로 추정하고 있다. 대책방안으로 클린룸 내 스프링클러 및 공기흡입형 감지기를 설치하고 불연덕트 사용으로 인한 연소 확대 및 연기확산을 방지하고자 하였다.

5) 국내외 반도체 공장 소화설비 설치현황

디스플레이 패널 또는 반도체 관련 국내 주요 사업장 FAB의 소화설비 현황은 한국화재보험협회의 특수건물 안전 점검 결과 등 현장 확인 사항(2021년 기준)을 바탕으로 국내에 소재한 생산라인(FAB)을 갖춘 건물로 총 13개 사업장을 대상으로 조사하였다. 생산 라인에 설치된 소방시설의 종류로는 소화기, 자동화재탐지설비, 옥내소화전 설비, 스프링클러 설비 등이 설치되어 있었으며, 일부 특정 구역에 이산화탄소소화설비, 할론소화설비, 불활성 및 할로젠화합물 소화약제 소화설비 등 가스계소화설비가 설치된 것으로 조사되었다.

수계소화설비의 경우 조사 대상 사업장(13개) 중 전체 사업장(13개) 클린룸에 습식 스프링클러 설비가 설치되어 있었으며, 스프링클러 헤드는 폐쇄형 헤드가 설치되어 있는 것으로 조사되었다. FAB 상부실은 아래 표에 나타난 바와 같이 조사 대상 13개 사업장 중 8개의 사업장에

스프링클러 헤드가 설치되어 있지 않았으며, 5개의 사업장에는 설치된 것으로 조사되었다. 단, 최근에 지은 FAB 건물일수록 성능위주설계(PBD) 등을 도입하여 FAB 상부에 스프링클러 설비를 설치하지 않는 경향이 나타났다(○○디스플레이, ○○전자 등). FAB 상부실의 스프링클러 헤드를 설치하지 않은 주요 이유는 다음과 같이 조사되었다.

첫 번째는 스프링클러 헤드의 오동작 시 고가 제조설비에 대한 직·간접적인 수손 피해뿐만 아니라 이로 인한 기업 휴지(Business interruption) 등 간접피해를 우려하여 헤드를 설치하지 않은 것으로 조사되었다. 스프링클러 배관 연결부로부터의 누수, 스프링클러 헤드의 자체 결함 또는 작업자 등에 의한 물리적인 충격에 의하여 오동작 발생 시 수손에 의한 피해 가능성 또한 배제할 수 없기 때문이다.

두 번째는 FAB 상부실에 분포된 가연물의 연소성이 매우 낮으며 스프링클러 헤드가 작동하여도 가연물의 특성상 소화 효과가 매우 낮다는 점이다. 즉 FAB 상부실에 설치된 케이블은 불연성 및 난연성의 케이블이 설치되어 있으며 FFU의 외함 재질이 불연성 금속 재질이다. FFU 내부의 전원선이나 회로기관 등 일부 구성부품이 발화되어도 스프링클러 헤드로부터 소화수가 FFU 함 내부로 침투되기 어려워 소화 효과가 떨어진다는 점이다. 아래의 <표 14>는 국내 주요 사업장 FAB 및 FAB 상부실의 스프링클러 설비 설치현황을 나타낸 표이다. 주요 사업장의 경우 FAB 상부실에 대한 화재 위험성 평가를 수행하고, 생산설비에 대한 특수성을 고려하여 소화설비를 선택적으로 설치하고 있다.

<표 14> 국내 주요 FAB 스프링클러 설비 설치현황

연 번	사업장명	스프링클러설비 (SP) 설치 여부		비고
		클린룸 (FAB)	FAB 상부	
1	○○디스플레이(주)천안캠퍼스	0	0	
2	○○디스플레이(주) 아산1캠퍼스(LCD)	0	×	
3	○○디스플레이(주) 아산2캠퍼스(LCD)	0	×	
4	○○하이닉스(주)청주1캠퍼스	0	×	FAB 상부 CCTV 설치
5	○○하이닉스(주)청주2캠퍼스	0	0	
6	○○하이닉스(주)청주3캠퍼스	0	0	
7	○○하이닉스(주)청주4캠퍼스	0	0	
8	(주)○○디스플레이과주공장	0	×	
9	○○전자(주)화성캠퍼스	0	×	
10	○○전자(주)기흥캠퍼스	0	×	
11	○○전자(주)평택캠퍼스	0	×	
12	○○하이닉스(주)이천공장	0	0	
13	○○칩반도체(유), 청주공장	0	×	클린룸에 자진설비로 미분무소화설비 설치

2. 자동화재탐지설비 및 NFPA921 과학적 방법론

가. 자동화재탐지설비

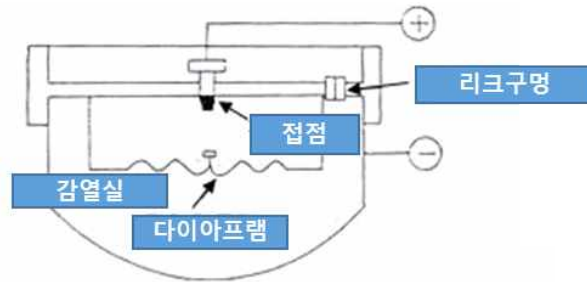
최근 건축물의 대형화, 고층화 및 실내외 건축자재의 고급화 추세로 인해 화재 발생 요인이 증가하고, 화재 발생 시 인명 및 재산 피해가 막대하며, 화재 진압도 어려워지는 추세이다. 화재가 발생하였을 때 가장 중요한 것은 조기에 화재를 인지하고 대처하는 것이다. 이에 따라 관련 법령에서는 건축물의 규모, 구조, 용도, 수용인원 등에 따라 소방설비의 설치를 의무화하고 기준화하고 있다. 이러한 설비 중 화재 시 발생하는 연기, 열, 불꽃 등을 자동으로 감지하여 경종, 비상 방송 등의 경보를 발보 하는 것이 자동화재탐지설비이다.

자동화재탐지설비는 수신기, 중계기, 감지기, 발신기, 경종, 시각 경보기 등으로 구성되어 있다. 화재감지기는 연기, 열, 불꽃 등이 설정된 기준값에 도달하면 자동으로 감지하고 신호를 수신기로 전달하고 수신기는 감지기 동작 장소에 경보를 발보하여 초기 대응 및 피난 대피가 쉽게 한다.

나. 화재감지기 동작 원리

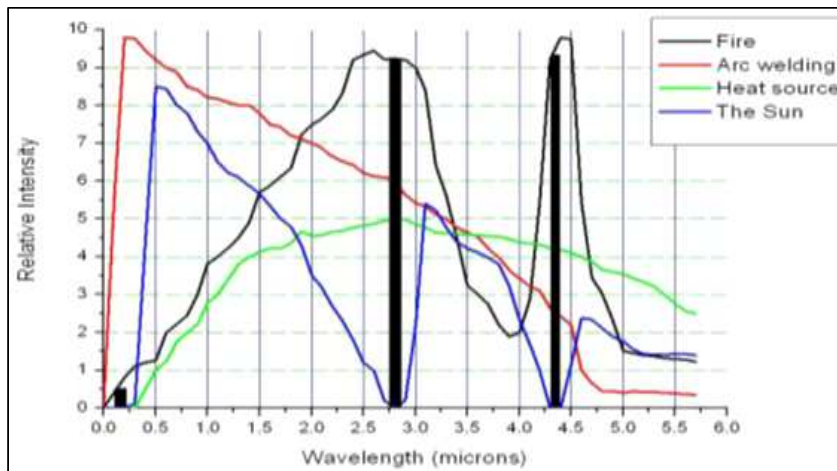
화재감지기 중 차동식스포츠형 감지기는 열 감지기이다. 화재 발생 시 발생하는 화염에 의해 주변의 온도가 변화하는 것을 감지하는 설비로 감지소자에 따라 열전대식, 공기식, 열반도체식으로 구분된다.

공기식 차동식스포츠형감지기는 [그림 4]와 같이 화염에 의해 온도가 일정 이상 올라가면 감지기 감열실의 공기가 팽창하여 다이어프램이 위로 밀려 올라가며 점점이 붙어 화재 신호를 발하는 방식이다. 일상적인 온도 변화에 의한 공기 팽창은 리크구멍을 통해 외부로 배출되어 점점이 붙지 않는다.



[그림 4] 공기식 차동식스포트형감지기

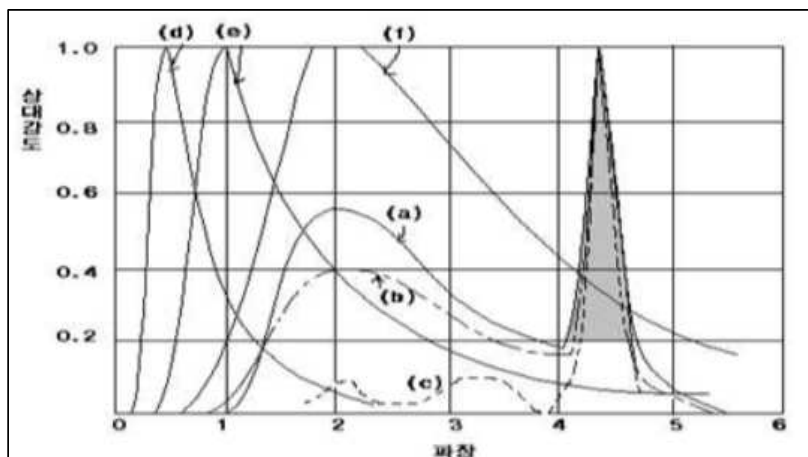
불꽃감지기는 연소 시 발생하는 화염의 자외선, 적외선을 감지한다. 화염으로부터 방사되는 적외선에는 현저한 특징이 있는데, 그중 하나가 “CO₂ 공명방사”라는 현상이다. 물질이 연소하면 다량의 CO₂가 발생하게 된다. 공명방사란 여기상태의 CO₂가 방출한 에너지를 기저상태에 있는 다른 CO₂가 받아들여 여기상태가 되고, 차례차례로 CO₂끼리 에너지를 주고받는 공명을 일으키는 현상을 말한다. [그림 5] 에서의 막대그래프는 화재 발생 시 초기와 2.5~2.7[μm] 4.3~4.4[μm] 파장 대역의 방사에너지의 상대 강도를 나타내며, 이때 방사하는 적외선 중 4.3~4.4[μm] 가 가장 강한 고유 파장을 가지고 있음을 나타낸다.[40]



출처:조명·전기설비학회논문지 24(12), 2010.12, 201-207

[그림 5] 열원별 스펙트럼 분포비교

[그림 6]은 연소물질이나 온도에 따른 분광분포특성을 나타낸 것으로, (a)와 (b)는 오렌지색의 불꽃을 내는 촛불과 가솔린의 연소, (c)는 청백색불꽃의 완전연소에 가까운 도시가스의 분광분포로 이들 불꽃 모두 $4.3[\mu\text{m}]$ 부근에서 최대분광 에너지를 방사하고 있으나, 이것은 CO_2 에 의한 공명방사 에너지로 다른 고온 물체에서는 볼 수 없는 특징이다. (d)는 $6,000[^\circ\text{K}]$ 의 태양광, (e)는 $2,850[^\circ\text{K}]$ 의 백열전구, (f)는 $1,400[^\circ\text{K}]$ 의 고온 물체, 불꽃은 넓은 스펙트럼대로 에너지를 방사시키고 가시광선 외에 불꽃을 육안으로 볼 수 없는 파장대에서 자외선과 적외선을 방사시킨다. 적외선 불꽃감지기는 $4.35 \sim 4.4[\mu\text{m}] \pm 0.2[\mu\text{m}]$ 의 파장을 갖는 에너지 방사에 반응하는 감지기로서 이 파장대는 연소 시 발생하는 탄화가스 분자의 파장을 검출하는 것이다.[41]



출처:조명·전기설비학회논문지 24(12), 2010.12, 201-207

[그림 6] 분광분포 특성

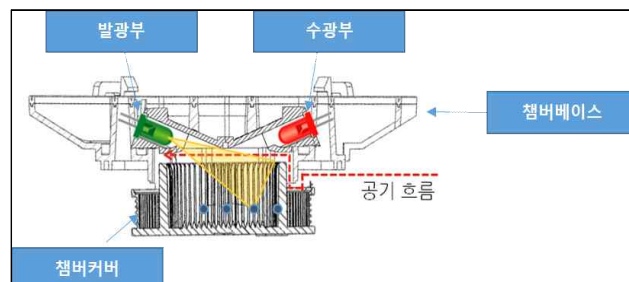
정온식감지선형감지기는 [그림 7]과 같이 감지부는 내열 성능이 아주 작고 전기적 절연체인 Ethyle Cellulose로 강철선에 대하여 그 외부를 피복한 다음, 두 가닥의 절연된 강철선을 새끼처럼 꼰 것을 다시

Protective Tape로 감은 후 난연성 재질로 피복한 것이다. 화재 발생 시 감지부는 열 또는 화염으로 인해 Ethyle Cellulose가 녹고, 트위스팅 시킨 강철선에 선간 단락이 일어나며, 두 도선 간에 전류가 흐르는데 두 도선 간에 절연이 파괴되면서 동작하므로 녹은 부분만큼은 재사용이 불가능하다.[42]



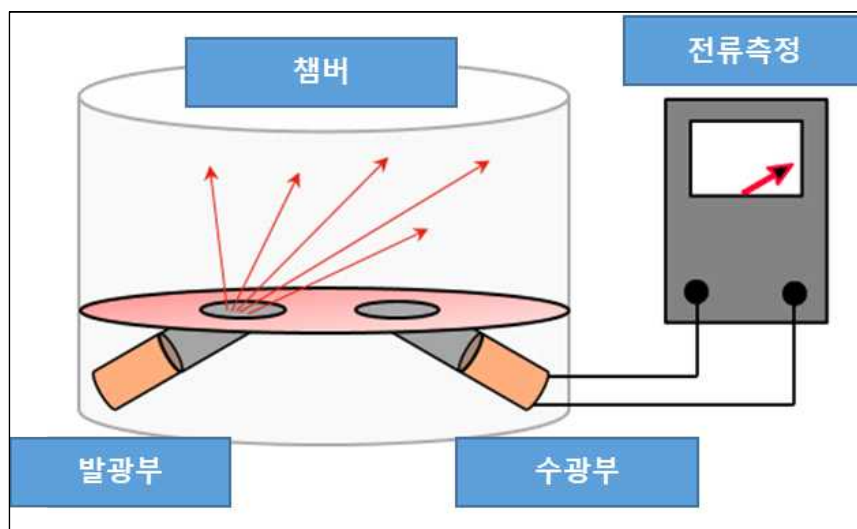
[그림 7] 정온식 감지선형 감지기 구조

연기감지기는 이온화식과 광전식으로 구분되며 이온화식 감지기는 현재 방사능물질 이슈로 인해 단종된 상태이다. 광전식 감지기의 주요 구조는 [그림 8]과 같이 외부에서 유입되는 빛을 차단하고, 벌레, 먼지의 유입을 차단, 내부의 빛 산란을 최소화하는 챔버 덮개와, 공기의 와류 발생으로 먼지 인입을 최소화하고 무거운 먼지는 아래로 떨어트리고 기관에 오염물질 인입을 방지하는 챔버 베이스로 구성되어 있다. 또한 연기 입자의 산란을 측정하는 발광부와 수광부가 설치되어 있다.

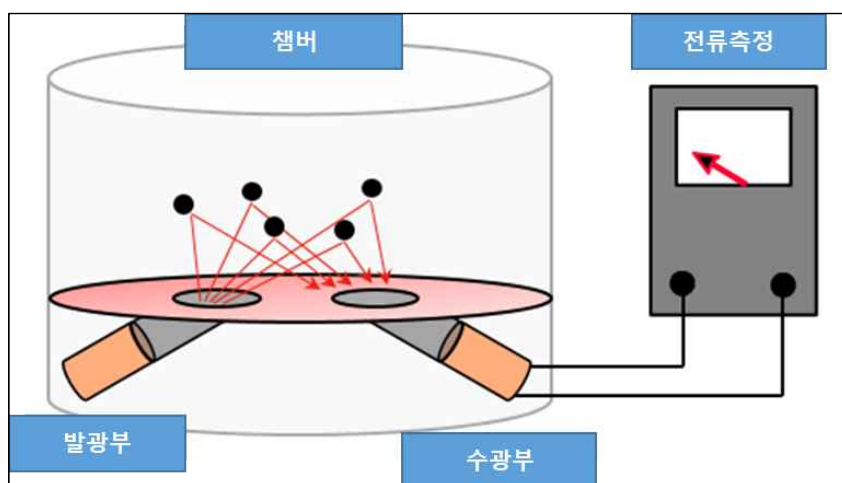


[그림 8] 광전식 감지기 구조

정상상태일 때는 [그림 9(a)]와 같이 발광부의 빛이 수광부로 들어갈 수 없으나, 연기 또는 먼지 등에 의해 빛이 산란할 경우에는 [그림 9(b)]와 같이 발광 부의 빛이 수광부로 들어가며 경보를 발보한다.



(a) 정상상태



(b) 경보 상태

[그림 9] 광전식 감지기

다. 화재감지기 비화재보

화재감지기는 화재 시 발생하는 물리적 현상 또는 연소생성 시 발생하는 연기 등을 사전에 인지하여 정해진 오염도 기준이상이 되면 신호를 전달하도록 구성되어 있으나, 실제 화재가 아닌데도 감지기 동작 조건을 환경적으로 갖추게 되면 감지기는 화재로 인식하여 신호를 전달하여 경보가 발보되는 것을 비화재보라 한다.[43]

화재가 아닌 경우에는 기계적 요인, 환경적 요인, 공사 현장에서 발생하는 용접 흠, 용접 아크 불빛, 청소먼지, 작업등 불빛, 컴파운드의 물기 등이 환경적 조건에 해당하며, 해당 환경적 조건에 아날로그 감지기 및 UV/IR 불꽃감지기가 작동하게 되고, 통신 신호를 통해 수신기는 전달하고 경종 및 비상 방송을 발보하는 것이 비화재보가 발생하는 기인물의 대표적인 예로 볼 수 있다. 즉, 감지기로써 연기 또는 불빛을 인지하는 기능은 이상이 없지만, 작업이나 청소 등으로 발생 환경적 요인들에 의하여 감지기가 실제 화재로 인지하고 신호를 검출하여 경보 설비를 현장에 발보하는 것을 말하며, 비화재보로 인하여 건물 대피가 이루어지고 자체소방대 및 관할 소방서 등의 출동이 이루어지는 상황을 말한다.

라. NFPA 921 과학적 방법론

NFPA 921은 미국방화협회에서 제정한 화재 조사 표준으로 과학적 방법론을 바탕으로 화재조사를 수행하는 데 필요한 지침을 제공한다.

화재조사의 과학적 방법은 <표 15>와 같이 필요성 인식, 문제의 정의, 자료수집, 자료 분석, 가설의 수립, 가설의 검증, 최종가설 선택으로 총 7단계로 구성되어 있으며 최종가설을 검증하지 못한 경우 이전 단계를 다시 수행하는 등 과학적이면서 합리적인 조사를 통해 원인을 도출하는 것이 특징이다.

<표 15> 화재조사 과학적 방법론

구 분	정 의
필요성 인식 (Recognize the need)	해결해야 할 문제가 존재한다는 것을 확인하는 것
문제 정의 (Define the problem)	문제를 어떤 방식으로 해결할 수 있는지 결정하는 것
데이터 수집 (Collect data)	실질적인 측정, 관찰 또는 직접적인 감각 경험에 근거하여 사실적인 자료들을 모으는 것
데이터 분석 (Analyze the data)	교육훈련, 경험 및 전문지식을 토대로 추정이 아닌 과학적 원리에 기초하여 수집된 전체 데이터의 연관성과 의미를 평가하는 것
가설 수립 (Develop hypotheses)	데이터 분석에 기초하여 현장에서 수집된 물리적 증거, 목격자의 증언 등이 화재현장을 설명하는데 모순이 없는 잠정적인 결론을 내리는 것
가설 검증 (Test the hypotheses)	연역적 추론에 입각하여 잠정적으로 수립된 가설의 증거물을 물리적으로 실험하거나 과학적 이론을 적용하여 인지적 또는 분석적으로 평가하는 것
최종 가설 선택 (Select final hypotheses)	가설 검증을 통해 다른 가설이 배제되고 사실과 부합하며 신뢰할 수 있는 하나의 가설로 귀결될 때 공식적인 결론이나 의견으로 채택하는 것

필요성 인식은 연소상황을 파악하고 원인조사의 필요성을 인식하는 단계로써 연소의 진행이 시시각각으로 변화하므로 빠른 판단과 객관적인 조사를 진행하기 위해 연소사항을 사진 촬영하고 녹화하여야 한다. 문제의 정의는 연기와 화염의 상황, 연소의 범위, 진행 방향, 확대 속도 등의 특이사항을 확인하고 해결하는 방법을 결정하는 단계로 화재 현장의 모든 면에서 연소상황을 관리하고 기록한다. 자료수집이란 출동 시 멀리서 보이는 연기 색깔, 화염의 높이 및 크기, 소방대 도착 전 관계자들이 촬영한 사진이나 영상 확보, 화재 방향과 발화에 중요한 역할을 할 수 있는 창문, 지붕, 벽 구조물 등을 촬영하고 기록하는 단계로 과학

적이고 객관적인 기준에 의해 신뢰성이 확보되어야 한다.

자료 분석은 최종가설을 위한 필수적 단계로 귀납적 추론 방법을 이용한 자료수집과 분석이 이루어져야 하며, 분석된 정보를 보증할 수 있어야 한다. 분석의 기법에는 진술 분석기법, 행동 분석기법, 현장 분석기법 등 다양한 기법들이 활용되고 있다.

가설수립은 자료 분석을 기본으로 하여 현장에서 조사된 건물 내외부 피해 범위, 목격자 진술 등을 통해 최초 발화지점, 화재 원인을 증명하는데 모순이 없는 가설을 수립하는 단계를 말한다. 여러 개의 가설이 수립될 수 있지만 수집된 자료를 토대로 가설을 입증할 수 없다면 다음 단계로 넘어갈 수 없다. 가설검증은 수립된 가설을 과학적 방법, 실험 등을 통해 검증하는 단계로, 알려진 사실 또는 일반적인 전제로부터 찾아낼 수 있는 구체적인 결과를 연역적 추론을 통해 확인한다.

최종가설 선택은 화재조사 과학적 방법론의 최종단계로써 이전 단계들이 과학적이고 구체적인 방법으로 수행된 후에 진행된다. 다른 가설들이 객관적인 방법과 신뢰성 있는 검증을 통해 배제되고 최종 선택된 가설은 공식적인 의견으로 지지되어야 한다.

국내외 사례를 살펴보면, NFPA 921을 기반으로 화재조사를 수행하는 경우가 많다. 국내에서는 소방청이 NFPA 921을 참고하여 화재조사 표준을 제정하고, 이를 바탕으로 화재조사를 수행하고 있고, 해외에서는 미국, 캐나다, 유럽 등에서 NFPA 921을 기반으로 화재조사를 수행하고 있으며, 이를 통해 화재 예방과 안전 대책을 수립하고 있다.

또한 NFPA 921에서는 화재감지기 비가동 조사 방법에 대해 4단계로 나누고 있다 1단계는 현장 조사로 화재감지기가 설치된 현장을 조사하여 화재감지기의 위치, 종류, 상태 등을 파악하고, 정상적으로 작동하는지를 확인하도록 되어있다. 2단계는 데이터 분석 단계로 수집한 데이터를 분석하여, 화재감지기의 작동 이력을 분석하고, 화재 발생 시 화재감지기가 작동하지 않은 이유를 파악한다. 3단계 조치 계획 수립 단계에서는 파악한 문제점을 바탕으로 조치 계획을 수립하여, 수리 또는 교체

여부를 결정하고, 작동 환경을 개선하기 위한 방안을 모색하도록 하고 있다. 마지막 4단계는 모니터링 단계로 조치 계획을 실행하고, 화재감지기의 작동 여부를 지속해서 모니터링하여 주기적으로 확인하고, 비상 대응 체계를 구축하도록 하고 있다.

국내에서는 2023년부터 시작된 사업으로 소방청이 주관하는 ‘화재감지기 비화재보(오동작) 저감을 위한 현장 조사 및 대책방안 연구’가 진행되고 있으며, 소방청은 매년 화재감지기가 설치된 건물 중에서 일정 규모 이상의 건물을 대상으로 선정하고 대상 건물에 대해 현장 조사를 실시하고 있다.

3. 스프링클러 설비

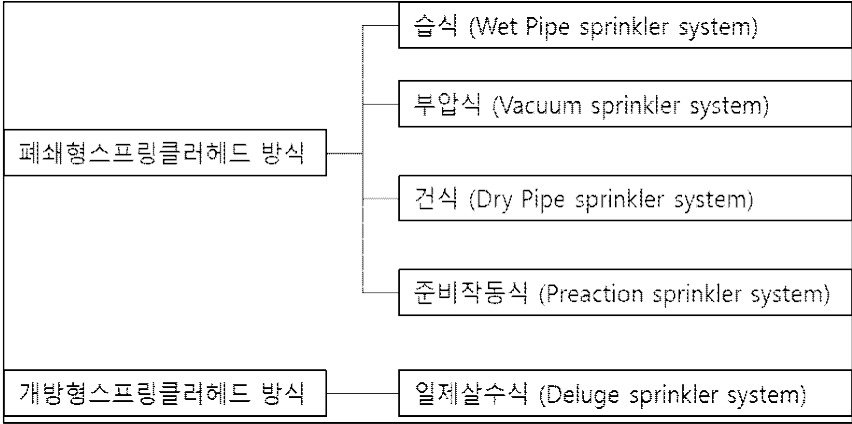
가. 스프링클러 설비의 개요 및 종류

스프링클러 설비는 건축물 화재 시 인명과 재산을 보호하고 물을 소화약제로 사용하여 화재 제어 및 확산을 방지한다. 화재감지기와 연동하거나 헤드 자체 감열체 파손, 2차 배관 공기누설 등의 여부에 의해 자동으로 밸브가 동작하는 자동식 소화설비이며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 소화설비로써 초기화재진압을 목적으로 한다. 스프링클러 설비는 가압송수 장치, 유수검지장치, 소화수조(용수), 헤드, 배관, 기동용 수압 개폐장치 등으로 구성되어 있으며 형식승인 및 성능시험에 합격한 제품을 사용하도록 하고 있다.

