



반도체 PR 공정의 클린룸내 CFD 기반 화재 사고 영향 분석

천광수 · 이진석* · †박명남**

금강유역환경청 화학안전관리단, *(주)지엘환경기술, **(주)모백스
(2021년 8월 13일 접수, 2021년 12월 9일 수정, 2021년 12월 10일 채택)

CFD-based Fire Accident Impact Analysis in Clean Room for semiconductor PR Process

Kwang-Su Chun · Jinseok Yi* · †Myeongnam Park**

Ministry of Environment, Chemical Safety Management Department, Youseoung-Gu
Daejeon, 34142, Korea

*GL Environment technology, Sasang-gu, Busan, 46985, Korea

**MOVEX, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13488, Korea

(Received August 13, 2021; Revised December 9, 2021; Accepted December 10, 2021)

요약

반도체 공정 중 PR (Photo Resist) 공정은 여러 인화성 물질을 혼합하여 사용하는 공정으로, 공정 장비가 Clean Room 내 설치되어 인화성 물질이 누출되는 경우 질식, 화재, 폭발 사고로 이어질 위험성이 크므로, 물질 누출시 발생할 수 있는 사고에 대한 영향을 분석하고, 작업자들의 안전을 보장할 수 있는지 평가하는 것이 필요하다. 본 연구는 FLACS CFD - Fire Module을 이용하여 10개의 누출, 화재 시나리오에 대한 CFD Simulation을 통해 Clean Room 내부 가상으로 설정한 Monitor Point에서의 복사열 및 온도 변화 값을 확인하였다. Clean Room 내부에서 발생한 화재는 층간 구조물에 높은 복사열을 전달하지만, 그 범위가 상당히 제한적이며, 단일 화재 사고로 인해 붕괴될 가능성이 희박하다. 화재 사고로 인해 탈출구로 이어지는 2 곳의 계단이 동시에 높은 복사열에 노출되는 시나리오는 없어, 화재 발생시 작업자가 탈출 가능하였다. 또한 복사열 및 온도 상승의 수준은 아래층으로 이동하면서 급격하게 낮아지는 것을 확인하였으며, API 520의 기준에 따라 작업자가 30초 동안 버틸 수 있는 복사열인 6.31 kW/m²에 노출된 작업자도 화재가 발생한 Clean Room 내부에서 충분히 탈출할 수 있음을 확인하였다.

Abstract - The PR (Photo Resist) process in the semiconductor process is a process that uses a mixture of flammable substances. Due to the process equipment is installed in a clean room and when flammable substances leak, there is a high risk of suffocation, fire, and explosion. It is necessary to analyze the impact of accidents that may occur during operation and to evaluate whether the safety of workers can be guaranteed. In this study, the value of radiant heat and temperature change at the monitor point set up virtual inside the clean room was confirmed through CFD simulation of 10 leak and fire scenarios using the FLACS CFD - Fire Module. A fire that occurs inside a clean room transfers high radiant heat to the inter-story structure, but its scope is quite limited, and it is unlikely that it will collapse in a single fire accident. There was no scenario in which two stairs leading to the exit were exposed to high radiant heat at the same time due to a fire accident, therefore workers were able to escape in case of a fire. In addition, it was confirmed that the level of radiant heat and temperature rise rapidly decreased as they moved downstairs. According to the API 520 standard, workers exposed to 6.31 kW/m² of radiant heat that workers can withstand for 30 seconds were confirmed that it was possible to sufficiently escape from the inside.

Key words : semiconductor, photo resist, fire, CFD

†Corresponding author: iselpark@gmail.com

I. 서론

반도체 공정 중 PR (Photo Resist) 공정은 여러 인화성 물질을 혼합하여 사용하는 공정으로, 공정을 위한 자동화 장비가 Clean Room 내 설치되어 공정 중 인화성 물질이 누출되는 경우 질식, 화재, 폭발 사고로 이어질 위험성이 크다. 또한 이러한 사고로 인한 피해가 공정 장비뿐만 아니라 전체 설비 또는 건물 전체로까지 사고가 확산될 수 있다. 그러므로 실내 (Clean Room) 에서 인화성 물질을 다루는 PR 공정의 물질 누출시 발생할 수 있는 화재 사고에 대한 영향을 분석하고, 구조적으로 작업자들의 안전을 보장할 수 있는지 평가하는 것이 필요하다.

