[Research Paper]

화재 · 피난시뮬레이션을 통한 MLCC 사업장 클린룸의 위험성 평가

손광태 · 손종영* · 배영훈* · 최준호**†

부경대학교 대학원 대학원생, *경북대학교 건설환경에너지공학부 박사후연구원, **부경대학교 건축 · 소방공학부 교수

Risk Assessment of a MLCC Plant through Fire and Evacuation Simulations

Kwang-Tae Son · Jong-Yeong Son* · Young-Hoon Bae* · Jun-Ho Choi**†

Graduate Student, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University,

*Post-Doctoral Researcher, School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University,

**Professor, Division of Architectural and Fire Protection Engineering, Pukyong National University

(Received December 28, 2020; Revised February 22, 2021; Accepted February 26, 2021)

요 약

본 논문에서는 MLCC 공장 클린룸을 대상으로 화재 및 피난 시뮬레이션을 실시하고, 그 결과분석을 기반으로 성능위주설계 시뮬레이션 분야 수행기준의 개선방안을 제시하고자 한다. 우선 화재사고사례 및 선행연구의 고찰을 통해 클린룸의 화재 · 피난위험요인을 도출하였으며, 도출된 위험요인을 변수로 화재 · 피난시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행결과 ‘공조설비 작동여부’, ‘근무인원의 수’, ‘출구설정 방법’과 ‘인명안전성 평가방법’이 인명안전성 평가에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 최종적으로 본 논문에서는 인명안전성 평가에 영향을 미치는 요인들을 반영하기 위한 화재 및 피난시뮬레이션 수행기준의 개선방안을 제시하였다.

ABSTRACT

In this paper, fire and evacuation simulations are conducted for the Multi-Layer Ceramic Capacitor (MLCC) factory clean room, and a plan to improve performance standards in the field of performance-based design simulation is suggested. First of all, fire and evacuation risk factors in the clean room were derived through fire accidents and previous research. And fire and evacuation simulations were performed using the derived risk factors as variables. As a result of the simulations, it was found that 'air conditioning equipment', 'working capacity', 'door setting method' and 'life safety evaluation method' have an influence on the life safety evaluation. Finally, a plan to improve the standards for fire and evacuation simulation was suggested to reflect the factors influencing the life safety evaluation.

Keywords : Multi-layer ceramic capacitor factory, Fire risk assessment, Fire simulation, Evacuation simulation

1. 서 론

적층 세라믹 콘덴서 (Multi-layer ceramic capacitor (MLCC))는 전원에서 공급받은 전기를 저장했다가 반도체 등 전자 부품에 필요한 만큼 전기를 안정적으로 공급하는 부품이다. 최근 Internet of Things (IoT) 제품의 확대에 따라 MLCC의 중요성은 더욱 커질 전망이며, 그에 따라 MLCC 제조공장 MLCC 가공 및 조립을 위한 클린룸은 증가할 것으로 판단된다.

하지만 한국화재보험협회⁽¹⁾에 따르면 클린룸은 빠른 공기이동과 순환으로 인해 스프링클러 설비의 작동에 부정적

인 영향을 미치는 등 매우 높은 화재 위험성을 가진다. 또한 Song⁽²⁾의 연구에 의하면, 구조적으로 밀폐, 무창구조로 인해 연기의 자연배출이 어렵고 채광이 결여된다는 화재 위험성을 가지며, 생산과 청정도를 만족하기 위한 설비와 레이아웃 배치는 재실자의 피난동선에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 크다. 특히 국가화재정보센터의 화재통계에 따르면⁽³⁾, 클린룸의 경우 고가의 설비가 밀집하여 설치되어있기 때문에 화재발생시 대규모 재산피해발생의 가능성이 크다.