최초의 자동식 스프링클러 설비는 1723년 Ambrose Godfrey이라는 영국의 화학자에 의해 발명되었다. 최초 스프링클러는 물통과 도화선으로 구성되어 화재 발생 시 발생하는 화염이 도화선에 점화되면 폭약이 폭발하고 그로 인해 물통이 파손되고 물이 쏟아지는 형태의 설비였으며 스프링클러 설비의 기초가 되었다. 그 이후 1850년경 영국에서 현재 사용하는 스프링클러 설비를 개발하였으며, 미국에서부터 오늘날의 우리가 사용하는 자동식 소화설비 방식의 스프링클러 설비를 대규모로 공업화하여 보급함으로써 전 세계적으로 소방 안전이 발전하게 되었다.

스프링클러 설비는 물을 소화약제로 사용하기 때문에 소화약제 비용의 값이 싸고 화재의 확산방지, 열기의 차단 효과를 통해 초기 소화능력이 우수하고 조작이 간편한 장점이 있는 반면, 대량의 펌프와 물 저장시설이 필요하는 등 초기 시공비용이 비싸고 설비의 설계가 복잡하다. 또한 가연성액체의 화재나 금속성 위험물의 화재에는 적응성이 떨어지고 다량의 물 사용에 화재진압 후 수손피해가 발생하는 등의 단점도 있다.

스프링클러 설비는 [그림 10]과 같이 설비 특성에 따라 구분되며, 습식 스프링클러 설비, 준비 작동식 스프링클러 설비, 건식 스프링클러 설비, 일제살수식 스프링클러 설비로 구분된다.

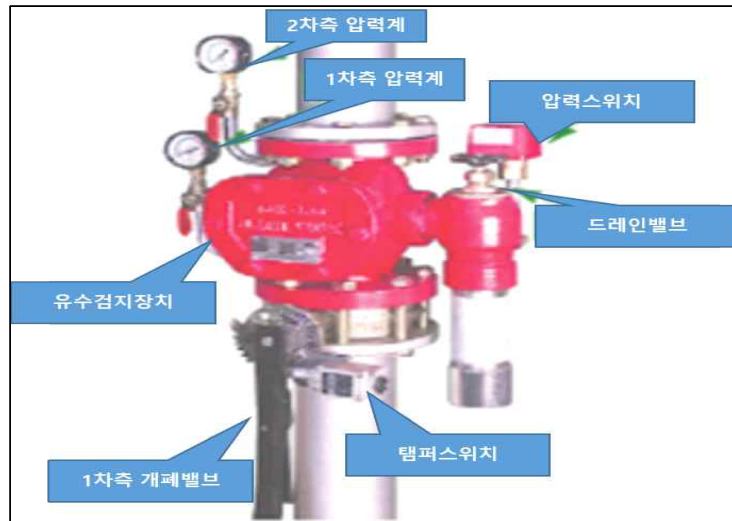


[그림 10] 스프링클러설비 종류

나. 스프링클러설비 동작 원리

습식 스프링클러설비는 [그림 11]과 같이 1차측 가압수 2차측 가압수로 세팅되어 있으며, 화재 발생 시 스프링클러 헤드가 파손되어 소화수가 방수되면 2차측 배관 내 압력이 저하되어 유수검지장치 내 클래퍼가 개방되고 1차 측의 유수가 2차측 배관으로 흐름이 발생된다.

2차측으로 흐르는 유수의 일부는 압력스위치의 리타팅챔버측으로 흘러 들어가고 압력스위치를 동작시킨다. 압력스위치가 동작하면 화재 수신기는 화재로 인식되어 경종, 지구 경종, 비상 방송, 시각 경보기가 출력된다. 또한 소화수 방출로 인한 압력 저하로 인해 소방 펌프도 기동하게 된다. 신속한 화재진압이 장점인 반면 동파 우려 지역에는 설치가 불가한 단점이 있다.

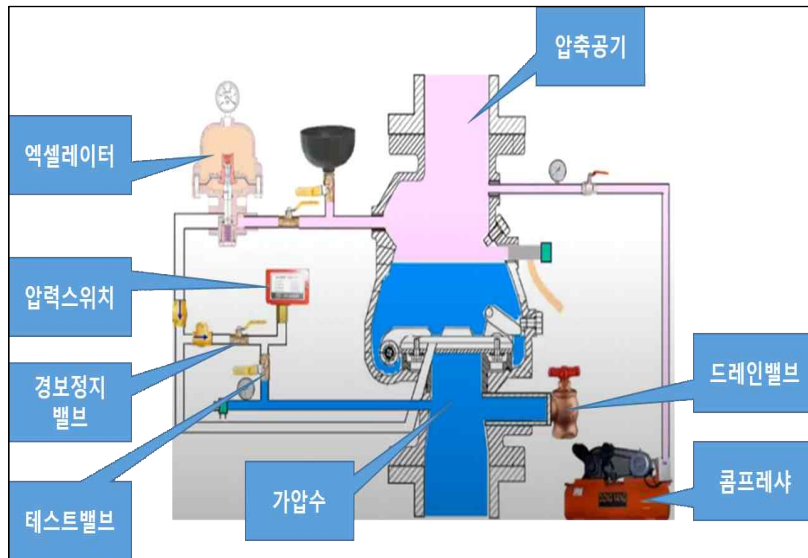


[그림 11] 습식 스프링클러설비

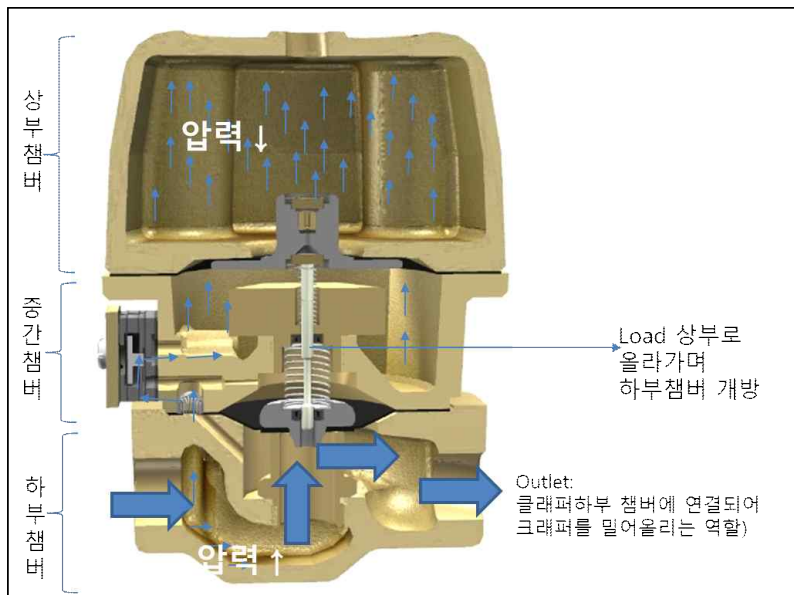
건식 스프링클러설비는 [그림 12]와 같이 1차측 가압수 2차측 공기압이 균형을 유지하고 있다가, 화재 발생 시 헤드 개방으로 2차측 공기압이 누설되면 1차 측과 2차측의 균형 압력이 깨지면서 클래퍼가 개방되고, 1차측의 가압수가 2차측으로 유수 되며 소화수가 방출된다.

건식 스프링클러설비는 2차측의 압축공기가 모두 방출되어야 2차측의 물이 헤드를 통해 방사된다. 이러한 이유로 인해 습식 스프링클러설비보다는 소화수 방출시간이 늦다. 하지만 건식밸브의 클래퍼 주변의 1, 2차측의 압력 균형을 빠르게 파괴하여 클래퍼가 신속하게 열리고 유수가 될 수 있도록 액셀레이터 또는 익저스트가 설치되어 있다.

액셀레이터는 [그림 13]과 같이 2차측 공기압력이 액셀레이터 내부로 들어갈 때 하부 챔버에서 중간챔버로 갈 때는 Screen Filter를 통해 아주 미세하게 압력이 전달되고, 중간챔버에 수분이 침투하지 못하도록 미로처럼 설계된 장치인 anti-flood assembly를 통해 중간챔버, 상부챔버로 공기압력이 채워지며, actuator load를 하부로 밀어 세팅을 유지하고 있다가 2차측의 압력이 빠지게 되면 Load가 상부로 올라가게 되고 2차측의 압력이 클래퍼 하부로 연결된 outlet 부분으로 방출되며 클래퍼를 밀어 올리는 역할을 한다.



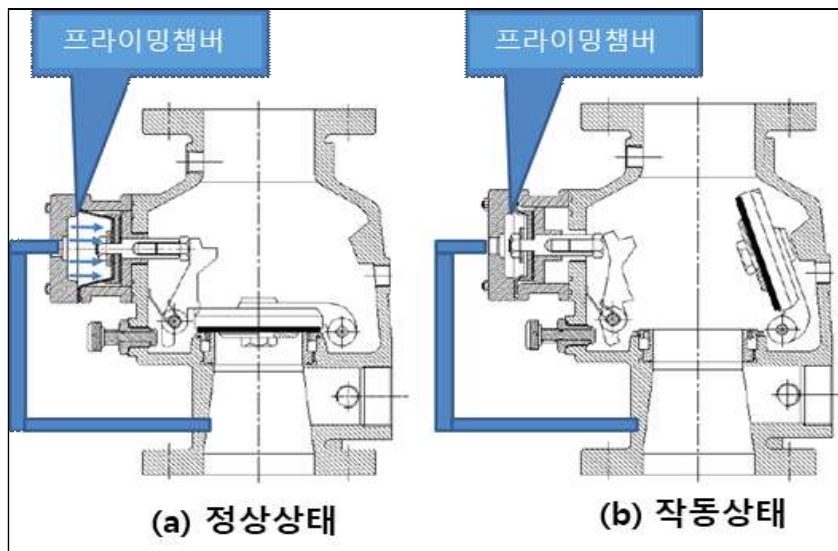
[그림 12] 건식스프링클러설비



[그림 13] 엑셀레이터 동작 원리

준비 작동식 스프링클러 설비는 [그림 14]와 같이 1차측 가압수 2차측 대기압으로 구성되어 있으며, 1차측의 가압수가 Priming chamber 내 가압되어 다이어프램을 밀어 1차측 가압수가 2차측으로 유수 되지 못하도록 세팅되어 있다. 화재 발생 시 현장에 화재감지기 2개가 AND조건으로 동작을 하였을 때, 솔레노이드 밸브가 개방되며 Priming chamber 내 셋팅수를 배출하고 다이어프램이 뒤로 밀리면서 1차측의 가압수가 2차측으로 유수되는 원리이다. 수동기동조작함(슈퍼비조리판넬)에 수동기동버튼을 눌러도 솔레노이드 밸브가 동작하며 2차측으로 가압수가 유수될 수 있다.

화재감지기가 2개 동시 동작을 해야 밸브가 작동하는 만큼 알람 밸브보다 동작시간이 늦을 수 있는 반면 오동작으로 인한 오방출을 예방할 수 있는 장점이 있다.



[그림 14] 준비 작동식 스프링클러 설비 동작 원리

일제 살수식 스프링클러 설비는 개방형 스프링클러 헤드를 설치하게 되는데 유수검지장치는 준비 작동식 스프링클러 설비와 동작 원리가 유사하다. 흔히 밸브 자체를 일제 개방과 준비 작동식이 다른 것처럼 구분되나 사실상 같은 밸브로 봐도 무방하다. 준비 작동식은 2차측 공기 또는 질소로 가압하고 일제개방밸브는 개방형 헤드를 사용하기 때문에 가압이 무의미하여 <표 16>과 같이 스프링클러 설비의 동작 원리를 비교하였다.

<표 16> 스프링클러 설비 동작 원리 비교

구분	1차 측	2차측	헤드	밸브	감지기	동작
습식	가압수	가압수	폐쇄형	알람 체크밸브	X	헤드 개방
건식	가압수	압축공기	폐쇄형	드라이밸브	X	헤드 개방
준비 작동식	가압수	대기압	폐쇄형	프리액션밸브	○	감지기동작+헤드개방
일제 살수식	가압수	대기압	개방형	데류즈밸브	○	감지기동작
부압식	가압수	부압수	폐쇄형	프리액션밸브	○	감지기동작+헤드개방

다. 스프링클러 헤드 특성

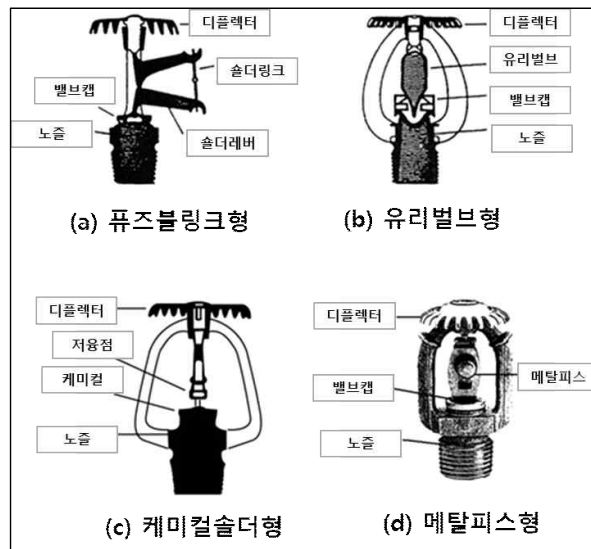
스프링클러 헤드란 화재 시 가압된 물이 내뿜어져 분산됨으로써 소화 기능을 하는 헤드를 말한다. 종류는 [그림 15]와 같이 크게 2가지로 폐쇄형과 개방형으로 나뉘고 폐쇄형 스프링클러 헤드란 정상상태에서 방수구(放水口)를 막고 있는 감열체가 일정온도에서 자동적으로 파괴·용해 또는 이탈됨으로써 방수구가 개방되는 스프링클러 헤드를 말한다. 개방형 스프링클러 헤드란 감열체 없이 방수구가 항상 열려 있는 스프링클러 헤드를 말한다.[44]



출처: 소방안전플러스, <https://www.kfsi.or.kr/contents/webzine/201712/sub03-03.html>

[그림 15] 스프링클러 헤드 종류

개방형과 폐쇄형의 큰 차이점은 감열체의 유무이다. 폐쇄형은 감열체가 있고 개방형은 감열체가 없다. 감열체란 것은 유리, 납 등의 물질로 일정한 온도에 도달하면 변형 또는 파괴되는 성질을 가진 물질들이다. 감열부는 구조 및 재질에 따라 분류되며 [그림 16]과 같이 퓨즈블링크형, 유리벌브형, 케미컬슬더형, 메탈피스형 구분된다.



출처: 한국소방공사, <http://www.nofire.co.kr/m/product.html?branduid=156119>

[그림 16] 감열체 종류에 따른 헤드 유형

퓨즈블링크형 헤드는 퓨즈블링크, 디플렉터, 파킹캡, 레바후레임, 메탈 가스켓 구성 요소로 이루어져 있으며, 퓨즈 부분이 레버로 이루어져 있다. 열을 감지하는 부분이 넓어서 화재 감지 속도가 빠르고 시공이 간단하고 파손 시 재생이 가능하다.

유리벌브형 헤드는 유리관 내 체적 팽창이 큰 에테르, 알콜 등을 넣어 봉입하였다. 온도에 따른 동작이 정확하며 스케일이 오랫동안 끼지 않아 반영구적이다. 특히 유리벌브형 헤드의 감열체는 [그림 17]과 같이 57 ℃ Orange, 68 ℃ Red, 79 ℃ Yellow, 93 ℃ Green, 141 ℃ Blue 등으로 표시온도에 따라 감열체가 다른 색으로 표시되어 있다.



[그림 17] 유리벌브형 스프링클러 헤드

케미컬솔더형은 화학 물질로 조립된 것으로 후레임, 디플렉타, 케미칼 릴리스로 구성되어 있다. 메탈피스형은 프레임, 디플렉타, 메탈피스로 구성되어 있으며 열을 감지하는 면적이 작고 설치 후 오랫동안 방치하면 금속 피스에 스케일이 끼어 오동작할 수가 있다.

헤드는 [그림 18]과 같이 설치 방식에 따라 상향형, 하향형, 측벽형으로 분류하는데, 상향형은 반자가 없는 천정에 설치하며 반사판의 형태가 니플 쪽을 향해 구부러져 있으며, 하향형은 반자가 있는 곳에 주로 설치하고 반사판은 36 mm로 분사 패턴이 상향형보다는 떨어지거나 반자의 소손을 적게 하며 반구형의 패턴으로 분사되는 장점이 있다. 측벽형은 옥내의 한 쪽 벽 상단부에 설치하여 사용하는 것으로 한쪽만으로 살수가 이루어진다.



출처:소방청(2019), 스프링클러설비의 화재안전기준 해설서

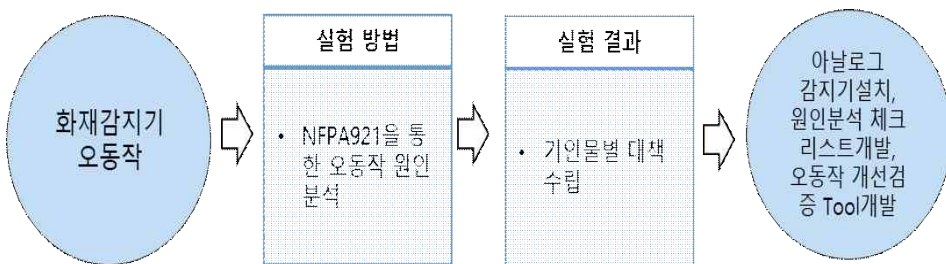
[그림 18] 설치 방식에 따른 헤드 종류

IV. 실험 모델

1. NFPA 921을 통한 비화재보 분석 실험

소방시설의 화재감지기 비화재보 원인을 분석, 규명하는데 NFPA 921 과학적 분석론을 적용하여 필요성 인식, 문제의 정의 단계, 자료수집, 자료분석, 가설수립 단계, 가설검증, 최종가설선택 단계, 총 3단계로 구분하여 화재감지기 비화재보 기인물별 원인 및 대책방안을 수립하였다.

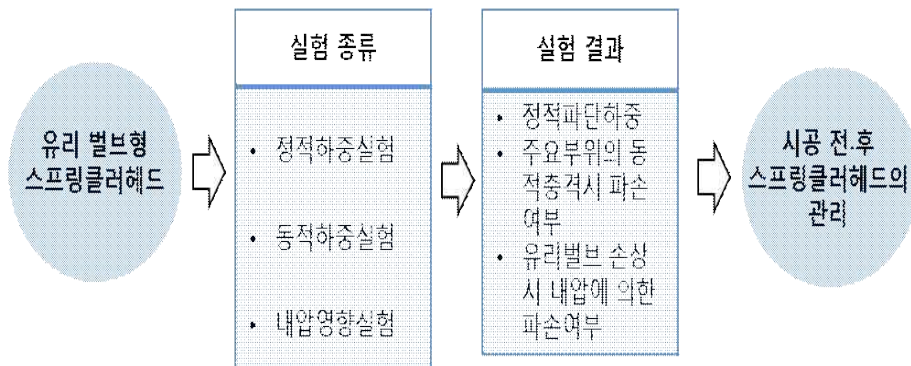
1단계에서는 비화재보를 신속하고 정확하게 판단하기 위해 아날로그 감지기와 통합감시시설 설치를 제언하였고, 2단계인 자료수집, 자료분석, 가설수립에서는 비화재보 정의를 수립하고 원인분석 체크리스트를 제시하였다. 3단계에서는 수립된 대책방안으로 개선된 비화재보가 단절, 재발 되는지 검증 할 수 있도록 체크리스트를 제시하였다.



[그림 19] NFPA 921을 통한 비화재보 분석 실험 모델

2. 유리벌브형 헤드 내구성 및 내압성 실험

스프링클러 유리벌브 헤드에 정적하중 실험, 동작 하중 실험, 내압 영향실험을 시행하고, 정적 파단 하중과 주요 부위의 동적충격 시 파손 여부, 유리벌브 손상 시 내압에 의한 파손 여부를 정량적으로 평가한다. 헤드 운송 방법, 보관 장소 및 보관온도 기준, 헤드 설치 전용 공구 사용, 설치기준 수립 등 스프링클러 헤드를 안전하게 관리해야 할 필요가 있다. 따라서 [그림 20]에 연구모형을 제시하고자 한다.

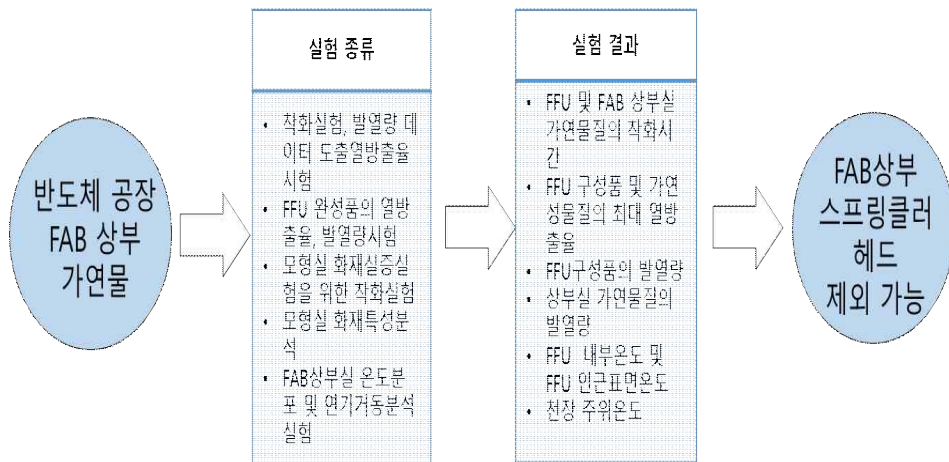


[그림 20] 유리벌브형 헤드 내구성 및 내압성 실험 모델

3. 반도체 실화재실험

[그림 21]과 같이 반도체 실 화재 실험 모델은 국내외 반도체 공장 화재방보 설계자료 및 국내외 기준 등의 관련 자료를 검토하고, 국내 주요 사업장 반도체 소화설비를 현황을 조사하며, 반도체 FAB 내부 건축 구조, 건축자재, 소방시설, 피난시설, 건축물 시스템 등 현황 및 FAB 상부실의 공기정화장치구조 및 특성, FAB 상부실 가연물 현황, FAB 공조 등 구조 및 가연물, 발화원을 조사한다.

조사된 가연물 및 발화원을 토대로 착화실험, 개별 연소 특성 시험, 열방출율 및 발열량 측정, 모형실 화재실증실험을 위한 착화실험, 온도 분포 및 연기 거동 분석 등의 화재실증실험을 진행한다. 최종 실험 결과를 토대로 보완 및 개선사항을 분석한다.



[그림 21] 반도체 실화재실험 모델

4. 통합 실험 모델

통합 실험 모델의 목적은 소방시설의 비화재보 분석, 유리별브형 헤드의 내구성 및 내압성 평가, 반도체실화재 실험을 통해 소방시설 비오작동을 최소화하고 안전성을 향상시키는 것을 목적으로 한다.

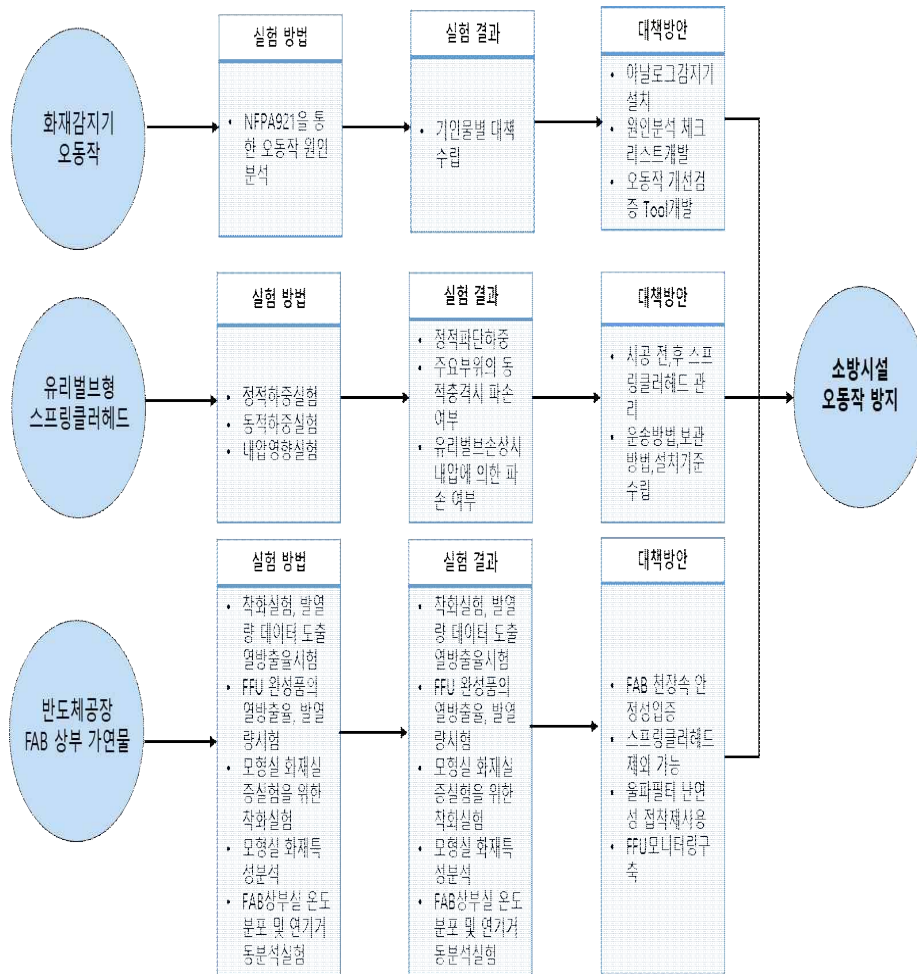
실험 대상은 화재감지기, 유리별브형 스프링클러 헤드, 반도체 FAB 등이며, 실험 조건은 비화재보 발생 상황, 정적하중, 동적하중, 내압영향, 반도체 FAB의 건축구조, 건축자재 등이다.