실내 또는 밀폐된 공간에서 화재가 발생하는 경우 그 피해가 실외에서 발생하는 경우보다 커질 수 있어, 실내 공간에 대한 화재의 취약점 또는 위험성 평가가 중요하며, 기존 연구에서 Woodburn 외 1명[1,2]은 터널에서 일어나는 화재의 영향을 CFD simulation을 통해 분석하였으며, Roh 외 3명[3]은 지하철에서 발생하는 화재를 CFD를 통해 분석하여 승객들의 생명에 대한 위협 정도를 분석하였다. 위험물을 주로 다루는 화학 공장에 대한 화재 시물레이션을 통해 공정 또는 공정 장치에 대한 위험성 분석 연구들이 수행되어왔다. Jang 외 1명[4]은 인화성 물질을 다루는 화학 공장이 고압으로 운전될 때, 제트 화재의 영향을 CFD를 통해 분석하였으며, Yang 외 4명[5]은 사고 발생시 대처에 취약한 offshore LNG 시설에 대한 화재 시물레이션을 CFD를 통해 수행하였다. Wang 외 2명[6]은 화학 공장 내 염소 (Chlorine)이 누출된 경우 농도의 변화를 CFD를 통해 해석하여, 시나리오에 따른 작업자 사망률을 산출하였다. 또한 반도체 PR 공정에서 PR의 수축 효과를 CFD 시물레이션을 통해 분석하기도 하였다[7].

반도체 PR 자동화 장비에 사용되는 주요 인화성 물질로는 아세톤 (Acetone)과 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르 아세트산 (Propylene Glycol Methyl Ether Acetate, PGMEA)이 존재한다. 두 인화성 물질을 포함한 다양한 혼합물들이 실제 공정에 사용되지만, 혼합물에 대한 물리적/화학적 물성치가 명확하게 제공되지 않거나, 혼합물의 물성치를 추정하는 것에 제약이 있어, 가정이 필요하므로 CFD Simulation의 결과에 대한 신뢰성 보장을 위해 무시하였다.

본 연구는 PR 자동화 장비를 포함한 공정 설비로부터 인화성 물질이 누출되어 화재 사고로 확산되는 경우, Clean Room 내부의 복사열 분포와 온도 분포를 3D 기반 CFD Simulation을 통해 분석하였으며, 현 PR 공정을 위한 설비의 구조적인 위험요소와 화재 발생시 작업자의 대피 가능성을 평가하였다.

II. 위험성 평가 방법

2.1. 화재 사고 simulation

누출된 인화성 물질은 그 환경에 따라서 화재, 폭발, 질식 등의 사고로 이어질 수 있다. 화재의 경우 크게 2가지 화재 유형으로 나눌 수 있는데, 누출시 압력을 수반하며 그 순간 점화가 되는 경우 제트 화재 (Jet Fire), 누출된 후 지면에서 자연 기화되며 점화가 되는 경우 풀 화재 (Pool Fire)라고 정의한다. 제트 화재와 풀 화재 모두 누출 물질이 인화점 (Flash Point) 이상의 상태가 되었을 때 발생 가능하며, 인화점 이상의 상태가 되더라도 점화원 (Ignition Source)과 일정 농도 이상의 산소가 존재하지 않으면 화재로 이어지지 않는다.

폭발의 경우 누출 물질이 대기중에서 기화가 되고, 기화된 물질이 충분한 가스 운 (Gas Cloud)을 형성한 가운데 점화되는 경우 발생할 수 있다. 가스 운의 크기가 동일한 경우에도 주변부 공간에 대한 밀집도나 가스 운의 성분에 따라 폭발로부터 발생하는 폭발 압력 (Blast Pressure)은 달라질 수 있으며, 일반적으로 폭발 압력이 가해지는 시간은 1.0E-03초 단위이다.