이러한 클린룸의 화재 · 피난 위험성은 다양한 사고사례에서 나타난 바 있지만, 재실자의 안전을 보장하기 위해 「화재예방, 소방시설 설치 · 유지 및 안전관리에 관한 법률」에

† Corresponding Author, TEL: +82-51-629-7830, FAX: +82-51-629-7078, E-Mail: jchoi@pknu.ac.kr

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

따라 시행하고 있는 성능위주설계의 경우 연면적 200,000 m² 이상의 특정소방대상물을 대상으로만 수행되고 있기 때문에 소규모의 클린룸의 경우 성능위주설계의 사각지대에 놓여있는 실정이다. 또한 클린룸 방화기준의 경우에도 클린룸의 위치 및 구조, 설치 소방시설 및 제연설비 등에 대한 일부 사항을 규정하는데 그치고 있는 실정이다⁽¹⁾.

따라서 본 논문에서는 화재·피난 시물레이션을 통해 MLCC 공장 클린룸의 성능위주설계 시물레이션 분야 수행기준의 개선방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 사고사례 및 선행연구고찰을 통해 클린룸의 3가지 화재·피난위험요인을 도출하고, 각 위험요인을 변수로 2번의 화재시물레이션과 12번의 피난시물레이션을 실시하였으며, 두가지 인명안전성 평가방법(논커플링, 세미커플링)에 따라 시물레이션 결과를 비교하였다. 이후 시물레이션 결과를 바탕으로 MLCC공장 클린룸의 화재·피난 시물레이션 분야 성능위주설계 수행기준의 개선방안을 제시한다.

2. 클린룸의 화재 위험성 고찰

반도체 공장에서 발생한 주요화재사례를 살펴보면, 대형 인명피해가 발생한 화재는 많지 않으나, 많은 근무자와 고가의 설비 등 화재 시 대형 인적·물적 피해의 위험성을 내포하고 있는 것으로 나타났다⁽³⁾. 이러한 사고사례들과 클린룸 관련 선행연구 고찰^(1,2)을 통해 도출된 클린룸의 주요 화재·피난위험요인은 ‘건물구조’, ‘공조설비시스템’, ‘근무행태’의 3가지로 구분된다.

건축물 구조적으로 클린룸은 청정도를 유지하기 위해 밀실구조로 구성되어있으며, 가연성 내장재료를 사용하는 경우가 대부분이다. 또한 클린룸을 출입하기 위해서는 클린복을 착용한 상태에서 도어인터록을 통과하여야 하며, 이는 대피지연의 요인으로 작용할 가능성이 크다.

또한 클린룸은 공조설비시스템으로 인해 공기가 연속적으로 순환하며, 이는 급속한 연기의 확산 및 화재 및 가스 누설 감지의 지연요인으로 작용할 수 있으며, 급·배기장

치의 설치로 인해 안전점검 및 화재진화에 어려움을 겪을 가능성이 크다.

근무행태 측면에서 클린룸은 많은 인원이 근무하며 고가의 설비가 밀집하여 설치되어있는 경우가 대부분으로 화재 발생 시 대규모 인명·재산피해의 우려가 크며, 근무자들이 클린복을 착용하고 근무한다는 점은 근무자의 대피시 시야 및 이동제한의 원인으로 작용할 수 있다.

3. 화재·피난시물레이션 시나리오

3.1 대상지 및 시물레이션 시나리오 개요

본 연구에서는 앞서 도출된 클린룸의 3가지 주요 위험요인을 변수로 화재·피난시물레이션을 통해 화재위험평가를 실시하였다. 대상지는 Figure 1과 같이 실제 MLCC 사업장의 클린룸으로 연면적은 약 30,000 m² 규모로 성능위주설계대상에는 포함되지 않는 특정소방대상물이었다.

대상지는 MLCC공정 중 ‘성형/인쇄/적층 공정’, ‘배치 공정’, ‘압착/절단 공정’을 포함하고 있으며, 10개의 건물외부로 이동하는 출구와 건물 내부에 인터록이 적용된 8개의 출입문과 10개의 일반출입문이 존재한다.

화재·피난시물레이션은 Tables 1, 2와 같이 4가지 변수

Figure 1. Overview of the target plant for simulations.