실험 방법 및 절차는 비화재보 분석 실험에서는 화재감지기 비화재보 오동작을 분석하고, 유리별브형 헤드 내구성 및 내압성 실험에서는 정적하중 실험, 동적 하중 실험, 내압 영향실험을 시행하며, 반도체실화재 실험에서는 국내외 반도체 공장 화재방보 설계자료 및 국내외 기준 등의 관련 자료를 검토하고, 국내 주요 사업장 반도체 소화설비를 현황조사, 모형실 화재실증실험을 실시한다.

비화재보 분석 실험에서는 오동작의 원인을 분석하고, 유리별브형 헤드 내구성 및 내압성 실험에서는 정적 파단 하중과 주요 부위의 동적 충격 시 파손 여부, 유리별브 손상 시 내압에 의한 파손 여부를 정량적으로 평가하며, 반도체실화재 실험에서는 조사된 가연물 및 발화원을 토대로 착화실험, 개별 연소 특성 시험, 열방출율 및 발열량 측정, 모형실 화재실증실험을 위한 착화실험, 온도분포 및 연기 거동 분석 등의 화재실증실험을 진행한다.

실험 결과를 바탕으로 보완 및 개선사항을 도출하며, 비화재보 분석 실험에서는 오동작의 원인에 대한 대책을 수립하고, 유리별브형 헤드 내구성 및 내압성 실험에서는 헤드 운송 방법, 보관장소 및 보관온도 기준, 헤드 설치 전용 공구 사용, 설치기준 수립 등 스프링클러 헤드를 안전하게 관리해야 할 필요가 있으며, 반도체 실 화재 실험에서는 최종 실험 결과를 토대로 보완 및 개선사항을 분석한다. 따라서 [그림 22] 에

통합실험모델을 제시하고자 한다.



[그림 22] 통합 실험 모델

V. 반도체 공장의 안전성 평가

1. 반도체 공장의 NFPA 921에 의한 비화재보 분석

아날로그 화재감지기는 화재 시 발생하는 물리적 현상 또는 연소생성 시 발생하는 연기 등을 사전에 인지하여 정해진 오염도 기준이상이 되면 신호를 전달하도록 구성되어 있다. 그러나 실제 화재가 아닌데도 감지기 동작 조건을 환경적으로 갖추게 되면 감지기는 화재로 인식하여 신호를 전달하여 경보가 발보되는 것을 비화재보라 한다.[45]

화재가 아닌 경우는 기계적 요인, 환경적 요인, 공사 현장에서 발생하는 용접 흠, 용접 아크 불빛, 청소먼지, 작업등 불빛, 컴파운드의 물기 등이 환경적 조건에 해당하며, 해당 환경적 조건에 아날로그 감지기 및 UV/IR 불꽃감지기는 작동하게 되며 통신 신호를 통해 수신기는 전달하고 경종 및 비상 방송을 발보하는 것이 비화재보가 발생하는 기인물의 대표적인 예로 볼 수 있다. 즉, 감지기로써 연기 또는 불빛을 인지하는 기능은 이상 없지만, 작업이나 청소 등으로 발생 환경적 요인들에 의하여 감지기가 실제 화재로 인지하고 신호를 검출하여 경보 설비를 현장에 발보하는 것을 말하며, 비화재보로 인하여 건물 대피가 이루어지고 자체소방대 및 관할 소방서 등의 출동이 이루어지는 상황을 말한다.

국내 소방 관련 법령에서는 비화재보에 대한 명확한 정의와 비화재보 원인조사에 관한 내용은 매우 부족한 것이 현실이며, 그나마 「감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」에 감지기의 비화재보를 방지하는 실험 기준과, 「자동화재탐지설비 및 시각경보장치의 화재 안전 기술기준」 2.4.1에 부착 높이에 따른 감지기의 종류 및 설치장소별 감지기를 구분하여 오동작을 예방할 수 있도록 규정화 한 것이 전부이다.[46][47]

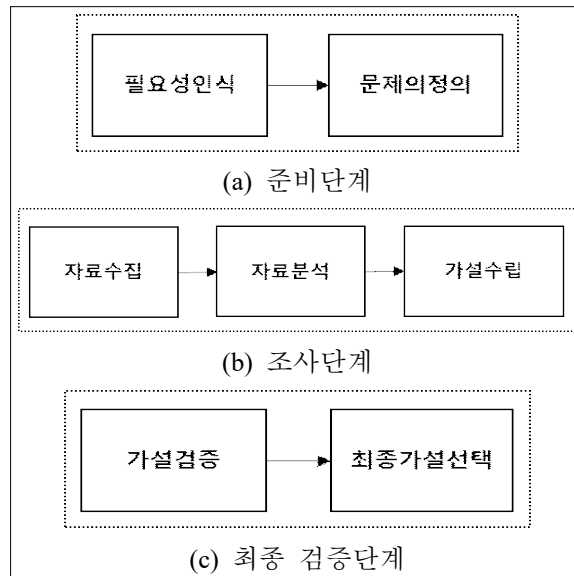
선행연구는 비화재보 시 신속한 대피를 유도하는 기술개발, 습도에

의한 비화재보 장소 재정의, 화재감지기 기술 개선, 전산센터 비화재보 주원인 등 비화재보 원인 및 조치에 중점이 맞춰져 있고, 비화재보의 원인조사 방법론과 미국과 영국처럼 비화재보에 대한 명확한 정의 규정에 관한 연구가 부족한 실정이다. 미국의 경우는 National Fire Alarm and Signaling Code(NFPA 72) 에서 비화재보를 정의하고 있고 영국의 경우도 Fire Detection and Fire Alarm Systems for Building(BS 5839-1)기준에서 비화재보를 규정하고 있다.[48][49]

가. NFPA 921 과학적 방법론의 필요성 및 구성

건축, 시설물들이 다양화 및 고도화됨에 따라 현장에 설치되고 있는 소방시설 또한 현장 상황과 여건에 맞게 다양화되고 있다. 특히 광전식 스포트형 연기감지기는 발광부와 수광부로 구성되어 있으며, 화재로 인한 연기가 감지기 내부 챔버로 유입되었을 경우 연기에 의해 빛이 산란되는 양을 감지하여 화재로 인식하는 설비이다. 하지만 현장에 먼지나 외기유입, 작업성 분진 등에 의해서도 광전식 감지기는 화재로 인식하는 Risk가 존재한다. 이 경우 건축물 관리자는 화재감지기의 동작 여부가 진성 또는 가성인지를 구분해야 하며, 가성 즉 비화재보인 경우에는 정확한 원인을 파악하고 재동작 하지 않도록 하여 소방서 헛걸음 출동과 건축물 내 재실자들의 불필요한 피난을 방지할 필요성이 있다. 하지만 일반적인 건축물 관리자 또는 재실자들은 소방시설에 대한 이해가 부족하고 경험이 부족하여 비화재보의 원인분석이 쉽지 않은 것이 현실이다. 비화재보 원인조사는 경험과 이론적 지식, 과학적 방법이 복합적으로 이루어졌을 때 원인이 도출될 수 있다. National Fire Protection Association (NFPA) 921은 세계적으로 공신력이 있는 미국방화협회에서 발간한 화재·폭발 조사 방법을 안내한 지침으로 화재 원인을 조사하기 위한 방법론을 종합적으로 규정하고 있어 비화재보 원인조사에 NFPA 921을 적용할 필요성이 있다.

NFPA 921 화재조사의 과학적 방법은 [그림 23]과 같이 필요성인식, 문제의 정의, 자료수집, 자료 분석, 가설의 수립, 가설의 검증, 최종가설 선택으로 총 7단계로 구성되어 있으며 최종가설을 검증하지 못한 경우 이전 단계를 다시 수행하는 등 과학적이면서 합리적인 조사를 통해 원인을 도출하는 것이 특징이다.



[그림 23] 화재조사 과학적 방법론

필요성 인식은 연소상황을 파악하고 원인조사의 필요성을 인식하는 단계로써 연소의 진행이 시시각각으로 변화하므로 빠른 판단과 객관적인 조사를 진행하기 위해 연소사항을 사진 촬영하고 녹화하여야 한다. 문제의 정의는 연기와 화염의 상황, 연소의 범위, 진행 방향, 확대 속도 등의 특이사항을 확인하고 해결하는 방법을 결정하는 단계로, 화재 현장의 모든 면에서 연소상황을 관리하고 기록한다. 자료수집이란 출동 시 멀리서 보이는 연기 색깔, 화염의 높이 및 크기, 소방대 도착 전 관계자들이 촬영한 사진이나 영상 확보, 화재 방향과 발화에 중요한 역할

을 할 수 있는 창문, 지붕, 벽 구조물 등을 촬영하고 기록하는 단계로 과학적이고 객관적인 기준에 의해 신뢰성이 확보되어야 한다. 자료 분석은 최종가설을 위한 필수적 단계로써 귀납적 추론 방법을 이용한 자료수집과 분석이 이루어져야 하며, 분석된 정보를 보증할 수 있어야 한다. 분석의 기법에는 진술 분석기법, 행동 분석기법, 현장 분석기법 등 다양한 기법들이 활용되고 있다. 가설수립은 자료 분석을 기본으로 하여 현장에서 조사된 건물 내 외부 피해 범위, 목격자 진술 등을 통해 최초 발화지점, 화재 원인을 증명하는데 모순이 없는 가설을 수립하는 단계를 말한다. 여러 개의 가설이 수립될 수 있지만 수집된 자료를 토대로 가설을 입증할 수 없다면 다음 단계로 넘어갈 수 없다. 가설검증은 수립된 가설을 과학적 방법, 실험 등을 통해 검증하는 단계로써 알려진 사실 또는 일반적인 전제로부터 도출 할 수 있는 구체적인 결과로써 연역적 추론에 입각한다. 최종가설 선택은 화재조사 과학적 방법론의 최종단계로써 이전 단계들이 과학적이고 구체적인 방법으로 수행된 후에 진행된다. 다른 가설들이 객관적인 방법과 신뢰성 있는 검증을 통해 배제되고 최종 선택된 가설은 공식적인 의견으로 지지되어야 한다. 이상의 사항을 정리하면 <표 17>과 같다.

<표 17> 과학적 방법론의 구성

구 분	정 의
필요성 인식 (Recognize the need)	해결해야 할 문제가 존재한다는 것을 확인하는 것
문제 정의 (Define the problem)	문제를 어떤 방식으로 해결할 수 있는지 결정하는 것
데이터 수집 (Collect data)	실질적인 측정, 관찰 또는 직접적인 감각 경험에 근거하여 사실적인 자료들을 모으는 것
데이터 분석 (Analyze the data)	교육훈련, 경험 및 전문지식을 토대로 추정이 아닌 과학적 원리에 기초하여 수집된 전체 데이터의 연관성과 의미를 평가하는 것
가설 수립 (Develop hypotheses)	데이터 분석에 기초하여 현장에서 수집된 물리적 증거, 목격자의 증언 등이 화재현장을 설명하는데 모순이 없는 잠정적인 결론을 내리는 것
가설 검증 (Test the hypotheses)	연역적 추론에 입각하여 잠정적으로 수립된 가설의 증거물을 물리적으로 실험하거나 과학적 이론을 적용하여 인지적 또는 분석적으로 평가하는 것
최종 가설 선택 (Select final hypotheses)	가설 검증을 통해 다른 가설이 배제되고 사실과 부합하며 신뢰할 수 있는 하나의 가설로 귀결될 때 공식적인 결론이나 의견으로 채택하는 것

나. 반도체 공장 비화재보 원인조사 분석 방법

비화재보 실태를 조사한 장소는 국내 반도체 공장으로써 비화재보의 대상은 아날로그 연기감지기 22,459대, 아날로그 정온식 감지기 2,538대, 공기흡입형 감지기 1,364대, UV/IR 불꽃 감지기 1,515대, 감지 선형 감지기 766대로 정하고, 아날로그 연기감지기 및 아날로그 정온식 감지기는 예비단계는 집계 대상에서 제외하고 최종 화재단계만 집계 대상으로 선정했으며, 공기흡입형 감지기도 Arlet, Action, Fire1은 집계 대상에서 제외하고 Fire2 단계부터 비화재보로 집계하였다. 비화재보 발생 현황은 2019년 67건, 2020년 52건, 2021년 44건이 발생되었는데, 가장 많이 발생한 화재감지기는 아날로그 연기감지기로 3년간 총 94건이 동작

하였으며, 다음 순으로 공기흡입형 감지기 36건, 감지 선형감지기 15건, 불꽃감지기 15건, 정온식 감지기 3건으로 순으로 동작하였다.

소방시설 비화재보의 발생 원인은 작업 연관성에 의한 동작이 114건, 기계적 고장이 37건, 환경적 요인이 12건으로 구분되고 있다. 작업성 요인의 대표적 사례는 공사 시 사용하는 그라인더, 드릴 작업, 용접작업 등 발생하는 분진, 흙 등에 의한 오동작과 기계적 요인으로는 감지기 기계적 고장에 의한 동작, 환경적 요인은 외기유입, 주방에 감지기 설치 등에 습기 유입에 의한 동작으로 나타났다.

해당 조사 결과에서 집단 간의 차이 파악, 집단 간 특성 파악, 문제점 발견, 개선방안 모색 등을 위해 집단 간 비교 검증을 시행하였다.

연도별 비교는 < 표 18>과 같이 2019년과 2020년에 비해 2021년에 비화재보 발생이 감소한 것으로 나타났다.

<표 18> 연도별 비교

연 도	비화재보 발생 건수
2019	67건
2020	52건
2021	44건

감지기는 <표 19>와 같이 가장 많이 발생한 화재 감지기는 아날로그 연기감지기로, 다른 감지기에 비해 비화재보 발생 빈도가 높은 것으로 나타났습니다.

<표 19> 감지기 종류별 비교

연 도	비화재보 발생 건수
아날로그 연기감지기	94건
공기흡입형 감지기	36건
감지 선형감지기	15건
불꽃감지기	15건
정온식 감지기	3건

두 집단 간의 차이를 검정하기 위해 t-검정을 수행하였고, 연도별 비교의 p-값은 0.05로, 두 연도 간의 비화재보 발생 건수의 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 감지기 종류별 비교의 p-값은 0.01로, 아날로그 연기감지기와 다른 감지기 간의 비화재보 발생 건수의 차이가 통계적으로 유의했다. 이를 통해, 감지기 종류에 따라 비화재보 발생 건수에 차이가 있다는 것을 알 수 있다. 결과는 <표 20>과 같다.

<표 20> t-검증 결과

검정통계량	p-값
연도별 비교	0.05
감지기 종류별 비교	0.01

해당 조사 결과를 바탕으로 반도체 공장에서는 실제 화재가 아닌 비화재로 인한 감지기 등의 동작이 매년 지속해서 발생하고 있는 추세이다. 이는 소방서의 헛걸음 출동으로 소방력 낭비와 화재 출동 지체로 이어져 재산, 인명피해 확대 또한 불필요한 건물 재실자들의 피난 등으로 기업 휴지가 발생할 수 있다.

비화재보의 발생 원인 중에서는 작업 연관성에 의한 동작이 가장 많

은 것으로 확인되었는데, 이는 반도체 공장에서 작업 시 발생하는 먼지 또는 연기 등이 감지기에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

이처럼 비화재보 원인조사를 시행함에 주변 작업자 및 목격자의 진술이 필수적으로 중요한 사항이지만 작업 도중 화재 알람이 송출되면 작업자 및 주변 관계인들은 당혹감과 불안함에 현장을 이탈하기에 자체소방대 및 소방 안전관리자가 현장에 도착하였을 경우 주변인들의 진술을 확보하기가 어렵다. 또한 진술을 통해 본인이나 본인 회사에 불이익이 미칠 수 있음을 염려하여 소극적인 모습을 보이는 것이 사실이다. 또한 소방안전관리자 및 건축물의 관계인은 최대한 빨리 현장을 정상화해야 하므로 많은 시간을 두고 현장의 목격자를 찾는 것에 부담이 있다. 하여 실제 감지기 동작의 원인은 용접 흠 또는 작업에 의한 분진 등으로 동작하였지만 관계인들은 사실을 알지 못한 채 감지기 주변 상황으로만 확인하고 특이점이 없어 원인 미상으로 감지기 자체 불량으로 판단하고 감지기만 교체하는 행위를 반복적으로 시행하는 등 원인분석에 오류를 범한다.

비화재보의 원인조사는 대부분 건축물의 소유자, 점유자, 관리자, 소방안전관리자 등 가장 접근이 용이한 다양한 인원들로 구성되어 있으며, 소방에 대한 전문지식과 경험이 있어 감지기 오동작 원인을 쉽게 찾을 수 있는 사람이 있는 반면 소방에 대한 경험과 이론적 지식이 없어 화재감지기가 오동작하여 경보가 발보되면 수신기의 경보장치를 끄거나 현장에 경종을 탈거하는 등의 행위를 하는 사람도 있다. 화재감지기가 동작을 하면 무엇을 먼저 확인해야 하고 어떤 기인물이 주변에 있는지 등의 기준을 제시하는 법령이나 가이드는 찾아보기 힘들기에 건축물의 관계인들은 비화재보의 원인조사에 대해 소극적이고 과학적이지 않은 근거를 제시하여 신뢰성을 저하시키고 지속적인 비화재보가 발생하게 되는 요인이 된다.

다. 비화재보 원인조사 방안

신속한 비화재보 판단을 하고 원인을 분석하기 위해서는 모든 화재감지기는 위치를 알 수 있는 아날로그식 감지기로 설치하고 [그림 24]과 같이 통합감시시스템과 연동하여 화재감지기 동작 시 위치가 도면상에 표식 되게 했다. 주변의 CCTV가 감지기 동작 주변을 비추고 확인함으로써 화재 진, 가성 여부를 조기에 알 수 있어 현장의 혼선을 예방할 수 있다. 또한 비화재보는 장소 환경, 소방시설에 따라 다양하게 나타나고 화재 연기 미립자가 아닌 인위적 요인, 환경적 요인, 기능상 요인, 유지관리상 요인, 설치상 요인, 휴먼에러로 구분하여 비화재보의 원인분석을 객관적이고 과학적으로 진행할 수 있다.

[그림 24(a)]는 화재감지기, 가스감지기가 동작 시 사고위치를 도면에 표식해주는 모습으로 사고 장소의 위치를 정확하게 알 수 있게 한다.

[그림 24(b)]는 사고 장소로 소방대의 출동 최단 경로를 표시해 줌으로써 반도체 공장과 같이 복잡한 구조에 건축물 사고도 조기에 대처 할 수 있도록 한다.

[그림 24(c)]는 동작한 감지기 주변에 설치된 CCTV가 자동으로 팝업되어 그 주변을 비추는 모습으로, 소방대가 현장에 도착하기 전 실제상황인지 비화재보 상황인지를 조기에 알 수 있게 한다.



[그림 24] 통합방재시스템

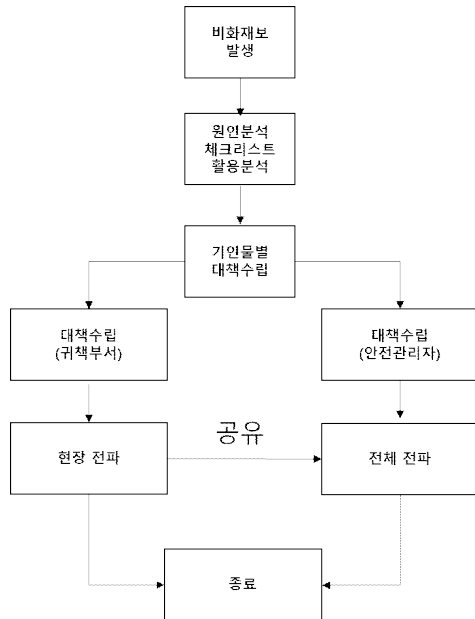
비화재보의 원인은 다양하고 원인분석도 각양각색으로 매우 다양한 해결책이 도출된다. 하지만 비화재보의 명확한 정의가 수립되어 있지 않고 소방시설의 전문가들만이 비화재보 원인을 분석할 수 있다면 현장의 비화재보는 개선되지 않을 것이다. 이에 약 3년간 3만여 개 감지기를 설치 운영 중인 반도체 공장의 비화재보 원인을 분석한 결과, 객관적인 자료 분석과 가설수립 절차를 통해 비화재보 원인을 조기에 확인하고 비전문가도 비화재보 원인을 확인하는 방법을 강구하였으며 내용은 다음과 같다.

첫째, 소방시설의 오동작 시 인위적 요인, 환경적 요인, 기능상 요인, 유지 관리상 요인, 설치상 요인, 휴먼에러 요인에 의한 오동작인지에 대한 현장 조사를 시행한다. 각 요인별 원인은 <표 21>과 같다. 둘째, 비화재보 원인분석 Check List를 이용하여 비화재보 초기 가설을 수립한다. 가설수립에는 목격자 진술, 최초 소방대 현장평가, 시설설치 연도, 등 가능한 모든 자료가 고려되어야 한다.

<표 21> 비화재보 원인분석 체크리스트

구 분	원 인	결 과
인위적 요인	- 연기발생	
(환경적)	- 난방에 의한 것	
	- 용접에 의한 것	
	- 먼지가 많은 장소	
	- 기타	
기능상 요인	- 먼지에 의한 것	
	- 증기에 의한 것	
	- 감지기 불량에 의한 것	
	1)외함에 전기적, 물리적 충격여부	
	2)제품에 이물질 등 특이사항 여부	
	3)케이블에 전기적, 물질적결함여부	
	4)전원값 정상여부	
	* 수신기 전원 : DC22~24V	
	* 채널카드 통신전압: DC14~16V	
	* 채널카드 회로저항: 50Ω 이하	
	* 선로 도통 확인: 도통(-,+)	
	5)감지기LED표시 상태 정상여부	
	6)감지기 동작여부	
	- 기상 및 결로에 의한 것	
	- 벌레의 침입에 의한 것	
유지관리상	- 청소 불량에 의한 것	
	- 침수에 의한 것	
	- 기타	
설치상	- 부적합한 장소에 의한 것	
	- 기타	
휴먼에러	- 작업부주의	

비화재보의 최종 원인 선택의 검증은 재 오동작률로 확인할 수 있다. 현장에서 Check List 및 연역적 추론 방법을 통해 수립된 가설을 검증하더라도 해당 내용을 안전관리자 및 관계인들만 알고 있다면 현장은 변화가 없을 것이다. 오동작을 발생시킨 기인물이 재 오동작을 유발하지 않도록 [그림 25]와 같이 오동작이 발생하면 지정된 화재 알람 원인 규명 담당자가 오동작 Check List를 기반으로 현장에서 오동작 원인을 파악, 분석하고 기인물이 기계적 단순 고장이 아닌 현장의 작업성과 연관이 있는 경우에는 해당 작업부서로 오동작 발생 여부를 전달하여 작업시 주변 화재감지기 오동작 유발 원인에 대한 대책방안을 수립하도록 안내하여 현실적인 방안이 제시되도록 한다. 또한 수립된 대책방안은 전체 부서 공유 및 횡 전개를 통해 현장의 재발을 방지하여 화재감지기 오동작을 단절함으로써 최종가설을 검증한다. 비화재보 단절의 개선 효과 확인은 <표 22>와 같이 소방시설별 오동작의 원인을 분석하여 구분하고 발생한 원인의 최종가설에 대한 개선대책 시행 전, 후 오동작 건수를 비교분석하여 대책방안 시행 전 월평균 발생 건수 대비 개선점을 비교한다. 수립된 대책방안의 개선 효과를 단절, 재발, 개선으로 구분하여 검증할 수 있고, 단절되지 않은 대책방안들은 추가적인 대책을 수립하여 현장에 적용하여 개선할 수 있다.