질식의 경우 밀폐된 공간에 누출된 물질로 인해 내

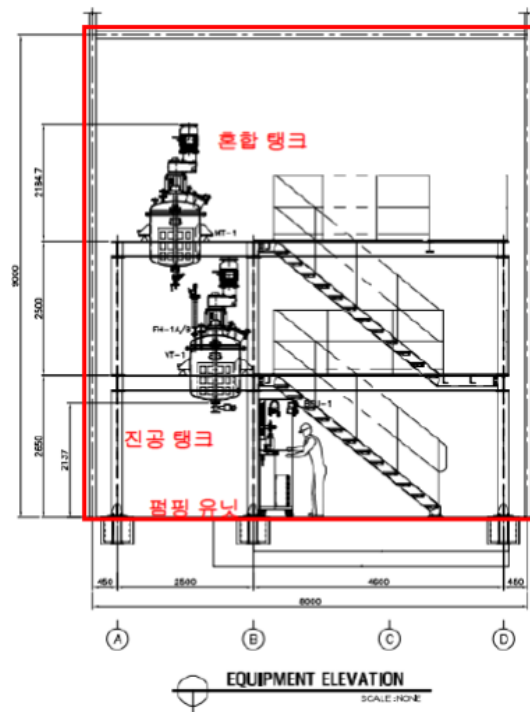


Fig. 1. Clean room elevation view.

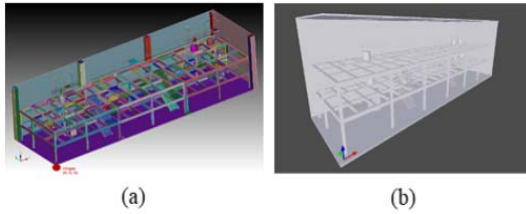


Fig. 2. 3D modeling. (a) CUBIT 3D Tool, (b) Converted model.

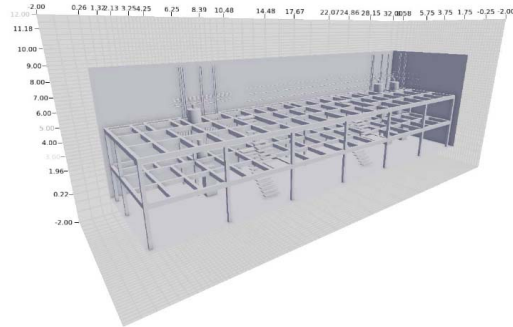


Fig. 3. Simulation grid.

부 산소 농도가 상대적으로 떨어지면서 발생할 수 있다. 하지만 그 공간에 외부 공기를 공급하고 내부 공기를 배출할 수 있는 공기 순환 시스템이 존재하는 경우, 누출된 물질로 인한 눈에 띄는 산소 농도 감소는 기대하기 어려우며, 누출된 물질 역시 강제로 배출되기 때문에 크게 문제 되지 않는다. PR 자동화 장비는 HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) 시스템이 갖춰진 Clean Room 내부에 설치되며, 따라서 인화성 물질로 인한 폭발 및 질식의 위험성은 없는 것으로 간주한다. 사고 결과 분석은 화재에 의한 Clean Room 내부 복사열 분포 및 내부 온도 상승을 확인하는 것이 주목적이며, 제트 화재 및 풀 화재의 유형 구분은 실제로 누출 가능성이 있는 인화성 물질의 특성에 따라 정의한다.

사고 결과 분석은 CFD Simulation을 수반하며, GEXCON 사의 FLACS CFD - Fire Module로 수행하였다.

2.2. 분석 범위 및 절차

본 연구는 PR 자동화 장비를 포함한 공정 설비로부터 인화성 물질이 누출되어 화재로 이어지는 경우를 가정하여, 인화성 물질의 누출을 기반으로 CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulation을 수행하

였다. CFD 시뮬레이션 결과를 통해 Clean Room 내부 복사열 분포와 내부 온도 상승을 확인하였고, 장비가 설치된 공간에 어떤 물리적인 사고 영향이 존재하는지 분석하였다.