Table 1. Evacuation Simulation Scenarios

Evacuation simulation case	Occupant density	Protective clothing	Door interlock and opening settings
Case-Evac-1	According to the standard	Wear	All door open
Case-Evac-2			Door interlock unopened
Case-Evac-3			Door interlock unopened & evacuation within single process
Case-Evac-4		Not Wear	All door open
Case-Evac-5			Door interlock unopened
Case-Evac-6			Door interlock unopened & evacuation within single process
Case-Evac-7	Real situation at the moment	Wear	All door open
Case-Evac-8			Door interlock unopened
Case-Evac-9			Door interlock unopened & evacuation within single process
Case-Evac-10		Not Wear	All door open
Case-Evac-11			Door interlock unopened
Case-Evac-12			Door interlock unopened & evacuation within single process

Table 2. Fire Simulation Scenarios

Fire simulation case	HVAC system
Case-Fire-1	Inoperative
Case-Fire-2	Operative

에 대해 총 14건의 시나리오(화재시나리오 2건, 피난시나리오 12건)로 구분되어 수행하였다.

첫 번째 위험요인인 ‘건물구조’은 Table 1과 같이 ‘출구 설정 방법’에 따라 ‘모든 출구가 개방되어있는 경우(모든 출구 개방)’, ‘도어인터록이 개방되지 않은 경우(도어인터록 미개방)’, ‘도어인터록이 개방되지 않았으며, 각 공정별 출구를 통해서만 근무자가 대피하는 경우(도어인터록 미개방 및 단일공정 내 대피)’의 3가지 시나리오로 구분하였다. 다음 요인으로 ‘공조설비시스템’은 Table 2와 같이 화재 발생 이후 ‘공조설비가 작동하지 않는 경우’와 ‘공조설비가 작동하는 경우’의 2개의 시나리오로 구분하였다.

마지막 요인인 ‘근무행태’는 근무자들의 ‘클린복 착용여부’와 ‘근무자 인원 수’에 따라 시나리오를 분류하였다. 이때, ‘근무자 인원 수’는 소방청의 현행 「성능위주설계 수행기준」에 따른 ‘기준 수용인원’과 현재 실제 사업장에서 근무하고 있는 근로자의 수 (‘실제 수용인원’)로 구분하였다.

이상에서 ‘공조설비시스템’ 시나리오만 화재시물레이션의 시나리오에서 반영되었으며, 나머지는 모두 피난시물레이션 시나리오에서 반영하였다. 이 때, 모든 시물레이션 결과는 세미커플링⁽⁴⁾을 통해 다시 검증하였다. 세미커플링방식은 화재 · 피난 시물레이션의 결과값을 지오메트리상에 오버레이 하는 방식으로, 기존 논커플링방식에서 사용하던 디바이스 포인트(특정지점)에서만 화재 · 피난시물레이션 방식을 벗어나 모든 지오메트리상에서 실시간으로 재실자의 인명안전성을 평가하는 방식이다. 이를 통하면 설계자의 경험과 지식에 따라 천차만별이던 평가결과와는 달리 모델러가 누구이든 동일한 인명안전성 평가가 가능하다.

본 연구에서 사용한 화재 · 피난시물레이션 모델은 국내 소방시설설계자들이 가장 많이 사용하는 Thunderhead Engineering사의 PyroSim 2020.4.0902과 Pathfinder 2020.4.0902였다. 이 때 시물레이션의 입력값들은 현행 「소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준」과 「부산광역시 성능위주설계 평가 가이드라인」⁽⁵⁾을 참고하였다.

3.2 화재 · 피난시물레이션 입력값

‘공조설비 작동여부’에 따른 화재확산여부를 예측하기 위해 화재시물레이션을 수행하였다. 공조설비가 작동하지 않는 경우는 급기 및 배기가 없는 상황으로 설정되었으며, 공조설비가 작동하는 경우에는 실제 설치된 공조시스템을 기준으로 급기 · 배기량을 설정하여 모델링하였다. 이 때, 두 번의 시물레이션에서는 급기 · 배기량을 제외한 다른 모든 변수는 동일하게 설정하였다.