[그림 25] 오동작 개선검증 프로세스

<표 22> 오동작 개선검증 Tool(예시)

Tool	원인		개선 대책					
				기간		오동작 건수 (월 평균)		개선 판단 기준
				변경전	변경후	변경전	변경후	
불꽃 감지기	원인 1			18.1월	18.12월	3.6건	0건	≤3건
광전식 연기감 지기	원인 2			18.1월	18.11월	8.4건	2건	≤8건
				‘18.1월	‘19.3월	6.4건	2.4건	≤6건
공기흡 입형 감지기	원인 3			‘18.1월	‘19.3월	2.5건	1.2건	≤2건
준비작 동식 스프링 클러	원인 4			‘18.1월	‘19.1월	3건	1.1건	≤3건

라. 결과의 고찰

이 연구는 약 3만개 화재감지기가 설치된 국내 반도체 제조공장에서 2019년 1월부터 2021년 12월까지 발생한 163건의 화재감지기의 비화재보의 다양한 원인을 분석·규명하는데 NFPA 921 과학적 방법론을 적용함으로 객관적이고 체계적인 비화재보 원인분석이 이뤄질 수 있도록 하여 새로운 비화재보 정의를 규정하고, 비화재보 정의 구분에 따른 효과적인 원인분석 기법을 제시하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 필요성 인식 및 문제의 정의 측면에서 소방시설의 비화재보에 대한 인식 부족과 성급한 판단을 내린다면 비화재보의 정확한 원인을 도출하기보다 감지기 불량 등 설비 자체 결함에 한정되어 지속적인 비화재보가 발생할 수 있고, 현장의 공정이 복잡하고 넓은 경우 화재감지기의 위치 및 설치 공간 정보가 명확하지 않아 불필요한 신고를 하게 되며, 이를 통해 소방서의 헛걸음 출동, 재실자 피난 대피 등이 발생되어 최종 소방시설에 대한 신뢰성을 잃을 수 있다. 이와 같은 Risk를 최소화하기 위해 아날로그식 감지기 및 통합감시시스템을 제안하였다. 빠른 정보전달은 현장의 화재 진, 가성 여부를 조기에 알 수 있어 현장의 혼선을 예방하는 데 도움이 될 것이다.

둘째, 자료 분석, 가설수립 측면에서 비화재보 발생 공간의 주변 작업자 및 최초목격자의 진술이 필수적으로 중요한 사항이지만 당혹감과 불안감에 현장 이탈 등으로 비화재보 원인에 대한 진술을 확보하기 어려워 소방안전관리자 및 관계인들의 추측성 원인 및 비화재보의 정의가 명확하지 않아 다양한 분석의 오류를 통해 비화재보는 개선되지 않는다. 이러한 원인분석 오류를 방지하기 위해 3년간 비화재보 발생을 분석한 결과를 토대로 비화재보 요인을 5가지로 정의하고 각 요인별 발생 원인을 구분하여 비전문가도 비화재보 원인을 찾을 수 있고 같은 분석이 가능하도록 Check List를 제안하였다.

마지막으로, 가설검증, 최종가설 선택 측면에서 비화재보 원인분석

Tool을 이용하여 근본적 원인을 도출하였지만 기인물이 현장의 작업성 면지 등으로 현장의 도움 없이는 비화재보를 개선하기 어려운 부분들이 있다. 하여 수립된 가설을 검증하더라도 해당 내용을 안전관리자 및 관계인들만 알고 있다면 현장은 변화가 없을 것이다. 따라서 동작을 발생 시킨 기인물이 오동작을 재발하지 않도록 비화재보 개선 종결 프로세스 및 최종가설 검증 Sheet를 제안하였다.

이 연구는 NFPA 921의 과학적 방법론에 따른 비화재보 원인조사에 대한 접근으로 반도체 공장 외 소방시설이 설치된 건축물에 비화재보 원인분석 Check List 및 개선 절차를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 유리별브형 스프링클러 헤드 내구성 및 내압 실험

스프링클러의 유리별브형 헤드는 57℃ Orange, 68℃ Red, 79℃ Yellow, 93℃ Green, 141℃ Blue 등으로 표시온도에 따라 유리별브가 다른 색으로 표현되어 있고, 작동온도에 감열체인 유리별브가 파손되며 소화수가 방출되는 방식의 헤드이다.

스프링클러 유리별브 헤드의 국내시험 기준은 「스프링클러 헤드의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」에 명시되어 있다.[50]

NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler System에 설치된 스프링클러 시스템은 NFPA 25 Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems Chapter 5 Sprinkler Systems에 명시되어 있으며, 헤드를 특정하고 있지는 않지만 Leak, 부식, 물리적 손상, 유리별브 내 액체 손상, 스프링클러 헤드 성능에 해로운 영향, 스프링클러 헤드 제조사에 의해 적용된 것과 다른 페인트가 묻은 헤드는 교체가 필요하다고 명시되어 있다.[51][52]

스프링클러 헤드는 제조된 후 차량, 선박, 항공 등의 교통수단을 통해 보관창고로 이동되고 시공사들의 자체 검수 등을 진행한 후 시공 현장으로 이동하여 별도 보관 및 설치되는 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 헤드의 유리별브에 충격과 손상이 발생하고 고온의 환경에 노출되고 있음이 확인되었고, 손상된 헤드 및 비정상 헤드가 고가장비를 운용하고 있는 현장에 설치되면 많은 수손피해가 발생할 것이다.

그러나 국내·외 기준에서는 스프링클러 헤드의 유리별브에 대한 직접적인 강도시험 기준과 유리별브 손상 방지에 대한 기준은 부족하고, 손상된 헤드가 설치되면 발생할 수 있는 비화재보에 관한 연구 또한 부족한 것이 현실이다. 선행연구 및 국내외 기준에서는 헤드의 외관, 구조, 중량측정 등 외형적 결함과 수압, 수력 시험, 물성에 관한 시험, 온도에 관한 시험, 화재성능에 관한 시험, 살수 분포 등 제품성능에 초점이 맞춰져 있다. 스프링클러 헤드의 이동 및 시공 과정에서 발생할 수 있는

유리밸브 손상과 그에 따른 헤드 비화재보에 관한 연구는 부족한 실정이다.

이 연구는 스프링클러 헤드 유리밸브에 직접 충격을 가하는 정적하중 실험과 동적 하중 실험으로 구분한 내구성실험과 유리밸브 손상 정도에 따른 내압을 가하여 유리밸브 헤드의 파손 여부를 검증하는 유리밸브 내압 영향실험을 통해 손상된 유리밸브 비화재보 가능성을 검증하고 현장에서 발생할 헤드 손상을 최소화할 관리방안을 제시하고자 한다.

가. 실험 조건 및 실험 방법

1) 실험 조건

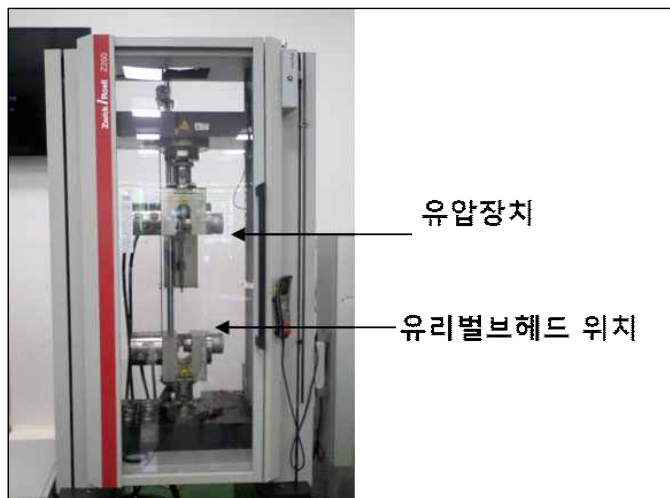
실험장소의 내부 온도는 23~25℃를 유지하고 습도는 39% ±3%를 유지하고 있다. A사 조기 반응형 유리밸브형 스프링클러 헤드 68℃, 두께 약 2.5 mm 밸브를 사용하였으며, 실험에 앞서 1,176 kPa 10분, 1,569 kPa 10분, 1,961 kPa 10분에 기본 내압 실험과 5 mm/25Hz/3시간의 진동 시험, 원통형 추 1 m 높이 낙하 실험을 통해 기본 평가를 진행 후 이 실험에 적용한다.

2) 정적하중 실험

유리밸브형 헤드는 독일 A사 제품으로 조기 반응형 68℃, 두께 약 2.5 mm 유리밸브 5개를 사용하였으며, < 표 23 >과같이 5 ~ 250 kN과 압축 속도 80 mm/min을 사양을 가지고 있는 압축시험기에 [그림 26]과 같이 유리밸브를 고정하고 유압장치가 일정한 속도로 유리밸브에 점진적 하중값을 증가하게 구성하였으며, 로드셀(Load cell)은 0[N]에서 파손지점까지의 하중을 측정하였다.

<표 23> 인장 기계 사양

구 분	사 양
시험부하 / 높이	5~250kN / 2340mm
장치폭 / 압축 속도	1200mm / 80mm/min
모터	Ac 서보모터(Servo-Motor)
입력신호	디지털(Digital)
정확도	$\pm 2 \mu m$
강도측정	로드셀 등급 0.5 / 1 국제표준화기구(ISO 7500-1), 미국재료시험협회(ASTM E4) 참조
전력	AC220V



[그림 26] 정적 하중 실험장치

3) 동적하중실험

동적 하중 실험은 [그림 27]과 같이 추를 낙하할 수 있는 중공봉이 고정되어 있고, 추 고정 핀 제거 시 추가 자유낙하 할 수 있게 구성하였

다. 각 스프링클러 헤드는 T사 제품으로 조기 반응형 68℃ Upright 타입 헤드를 10개 사용하였고 바닥에 고정되어 있으며, 추가 낙하하여 몸체 및 유리벨브 자체에 대하여 3가지 무게와 9가지 상황에서 중량물 낙추 시험을 통해 정량적인 충격량을 산출하였다.



[그림 27] 동적 하중 실험장치

4) 내압 영향실험

유리벨브 손상에 따른 내압 평가는 스프링클러 헤드는 T 사 제품으로 조기 반응형 68℃ Upright 타입 헤드를 사용하였고, 유리벨브형 헤드는 독일 A 사 제품으로 두께 약2.5 mm 유리벨브 5개를 사용하였다. [그림 28]과 같이 다이아몬드 연삭 막대를 사용하여 유리벨브 외경의 8% ~ 10% 초과되는 깊이의 손상을 임의로 발생시키고, 25A 스프링클러 배관에 헤드를 설치했으며, 내압 1,960 kPa 까지 점진적으로 증가시키고 최종압력에서 5 min 이상 유지 시험을 진행하여 헤드 파손 여부를 검증하였다.



[그림 28] 다이아몬드 연삭 막대

나. 실험 결과

스프링클러 헤드에 대한 국내시험 기준은 「스프링클러 헤드의 형식 승인 및 제품검사의 기술기준」에 명시되어 있으며, 재료 검사, 헤드 강도시험, 퓨즈블링크의 강도시험, 유리벨브의 강도시험, 분해 부분의 강도시험, 진동시험, 수격시험, 부식 시험, 작동온도시험, 걸림 작동시험, 반사판 강도시험, 장기 누수시험, 내열시험, 감도 시험, 열반응 시험, 방수량 시험, 살수 분포시험 등을 진행하고 있다. 그중 유리벨브의 강도시험은 온도 영향성에 대한 시험이 주를 이루고 있다.[53]

하지만 유리벨브 및 헤드에 직접적으로 정적하중과 동적하중을 가한 유리벨브의 강도에 대한 시험기준은 부족하다. 이 실험은 유리벨브에 직접적인 정적, 동적 충격 시험을 통해 파손 및 강도를 확인하고 유리벨브에 임의 손상을 가하여 내압 테스트에 유리벨브 영향성을 확인하였다.

1) 정적하중 실험결과

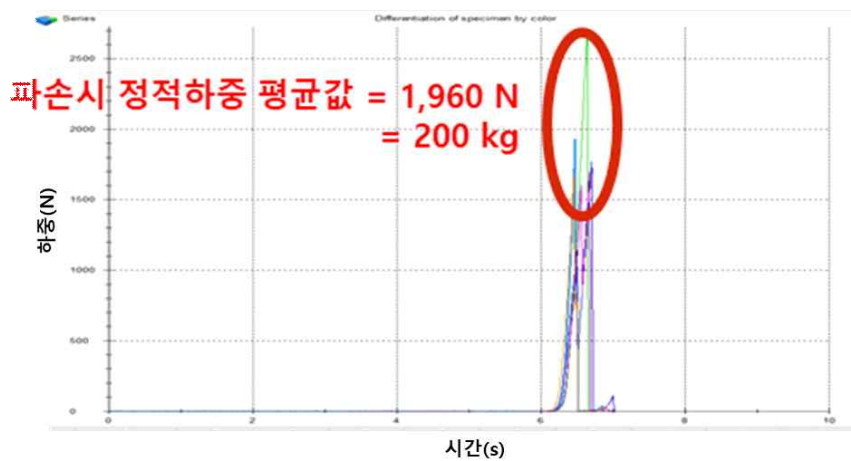
유리벨브 정적하중 실험을 위해 유리벨브 자체를 만능인장기를 사용하여 정량적 data를 산출한 결과 약 성인남성 3인(약 2744 N)의 무게를

정적하중 조건에서 견뎌를 확인할 수 있었으며 유리벌브 자체는 정적 (Static)인 외력에 높은 수준의 강도를 보임을 알 수 있었다.

<표 24>에서 파단하중은 1693,552 N ~ 2707.293 N 범위에 있었다. 파 단하중의 평균값은 [그림 29]와 같이 약 1960 N 정도로 나타났다.

<표 24> 정적하중 실험결과

구분	최대파단하중 [N]
유리벌브 #1	1,930.548
유리벌브 #2	2,707.293
유리벌브 #3	1,773.768
유리벌브 #4	1,693.552
유리벌브 #5	1,698.381
평균	1,960.708



[그림 29] 정적하중 실험 평균값

2) 동적하중 실험결과

높이에 따른 낙추의 속도는 식(1)로서 구할 수 있다.

$$V = \sqrt{2gh} \text{-----} (1)$$

여기서 V: 낙하하는 추의 속도(m/s), g:중력가속도(9.8m/s^2), h:낙하하는 추의 높이(m)

동적 하중 실험은 Case 1, 2를 통해 Head 외부의 측면을 극한조건인 90 g (전산 볼트 1개 수준), 4.5 m/s의 충격을 가해도 Bulb는 이상 없음을 확인했다. Head 외부 충격으로 인한 Bulb 깨짐은 일반적인 동적(Dynamic) 충격 상황에서 불가함을 확인하였다.

Case 3을 통해 7g(볼트 1개 수준), 2 m/s에서 90% 정상율을 보임을 확인했다. Bulb 자체는 충격에 대한 내구성이 존재하지만, Bulb에 직접 동적 충격(자재 낙하 등)을 가할 경우에는 쉽게 파손될 수 있음을 확인하였다.

<표 25>는 Case 1 실험 결과로서 [그림 30]과 같이 디플렉터 윙 부분에 90 g, 40 g, 7 g의 추를 1,000 mm, 500 mm, 200 mm 높이에서 낙하시키는 9가지 상황에서 중량물 낙추 실험을 한 결과 모든 조건에서 유리 밸브는 파손되지 않음을 확인할 수 있었다. 헤드 외부 충격으로 인한 유리밸브 깨짐은 일반적인 동적충격 상황에서 불가함을 확인하였다.

<표 25> 동적 하중 Case 1 프레임 윙 부분 낙하

구분	낙하 높이		
	1,000 mm	500 mm	200 mm
90 g	10 유리밸브	10 유리밸브	10 유리밸브
40 g	10 유리밸브	10 유리밸브	10 유리밸브
7 g	10 유리밸브	10 유리밸브	10 유리밸브

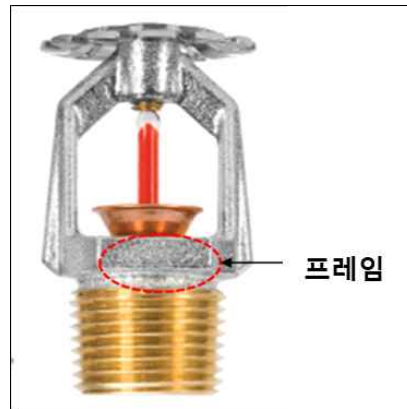


[그림 30] 프레임 윙 부분 낙하지점

<표 26>은 Case 2 실험 결과로서 [그림 31]과 같이 디플렉터 바디 부분에 90 g, 40 g, 7 g의 추를 1,000 mm, 500 mm, 200 mm 높이에서 낙하시키는 9가지 상황에서 낙추 실험을 한 결과 모든 조건에서 유리밸브는 파손되지 않음을 확인할 수 있었다. 헤드 외부 충격으로 인한 유리밸브 깨짐은 일반적인 동적충격 상황에서 불가함을 확인하였다.

<표 26> 동적 하중 Case 2 프레임 몸체 부분 낙하

구분	낙하 높이		
	1,000 mm	500 mm	200 mm
90 g	10 유리별브	10 유리별브	10 유리별브
40 g	10 유리별브	10 유리별브	10 유리별브
7 g	10 유리별브	10 유리별브	10 유리별브



[그림 31] 프레임 몸체 부분 낙하지점

<표 27>은 Case 3 실험 결과로서 [그림 32]와 같이 유리별브 측면에 90 g, 40 g, 7 g의 추를 1,000 mm, 500 mm, 200 mm 높이에서 낙하시키는 9가지 condition에서 낙추 실험을 한 결과 7 g(볼트 1개 수준) 2 m/s 등가속에서만 90% 가 정상율을 보이고 나머지 실험 조건에서는 모든 유리별브가 깨짐이 확인되었다. 유리별브에만 동적 충격(낙하 등)을 가할 때 쉽게 파손될 수 있음을 확인하였다.

<표 27> 동적 하중 Case 3 유리별브 직접 낙하

구분	낙하 높이		
	1,000 mm	500 mm	200 mm
90 g	0개 유리별브	0개 유리별브	0개 유리별브
40 g	0개 유리별브	0개 유리별브	0개 유리별브
7 g	0개 유리별브	0개 유리별브	9개 유리별브



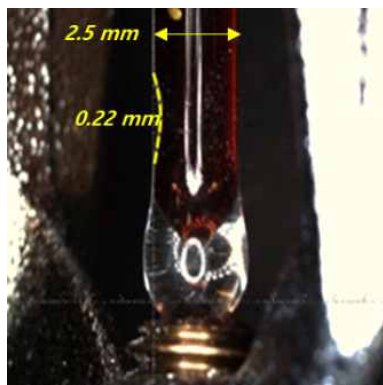
[그림 32] 글라스별브 표면 낙하지점

3) 내압 영향 실험 결과

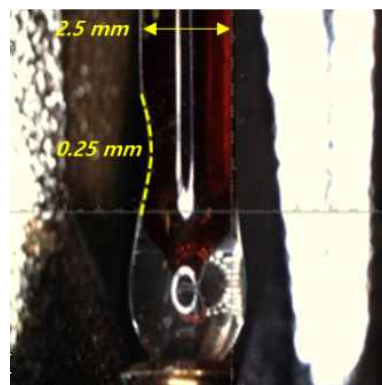
스프링클러 유리별브 헤드 외경을 [그림 33]과 같이 인위적으로 8 ~ 10% 초과하는 깊이의 손상을 발생시키고 1,960 kPa 정수 압력을 5분간 가한 경우 내압 1,765 kPa 구간 승압 중 스프링클러 헤드 오작동(유리별브 파손)이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 일정 수준 이상의 유리별브 표면의 손상은 Bulb 오작동을 일으킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

[그림 33(a)]은 유리별브를 현미경으로 확대하여 본 사진으로 지름 약 2.5 mm 유리별브의 한쪽(단일결함)에 0.22 mm 손상을 발생시킨 후의

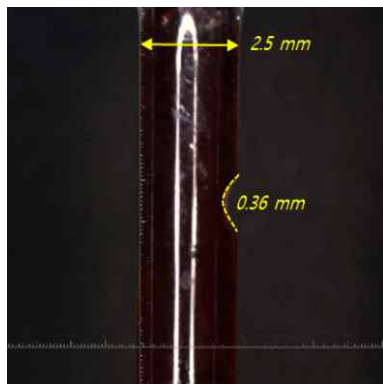
모습이고, [그림 33(b)]은 한쪽에 0.25 mm 손상을 발생시킨 후의 모습, [그림33(c)]은 한쪽(단일결함)에 10% 초과 0.36 mm 손상을 발생시킨 후의 모습이고, [그림 33(d)]은 양쪽(이중결함)에 각각 0.25 mm, 0.18 mm 손상을 발생시켜 합산 깊이가 두께의 10% 초과가 되도록 한 모습, [그림 33(e)]는 양쪽(이중결함)에 각각 0.33 mm, 0.25 mm 손상을 발생시켜 합산 깊이가 두께의 10% 초과가 되도록 한 모습을 각각 나타낸다.



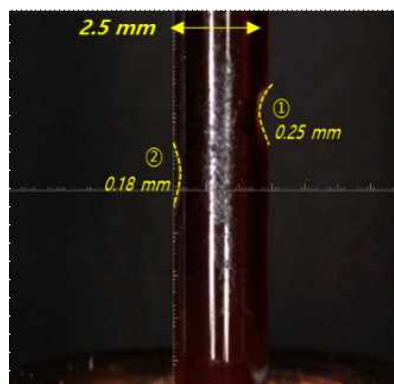
(a) 0.22 mm 단일결함



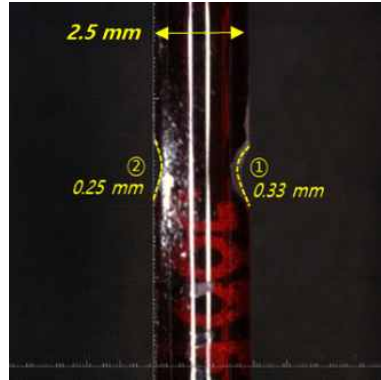
(b) 0.25 mm 단일결함



(c) 0.36 mm 단일결함



(d) ① 0.25mm and
② 0.18 mm Damages 양쪽 결함



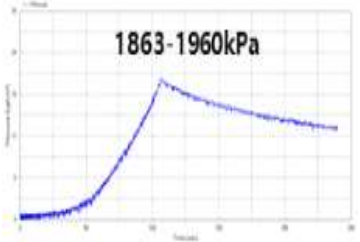
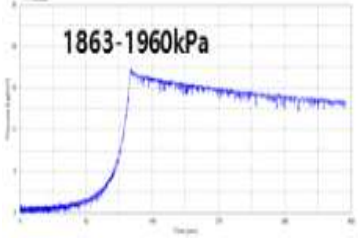
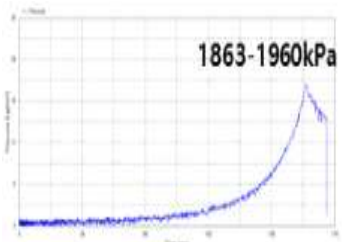
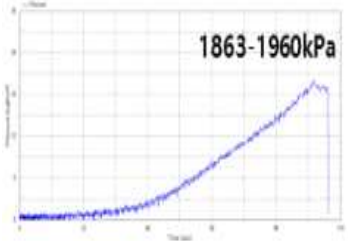
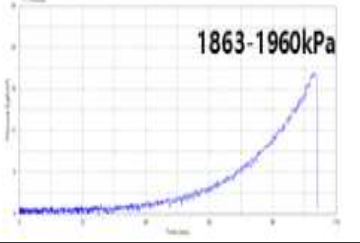
(e) ① 0.33 mm and ② 0.25 mm Damages 양쪽 결함

[그림 33] 유리밸브 손상

<표 28> 은 공구를 통한 인위적 손상을 가한 유리밸브 시편 5개의 손상 깊이에 따른 내압 평가 결과를 나타내고, 5개 case로 실험한 결과 유리밸브 외경 2.5 mm의 10% 초과되는 깊이의 손상이 발생 할 경우 비화 재보 유리밸브 3개 모두 승압 중 Bulb가 파손됨을 확인할 수 있었다.

그 이유는 유리밸브에 외부 충격이 가해져 유리밸브가 즉시 파손되지 않을 정도의 손상이 생긴 상태에서 배관 수압이 헤드에 가해지고 시간이 흘러 유리밸브가 파손된 것으로 추정된다.

<표 28> 유리벨브 손상 깊이에 따른 내압 영양평가 결과

구분	손상 깊이	그래프	실험 결과
단일결합	0.22mm		정상
단일결합	0.25mm		정상
단일결합	0.36mm		파손
양쪽결합	①0.25mm ②0.18mm		파손
양쪽결합	①0.33mm ②0.25mm		파손

다. 결과의 고찰

유리별브형 스프링클러 헤드가 제조되어 현장에 설치되기까지, 유리별브 제조, 스프링클러 헤드 제조, 해외수입, 국내 입고 및 검수, 국내 출하, 시공사 창고 입고, 시공사 입고 검사, 시공 현장으로 이동 및 보관, 헤드시공, 기수압 완성검사 등 여러 과정을 거치면서 스프링클러 헤드에 손상이 가해질 환경적 요인이 있음이 확인되고, 손상된 유리별브 헤드가 설치되면 헤드는 파손되어 수손피해가 발생할 수 있음이 확인되었다.

스프링클러 유리별브 헤드는 장시간 고온에 노출되면 유리 내부의 분자들이 이동하면서 발생하는 변형 중 하나인 크리프(Creep) 현상을 일으키고 강도가 약해지기에 한국산업표준(KS)에서는 유리별브 헤드의 크리프 한도를 65°C에서 168시간 동안 노출되었을 때, 변형이 1.5 mm 이하로 규정하고, 미국국립표준기술원(NIST)에서는 유리별브 헤드의 크리프 한도를 100°F(37.8°C)에서 1,000시간 동안 노출되었을 때, 변형이 0.25인치(6.35 mm) 이하로 규정하고 있다. 크리프 현상이 발생하면 유리별브 헤드의 성능이 저하될 수 있고 유리구가 변형되어 물이 분사되는 방향이 바뀌거나, 물이 제대로 분사되지 않을 수 있고 이로 인해 화재 진압에 실패하거나 더 큰 피해를 초래할 수 있다.