III. 화재 사고 simulation 분석

3.1. 클린룸 (Clean Room)

인화성 물질을 사용하는 공정은 Clean Room 내부에 존재하기 때문에, Simulation을 위한 Geometry는 Clean Room 내부로 제한한다. Clean Room은 Fig. 1과 같이 길이 30 m X 폭 8 m X 높이 9 m로 구성되어 있으며, 여기에 혼합 탱크 (Mixing Tank), 진공 탱크 (Vacuum Tank), 펌핑 유닛 (Drum Pumping Unit) 세 개의 패키지가 모두 설치되어 있다. Room 내부는 단일 공간으로 구분되어 있고, 중간층 구조물을 설치하여 실제로는 3 개의 층으로 구성되어 있다. 층간 접근은 Room의 길이 방향 중간에 설치된 계단으로 가능하며, 1층 바닥을 제외한 상부층은 모두 Grating으로 구성하여 Clean Room 내부에서 층간 공기의 흐름이 방해되는 요소는 없다.

혼합 탱크는 3층, 진공 탱크는 2층 높이에 설치되어 있으며, 1층에는 최종 펌핑 유닛이 설치되어 있다. 공정은 상부층에서 하부층으로 내려오는 형태로 설계되어 있다. 기체를 제외한 모든 유체는 중력으로 펌핑 유닛까지 이송된다.

3.2. 3D 모델

FLACS CFD - Fire Module로 Simulation을 수행하기 위해서는 패키지를 포함한 Clean Room 내부를 3D로 형상화해야 한다. CUBIT 3D Tool을 이용하여 Fig. 1 기반의 3D 모델링을 Fig. 2 (a)와 같이 수행하였고, 이를 FLACS CFD 내 모델 Editor로 실제 Simulation을 위한 모델로 간소화하여 Fig. 2 (b)와 같이 변환하였다.

3D 모델을 변환하는 과정에서 모델의 형상을 간소화하는 이유는, 너무 정밀한 곡선 형태의 Solid Body가 포함될 경우 실제 계산 결과에는 큰 영향을 끼치지 않으나, 정밀한 모델에 대한 Mesh 생성 및 Simulation Grid를 생성하는데 많은 노력과 긴 계산 시간이 요구된다. 이에 FLACS CFD의 모델 Editor는 다양한 형상의 3D 모델을 육면체, 원기둥, 타원체만으로 간소화하여 Simulation을 위한 모델로 변환을 해주고 있으며, 심하게 왜곡된 3D 모델의 경우 작업자가 직접 모델 Editor를 통하여 이를 수정하거나 신규 모델을 생성해야 한다. FLACS CFD Simulation은 Fig. 2 (b)을 이용하여 수행하였다.

Table 1. Monitor points in simulation

Floor #	Num. of Points	Coordinate (mm)		
		X	Y	Z
1 st	20	1000, 8000, 15000, 22000, 29000	1000, 3000, 5000, 7000	1500
2 nd	20	1000, 8000, 15000, 22000, 29000	1000, 3000, 5000, 7000	4500
3 rd	20	1000, 8000, 15000, 22000, 29000	1000, 3000, 5000, 7000	7500

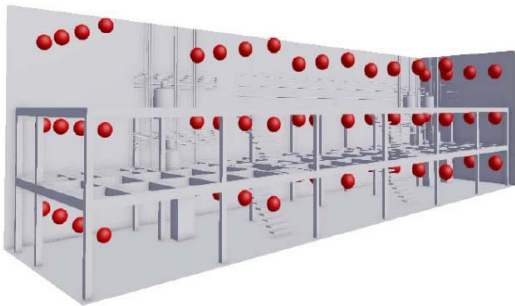


Fig. 4. Monitor points in simulation domain.

Simulation을 위한 3D 모델의 또 다른 특이사항은, Clean Room은 작은 Room들을 포함하고 있으나, 해당 Room의 형상이 명확하지 않은 관계로 이들을 반영하지 않았다는 것이다. 열의 복사는 방향성이 존재하기 때문에 이러한 Room들의 외벽이 복사열의 확산을 막아줄 것으로 판단되지만, 이들이 없는 가운데 계산된 복사열의 수준이 더 높을 것이기 때문에 보수적인 결과를 기대할 수 있으므로 여전히 결과는 유효하다고 간주한다.