Figure 2. Measurement location of combustion products measurement point & location of fire.

Table 3. Fire Simulation Scenario and Input Values

Category	Input
Case	Case-Fire-1 : HVAC system inoperative
	Case-Fire-2 : HVAC system operative
Sprinkler	Inoperative
Heat release rate per area	400 kW/m ² (Area: 46.8 m ²)
Fire growth rate	Fast
Byproducts	Soot Yield = 0.1 kg/kg CO Yield = 0.02 kg/kg
Number of cells for mesh	6,180,300 (Cell Size, x = 0.2 m, y = 0.2 m, z = 0.2 m)
Interior wall material	INERT
Simulation time	500 s

화재시물레이션의 화재는 원인미상의 전기적 점화원에 의해 발생한 화재가 인근 MLCC 이형필름(PET필름)으로 확산되는 상황으로 설정하였으며, 이 때 화원의 위치는 Figure 2와 같이 가장 많은 작업자가 위치하고 있는 성형/인쇄/적층공정구역의 출구와 인접한 곳으로 설정하였다.

화재시나리오 설정 시 최악의 상황을 고려하여 스프링클러 설비는 작동하지 않는 것으로 가정하였고, 화재성장속도는 화재실의 제조공정상 고온에서 작업이 이뤄지며 원료 및 생산품에 의해 위험물질이 발생 가능하므로 ‘빠름(Fast)’으로 설정하였다. 이때 Table 3과 같이 발열량, 화재성장률, 연기 및 독성물질(CO)의 발생량은 핀란드 VTT의 선행연구에서 제시된 값을 인용⁽⁶⁾하였다. 해석공간의 mesh 크기는 0.2 × 0.2 × 0.2 m로 해석공간의 적정성 검사를 수행한 후 모델링 하였으며, 두 번의 시물레이션은 총 500 s 동안 수행되었다.

커플링을 하지 않고 화재 및 피난시물레이션을 따로 수행하는 이른바 ‘논커플링’ 방식의 인명안전성 평가를 위한 연소생성물(온도, 가시도, 일산화탄소)은 Figure 2와 같이 출구 지점 10곳의 디바이스 포인트에서 측정되었다. 그러나, ‘세미커플링’ 방식의 연소생성물은 Pyrosim의 Slice 기능을 활용하여 대상지 지오메트리의 전체 영역에서 측정되

(1) Occupant Density (According to the Standard)

(2) Occupant Density (Real Situation at the Moment)

Figure 3. Evacuation simulation scenario (occupant density).

었다. 모든 연소생성물은 「소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준」의 [별표 1] 화재 및 피난시물레이션을의 시나리오 작성기준의 ‘인명안전기준’에 따라 온도, 가시도, 일산화탄소를 호흡한계선인 1.8 m 높이에서 측정하였다.

피난시물레이션을의 경우 ‘근무자 인원 수’, ‘클린복 착용 여부’, ‘출구설정 방법’의 3가지 변수에 따라 12회의 시물레이션을 수행하였는데, 이 3가지 변수를 제외한 다른 입력값은 모든 시나리오에서 동일하였다.

‘근무자 인원 수’ 관련 수용인원 수는 Figure 3과 같이 현행 소방청의 「화재 및 피난시물레이션을의 시나리오 작성기준」 내 수용인원 산정기준에 따라 공업용도 수용인원(일반 및 고위험 공업: 9.3 m²/인)을 적용하여 총 1,193명(성형/인쇄/적층공정구역: 736명, 배치공정구역: 302명, 압착/절단공정구역: 155명)으로 설정하였다. 한편, 사업장을 실측한 ‘실제 수용인원’ 시나리오에서는 실제 근무자 130명(성형/인쇄/적층공정구역: 52명, 배치공정구역: 35명, 압착/절단공정구역: 43명)을 그대로 반영하여 반영하였다.