스프링클러 헤드는 설치 전 온도관리가 유지되는 장소에 보관하고, 온도를 30°C 이하로 유지 할 수 있어야 한다. 보관장소는 사람이 이동 시 쉽게 접촉될 수 있는 장소가 아니어야 하며, 유리별브형 헤드를 차량으로 이동 시에는 차량 내부 또는 탑차 등을 이용하여 온도관리와 충격 방지가 가능한 수준에서 이동해야한다. 여름철 오픈된 짐칸에 헤드를 탑재하여 이동하는 것은 지양해야 한다. 시공 현장에 도착한 스프링클러 유리별브형 헤드는 별도의 분리된 캐비닛에 보관하여야 하고 헤드 박스를 여러 단으로 적재하지 않아야 한다.

유리별브형 헤드를 설치 시에는 전동 공구 사용은 지양하고 제조사에

서 권장하는 전용 렌치를 사용하여 헤드를 설치해야 한다. 또한 유리별브 보호 덮개를 제거하는 순간 헤드 보호망을 설치하면 관리가 용이하다. 과도하게 헤드를 체결 시 외관 변형 및 누수 발생 가능성이 있으므로 헤드에 테프론은 여러 차례 감고 잔여 나사산은 적당하게 체결하는 것을 권장한다. 스프링클러 헤드를 설치한 이후에는 타 공정의 작업에 손상되지 않도록 관리해야 하며, 작업선 등이 헤드 주변에 설치되지 않도록 관리가 필요하다.

이 연구에서는 짧은 시간 고압으로 헤드에 극한조건을 부여하여 결과 값을 두고 비화재보를 예측 하였지만, 현장에서는 사용 배관압력이 다양하므로 향후 연구과제로는 보다 많은 보정 실험을 시행하여 헤드의 파손 가능 압력에 대한 오차율을 줄일 필요가 있다.

3. 반도체 클린룸의 실화재실험

FAB 상부실은 클린룸의 반자 상부에 위치하는 장소로 클린룸의 청정도를 유지하기 위해 필요한 다수의 FFU가 설치되어 있다. FAB 상부실은 높이가 약 3 m로 FFU 외에 케이블 트레이, 공기 순환 및 폐액 배출을 위한 덕트 및 행거 등이 설치되어 있으며, 공기공급이 원활하도록 클린룸 하부실과 플레넘으로 연결되는 구조이다. 즉 상부실의 FFU를 통해 클린룸으로 청정공기를 공급하고, 클린룸의 다공성 바닥을 통해 하부실로 유입된 공기가 다시 상부실로 공급되는 순환구조를 가지고 있다.

이러한 FAB 상부 공간에 스프링클러 헤드가 설치되고 헤드의 파손 또는 원인 미상의 오방출로 인해 소화수가 방출될 경우, 소화수는 천장면을 따라 흘러 FAB 전체로 퍼지고 하부 클린룸의 고가장비에 직접적인 수손피해 및 기입 휴지 등의 간접피해가 발생할 것이다. 그러나 국내 소방법에서 스프링클러 설비에 대한 설치기준은 스프링클러 설비의 화재안전기준성능기준(NFPC)과 기술기준(NFTC)에 있다. 그 중 스프링클러 헤드 설치제외 규정은 NFTC 103에 기술되어 있으며, 천장과 반자사이의 벽이 불연재료이고 천장과 반자사이의 거리가 2 m 이상으로서 그사이에 가연물이 존재하지 않는 부분으로 규정하였다.[54]

NFPA 13에 따르면 화재하중이 11.4 MJ/m^2 이하인 단열재를 쓰는 경우 소화설비의 설치를 면제해 주고 있다. 이는 구획된 공간의 가연물의 화재하중이 일정 크기 이하면 화재가 발생한 경우에도 연소 확대 가능성이 가벼운 것으로 보아 위험성이 낮다고 판단하는 것으로 이해된다. 국내에서는 스프링클러 헤드 설치 제외 규정에 대한 기준이 부족하고, 화재 안전성 확보에 따른 스프링클러 헤드 설치 제외에 관한 연구 또한 부족한 것이 현실이다.

FAB 상부실의 가연성 물질로는 FFU, 전원 케이블, 제어케이블, 전등 케이블, 가요전선관, 콘센트 등이 있는 것으로 나타났다. 전원 케이블은

케이블 트레이에 포설되어 있으며, 일부는 각 기기에 전원을 공급하도록 가요전선관에 내장되어 있다. FAB 상부실의 대표적인 잠재 위험요인으로는 FAB의 공기청정도를 유지하기 위해 계속적으로 가동되는 FFU의 모터부 과열에 의한 발열이나, 전원 접속부의 절연파괴 및 단락 등에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 FFU의 모터부에서 발생한 화재는 화재 규모 등 상황에 따라 주변 케이블 및 가연성 전선관 등을 통하여 확산될 수 있으며, 이로 인해 유독성 연기 등 연소생성물이 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

스프링클러 헤드 설치를 제외하여 수손피해를 예방하기 위해서는 FAB 상부 주요 가연물인 FFU와 케이블 등의 열방출율과 발열량을 화재실증실험과 시뮬레이션을 통해 화재 안전성을 검증하여 국내법에서 요구하는 가연물이 존재하지 않는 수준임을 입증할 필요가 있다.

따라서 이 연구에서는 국내외 기준 및 관련 자료 비교분석, FAB의 소방시설 설치현황, FAB 상부 공간에 존재하는 가연물의 종류, 주요 가연물 화재 재현실험을 통한 화재재현실험 비교 검증 등을 분석하여 객관적인 소방시설 제외 요건임을 입증하고 효과적인 화재 방호 및 FAB의 화재 안전 증대를 위한 방안을 제안하고자 한다.

가. FAB 상부실 현장 조사

FAB 상부에는 청정공기 공급을 위한 FFU가 설치되고 FFU에 필터가 부착되어 있다. FFU 및 케미칼 필터는 불연성 재료의 외함으로 설치되어 있다. 그 외 금속덕트 및 공정용 스테인리스 파이프 등 불연성 설비가 다수 설치되어 있다. FAB 상부의 FFU 등 전원 연결 사용한 케이블은 대부분 FR-8의 내화케이블 및 난연케이블을 사용하였다. 케이블을 수납하기 위한 전선관은 일부 합성수지 피복 전선관을 사용하였으며, 배선을 각재 등에 고정하기 위해 케이블 타이로 소량 사용하였다.

FAB 상부실의 가연성 물질로는 FFU, 전원 케이블, 제어케이블, 전등

케이블, 가요전선관, 콘센트 등이 있는 것으로 조사되었다. 전원 케이블은 케이블 트레이에 포설되어 있으며, 일부는 각 기기에 전원을 공급하도록 가요전선관에 내장되어 있다. FAB 상부실의 대표적인 잠재 위험요인으로는 FAB의 공기청정도를 유지하기 위해 계속적으로 가동되는 FFU의 모터부 과열에 의한 발열이나, 전원 접속부의 절연파괴 및 단락 등에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다. 또한 화재확산 경로를 가정해 보면 FFU의 모터부에서 발생한 화재는 화재 규모 등 상황에 따라 주변 케이블 및 가연성 전선관 등을 통하여 확산될 수 있으며, 이로 인해 유독성 연기 등 연소생성물이 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

나. 화재 발생 시나리오 및 시험체

현장 확인 사항을 통해 FFU 내부에서 발화 위험성이 가장 높은 모터부의 과열이나 또는 전원 접속부의 이상으로 화재가 발생하여 가연성 구성품이 지속해서 연소하는 경우로 시나리오를 선정하고 연소실험을 실시하였다.

FFU의 주요 구성품으로는 FAN, 모터, 회로기판, 이블 커넥터 및 케미컬 필터 등이 있으며, 콘칼로리미터를 이용한 연소시험에서 모터케이싱 등의 금속제 구성품은 불연성이므로 시험에서 제외하고 가연성 재료에 대해서만 시험을 실시하였다. 또한 FAB 상부실의 가연성 물질 중 전원선, 제어선, 전등선, 가요전선관, 콘센트 등에 대해서도 연소시험을 실시하였다. 시험은 FFU의 각 구성품과 시험체를 100 mm×100 mm 크기의 연소 팬에 들어갈 수 있도록 절단하여 실시하였으며 시험에 사용된 시험체의 종류는 <표 29>와 같다.

<표 29> 콘칼로리미터 시험체의 종류 및 측정항목

시 험 체	가연성물질	측정 항목	
		열방출율	발열량
필터(주름형)	접착제 등	개당/단위면적/ 길이 또는 전체(kW)	단위면적당 발열량(MJ/m ²)
케미칼 필터	Glass Fiber 등		단위면적당 발열량(MJ/m ²)
FFU 제어선	케이블, 플라스틱		개당 발열량(MJ)
팬 커버(A/B)	플라스틱		개당 발열량(MJ)
전원콘센트	플라스틱		개당 발열량(MJ)
전원콘센트 커버	플라스틱		개당 발열량(MJ)
FFU 회로기판	플라스틱, 콘덴서 등		개당 발열량(MJ)
FFU 전원선	케이블 피복재		단위 길이당 발열량(MJ/m)
전등 전원선	케이블 피복재		단위 길이당 발열량(MJ/m)
케이블타이	플라스틱		개당 발열량(MJ)
가요 전선관	전선관 피복재		단위 길이당 발열량(MJ/m)
일반 콘센트	플라스틱		개당 발열량(MJ)
System Ceiling(바닥판넬)	-		단위면적당 발열량(MJ/m ²)

다. 주료가연물 연소시험 방법 및 결과

FFU 구성품 및 기타가연물의 열방출율 및 발열량을 측정하기 위한 시험장치는 ISO 5660-1에 따른 콘칼로리미터를 사용하였다. 콘칼로리미터는 산소소비원리(Oxygen Consumption Principle)를 이용한 시험장치로 고분자 재료, 건축재료, 항공기 및 선박용 내장재료, 케이블 등의 연소 특성을 평가하는데 사용한다. 콘칼로리미터에 의한 시험방법은 국제규격(ISO, ASTM, NFPA 등)으로 채택되어 있으며, 재료 및 제품의 착화시간(Time to Ignition), 열 방출율(Heat Release Rate), 유효발열량(Effective Heat of Combustion), 질량감소율(Mass Loss Rate) 등을 동시에 측정할 수 있다. ISO 5660-1에 따른 콘칼로리미터 시험을 통해 각 시험체가 일정한 열원(50kW/m^2)에 노출되었을 때의 해당 시험체에서 발생하는 열 방출율을 측정하였다. 또한 가연물의 열방출율 및 발열량은 단위면적이나 단위길이로 환산하여 발열량을 산출하였다. 측정항목은 <표 30>과 같다.

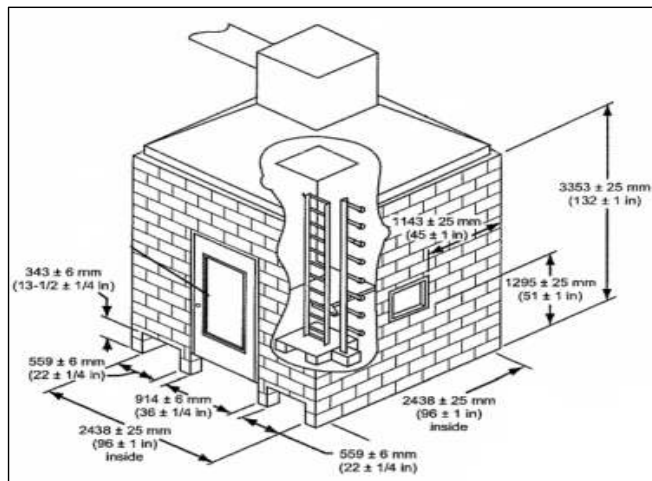
<표 30> 열방출율시험 시 측정항목

측정항목	기호	단위	의 미
착화시간	t_{ig}	s	Pilot Flame을 통해 착화되는 시간
열방출율	HRR	kW/m^2	산소소모원리를 통해 실시간으로 측정되는 열의 방출속도
총발열량	THR	MJ/m^2	연소기간 동안 방출된 총발열량
유효발열량	EHC	MJ/kg	연소기간 동안 방출된 총발열량을 질량 감소량(kg)으로 나눈 값

1) FFU 연소시험

FFU 완성품의 연소시험은 FFU가 외부 화원에 의해 전체가 연소되었을 때를 가정하여 FFU 완성품의 열방출율을 측정하였다. 즉 일정한 크기의 화원(20 kW)을 FFU에 가하고 FFU에서 연소가 시작되어 일정한 열량이 발생한 이후부터 열량이 발생되지 않을 때까지 시험을 지속하였다.

시험장치는 FFU 완성품의 열방출율 측정을 위해 IEEE 1202에 규정된 케이블 난연성 시험장치인 중규모 열방출율 측정장치를 활용하였다. 이 시험장치는 20 kW(70,000 Btu/hr)의 화염을 지속해서 공급할 수 있는 리본가스버너와 2,600 mm(W) × 2,600 mm(D) × 3,100 mm(H)의 챔버를 가지고 있으며, 챔버의 체적은 20.28 m³이고 바닥면적은 6.76 m²로 제작되어 있다. 또한 이 장치에는 산소농도 분석장치가 설치되어 있어 챔버 상부로 배출되는 연소가스의 산소농도를 측정하여 발열량을 계산할 수 있다. 시험장치의 개략도는 [그림 34]와 같다.



출처: 홍성호(2011). 케이블 화재의 발화원인 및 케이블 난연성능 시험방법에 대한 고찰. 방재기술, 51, 6-12.

[그림 34] IEEE 1202 시험장치 개략도

시험방법은 FFU 완성품에 일정한 열량(20kW)의 화염을 인가하여 FFU에서 발생하는 열방출율을 측정하였다. [그림 35]와 같이 시험체를 챔버 내에 설치하고 리본가스버너를 시험체 하부에 설치하여 연소열이 발생되지 않을 때까지 지속해서 화염을 인가하였다. 화염이 인가되면 시험체의 연소로 인하여 연소생성물이 생성되며, 이러한 연소생성물은 상부의 배기덕트를 통하여 배출된다. 이때 산소농도 분석장치를 이용하여 배기덕트 내의 산소농도를 측정하고 FFU 연소시 소비되는 산소소비를 측정하여 열방출율을 계산하였다.



(a) FFU 완성품



(b) 리본가스버너

[그림 35] FFU 완성품 및 표준 점화원

2) FFU 착화실험

FFU 착화실험의 시나리오는 FAB 상부실에서 발생할 수 있는 화재 발생 위험이 가장 높은 화재 원인을 가정하여 착화실험을 수행하고 그 결과를 화재실증실험에 반영하고자 하였다. FAB 상부실의 주요한 발화 요인으로서는 FAB의 공기청정도를 유지하기 위해 지속해서 가동되는 FFU를 통해 발생할 가능성이 높으며, 특히 FFU의 모터 과열이나 전원

케이블 접속부의 접촉 불량, 절연과피 및 단락 등에 의해 화재가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 FFU 착화실험은 기타의 화재 시나리오를 배제한 화재 발생 위험이 가장 높은 FFU 모터부 과열과 전원 접속부 단락을 고려하여 착화실험을 수행하였다.

일반적으로 전기제품의 과열에 의한 발화는 일정한 열을 발생시키는 열선을 이용하며, 필요한 경우 발화 시 가연물에 불이 옮겨 붙어 착화될 수 있도록 일정 시간 동안 지속해서 연소할 수 있는 액체연료를 함침한 솜 재질의 이그나이터(Igniter)를 사용한다.

이 실험에서 FFU 내부에 있는 모터부의 과열이나 FFU 몸체 표면에 있는 전원 접속부의 단락 등에 의한 발화를 모사하기 위해 [그림36(a)]과 같이 1차 실험에서는 FFU 모터부 회로기판에 알코올이 함침된 솜과 니크롬선 점화장치로 착화실험을 수행하였다. [그림 36(b)]과 같이 2차 실험에서는 모터부로 공급되는 전원이 외부의 전원선과 연결되는 FFU 몸체 표면의 전원 접속부 단자에 알코올 솜과 니크롬선 점화장치로 착화실험을 수행하였다.



(a) 모터 내부



(b) 전원 접속부

[그림 36] FFU 착화실험 시료

착화실험은 FAB 모형 실을 이용한 실 규모 실험에서 최적의 착화방법을 찾고 아울러 FFU 발화 시 팬의 정지시간, 필터 등으로의 화염

전과 여부 등을 살펴보기 위해 실증실험에 앞서 실시한 것이다. 이 연구에서 적용한 착화실험 방법을 요약하면 <표 31>과 같다.

<표 31> FFU 착화실험 방법

구 분	착 화 방 법	FFU 가동조건
1차	알코올 함침솜 1개를 FFU 내부 회로기판에 감싸고 니크롬선으로 가열	가동
2차	알코올 함침솜 1개를 FFU 전원 접속부 커넥터에 감싸고 니크롬선으로 가열	가동

또한 각 착화실험에 사용한 니크롬선의 인가전류, 인가전압 그리고 알코올 함침솜에 대한 세부사항은 <표 32>와 같으며, 착화실험 시 발화 여부 및 화염전파여부를 관찰하기 위해 온도측정용 열전대를 착화지점과 필터 상부에 각각 설치하였다.

<표 32> FFU 착화방법 세부사항

인가전압	인가전류	솜 무게 및 알코올 양
30.5 V	3 A	솜 : 3 g × 1개 , 알코올 : 10 ml

3) 주योग연물 연소시험 결과

3-1) FFU 구성품 및 상부실 가연성물질의 연소시험

FFU 구성품 및 상부실 가연성물질에 대한 콘칼로리미터 시험결과 착화시간은 필터(주름형)가 평균 11초로 가장 짧게 나타났으며 케미칼필터가 182초로 가장 느리게 나타났다. 또한 FFU 구성품 외 기타 가연물 중에서는 FFU 전원선 케이블이 15초로 가장 빨리 연소되었으며, FFU 전등 전원선이 64초로 가장 느리게 나타났다. <표 33> 은 FFU 구성품과 기타 가연성물질의 착화시간을 나타낸 것이다.

<표 33> FFU 구성품 및 가연성물질의 착화시간

시 험 체	평균착화시간(s)
필터(주름형)	11
케미칼필터	182
FFU 제어선	27
팬 커버 A	20
팬 커버 B	27
전원콘센트	22
전원콘센트 커버	17
회로기관 (모터용)	76
FFU 전원선	15
전등 전원선	64
케이블타이	27
가요 전선관	19
일반 콘센트	34

콘칼로리미터를 이용하여 측정한 FFU 구성품과 가연성 물질의 발열량에 각 재료의 실제 면적이나 길이를 반영하여 계산하면 FFU 및 구성품의 발열량이나 기타 가연성물질의 단위길이 또는 단위 수량당 발열량을 산출할 수 있다. <표 34>과 <표 35> 는 콘칼로리미터 시험에서 얻은 FFU 구성품과 상부실 가연성물질의 단위수량 또는 단위 길이당 실제 발열량을 나타낸다.

<표 34>는 FFU 구성품의 발열량 1대 기준으로 8개 시험체를 대상으로 발열량을 도출하고 실제 면적 및 길이를 반영하여 단위면적당 발열량을 산출하였다.

<표 34> FFU 구성품의 발열량(1대 기준)

시 험 체	단위면적당 발열량 (MJ/m ²)	면적 (m ²)	길이 (m)	발열량 (MJ/대)
필터 (주름형)	10.89	1.36	-	14.8(주름형)
케미칼 필터	121.9	0.76	-	92.6
FFU 제어선	129.8	-	1.5	1.3
팬 커버 A	52.4	0.02		1.0
팬 커버 B	42.3	0.02		0.8
전원콘센트	147.4	0.009		1.3
전원콘센트 커버	44.9	0.009		0.4
회로기판 (모터용)	39.3	0.02		0.8
합 계(케미칼 필터 제외)				20.5

<표 35>는 펌 상부실 내 가연성 물질 5개 시험체를 대상으로 발열량을 도출하고 실제 면적 및 길이를 반영하여 단위면적당 발열량을 산출하였다.

<표 35> 상부실 가연성물질의 발열량(단위길이/단위수량 기준)

시 험 체	단위면적당 발열량 (MJ/m ²)	단위길이당 발열량 (평균) (MJ/m)	길이(m)/ 개수(개)	발열량(MJ)
FFU 전원선	-	1.7	1.5	2.55
케이블 타이	45	0.45/4개	8개	0.9
전등 전원선	-	0.3	1.5	0.45
가요 전선관	-	1.39	1.5	2.09
일반 콘센트	195.4	-	0.009	1.76
합계				7.75

또한, <표 36>은 FAB 상부실의 바닥 부분에 설치되는 바닥 판넬의 단위면적당 발열량을 산출하였다. FAB 상부실 바닥의 경우 전체 바닥 면적 대비 약 76%가 System Ceiling(바닥판넬)으로 구성되어 있으며, 나머지 24%가 FFU로 구성되어 있다. <표 33> ~ <표 35>에 따라 FFU 및 System Ceiling(바닥판넬)이 설치되는 바닥의 가연물 분포를 고려한 단위면적당 평균 발열량은 9.7MJ/m²로 산출되었다. 다만, 라운드형 필터가 있는 경우에는 평균 발열량이 증가할 것으로 예상된다.

<표 36> FAB 상부실 바닥부 단위면적당 발열량

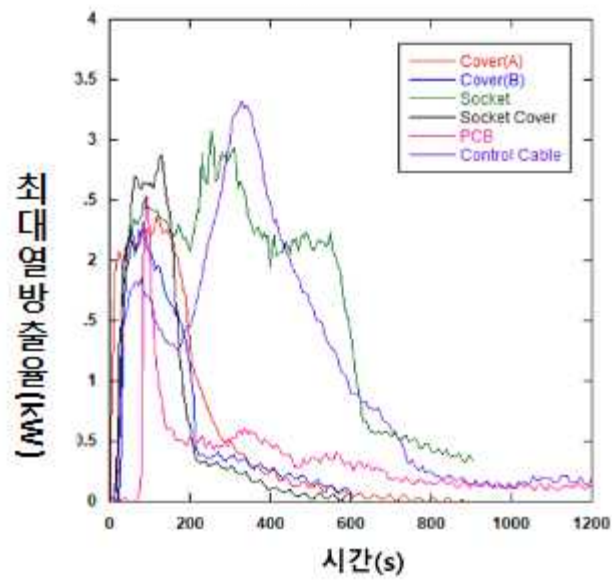
시 험 체	단위면적당 발열량(MJ/m ²)	비고
System Ceiling(바닥판넬)	0.2	

FFU 구성품의 콘칼로리미터 시험에서 최대열방출율(Peak Heat Release Rate, PHRR)은 <표 37>과 같이 측정되었다. 실험결과 FFU 상부에 설치되는 케미칼필터의 경우 UL 94 시험기준(Horizontal Burning Test)을 통과한 제품이지만 FM 인증품인 주름형 필터에 비해 난연성이 다소 떨어지는 것으로 판단된다.

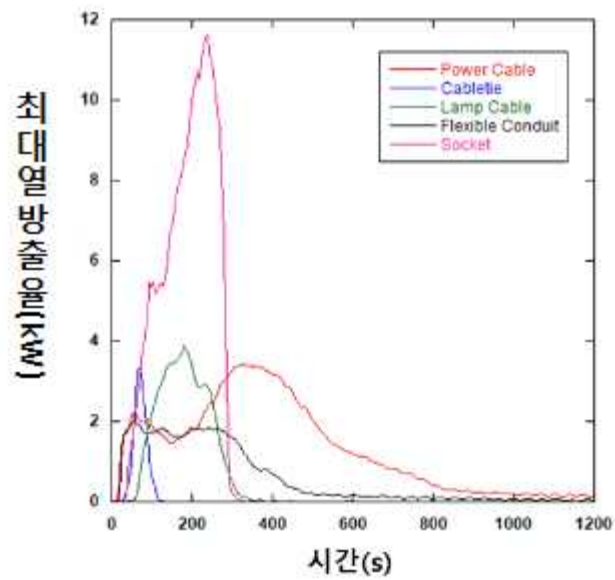
<표 37> FFU 구성품 및 가연성물질의 최대열방출율

시 험 체	최대열방출율(kW)	비 고
필터(주름형)	33.4	100 mm × 100 mm
케미칼필터	177.95	100 mm × 100 mm
FFU 제어선	3.3	100 mm × 100 mm
팬 커버 A	2.4	100 mm × 100 mm
팬 커버 B	2.3	100 mm × 100 mm
전원콘센트	3.1	100 mm × 100 mm
전원콘센트 커버	2.9	100 mm × 100 mm
회로기관(모터용)	2.5	100 mm × 100 mm
FFU 전원선	3.0	100 mm × 100 mm
케이블타이	3.0	1개 당
전등 전원선	3.5	100 mm × 100 mm
가요 전선관	2.0	100 mm × 100 mm
일반 콘센트	11.65	1개 당

필터를 제외한 나머지 구성품은 1개 또는 100 mm × 100 mm 크기에 대해 2.0 ~ 11.65 kW의 값을 가지는 것으로 나타나 FFU 구성품의 플라스틱과 전선 피복류의 최대 열방출율은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. FFU 구성품 및 가연성물질의 최대 열방출율을 시간에 따른 그래프로 나타내면 각각 [그림 37] 및 [그림 38]과 같다. 그래프에서 열방출율이 상대적으로 높은 구성품들은 연소기간이 짧으며 연소초기에 집중적으로 높은 열방출율을 발생하지만, 열방출율이 낮은 구성품들은 상대적으로 오랜 시간 동안 완만히 열을 방출하는 것으로 판단된다.