3.3. Simulation Grid

Simulation을 위한 모델에 반영되는 Grid는 모델의 특성과 Simulation의 목적에 맞게 구성해야 한다. FLACS CFD 매뉴얼에는 Grid 설정에 대한 Guideline을 제시하고 있어[8], 본 연구에서는 FLACS에서 제시

Table 2. Release scenarios

#	Point	Direction	Coordinate (mm)		
			X	Y	Z
1	VT-1	-Y	5850	5800	6000
2	VT-1	+X	6400	6350	6000
3	MT-1	-Y	5850	5200	3500
4	MT-1	+X	6400	5750	3500
5	VT-2	-Y	25800	5800	6000
6	VT-2	-X	25300	6350	6000
7	MT-2	-Y	25800	5200	3500
8	MT-2	-X	25300	5750	3500
9	VT-3	-Y	28250	5800	6000
10	MT-3	-Y	28250	5200	3500

하는 Guideline을 반영하였다.

Clean Room 내부 화재 사고 Simulation 분석에서 중요한 요소는 인화성 물질의 누출 위치와 누출 범위, 그리고 복사열의 영향을 받는 구조물의 형상이다. 따라서 Grid 생성시 주요 부분인 누출 위치 및 예상되는 누출 범위는 촘촘하게 Grid를 생성하였고, Clean Room 내부가 층을 나누기 위한 단순한 Beam 구조물만을 포함한다는 것을 감안하여 이들에게는 좀 더 완화된 Grid를 부여하였다. 또한, 화재 사고 Simulation 분석은 다양한 누출 시나리오에 대하여 수행하기 때문에, Grid는 각각의 시나리오의 특성을 고려하여 서로 다르게 적용하였다. Fig. 3은 다수의 시나리오 중 하나에 대한 Grid 생성을 보여준다.

3.4. Monitor Point

FLACS CFD - Fire Module Simulation 결과는 주변 모델에 대한 복사열 및 온도 변화를 보여주지만, 여기에 더해서 가상의 위치에 대한 동일한 결과를 보여주기도 한다. Clean Room 내부 공간 중 특정 위치에 대한 해당 결과를 얻기 위해서 가상의 Monitor Point를 지정하였으며, 이 결과는 특정 위치에 있는 작업자에게 가해지는 복사열과 작업자의 표면 온도로 간주할 수 있다.

Clean Room 내부가 3개의 층으로 구성되어 있다는 것을 감안하여 Table 1과 같이 Monitor Point를 다수 지정하였으며, 각각의 Monitor Point가 갖는 방사율(Emissivity)은 0.85로 동일한 것으로 가정하였다. 0.85

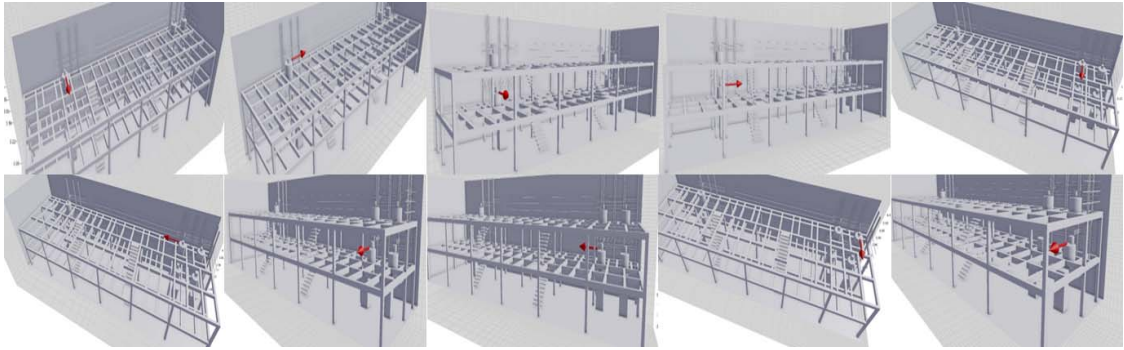


Fig. 5. Various release points.