한편, ‘클린복 착용여부’에 따른 보행속력값을 입력하기 위해 10명의 실제 근무자(남: 5명, 여: 5명)를 대상으로 보행속력을 실측하였다. 그 결과 실제 남성 근로자의 평균 보행속력은 클린복 미착용 시 1.36 m/s, 클린복 착용 시 1.32 m/s로 나타났다. 여성 근로자의 평균 보행속력은 클린복 미착용 시 1.33 m/s, 클린복 착용 시 1.29 m/s로 측정되었다. 이들 클린복 착용 시 보행속력 측정값들은 평상 시에 비해 약간의 감소치를 나타내었는데 피난시물레이션 툴에도 그대로 입력되었다.

끝으로 ‘모든 출구 개방’, ‘도어인터록 미개방’, ‘도어인터록 미개방 및 단일공정구역 내 대피’ 등의 3가지 시나리오로 구분하여 ‘출구 설정방법’과 관련된 피난시나리오를 반영하였다.

한편, 화재시물레이션 결과, 화재실 내 감지기의 작동시간은 29 s로 나타났다. 이에 따라 본 연구에서는 ‘부산소방안전본부 성능위주설계 평가 가이드라인’⁽⁵⁾에 따라 화재실 반응시간을 30 s로 설정하였다. 또한, 비화재실의 반응시간은 「소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준」의 [별표 1] ‘화재 및 피난시물레이션을의 시나리오 작성 기준’ 내 피난가능시간 기준에서 재실자들이 건물의 내부, 경보, 탈출로에 익숙하고, 상시 깨어 있으며, 방재실에서 육성지침을 통해 피난을 안내하거나 훈련된 직원에 의해 대피가 유도되는 경우(W1)로 가정하여 60 s로 반응시간을 적용하였다. 따라서 화재실의 경우 30 s, 비화재실의 경우 화재실 반응시간을 더해 90 s로 반응시간을 설정하였다. 재실자의 어깨너비는 한국인 신체치수 조사 사이트 ‘Size Korea’의 값을 참고하여 설정하였다.

4. 클린룸 화재 위험 평가 및 화재 · 피난시물레이션 수행기준안

4.1 시나리오 별 시물레이션 결과 비교

2가지 시나리오별 화재시물레이션을 통해 도출된 포인트별 피난허용시간(Available safe egress time, ASET)은 Table 4와 같다. 두 번의 시물레이션 모두 인명안전성평가 기준에 따른 연소생성물 중 가시도 관련 기준만을 초과하는 것으로 나타났으며, 양 케이스 모두 Point 2에서 각각 233.3 s, 315.8 s로 가장 빠른 ASET을 보였다. 즉, 공조설비 작동 시 ASET이 82.5 s 증가하는 것으로 나타났다.

하지만 시물레이션이 수행되는 500 s 동안 위험지역(인명안전성평가 기준을 초과하는 지역)으로 분류되는 포인트는 각각 5개소(Case-Fire-1), 9개소(Case-Fire-2)로 공조설비가 작동하는 경우 오히려 증가하는 것으로 나타났다. Figure 4와 같이, 500 s가 경과될 때 가시도를 비교해 보면 공조설비가 작동하는 Case-Fire-2에서 위험지역이 더 넓게 분포되어 있는 것으로 나타났다. 하지만 이는 공조설비가 설치되어 있는 공정 내부영역에서만 발생하는 현상으로, 공조설비가 설치되어있지 않은 각 공정의 외부로 연기가 전파되는 속도

Table 4. Available Safe Evacuation Time (s) by 10 Set Points

	Case-Fire-1				Case-Fire-2			
	Visibility (5 m)	Temperature (60 ℃)	CO (1,400 ppm)	ASET	Visibility (5 m)	Temperature (60 ℃)	CO (1,400 ppm)	ASET
Point 1	453.2	-	-	453.2	332.3	-	-	332.3
Point 2	233.3	-	-	233.3	315.8	-	-	315.8
Point 3	263.5	-	-	263.5	337.3	-	-	337.3
Point 4	-	-	-	-	443.3	-	-	443.3
Point 5	-	-	-	-	445.1	-	-	445.1
Point 6	362.2	-	-	362.2	341.6	-	-	341.6
Point 7	-	-	-	-	418.7	-	-	418.7
Point 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 9	-	-	-	-	368.7	-	-	368.7
Point 10	435.6	-	-	435.6	360.5	-	-	360.5

Figure 4. Fire simulation result (visibility).