[그림 37] FFU 구성품의 최대 열방출율

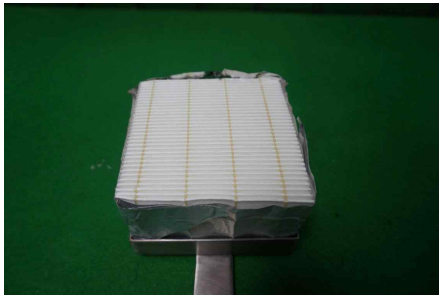


[그림 38] 상부실 그 밖의 가연물 최대 열방출율

실제 발열량은 FFU 구성품 중 가장 많은 양(면적)을 차지하고 있는 필터가 가장 큰 것을 알 수 있다. 특히 케미칼 필터는 주름형에 비해 난연성이 떨어져 발열량도 높게 나타났다. 케미칼 필터는 생산라인에 따라 선택적으로 적용되나 설치 장소의 화재안전성 확보를 위해 보다 높은 난연성의 제품을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

FAB 상부실 바닥의 경우 전체 바닥면적 대비 약 76%가 System Ceiling(바닥판넬)으로 구성되어 있으며, 나머지 24%가 FFU로 구성되어 있다. <표 33> ~ <표 35>에 따라 FFU 및 System Ceiling이 설치되는 바닥의 가연물 분포를 고려한 단위면적당 평균 발열량은 9.7MJ/m^2 로 산출되었다. 다만, 라운드형 필터가 있는 경우에는 평균 발열량이 증가할 것으로 예상된다. [그림 39]는 연소시험에 사용된 시료의 시험 전후를 나타낸 것이다.

[그림 39(a), (a-1)]는 주름형 필터 연소시험 모습으로 평균착화시간은 11초로 최대 열방출율은 33.4 kw로 나타났다. [그림 39(b), (b-1)]는 케미칼 필터로 평균착화시간은 182초, 최대 열방출율은 177.95 kw로 나타났다. [그림 39(c), (c-1)]는 팬 커버로 평균착화시간 20초, 최대 열방출율은 2.4 kw로 비교적 낮게 나타났다. [그림 39(d), (d-1)]는 FFU 전원콘센트로 평균착화시간은 22초, 최대 열방출율은 3.1 kw로 나타났다. [그림 39(e), (e-1)]는 FFU 전원콘센트커버로 평균착화시간은 17초, 최대 열방출율은 2.9 kw로 나타났다. [그림 39(f), (f-1)]는 회로기판(모터용)으로 평균착화시간은 76초, 최대 열방출율은 2.5 kw로 나타났다. [그림 39(g), (g-1)]는 FFU 전원선으로 평균착화시간은 15초, 최대 열방출율은 3.0 kw로 나타났다. [그림 39(h), (h-1)]는 케이블타이로 평균착화시간은 27초, 최대열방출율은 3.0 kw로 나타났다. [그림 39(i), (i-1)]는 전등 전원선으로 평균착화시간은 64초, 최대 열방출율은 3.5 kw로 나타났다. [그림 39(j), (j-1)]는 가요전선관으로 평균착화시간은 19초, 최대 열방출율은 2.0 kw로 나타났다. [그림 39(k), (k-1)]는 일반콘센트로 평균착화시간은 34초, 최대 열방출율은 11.65 kw로 나타났다.



(a) 필터(주름형) 시험 전



(a-1) 시험 후



(b) 케미칼 필터 시험 전



(b-1) 시험 후



(c) 팬커버 시험 전



(c-1) 시험 후



(d) FFU 전원콘센트 시험 전



(d-1) 시험 후



(e) FFU 전원콘센트 커버 시험 전



(e-1) 시험 후



(f) 회로기판(모터용) 시험 전



(f-1) 시험 후



(g) FFU 전원선 시험 전



(g-1) 시험 후



(h) 케이블타이 시험 전



(h-1) 시험 후



(i) 전등 전원선 시험 전



(i-1) 시험 후



(j) 가요 전선관 시험 전



(j-1) 시험 후



(k) 일반콘센트 시험 전



(k-1) 시험 후

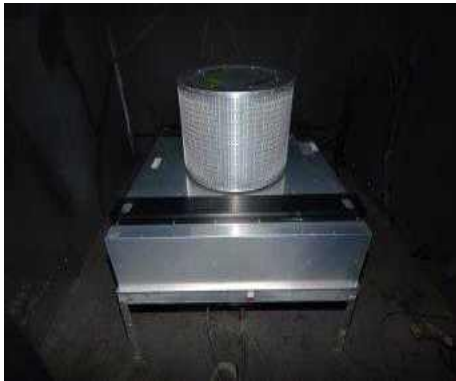
[그림 39] 연소시험 결과

3-2) FFU 완성품의 연소시험

가연물의 열방출율 및 발열량 측정이 가능한 IEEE 1202 케이블 연소 시험장치를 활용하여 FFU 완성품에 대한 연소시험을 실시하였다.

[그림 40(a)]은 IEEE 1202 케이블 연소시험장치에 FFU 완성품 시험체를 설치한 모습이며 [그림 40(b)]은 시험체에 20 kw 리본가스버너를 이

용하여 점화 하는 모습이다. [그림 40(c)]과 같이 약 6분 경과이후부터
필터의 연소가 급격히 진행되었다. [그림 40(d)]은 시험을 종료한 이후
시험체의 탄화 모습이다.



(a) 시험체 설치



(b) 리본가스버너 작동



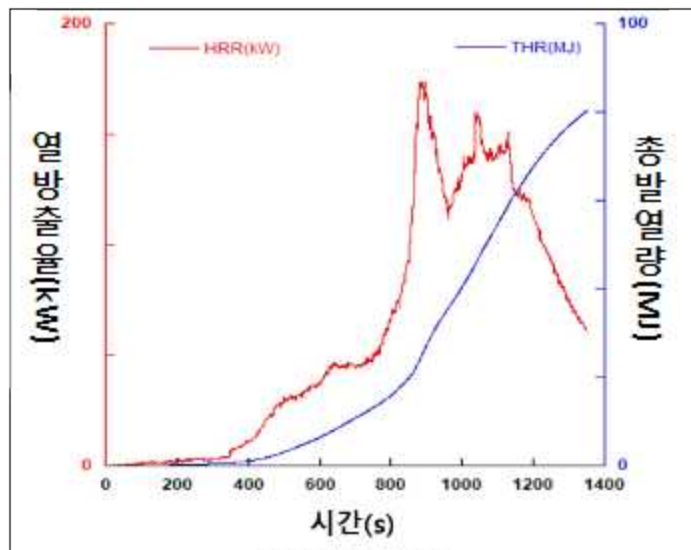
(c) 연소 장면



(d) 시험종료 후

[그림 40] FFU 완성품의 연소시험 장면

[그림 41]에서 왼쪽 세로축은 FFU 완성품의 열방출율(HRR)을 나타내며, 오른쪽 세로축은 총발열량(THR)을 나타낸다.



[그림 41] FFU 완성품의 열방출율 및 총 발열량

측정결과 FFU 완성품의 열방출율은 최고 170 kW로 측정되었고, 총 발열량은 약 80 MJ이 발생하였다. 이 결과는 IEEE 1202에 따른 콘칼로리미터 시험장치를 이용한 연소시험에서 측정된 FFU 구성품 발열량의 합보다 다소 높게 나타났다. 이는 하부에서 20분 이상 연소시험을 위해 임의적으로 공급되는 20 kW의 열원으로 하부 필터 등의 열분해로 연기가 지속적으로 발생하면서 시험장치에서 측정되는 산소, 이산화탄소 및 일산화탄소의 변화로 인한 것으로 판단된다.

3-3) FFU 착화실험 결과

FFU의 1차 착화실험은 [그림 42]와 같이 모터와 연결되는 회로기판에 알코올 함침솜과 니크롬선을 설치하고 시험을 실시하였으며 FFU를 가동한 상태에서 니크롬선에 약 90 W의 전원을 공급하였다.

[그림 42(a)]는 회로기판에 함침솜과 니크롬선을 설치하는 모습이며, [그림 42(b)]는 착화를 좀 더 쉽게 하기위해 니크롬선 위에 함침솜을 덮은 모습이다. [그림 42(c)]는 니크롬선을 설치하고 기판 덮개를 설치한 모습이다. [그림 42(d)]는 설치 완료 후의 FFU 전체 모습이며, [그림 42(e)]는 실험결과를 측정하는 기기의 모습이다. [그림 42(f)]는 알코올 함침솜의 화염에 기판이 탄화된 흔적을 나타내고 있다.



(a) 회로기판 함침솜



(b) 니크롬선설치



(c) 기판덮개설치모습



(d) 설치이후 모습



(e) 측정기기

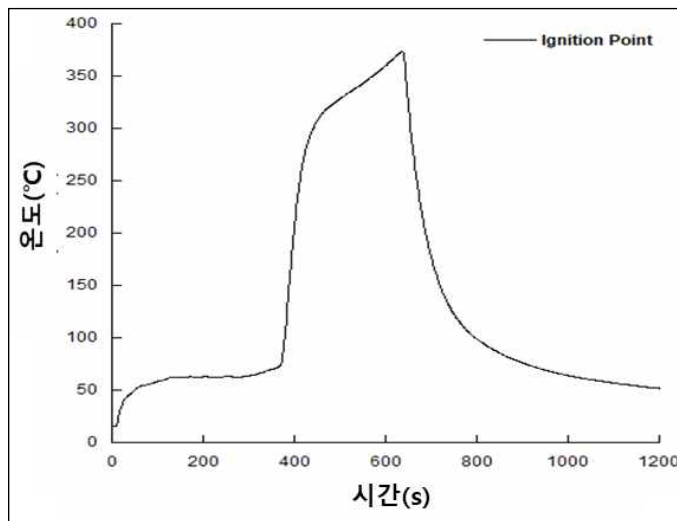


(f) 기판탄화흔적

[그림 42] FFU 착화실험 장면(1차)

시험 시작과 동시에 [그림43]과 같이 니크롬선에서 발생하는 열로 인해 모터 내부의 온도가 서서히 상승하기 시작하였고, 실험 경과 후 6분 시점에 온도가 급증한 것으로 보아 알코올 함침솜의 화염에 의해 회로기판이 발화한 것으로 판단된다. 약 6분 18초 후 회로가 단락되면서 팬의 회전이 정지하였다. 팬의 정지 후 FFU 내부로 공기의 공급이 저하되며 화염의 온도는 떨어지기 시작하였으며 금속재질의 모터 덮개로 인해

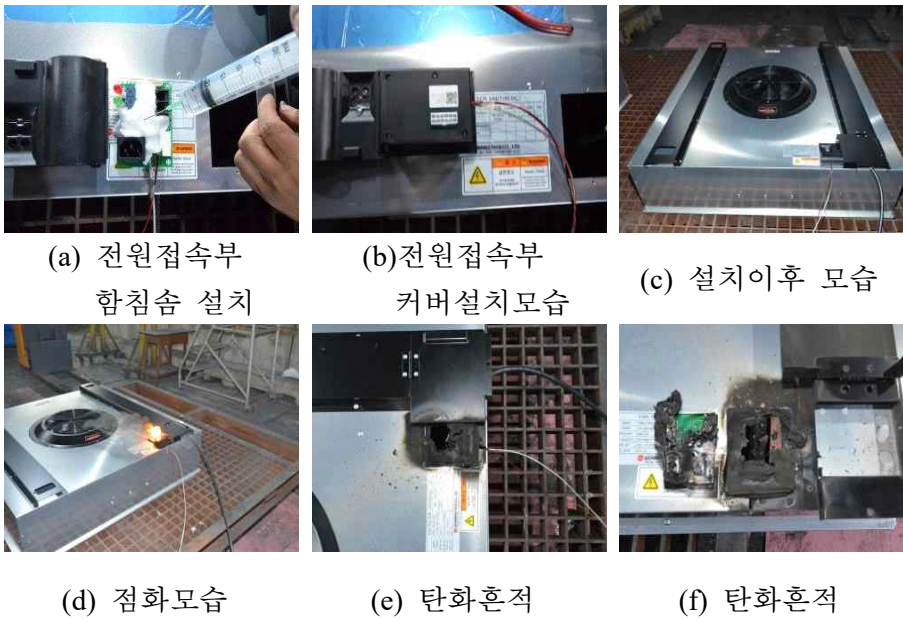
FFU 외부로 화염이 확산되지 않고 서서히 소멸되어 전원 인가 20분 경과 시점에 실험을 종료하였다. 실험에서 회로기판 부근의 온도는 착화 이후 급격히 상승하여 약 400 ℃까지 상승하였다.



[그림 43] 모터 연결부 및 필터 상부 온도 (1차 착화실험)

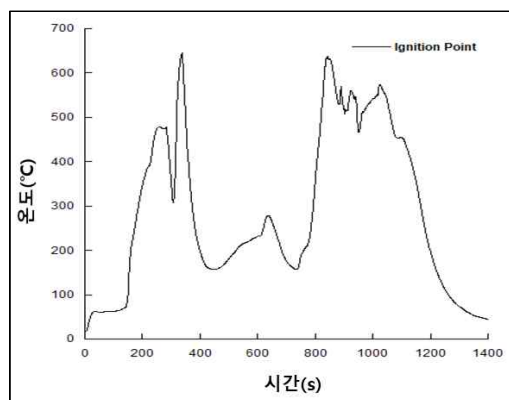
2차 FFU 착화실험은 [그림 44]와 같이 모터 제어부 회로기판 대신 FFU 전원 접속부 케이블 단자에 니크롬선과 함침솜을 감고 전기 인가 후 약 3분 시점에 전원 접속부에서 발화하였다.

[그림 44(a)]는 FFU 모터 전원 접속부 케이블 단자대에 알코올 함침솜과 니크롬선을 설치하는 모습이다. [그림 44(b),(c)]는 전원접속부에 니크롬선을 설치완료하고 덮개를 설치한 후 모습이다. [그림 44(d)]는 니크롬선에 약 90 W의 전원을 공급한 후 점화되어 불꽃이 일어나는 모습이며, [그림 44(e),(f)]는 연소이후 탄화흔적이 남아 있는 모습이다.



[그림 44] FFU 착화실험 장면(2차)

[그림 45]와 같이 화염으로 인한 온도 상승과 함께 12분 36초 경과시점에 전원선이 단락되며 팬의 회전이 정지하였다. 전원 접속부의 화재시 온도는 약 650℃까지 상승하였으며 화염이 소멸되어 실험 시작 22분 경과 시점에 실험을 종료하였다.



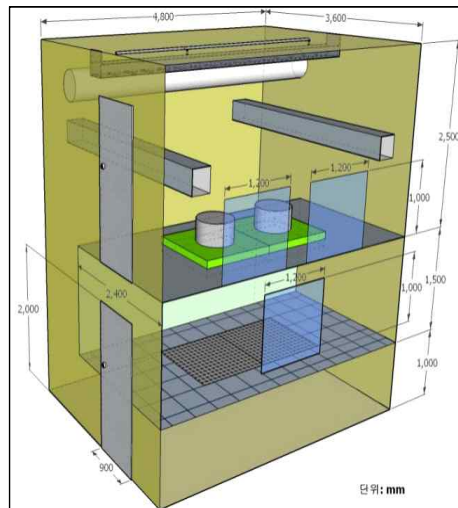
[그림 45] 전원 접속부 온도(2차 착화실험)

라. 클린룸 화재실증실험 방법 및 결과

FAB 구조물과 유사하게 만든 모형실을 이용한 실 규모 실증실험을 통해 FAB 상부실에서 화재 발생 시 가연물의 연소성상과 화재확산, 열기류 분포 등을 관찰하여 화재위험성을 평가하고 개선방안 마련을 위한 실험 자료를 제공하고자 한다. 아울러, FAB 상부실 화재로 인한 온도상승 영향을 평가하여 바닥재의 구조적 안전성을 평가한다.

1) 모형화재실의 구조

화재실증실험용 모형화재실은 ○○전자(주) FAB의 현장조사 및 도면 등을 통하여 설계 및 제작하였다. [그림 46]과 같이 모형화재실은 3개의 실(상부실, 클린룸, 하부실)로 구획하였고 크기는 3.6m(W) × 4.8m(L) × 5.0m(H)로 제작하였다. 각 구획실의 높이는 상부실 2.5m, 클린룸 1.5m, 하부실 1m로 선정하였는데 화재안전성 평가와 직접적으로 관련이 있는 상부실의 경우 실제와 유사하게 제작하였고 그 외 클린룸과 하부실의 경우 일정비율로 축소하여 제작하였다.



[그림 46] 모형화재실 개략도

클린룸에는 실제 현장과 동일한 다공성바닥재를 사용하여 개구율이 22%가 되도록 설치하였고, 상부실에는 현장에 설치된 FFU의 수량과 비율을 반영해 FFU 2대를 설치하여 공기가 순환되도록 제작하였다. 모형 화재실은 실제 생산라인의 공기 유동과 유사하도록 FAB 상부실 ⇒ 클린룸 ⇒ FAB 하부실 ⇒ Plenum ⇒ FAB 상부실로 공기가 순환되는 구조로 제작하였다. FFU 가동 시 모형실 내부의 공기유속은 공기흡입부인 필터주변이 1.23 m/s, 직하부인 필터 하부 표면에서 0.66 m/s로 측정되었으며 하부실의 공기흡입관 주위에서는 0.18~0.26 m/s로 나타났다.

한편 상부실에는 현장조사 결과를 반영하여 케이블 트레이와 덕트를 설치하였고, 하부실에는 공기흡입형 화재감지기인 VESDA를 설치하였다. 또한 상부실에 스프링클러설비를 적용 시 작동여부와 효용성을 관찰하고자 FAB 상부실 및 클린룸 천장에 2.4m 간격으로 스프링클러 헤드(68℃ 유리별브 조기반응형/하향식)를 2개 배치하고 배관을 구성하였다. 스프링클러 헤드 개방 시 소화수가 방수되도록 하였으며 방수압 및 유량제어를 위해 배관에는 압력계와 유량계를 설치하였다. [그림 49]는 모형화재실 실물 및 계측기를 나타낸 사진이다.

[그림 47(a)]은 모형실의 전면이며, [그림 47(b)]은 모형실 전체 조감도이다. 모형실에는 [그림 47(c)]과 같이 내부를 관찰할 수 있는 창을 설치하였으며, [그림 47(d)]과 같이 상부에 압력센서를 설치하여 모형실 내부 압력변화를 관찰하였다. [그림 47(e)~ (i)]은 화재를 조기에 감지할 수 있는 공기흡입형 감지기를 설치하고 클린룸 상부와 동일하게 FFU 및 덕트 트레이를 설치하였다.



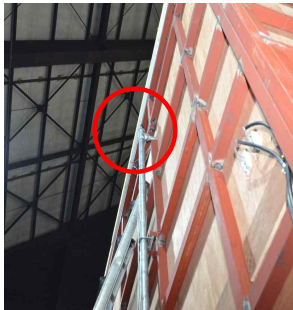
(a) 모형실 전면



(b) 모형실 조감도



(c) 내부 관찰창



(d) 압력센서



(e) 유량계



(f) 공기흡입형 감지기



(g) 상부실 FFU



(h) 덕트 및 트레이



(i) 클린룸



(j) 하부실



(k) 공기흡입관



(l) 데이터 수집장치

[그림 47] 실증실험용 모형화재실 및 계측기

2) 공기흡입형 화재감지기 설치

공기흡입형 화재감지기(VESDA)는 FAB 상부실이나 클린룸에서 화재 발생 시 화재를 조기에 감지하기 위해 설치된 고성능의 화재감지기로 화재실증실험 시 연기발생에 의한 화재감지특성을 관찰하고자 현장설치 사양과 동일한 기종의 VESDA 감지기(공기흡입형 아날로그식, VLP)를 FAB 하부실에 설치하였다. 공기흡입관은 [그림 48]과 같이 FAB 하부실 상단에 설치하고 흡입구(Sampling hole)를 통해 연기를 감지하도록 하였다. 공기흡입형 감지기의 4단계 경보수준(Alert, Action, Fire 1, Fire 2)에 도달하는 시간을 측정하기 위해 현장과 유사한 농도값으로 설정하였다. 각 단계별 감지농도 설정값은 <표 38>과 같다.



(a) 공기흡입형감지기 본체



(b) 하부실 설치모습

[그림 48] 공기흡입형 화재감지기 설치모습

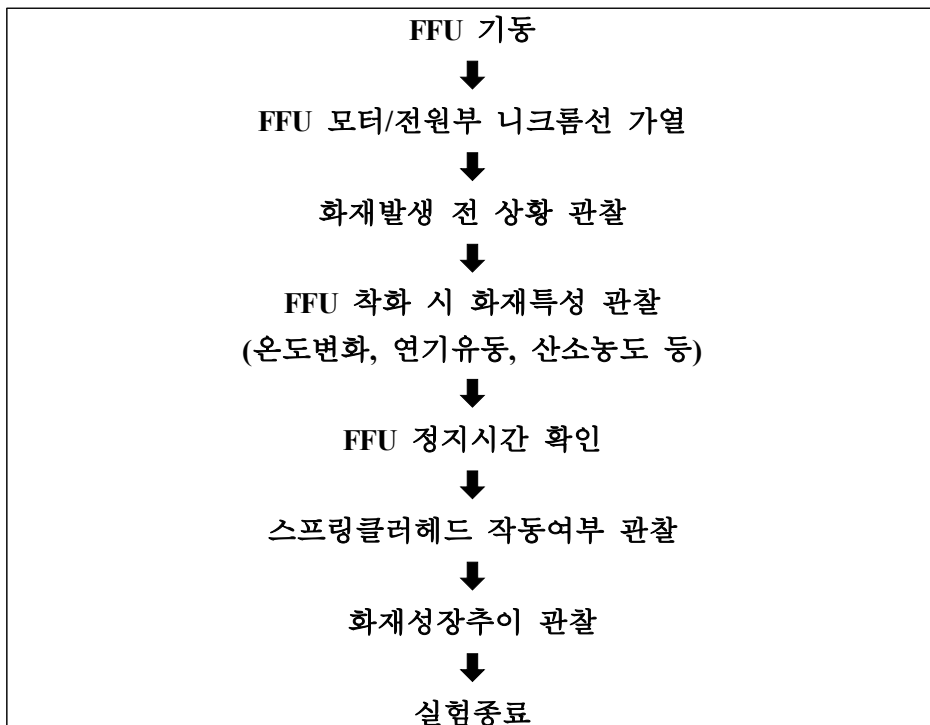
<표 38> VESDA 설치사양

감지농도 설정값(%/m)	Alert	0.016
	Action	0.033
	Fire 1	0.050
	Fire 2	0.250
흡입관 길이(m)	11	
홀 직경(mm)	3	
홀 간격(mm) 및 개수(ca)	800 ~ 1,100, 10	

3) 클린룸 화재실증실험 절차

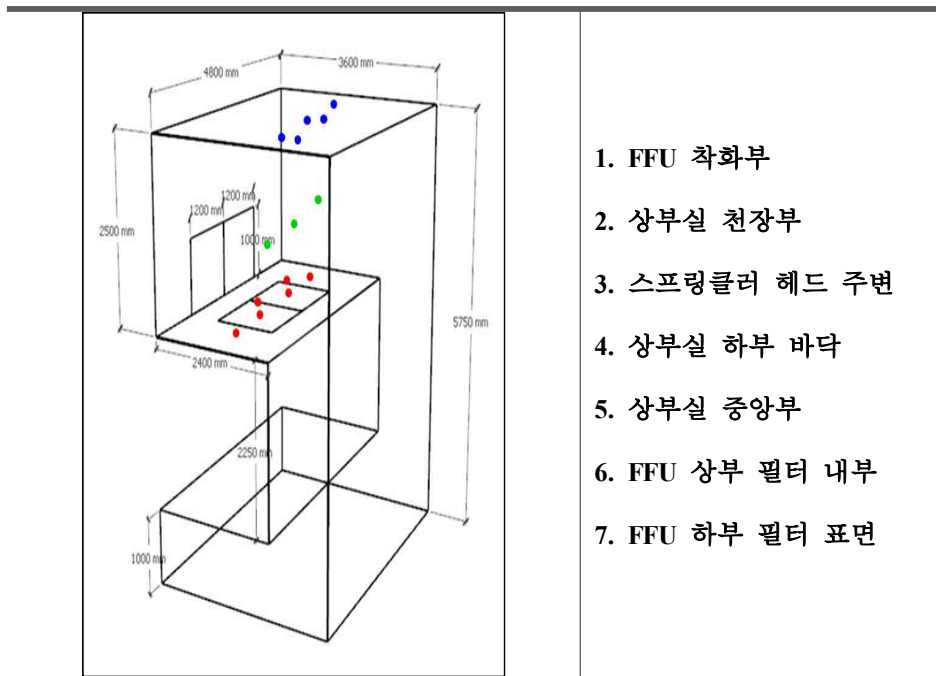
화재실증실험은 FFU를 기동하여 1분 가량 안정화시킨 후 2대의 FFU 중 1대의 FFU 모터 회로기판/전원부에 설치한 점화용 니크롬선에 전원을 인가함과 동시에 모든 계측을 시작하였다. FAB 상부실 화재실증실험 수행 절차는 [그림 49]와 같다.

니크롬선 가열 초기에는 훈소 현상 등이 발생되어 연기가 다량 발생될 수 있으므로 화재초기 상황을 관찰하였다. 또한 모터부 또는 전원접속부 연소에 따른 FFU의 정지시간 확인, 화재발생 시 화염확산에 의한 FAB 상부실 천장에 설치된 스프링클러헤드의 작동여부를 관찰하였다. 화재발생 종료시점은 온도변화 추이 등을 관찰하여 실험종료 여부를 판단하였다.



[그림 49] 클린룸 화재실증실험 절차

화재실증실험에서는 각 부분의 화염확산 등을 평가하기 위하여 [그림 50]과 같이 열화상카메라, 캠코더, 단독경보형감지기, 열전대, 열유속계 등을 설치하고 실제 화재 시에 클린룸의 거주성을 평가하기 위해 클린룸 천장부에 산소센서를 설치하여 산소농도의 변화를 관찰하였다. 또한, FAB 상부실 바닥의 구조적 안전성을 평가하기 위하여 실에서 발생하는 화재로 인한 영향성을 평가하였다. 화재안전성평가를 통해 화염확산, 클린룸 내 거주환경, 스프링클러헤드 작동여부를 관찰하였고, 각 항목별 주요 관찰사항은 <표 34>와 같다.



[그림 50] 온도센서 위치 개략도

<표 39> 화재실증실험용 계측기의 종류 및 관찰사항

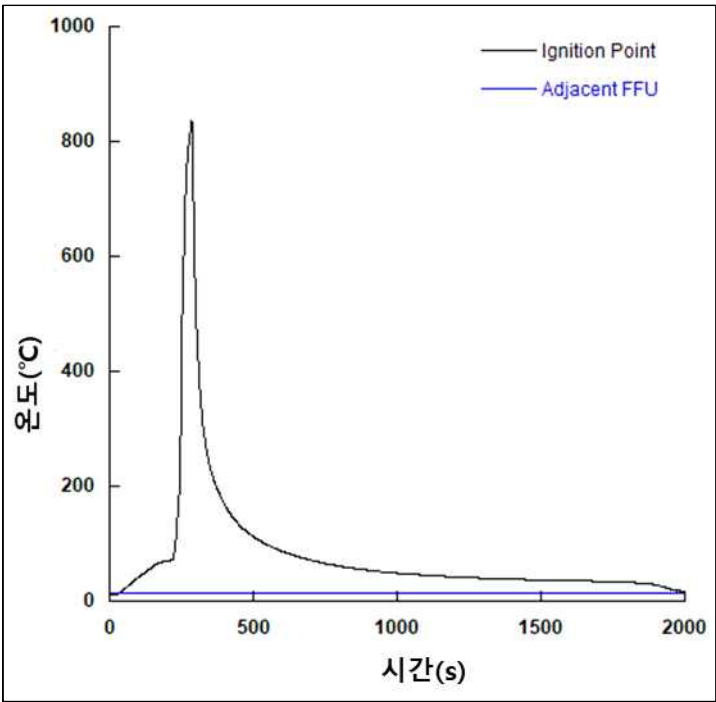
항 목	계측기	관 찰 사 항
화염확산	열화상카메라	FAB 상부실에 설치하여 FFU 주변 온도 변화 및 연기거동 관찰
	캠코더	FAB 상부실에 설치하여 모터부/전원접속부의 발화여부 관찰
	열전대	FFU 모터 및 전원부, 상부실 등 각 구역에 열전대를 설치하여 FFU 화재 시 온도변화 관찰
	단독경보형 감지기	FAB 상부실 천장에 설치하여 FFU 발화 시 연기확산 여부 관찰
	열유속계	FFU 화재발생 시 원거리 착화 가능성 평가를 위해 열유속 측정
거주성	산소센서	천장부에 설치하여 산소농도 변화 관찰
스프링클러헤드 작동여부	압력계	헤드 작동 시 배관 내 압력변화 관찰
	유량계	헤드 작동 시 배관 내 유량변화 관찰

4) 클린룸 화재실증 실험결과

4-1) FFU 온도변화 및 연소특성

FAB 모형화재실을 이용한 두 차례 화재실증실험 중 FFU 내부 모터부에 화재가 발생한 경우 발화부 및 FFU 인근의 표면 온도는 [그림 51]과 같이 나타났다. 그래프에서 니크롬선의 가열시작 후 약 3분 시점에 회로기판의 발화로 모터 내부의 온도가 가파르게 증가하기 시작한 것으로 판단된다. 모터 내부의 온도는 약 810℃까지 상승하였고 최고온도에 도달한 이후 급속히 하강하였다. 외부로 화염은 관찰되지 않았다. FFU 모터의 정지는 약 4분 경과 시점에 나타났고 이는 모터 제어용 회로기판이 화염에 의해 손상되어 팬의 작동이 정지한 것으로 판단된다. 또한 FFU 외부로 화염이 확산되지 않아 발화한 FFU에 인접해있는 다른 FFU

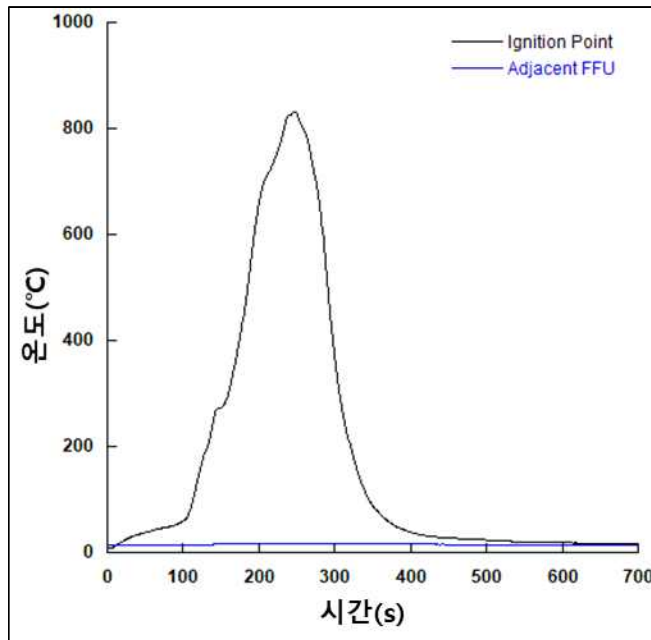
의 표면 온도는 그래프에서 보듯이 변화가 거의 없어 FFU 발화에 의한 열이 거의 전달되지 않은 것으로 판단된다. 온도 하강시점 이후 온도변화를 약 20분 동안 관찰하였으나 재발화가 발생하지 않고 지속적으로 온도가 감소하여 실험을 종료하였다.



[그림 51] FFU 내부온도 및 FFU 인근 표면온도(1차)

2차 실증실험에서 발화지점인 전원접속부의 온도는 [그림 52]와 같이 전원 인가 약 2분 시점부터 급격히 증가하기 시작하였으며 약 830°C 까지 온도가 상승하였다. 1차 실험과 달리 2차 실험에서는 FFU의 작동이 멈추지 않았다. 전원접속부는 FFU 몸체 외부와 연결되어 있으므로 공기가 유입되어 화염이 수분 간 지속된 후 소멸된 것으로 판단된다. 또한 FFU 인근의 온도는 1차 실험에서와 같이 실험기간 동안 계속 상온을 유지하였으며 화재로 인해 발생한 연소가스와 연기는 대부분 FFU 팬에 의해 아래쪽의 클린룸 방향으로 이동하였고, 이 중 대부분은 FFU

상하부에 장착된 케미칼 필터와 하부필터에서 걸러져 클린룸에 유입되는 연기는 없는 것으로 나타났다. 2차 실험에서 FFU에 설치된 전원접속부는 플라스틱 재질로 화재 시 상당히 높은 온도까지 상승하였다. FFU 전원접속부의 경우 산소공급이 원활하여 1차 실험보다 상대적으로 온도가 높게 상승한 것으로 판단된다. FAB 상부실의 안전성 향상 측면을 고려해 볼 때 전원접속부의 재질은 불연성 또는 난연성이 높은 재질로 변경하면 위험을 경감할 수 있을 것으로 사료된다.



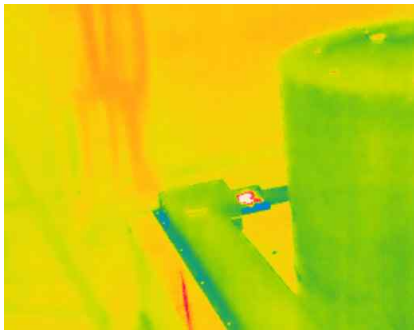
[그림 52] FFU 내부온도 및 FFU 인근 표면온도(2차)

FFU 화재 시 모터 외부와 전원접속부 주변의 2차원 온도변화를 살펴보기 위해 열화상 카메라로 실험장면을 촬영하였다. FFU 모터 내부에서 화재가 발생한 1차 실험에서 주변의 온도변화가 발생하지 않아 정상적으로 측정되지 않았다. 전원접속부에서 화재를 발생시킨 2차 실험에서는 [그림 53]과 같이 전원접속부에서 활발히 연소하는 모습을 관찰할

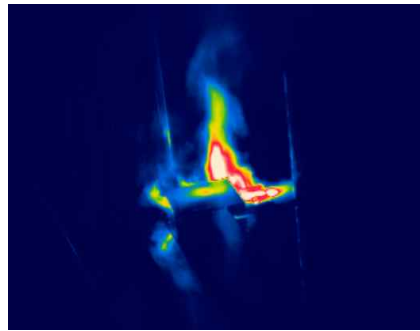
수 있었다.

각 실험을 통하여 FAB 상부실에서 발생할 수 있는 발화지점에 인위적인 점화원(니크롬선)과 가연물(숨+알콜)을 공급하여 화염확산 여부를 관찰하였으나, 온도변화 및 열화상카메라에 측정된 데이터 분석 결과 화염확산은 발생하지 않았다.

[그림 53(a)]은 전원접속부에서 연소가 시작되는 점이 나타나고, [그림 53(b)]은 화재 최성기지만 주변부로 화염이 확산되지 않음이 확인되고 있는 열화상카메라 측정 모습이다.



(a) 화재 발생기

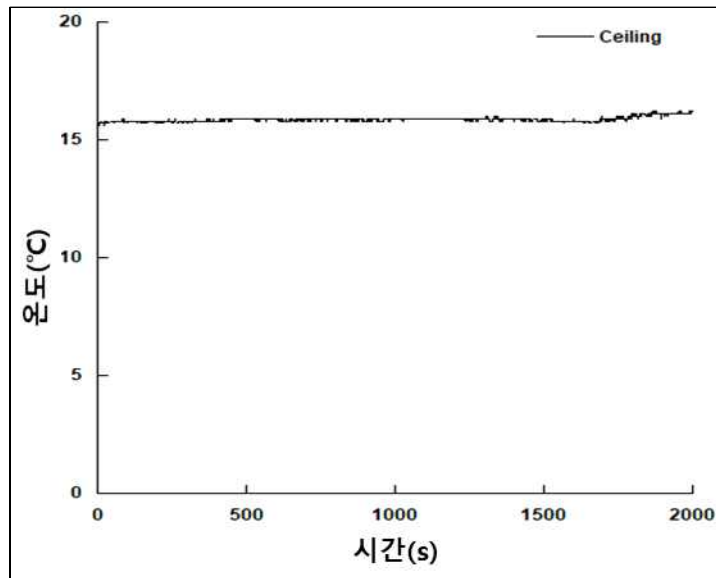


(b) 화재 최성기

[그림 53] FFU 전원접속부 화재 시 열화상 이미지(2차 실험)

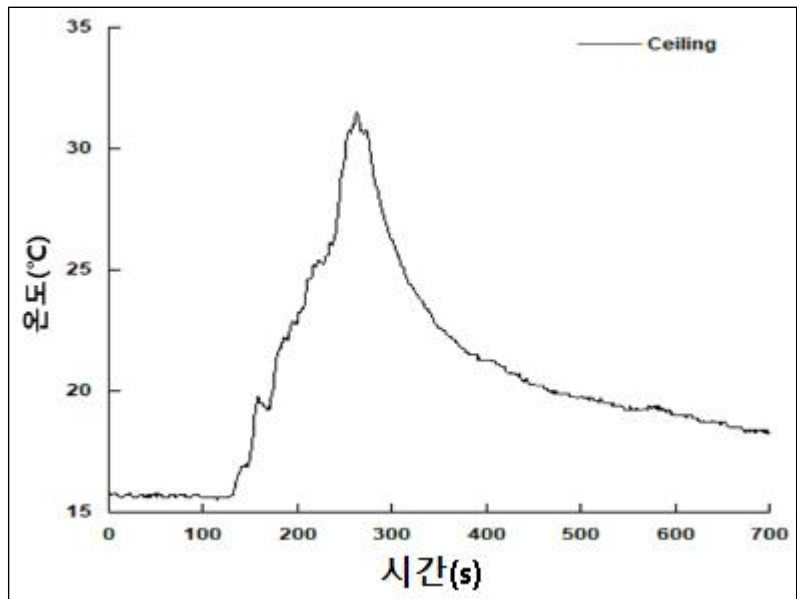
4-2) FAB 상부실 및 FFU 하부 필터 온도

두 차례에 걸친 FFU 화재실증실험에서 FFU가 설치된 상부실의 천장 기류의 온도는 [그림 54]에서 1차 실험에서는 실험기간 동안 변동 없이 상온을 유지하였으며 천장에 설치된 스프링클러 헤드가 작동할 수 있는 열기류가 형성되지 않아 스프링클러 헤드는 작동하지 않았다.



[그림 54] 천장 주위온도(1차)

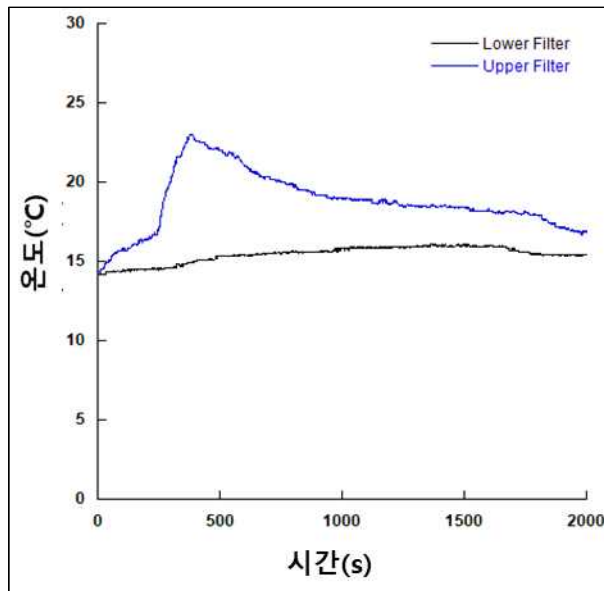
2차 실험에서는 [그림 55]와 같이 FFU 가동 중에는 천장 상부 온도가 상승하지 않았으나, FFU의 가동이 중단된 이후에는 온도가 약 33℃까지 상승하였다. 천장온도가 스프링클러 헤드의 표시온도에 도달하지 못하여 헤드는 개방되지 않았다.



[그림 55] 천장 주위온도(2차)

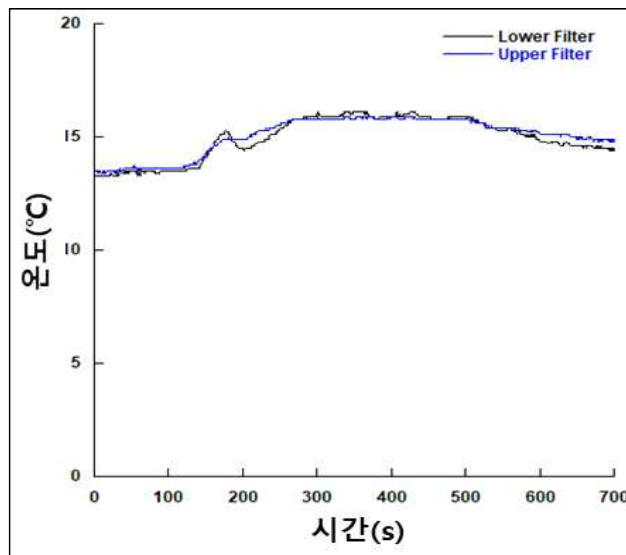
현장 조건하에서는 FFU 1대가 가동이 중단되더라도 주변의 FFU의 작동으로 연기 및 연소가스가 빠른 속도로 인근의 다른 FFU 팬 속으로 빨려 들어가 상부실 천장의 온도는 상승하지 않은 것으로 판단된다. 아울러, 스프링클러 헤드의 경우 설치기준에 따라 천장면에서 30 cm 이내로 설치하여야 하나 실험결과를 볼 때 스프링클러 헤드를 개방시킬 정도의 열기류 형성이 어려운 것으로 사료된다.

또한 [그림 56]~[그림 57]에서 FFU 하부와 상부에 설치되는 필터 온도를 보면 화재로 인한 온도 상승이 적어 FFU 발화에 의한 화재는 하부의 클린룸 방향으로 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.



[그림 56] FFU 하부 및 상부 필터 온도(1차)

[그림 57]은 2차 연소실험 시 FFU 하부 및 상부 필터 온도를 타나내는 그래프이며, 하부와 상부 모두 온도변화가 크지 않음을 알 수 있다.



[그림 57] FFU 하부 및 상부 필터 온도(2차)

4-3) FFU 정지시간

화재실증실험 1차에서 FFU는 점화 후 4분 26초에 정지하였으나 2차에서는 지속적인 전원공급으로 FFU는 정지하지 않았다. 1차 실험에서 니크롬선에 전원인가 후 모터 회로부에 화염이 발생하면서 회로의 손상이나 단락이 발생하여 작동이 멈춘 것으로 판단된다. 전원접속부 화재시 전원공급이 지속적으로 이루어져 FFU가 정지하지 않았으므로 이에 대한 모니터링이 요구된다.

4-4) 열유속 영향성 분석

화염전파는 일반적으로 주변온도 상승에 의한 대류현상과 원격발화를 시킬 수 있는 복사에 의해 발생할 수 있다. 앞선 실험결과 분석에서 FAB 상부실에 인위적이고 가혹한 발화조건을 공급하였으나 온도상승은 발생하지 않았다. 복사에 의한 화염전파 위험성을 분석하기 위해 발화지점과 1m 이격하여 열유속을 측정하였다. 화재공학적으로 분석할 때 화재공학 저서 ‘Principles of Fire Behavior’와 SFPE Handbook SFPE Handbook에 따르면 일반적인 가연물을 발화시키기 위해서는 임계열유속 이상을 일정시간 공급하여야 한다.[56][57] <표 40>은 가연물을 발화시킬 수 있는 대표적 임계열유속을 정리한 것이다.

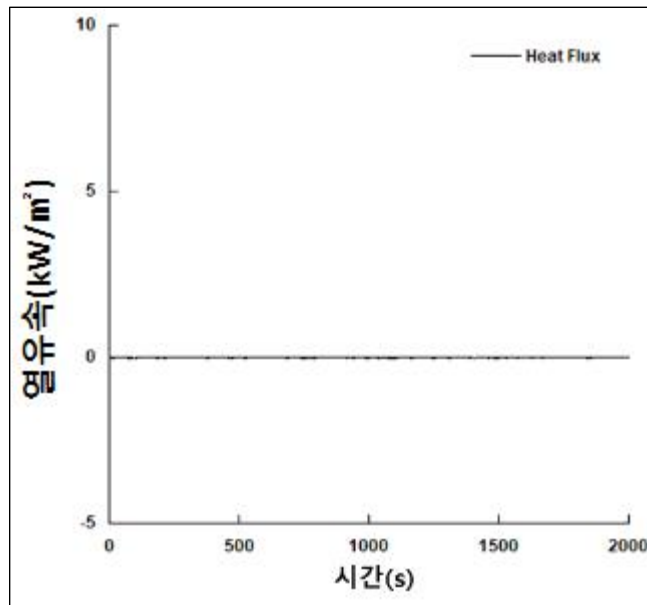
폴리메틸메타크릴레이트(PMMA)는 플라스틱의 일종으로 투명하고 내구성이 높다. 가볍고 유연하며 전기절연성이 우수하다. 내열성이 뛰어나며 고온에서도 변형이 적다. 폴리염화비닐(PVC)은 플라스틱의 일종으로 내구성이 뛰어나며 오래 사용할 수 있다. 방수성이 우수하며 습기가 많은 환경에서도 사용 가능하다. 가격이 저렴하고 가공이 쉽다. 폴리우레탄폼 리지드 및 플렉시블은 단열성이 우수하며 에너지 절약에 도움이 되고 방음성이 뛰어나며 소음을 차단하는 데 효과적이다. 레드우드유독가스를 발생시키는 등 고유한 특성을 가지고 있으며, 화재 발생 시에는 적극적인 대처가 필요하다.

각 가연물의 임계열유속은 주변 환경의 온도와 습도 등에 따라 달라질 수 있으며, 측정방법에 따라 값이 달라질 수 있다.

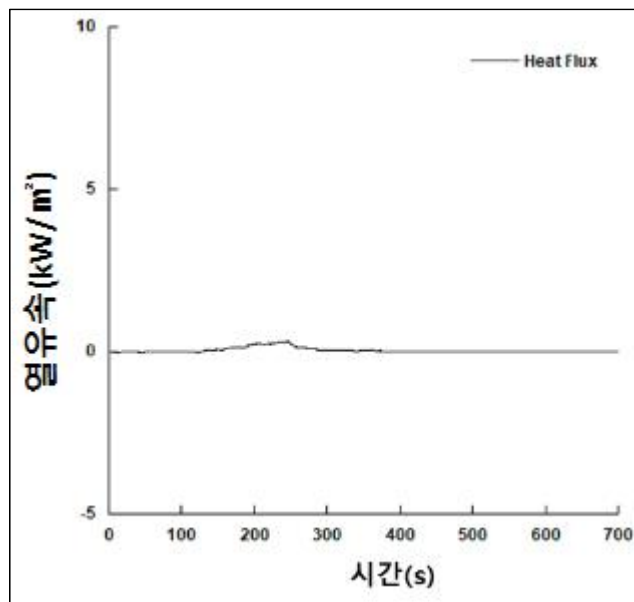
<표 40> 가연물의 대표적 임계열유속

가연물	임계열유속(kW/m ²)
폴리메틸메타크릴레이트 (PMMA)	약 10 ~ 20
폴리염화비닐 (PVC)	약 5 ~ 10
폴리우레탄폼 리지드 (Polyurethane foam, rigid)	약 1 ~ 2
폴리우레탄폼 플렉시블 (Polyurethane foam, flexible)	약 0.5 ~ 1
레드우드 (Redwood)	약 0.5 ~ 1

[그림 58(a)]에서 볼 수 있듯이 1차 실험에서 열유속은 변화하지 않았다. 2차 실험에서는 [그림 58(b)]과 같이 전원 접속부에서의 발생하는 순간 최대 열유속은 약 0.5 kW/m²로 측정되었으며 지속적으로 측정되지 않았다. 실험결과를 분석해 볼 때, 모터부 또는 전원접속부의 화재로 인한 주변가연물의 원격발화 가능성은 매우 낮을 것으로 판단된다.



(a) 1차



(b) 2차

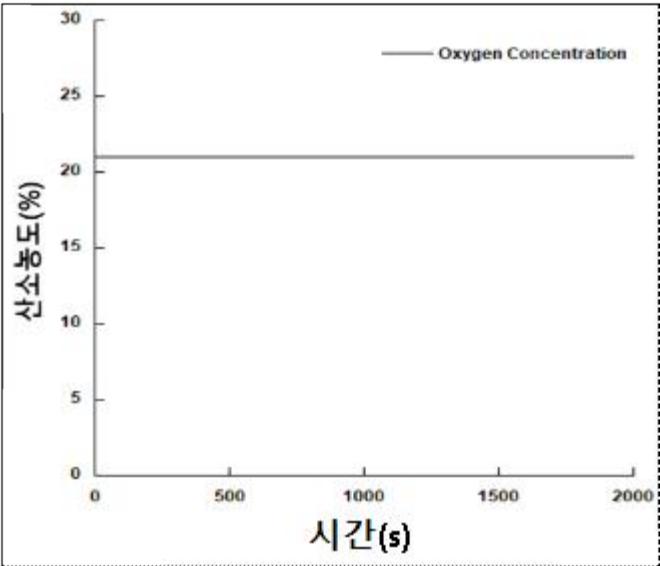
[그림 58] 임계열유속 변화

4-5) 클린룸 산소농도 변화 및 하부실 연기감지 여부

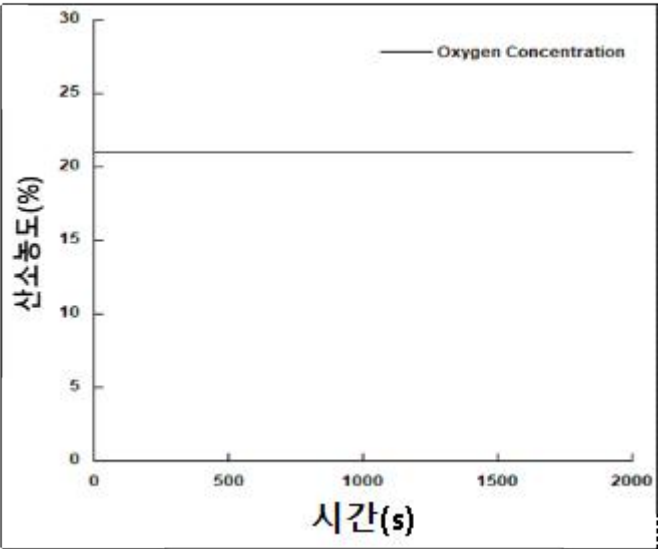
모형화재실 상부실에 설치된 산소센서를 이용하여 FFU 화재 시 연기의 영향을 산소농도의 변화를 통하여 관찰하였다. 실험결과 산소농도는 [그림 61]에서 보듯이 실험 시작 시 약 20.9%인 농도가 일정하게 유지하였으며, 소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준의 인명안전기준 이상의 농도를 나타냈다. 이는 모형실 상부실 내 공기유동이 지속적으로 발생되어, 대기 중에 상시 존재하는 산소의 농도 변화는 거의 없음을 나타낸다.