는 오히려 공조설비가 미작동하는 Case-Fire-1에서 빠른 것으로 나타났다. (Figure 4, 200 s 빨간색 원 부분) 즉, 공조설비의 작동은 공조설비가 작동하는 타 공정구역으로의 연기전파를 확산시키나, 공조설비가 작동하지 않는 구역으로의 연기전파는 지연시키는 것으로 나타났다.

피난시물레이션 결과는 Table 5와 같다. ‘근무자 인원 수’에 따른 피난소요시간(Required Safe Egress Time, RSET)을 살펴보면, ‘법적기준 수용인원’ 시나리오의 경우 ‘실제 수용인원’에 비해 최대 199.7 s (Case-Evac-6, Case-Evac-12) 피난소요시간이 증가하는 것으로 나타났다.

‘클린복 착용유무’에 따른 피난소요시간을 살펴보면, ‘실제 수용인원’을 적용한 피난시물레이션 (Case 7-12)에서는 클린복 착용에 따라 피난소요시간이 최대 3.7 s 증가하는 것으로 나타났으나, ‘기준 근무인원’을 적용한 피난시물레이션 (Case 1-6)의 경우 클린복 착용에 따라 피난소요시간이 감소하는 것으로 나타났다. 즉 ‘클린복 착용유무’에 따른 근무자 보행속력은 ‘근무인원의 수’에 비해 피난소요시

간에 미치는 영향이 적은 것으로 나타났다.

‘출구설정 방법’에 따른 피난소요시간의 경우 ‘도어인터록 미개방’, ‘도어인터록 미개방 및 단일공정 내 대피’ 시나리오에서 ‘모든 출구 개방’ 시나리오에 비해 피난소요시간이 증가하는 것으로 나타났으며, ‘도어인터록 미개방 및 단일공정 내 대피’ 시나리오에서 그 증가율이 더 높은 것으로 나타났다.

한편, 커플링을 통해 그 결과를 검증한 결과, 논커플링방식에 따라 ASET과 RSET을 비교할 경우, Case-Evac-3와 Case-Fire-1의 포인트 2 (RSET>ASET)에서 인명안전성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다.

세미커플링 방식에 따라 최초의 에이전트가 위험지역에 진입하는 시간을 살펴보면 Table 6과 같은데, 공조설비가 미작동하는 Case-Fire-1의 경우 ‘기준 수용인원’을 적용한 Case 1-6의 경우 108.0 s에 출구로 대피하지 못한 에이전트가 위험지역에 진입하는 것으로 나타났다. 또한 ‘실제 수용인원’을 적용한 Case 9, 12의 경우에도 146.0 s에 출구로 대피하지 못한 에이전트가 위험지역에 진입하는 것으로 나타났다. 공조설비가 작동하는 Case-Fire-2의 경우, Case 1, 3, 4, 6에서 125.0 s에 에이전트가 위험지역에 진입하는 것으로 나타났으며, Case 2의 경우 134.0 s, Case 9와 10의 경우 145.0 s에 에이전트가 위험지역에 진입하는 것으로 나타났다.

논커플링 방식의 경우 1개의 시나리오에서 인명안전성을 보장하지 못하는 것으로 나타났으나, 세미커플링 방식의 경우 15개의 시나리오에서 사망자가 발생하는 것으로 나타나 화재 · 피난시물레이션의 각개 수행을 통한 화재위험성 평가의 오류와 함께 세미커플링의 중요성이 입증되었다.