FAB 하부실에는 화재 시 발생하는 연기를 감지하기 위해 공기흡입형 화재감지기(VESDA)가 설치되어 있는데, 두 차례의 화재실험에서 FFU의 동작 중 공기흡입형 감지기의 연기농도는 0.00%를 유지하며 연기가 감지되지 않았다. 이는 FFU에서 발생한 연기가 FFU 상부에 설치된 케미칼 필터와 하부 필터에서 걸러져 클린룸과 하부실 쪽으로 유입되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 FFU 내부에서 화재발생 시 클린룸에서는 화재 여부를 쉽게 알 수 없으므로 FFU의 작동정지 여부를 곧바로 모니터링 할 수 있는 시스템의 지원이 필요할 것으로 사료된다.

[그림 59(a).(b)]는 1차, 2차 실험 시 모형상부실에 설치된 산소농도센서 수치를 나타내고 있으며, 20.9%가 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다.



(a) 1차



(b) 2차

[그림 59] 산소농도 변화

마. 결과의 고찰

FAB 상부실의 발화원이 될 수 있는 물질은 상부실에 가장 많이 설치되어 있는 FFU로 판단된다. FFU는 전기장치로서 모터를 구동하여 팬을 회전시키는 공기정화장치이며 24시간 내내 가동되기 때문에 항상 모터부의 과열이나 누전에 의한 발화 가능성이 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 착화실험 시 FFU의 구동부나 전원 접속부에 인위적으로 열을 가하여 발화시키고, 팬이 동작하는 실제와 같은 상태에서 FFU의 연소에 따른 화재확산이나 연기 유동 등을 관찰하였다.

한편 상부실의 또 다른 발화 가능성이 있는 물질로는 FFU 등에 전력을 공급하는 케이블이 있는데, 여기에 사용된 케이블은 일정한 불연성 및 난연성이 검증된 케이블로서 저전압(600V 이하)용이므로 고전압 아크에 의한 발화 위험성은 없는 것으로 판단되므로 발화원의 가능성은 낮은 것으로 사료된다. 다만 주변에 발생한 화재로부터 화염이 전파되는 경우 화염확산 방지를 위해 난연성(자기 소화성)이 있는 케이블이 요구된다.

클린룸의 반자 위 공간인 상부실은 불연재로 구축되어 있는데 NFPA 13(2019년 판)의 9.5.1.13절에 따르면 단위 면적당 화재하중이 11.4 MJ/m^2 이하인 단열재를 쓰는 경우 스프링클러 설비를 완화해 주고 있다. 이는 구축된 공간의 가연물의 화재하중이 일정 크기 이하면 화재가 발생한 경우에도 연소 확대 가능성이 낮은 것으로 판단하는 것으로 이해할 수 있다.

이 연구에서는 상부실의 주요 가연물인 FFU와 전원선, 제어선, 가요전선관 등의 화재하중인 발열량을 콘칼로리미터 장치를 이용해 직접 측정하였다. ○○전자 FAB 상부실의 도면 검토를 통해 FAB 상부실 바닥면적 대비 FFU가 차지하는 비율을 산정할 수 있다. FFU의 단위 면적당 발열량을 적용하여 FAB 상부실의 화재하중을 산출할 수 있을 것으로 판단된다.

앞서 설명한 바와 같이 FAB 상부실 바닥의 경우 전체 바닥면적 대비 약 76%가 System Ceiling으로 구성되어 있으며, 나머지 24%가 FFU로 구성되어 있다. 앞선 단위 가연물 발열량 측정을 통해 가연물 분포를 고려한 FFU 및 System Ceiling(바닥판넬)이 설치되는 단위 면적당 평균 발열량은 <표 41>과 같이 9.7 MJ/m²로(총 발열량/대수 또는 면적) 산출되었다. 따라서 NFPA 13에서 권고하는 화재하중과의 비교를 통해 가연물량에 의한 화재 위험성 수준을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

<표 41> 단위면적당 총발열량

구분	대수 또는 면적	발열량	총발열량
FFU	2,400 대	28.30 MJ/대	67,920 MJ
시스템 실링	10,342.27 m ²	6.185 MJ/m ²	63,966.94 MJ
전체면적	13,610.80 m ²	-	131,886.94 MJ

또한 FAB 상부실의 발화원인 FFU는 여러 차례의 착화실험 및 연소 시험으로부터 상당한 크기의 외부 화원이 존재하지 않으면 연소가 어려운 제품으로 확인되었다. 실험은 실제로 발생이 가능한 화재 시나리오에 따라 모터부의 과열이나 전원 접속부의 발화로 인한 화재를 모사하여 실시하였는데, 두 차례의 실험 결과 FFU의 회로기관이나 전원선의 손상으로 팬의 작동이 정지할 때까지 연소가 진행되었으며 1차 실험의 경우 화염은 외부로 분출되지 않고 연기만 발생하였다. 그러나 케이스 밖으로 발생한 연기는 상부의 반자 쪽으로 상승하지 못하고 강한 흡인력을 가지는 FFU 속으로 빨려 들어가는 현상을 보였으며 팬으로 빨려 들어간 연기는 이중으로 설치된 필터에 의해 걸러져 클린룸에서는 연기가 관찰되지 않았다. 하부실에 설치한 공기흡입형 감지기에도 농도가

전혀 검출되지 않았다. 따라서 FFU에서 발화 시 발생한 화염은 주변으로 확대되지 않았으며 발생하는 연기도 FFU에 의해 자체적으로 정화되는 것으로 나타났다. 또한 FFU 화재 시 발화 부에서 1m 이격하여 설치한 열유속계(Heat flux meter)로 측정한 열유속은 거의 측정되지 않아 가연물을 발화시키기 위한 임계열유속 이상을 일정 시간 공급하지 못하는 것으로 분석되었다.

상기 결과를 고려해 볼 때 FAB 상부실의 화재 위험성은 높지 않은 것으로 판단된다. 오히려 공기 청정 기능의 특성상 FAB 상부실에서 화재 발생 시 클린룸에서는 화재 발생 여부를 즉시 알기가 쉽지 않으므로 FFU 작동정지/화재 시 이상 유무를 곧바로 알 수 있는 시스템이 필요할 것이다. 또한 만일에 발생할 수 있는 화재에 대비해 구성품의 화재하중을 최소화하는 것이 화재 안전성 확보를 위한 유용한 방안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

화재실증시험에서는 FFU의 모터부와 전원 접속부에 임의적인 가연물과 점화원을 이용하여 FFU를 발화시켰으나 화재 후 자체 소화되어 화재확산은 이루어지지 않았다. 이는 FFU가 금속제로 케이싱되어 있으며, 밀폐구조로 공기 유입이 원활하지 않아 화재 시 연소하기 어려운 구조인 것으로 사료된다. 아울러, 케이블의 경우 별도의 외부 열원에 의해 화재가 발생하지 않는 경우에는 발화위험은 낮은 것으로 판단된다.

화재 실증시험 결과 FAB 상부의 화재 위험성은 낮은 것으로 판단되나, 화재 안전성 향상을 위해 가능한 가연물이 양을 줄이고 화재를 확인할 수 있는 시스템이 필요하여 선행연구를 바탕으로 다음 사항을 보완하여 안전성이 제고되기를 제안한다.

- (1) FFU Cable 전원 차단(FFU 이상) 등의 문제가 있을 경우 PLC Monitoring을 통해 CCR Room에서 정확한 위치를 확인하여 방재센터에 즉시 전파할 수 있는 시스템을 구축한다. 이를 통해 신속한 대응이 가능해져 안전성을 높일 수 있다.
- (2) FAB 상부실 주요 위치에 CCTV를 설치하여 초기 감지를 한다.

(예: CCTV 사양에 따라 반경 50m 기준으로 설치)

이를 통해 위험 상황을 빠르게 파악하고 대처할 수 있다.

- (3) FFU 전원 케이블은 내화케이블 사용을 기본으로 한다.

이를 통해 내화케이블을 사용하면 화재 발생 시 케이블이 녹아내리는 것을 방지할 수 있어 화재확산을 방지하고 안전성을 높여준다.

- (4) 내화케이블을 사용하지 못하는 경우(예: 제어선) 금속관 등으로 방호 조치하여 화재확산을 방지한다.(금속관 등의 조치가 불가능한 경우 노출은 최소화한다.)

- (5) 케미칼 필터를 사용하는 경우, 생산 라인의 화재 안전성 증대를 위해 난연 성능 시험을 통해 인증 받은 제품을 사용하여야 한다. 인증 제품을 사용하면 화재 발생 시 필터가 녹아내리는 것을 방지할 수 있다.

- (6) 주름형 필터의 접착제는 난연성의 제품으로 사용하여 화재 확대 위험을 최소화하여야 한다.

이를 통해 화재 발생 시 접착제가 녹아내려 화재가 확대되는 것을 방지할 수 있다.

- (7) 화재 발생 시 자체소방대가 FAB 상부로 신속하게 출동할 수 있는 시스템을 구축한다. 이를 통해 화재 발생 시 빠른 대응이 가능해진다.

Ⅵ. 결론

1. 연구요약

이 연구는 위험물을 대량으로 사용하고, 고가의 설비가 복잡하게 밀집되어 있는 대형 반도체 제조공장 내에 설치된 소방시설중 화재감지기와 스프링클러 설비의 오동작 감소방안에 중점을 두고 연구하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 화재감지기의 비화재보의 다양한 원인을 분석·규명하는데 NFPA 921 과학적 방법론을 적용함으로써 객관적이고 체계적인 비화재보 원인분석이 이루어질 수 있도록 하였으며, 새로운 비화재보 정의를 규정하고 각 요인별 발생 원인을 구분하여 비전문가도 효과적인 원인분석이 이루어질 수 있도록 원인분석 기법을 제시하였다.

둘째, 유리벌브 스프링클러 헤드의 자체 강도 수준과 유리벌브 손상에 따른 비화재보를 검증하였으며, 유리벌브 스프링클러 헤드는 정적의 외력에 높은 수준의 강도를 보이고, 동적 충격 충격에는 쉽게 파손됨을 확인하였다. 내구성실험과 유리벌브 내압 영향실험을 통해 유리벌브 두께 대비 10% 초과 손상이 발생된 경우 1,863 kPa 압력에 헤드가 파손됨이 확인되었고, 이는 손상된 유리벌브 헤드가 배관 수압에 의해 파손 또는 리크 등이 발생 될 수 있음을 추정할 수 있었다. 현장에서 발생될 헤드 손상을 최소화하고자 헤드 보관 방법 및 설치기준 등을 제시하였다.

셋째, 반도체 클린룸의 상부공간(Supply Plenum) 스프링클러 헤드 파손에 따른 수손 피해를 최소화하고자 클린룸 상부공간에 존재하는 가연물의 연소시험 및 실 규모 화재실증실험을 통해 FFU 및 바닥패널이 설치되는 바닥의 가연물 분포를 고려한 단위 면적당 평균 발열량은 9.7 MJ/m^2 로 산출하였으며, FAB 상부실 단위 면적당 평균 발열량은 NFPA 13의 스프링클러 설비 완화 요건을 만족하는 것으로 확인되었다. 또한

FFU 화재 시 발화부에서 1m 이격하여 설치한 열유속계로 측정한 열유속은 거의 측정되지 않아 가연물을 발화시키기 위한 임계열유속 이상을 일정 시간 공급하지 못하는 것으로 나타났다. FAB 모형실 화재실증실험은 FAB 상부실에 발화 위험이 가장 높은 부분을 선정하여 강제로 발화시켰으나 화재는 인접 부분으로 연소 확대되지 않음이 확인되었다. 유사시 화재 방호 및 화재 안전 증대를 위해 콘센트, 팬 덮개, 주름형 울파필터 접착제 등은 나연성을 사용하도록 제안하였다.

2. 연구의 한계 및 향후 연구 과제

이 연구는 한계는 우선 반도체 공장이라는 특수한 환경에 일부 시설만을 대상으로 하였기 때문에 전반적인 산업시설의 소방시설 문제를 해결 하기에는 한계가 있다. 또한 유리벌브 손상을 최소화하기 위한 관리 방안이 현장에서 효과적으로 적용되기 위해서는 헤드의 시공단계부터 운송, 현장 보관, 설치 등 전반적인 상황에 대해 지속적인 모니터링이 필요하고, 클린룸의 가연물에 관한 연구는 현재 사용 중인 일부 가연물에 대해서만 이루어졌으며, 제조 생산품에 따라 반도체 공정도 빠르게 변경되며 이에 따라 상부 가연물도 변경될 수 있기에 이 연구 결과를 모든 반도체 클린룸에 적용하기에는 한계가 있다.

향후에는 반도체 공장의 전체적인 소방시설을 대상으로 연구를 진행하고, 다양한 상황에서의 화재 안전성 평가를 수행하여 더 정확한 대책을 제시할 필요가 있다. 또한 소방시설의 오동작 감소 방안과 화재 예방 및 대응 능력 강화를 위해서는 기술적인 측면뿐만 아니라, 관리적인 측면과 교육적인 측면도 함께 고려해야 한다.

참고문헌

- [1] 조양규(2008). 특집 한국 반도체산업의 현주소와 미래 전망-(2) 한국 반도체의 역사. 과학과 기술, 41(2), 70-72.
- [2] 소방청(2024). 「스프링클러 설비의 화재 안전 기술기준」. 제 2.12.1.5.2조.
- [3] NFPA(2019). NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems Edition.
- [4] 소방청(2024). 「스프링클러 헤드의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」. 제5조.
- [5] NFPA(2019). NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems
- [6] NFPA(2017). NFPA 25 Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems
- [7] 소방청(2024).감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준.제8조.
- [8] 소방청(2024). 자동화재탐지설비 및 시각경보장치의 화재 안전 기술기준. 제2.4.1조.
- [9] 이대준·김상령·김상길·박교식·이준원(2023). 반도체 소재 제조 공정에서 아세트산 취급 작업 시 발생한 화재·폭발 사고 예방대책에 관한 연구. 한국가스학회지, 27(2), 65-70.
- [10] 천광수·이진석·박명남(2021). 반도체 PR 공정의 클린룸 내 CFD 기반 화재 사고 영향 분석. 한국가스학회지, 25(6), 35-44.
- [11] Michael J. Ferreira, & 안병국(2000). *CIA Smoke Management System Design For Semiconductor Fabrication Facilities*. FIRE SCIENCE AND ENGINEERING, 14(4), 23-28.
- [12] 최승복·김영석·김태환(2019). 반도체 제조 공정에서 발생하는 화재 위험성 분석 연구. 한국화재소방학회, 33(4), 48-55
- [13] 정창욱·강병희·황철홍(2022). 반도체 공장의 화재예방을 위한 안전관리 시스템 구축 연구. 한국안전학회. 38(4), 1-11

- [14] 이건호(2022). 아날로그 감지기의 비화재보 및 오동작 방지기재
과 자탐설비의 IOT화. 한국조명·전기설비학회. 36(4), 18-21
- [15] 이가현· 이승철(2021). 습도에 의한 연기감지기의 비화배조 특
성에 관한 전산해석. 대한설비공학회, 325-329
- [16] 서병근· 남상근(2016). 아날로그 광전식 연기감지기 비화재보
개선에 대한 연구. 한국화재보방학회, 30(5), 108-115.
- [17] 백동현· 이종문· 김은수(2010). 화재수신기의 네트워크 효용성.
화재소방학회, 114-119
- [18] Xi He & Yitong Feng & Fuli Xu & Fei-Fei Chen & Yan
Yu(2022). *Smart fire alarm systems for rapid early fire
warning: Advances and challenges*. Chemical Engineering
Journal, Vol. 450(1), [https : / / doi.org/ 10.1016/ j.cej. 20
22.137927](https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137927).
- [19] Sebastian Festag(2016). *False alarm ratio of fire
detection and fire alarm systems in Germany - A meta
analysis*. Fire Safety Journal, Volume 79, 119-126.
- [20] 박경진 · 이영기 · 차성식 · 정도영 · 김장오 (2018). 냉동창고
화재 사례를 기반으로 하는 NFPA921 CODE에 의한 과학적 화
재조사 연구. 한국산학기술학회, 19(8), 78-85
- [21] 김경호(2022). Scientific Fire Cause Investigation Plan by
NFPA 921. master's thesis, Woosuk University Graduate
School
- [22] Natalia Flores Quiroz & Richard Walls & Antonio
Cicione(2021). *Developing a framework for fire
investigations in informal settlements*. Fire Safety
Journal, Volume 120, [https://doi.org/10.1016/ j.firesaf. 2020.
103046](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103046).
- [23] 하호진(2021). 거싯피난안전검증법을 활용한 한국과 일본의 화
재안전성능평가 비교분석-사무실 공간을 대상으로. 대한건축학회,
37(11), 25-34

- [24] 임동오(2018). **오피스 빌딩의 화재안전도가 건물 가치에 미치는 영향에 관한 연구**. 대한설비공학회, 47(2), 44-49.
- [25] Zhi Tang & Zhan Wang & Ruoyi Chen & Zheng Fang & Yukun Mou & Junjie Wei & Chao Zhang & Ziyan Wang Dingting Feng & Minjie Zhang & Yongfeng Nie (2023). *Experiment study of fire characteristics in full-scale bedrooms under different vents and sprinkler conditions*. Fire Safety Journal, Volume 141, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103927>.
- [26] Yet-Pole I & Yi-Long Chiu & Shi-Jen Wu(2009). *The simulation of air recirculation and fire/explosion phenomena within a semiconductor factory*. Journal of Hazardous Materials, Volume 163, 1040-1051.
- [27] Wen-Yao Chang & Ping-Kun Fu & Chiun-Hsun Chen & Yi-Liang Shu(2008). *Performance evaluation of a water mist system in semiconductor wet bench fires*. Process Safety and Environmental Protection, Volume 86, 213-218. (<https://www.sciencedirect.com>)
- [28] 오재성·이성우·정태영·어성화·김유경·홍승태(2022). **스프링클러 헤드 실화재시험을 통한 열 유체의 유동 확산 경향에 대한 연구**. 대한기계학회, 1844-1848
- [29] 김운형·이준·홍성호·김중훈·양소진(2019). **적층식 대형창고 스프링클러 헤드 개발 및 성능실험**. 한국재난정보학회, 15(2), 214-222.
- [30] 최용섭·윤종철(2016). **저상장속도 화재에서의 스프링클러 헤드 동작 특성에 관한 실험적 연구**. 한국화재소방학회, 30(5), 26-35.
- [31] Khalid Moinuddin & Ian Thomas(2014). *Reliability of sprinkler system in Australian high rise office buildings*. Fire Safety Journal, Volume 63, 52-68,

- [32] Hsiang-Cheng Kung & Bo Song & Yi Li & Xin Liu & Liwei Tian & Bingjie Yang(2012). *Sprinkler protection of non-storage occupancies with high ceiling clearance*. Fire Safety Journal, Volume 54, 49-56,
- [33] Vladislav Reimer & Zhenyu Zhang & Schade W & Martin Angelmahr & Wolfgang Schade(2022). *Enhanced fire sprinkler system: Fiber optical monitoring of fire sprinkler heads*. Fire Safety Journal, Vol. 127, 1-6.
- [34] NFPA72 (2016). National Fire Alarm and Signaling Code.
- [35] BS5839-1 (2017). Fire Detection and Fire Alarm Systems for Building.
- [36] 소방청(2024). 「스프링클러설비의 화재안전기술기준」. 제2.12조.
- [37] 소방청(2024). 「스프링클러설비의 화재안전기술기준」. 제 2.12.1.5.2.조.
- [38] NFPA: NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems 2019 Edition, 319.
- [39] 소방청(2024). 국가화재정보시스템. 화재통계 <https://www.nfds.go.kr/> 에서 2024.11.22. 인출.
- [40] 송현선·이의용(2010). 초전형 삼파장 적외선식 불꽃감지기 신호 회로개발. 전기설비학회, (20), 201-207
- [41] 송현선·이의용(2010). 초전형 삼파장 적외선식 불꽃감지기 신호 회로개발. 전기설비학회, (20), 201-207
- [42] 한국화재보험협회(1996). 정온식 감지 선형감지기. 위험관리정보 제84호, 15-20
- [43] 홍상혁 · 공하성(2023). 반도체 공장의 NFPA921에 의한 비화 재보 원인조사 방안, 대한안전경영과학회지, 25(4), 87-94
- [44] 소방청(2024). 「스프링클러헤드의 형식승인 및 제품검사의 기술 기준」. 제2조.
- [45] 홍상혁 · 공하성(2023). 반도체 공장의 NFPA921에 의한 비화 재보 원인조사 방안. 대한안전경영과학회지, 25(4), 87-94

- [46] 소방청(2024). 「감지기의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」.
- [47] 소방청(2024). 자동화재탐지설비 및 시각경보장치의 화재 안전 기술기준.
- [48] NFPA72 (2016). National Fire Alarm and Signaling Code.
- [49] British Standard Institute 5839-1, (2017), Fire Detection and Fire Alarm Systems for Building.
- [50] 소방청(2024). 「스프링클러헤드의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」. 제5조.
- [51] NFPA(2019). NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems 2019 Edition. p319.
- [52] NFPA(2017). NFPA 25 Standard for the Inspection, Testing, and Maintenance of Water-Based Fire Protection Systems 2017 Edition. p16-18.
- [53] 소방청(2024). 「스프링클러헤드의 형식승인 및 제품검사의 기술기준」,
- [54] 소방청(2024). 「스프링클러 설비의 화재 안전 기술기준」. 제 2.12.1.5.2조.
- [55] NFPA(2019). NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems 2019 Edition, p319.
- [56] Principles of Fire Behavior, James G. Quintiere, Second Edition
- [57] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition

국문초록

반도체 공장 화재안전성 향상을 위한 소방시설의 특성분석

홍상혁

우석대학교 일반대학원 소방·안전공학과

지도교수 공 하 성

이 연구는 위험물을 대량으로 사용하고, 고가의 설비가 복잡하게 밀집되어 있는 대형 반도체 제조공장 내에 설치된 소방시설중 화재감지기와 스프링클러설비의 오동작 감소방안에 중점을 두고 연구하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 화재감지기의 가성알람의 다양한 원인을 분석·규명하는데 NFPA 921 과학적 방법론을 적용함으로써 비화재보 요인을 5가지로 정의하고 각 요인별 발생원인을 구분하여 비전문가도 객관적이고 체계적인 비화재보 원인 분석이 이루어질 수 있도록 원인분석 기법을 제언하였다.

둘째, 유리별브 스프링클러헤드는 정적의 외력에 높은 수준의 강도를 보이고, 유리별브에만 동적충격이 가해지면 쉽게 파손됨을 확인하였다. 또한 유리별브 두께 대비 10% 초과 손상이 발생된 경우 1,863 kPa 압력에 헤드가 파손됨이 확인되었다. 이는 고압이 아니라도 헤드에 손상이 가해지고 배관 수압이 헤드에 가해진다면 시간이 흘러 헤드가 파손될 수 있다는 것을 추정할 수 있다. 스프링클러 제조단계에서 현장에 설치까지 헤드에 손상이 가해질 환경적 요인이 있음이 확인되어, 헤드

보관방법 및 설치기준 등을 제언하였다.

셋째, 반도체 클린룸의 상부공간(Supply Plenum)에 존재하는 가연물의 연소시험 및 실규모 화재실증시험을 통해 FFU 및 바닥패널이 설치되는 바닥의 가연물 분포를 고려한 단위면적당 평균 발열량은 9.7 MJ/m²로 산출 하였으며, FAB 상부실 단위면적당 평균 발열량은 NFPA 13의 스프링클러설비 완화 요건을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 FFU 화재 시 발화부에서 1 m 이격하여 설치한 열유속계(Heat flux meter)로 측정 한 열유속은 거의 측정되지 않아 가연물을 발화시키기 위한 임계열유속 이상을 일정시간 공급하지 못하는 것으로 나타났다. FAB모형실 화재실 증시험은 FAB 상부실에 발화 위험 이 가장 높은 부분을 선정하여 강제로 발화 시켰으나 화재는 인접부분으로 연소 확대되지 않음이 확인되었다. 클린룸의 화재안전성을 확인한 반면 일부 가연물의 높은 발열량이 확인되어 콘센트, 웬커버, 주름형 율파필터 접착제 등은 나연성을 사용 하도록 제언하였다.

연구 결과를 바탕으로 국내 반도체 공장의 소방 시설 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만, 이 연구는 반도체 공장의 일부 시설 만을 대상으로 하였기 때문에, 전체적인 소방 시설 문제를 해결하기에는 한계가 있다. 향후에는 반도체 공장의 전체적인 소방 시설을 대상으로 연구를 진행하고, 다양한 상황에서의 화재 안전성 평가를 수행하여 보다 정확한 대책을 제시할 필요가 있다.

핵심어: 반도체공장, NFPA 921, 유리별브 스프링클러헤드, 비화재보, 클린룸 화재안전성평가