4.2 클린룸 화재 · 피난시물레이션 수행안 제시

4.2.1 공조설비 작동 반영

클린룸 내 공조설비의 경우 다른 공간에 비해 큰 급기량

Table 5. 12 Evacuation Scenarios vs. Required Safe Evacuation Time(s) by 10 Set Points

	Evacuation scenarios cases											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RSET	213.5	224.0	389.3	213.8	223.3	399.0	140.8	142.8	203.0	139.8	141.3	199.3
Point 1	211.2	217.5	103.1	213.8	216.6	102.5	140.8	140.8	110.0	139.8	139.6	109.7
Point 2	156.7	162.9	275.1	155.7	155.5	256.6	106.4	106.4	203.0	104.3	104.3	199.3
Point 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 4	164.1	-	-	140.9	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 5	171.3	172.2	173.9	171.2	174.5	174.9	117.1	133.3	113.0	116.5	113.0	113.0
Point 6	213.5	192.5	389.3	200.7	191.7	399.0	140.8	142.8	188.8	139.1	141.3	185.5
Point 7	209.3	224.0	344.0	212.6	223.3	160.7	129.3	133.3	127.1	127.1	131.9	127.1
Point 8	204.0	183.1	127.0	173.3	198.7	127.0	139.9	140.0	122.5	138.9	138.9	121.5
Point 9	145.5	145.1	145.5	143.7	152.7	143.8	133.2	126.9	126.6	132.9	125.3	125.3
Point 10	127.4	122.2	106.3	122.2	104.9	104.9	102.8	102.8	102.8	102.8	102.8	102.8

Table 6. Simulation Results (Life safety Evaluation Result According to Semi-Coupling Method)

	Time exceeding the standards for life safety evaluation (s)											
	Evacuation simulation case											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Case-Fire-1	108.0	108.0	108.0	108.0	108.0	108.0	-	-	146.0	-	-	146.0
Case-Fire-2	123.5	134.0	125.0	125.0	-	125.0	-	-	145.0	-	-	145.0

과 배기량을 가지며, 시뮬레이션 결과 공조설비에 따른 연기의 확산은 재실자의 인명안전성에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다. 최근 반도체 등 대형 사업장의 클린룸이 증가하고 있는데 「소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준」 내 ‘화재 및 피난시뮬레이션의 시나리오 작성 기준’에 클린룸 내 공조설비 작동상황에 대한 반영이 필요하다.

4.2.2 근무자 인원 수

클린룸 내 수용인원(재실자 밀도)의 경우 피난시뮬레이션 결과 RSET에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났다. 현재 수용인원 산정기준에 따르면 공업용도의 경우 일반 및 고위험 공업의 경우 9.3 m²/인, 특수공업의 경우 수용인원 이상으로 제시하고 있다. 하지만 본 논문의 시뮬레이션 결과를 통해 특정 수용인원 기준의 적정성을 판단할 수는 없으므로, 클린룸의 특성과 설치장비 등을 고려한 수용인원 기준수립을 위한 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2.3 출구설정 방법

클린룸의 경우 청정도의 유지를 위해 도어인터록을 통해 클린룸으로 출입하는데, 도어인터록은 화재 시 전기적 요인으로 인해 자동개폐가 불가능한 최악의 경우가 발생할 확률이 있다. 따라서 클린룸 화재·피난시뮬레이션을 수행하는 경우 도어인터록이 폐쇄되는 시나리오를 고려한 시뮬레이션의 수행도 필요하다.

4.2.4 인명안전성 평가방법

그동안 설계자의 경험과 지식을 바탕으로 특정지점을 설정하여 화재·피난시뮬레이션을 각기 수행하여 설계자가 수동으로 ASET, RSET 수치를 비교·평가하는 현행 논커플링방식의 경우 화염이나 복사열, 연기 등의 확산에 따른 재실자의 피난과정을 실시간으로 확인할 수 없다는 한계를 가진다. 즉, 시뮬레이션이 별도로 수행되다보니 에이전트가 화염이나 고온의 복사열, 유독가스층을 통과하더라도 아무런 해를 입지 않는 것으로 해석되고 있다. 이러한 한계점은 공조설비로 인해 연기의 급격한 확산이 우려되는 클린룸에서 더욱 크게 작용할 가능성이 크므로, 화재·피난시뮬레이션 수행시 반드시 세미커플링이나 커플링을 통한 해석이 뒤따라야 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 과거 화재사례와 선행연구를 통해 클린룸의 화재위험성을 고찰하였고, 이를 통해 도출한 위험요소들에 대해 총 14개의 시나리오를 설정하고 화재위험성을 평가하였다. 그리고 클린룸의 화재위험평가를 수행하기 위해 클린룸을 대상으로 한 화재·피난시뮬레이션 수행안을 제시하였다.

1. 클린룸 내 공조설비 작동 시 ASET은 최대 82.5 s 증가하는 것으로 나타났다.

2. 근무자 수의 증가에 따라 RSET은 최대 199.7 s 증가하

는 것으로 나타났다.

3. 클린룸의 착용여부가 보행속력 및 RSET의 증감에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4. 클린룸 내 도어인터록이 작동하지 않으면 RSET이 최대 10.5 s 증가하였으며, 이로 인해 단일출구로 대피할 경우 RSET이 최대 185.2 s 증가하는 것으로 나타났다.

5. 인명안전성 평가방법에 따라 24개의 시나리오 중 논 커플링방식의 경우 1개의 시나리오, 세미커플링방식의 경우 15개의 시나리오에서 인명안전성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 즉 커플링방식을 통하지 않는 기존 방식의 평가는 신뢰할 수 없다고 입증되었다.

한편, 사업장의 클린룸 화재 · 피난시물레이션 수행안을 제시하면 다음과 같다.

1. 화재 및 피난시물레이션의 시나리오 작성 기준(제4조 관련)에 클린룸 조항을 추가하여 클린룸 내 공조설비 작동을 고려한 시나리오 반영이 필요하다.

2. 클린룸을 대상으로 화재 · 피난시물레이션을 수행하는 경우, 도어인터록이 폐쇄되어 단일 출구를 사용하는 상황까지 고려한 시나리오 설정이 필요하다.

3. 인명안전성 평가는 대상지의 모든 지오펜트리에 인명안전성을 평가하는 세미커플링, 커플링 방식을 의무화하여야 한다.

본 논문에서는 클린룸의 특성을 반영한 다양한 시나리오에 대해 화재 · 피난시물레이션을 실시하고 그 결과를 비교 분석하였다. 이는 향후 성능위주설계의 대상범위 확대 시 참고자료로 활용될 수 있다는데 그 의의가 있다. 하지만 한 곳의 대상지만을 기준으로 연구가 진행되었기 때문에 후속연구가 필요하다.

후 기

이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF2018 R1A2B3005951). 또한 본 논문은 제1저자의 공학석사학위 청구논문⁽⁷⁾을 기반으로 재구성하여 작성되었음.

References

1. Korean Fire Protection Association(KFPA), "Standard on Fire Protection for Clean Rooms(KFS-521)" (2018).
2. Y. S. Song, M. Y. Yoon, S. H. Hyun, C. W. Lee, Y. S. Yoon and S. M. Kim, "A Study on Safety by Risk Assessment of Clean Room", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 78-85 (2004).
3. National Fire Agency, National Fire Data System, <https://www.nfds.go.kr> (2019).
4. H. -M. Koo, R. -S. Oh, S. -H. An, C. -H. Hwang and J. -H. Choi, "A Study on Comparison of Life Safety Assessment Results according to Three Coupling Methods of Fire and Evacuation Simulation", Fire Science and Engineering, Vol. 33, No. 1, pp. 78-85 (2019).
5. Busan Metropolitan Government, "Performance-Based Building Fire Safety Design Guideline" (2018).
6. J. Hietaniemi and E. Mikkola, "Design Fires for Fire Safety Engineering", Research Report, VTT Technical Research Centre of Finland (2010).
7. K. T. Son, "A Study on the Improvement of Performance Standards for Performance-oriented Design of Multilayer Ceramic Capacitor(MLCC) Factory Clean Room: Focusing on Fire and Evacuation Simulation", Master's Thesis, Graduate School of Pukyong National University (2020).