는 일반적인 섬유에 대한 방사율로써 작업자가 작업복을 입은 상태로 복사열에 노출된다고 판단하여 지정된 수치이다.

각 Monitor Point가 실제 Simulation 공간에 반영된 형상은 Fig. 4과 같다. 실제로는 Clean Room 내부에 다수의 벽들이 존재하는데, Monitor Point 중 #103, #203, #303의 경우 해당 좌표 기준으로 그러한 벽들에 의해 가려진 곳을 대표한다. 따라서 이 세 Monitor Point의 계산 결과가 전체의 결과를 왜곡할 수 있다고 판단하여 이들은 계산에서 제외하도록 한다.

3.5. 인화성 물질 선정

본 연구에서 다루는 PR 공정은 Acetone과 PGMEA가 공정 내 주요 인화성 물질로 사용되며, 이들이 누출되었을 때 점화 가능한 상태인지를 판단하는 것이 중요하다. Clean Room 내부가 HVAC 시스템을 통하여 온도는 $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 상대습도는 $50\% \pm 20\%$, Clean Class는 class 1000, Air change rate는 10 cyle/hour로 유지된다고 했을 때, 누출된 인화성 물질이 노출되는 환경이 이와 동일하다고 가정한다.

Clean Room 내부는 최대 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 유지되는데, 인화성 물질의 누출은 HVAC 시스템의 정지 상황으로 이어지지 않기 때문에 누출된 물질은 최대 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 대기 환경에 노출된다. 해당 물질의 운전 조건이 최대 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지 이기 때문에, 누출된 물질은 $25 \sim 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 범위의 상태로 유지된다. 화학적 특성 중 점화 가능한 상태의 물질을 판단하기 위해서는 인화점을 확인해야 한다. 인화점은 공기에 가연성 물질을 만들어내어 인화할 수 있게 하는 가장 낮은 온도를 가리킨다. 누출 가능한 물질이 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하의 환경에 노출된다고 봤을 때 PGMEA 는 인화점($42\text{ }^{\circ}\text{C}$) 이하에서 노출되기 때문에 이론적으로 이 물질을 점화 가능한 상태라고 볼 수 없으며, FLACS CFD - Fire Module에서도 이런 조건에서는 물질을 점화 가능한 상태라고 보지 않기 때문에

정상적으로 물질이 점화된 상태로 Simulation을 수행하는 것은 불가능하다.

인화성 물질의 혼합 공정에 Acetone과 PGMEA가 주로 사용되며, 이 두 물질은 점화될 수 있는 물질이 분명하나, 실제 운전 조건 및 노출 가능한 환경을 고려했을 때 PGMEA는 누출시 점화 가능한 상태가 아니므로 CFD Simulation은 누출시 인화점 이상의 상태로 존재하는 Acetone만이 가능하다.

누출 구멍 크기와 운전 조건에 따라 누출률을 0.5 kg/s 로 가정하여 Simulation을 수행하였다. 0.5 kg/s 는 9.1 mm 의 누출 구멍에서 발생할 수 있는 수준으로, 전체 발생 가능한 누출 구멍의 크기 중 약 85% 수준을 대표하여 분석을 수행하였다[9].

3.6. Simulation 시나리오

인화성 물질 혼합 공정 설비는 누출이 일어날 수 있는 다수의 플랜지 연결부로 구성되어 있다. 따라서 Clean Room 내부에서 일어날 수 있는 인화성 물질 누출 시나리오는 특정한 몇 가지 상황으로 정의할 수 없으며, 다양한 누출의 가능성을 검토하고 결과를 분석해야 한다. 본 연구에서는 총 10개의 누출 시나리오를 정의하였으며, 누출 물질은 Acetone으로 한정하여 Simulation 하였다. 시나리오별 특성은 Table 2와 같으며, Simulation Domain에서의 누출 방향은 Fig. 5와 같다.

IV. Simulation 분석 결과

4.1. 제트 화염의 형상

각 시나리오에 따른 제트 화염의 형상은 Fig. 6과 같다. 누출률을 0.5 kg/s 로 동일하게 가정했기 때문에 초기 제트 화염의 형상은 모두 동일하나, 주변 구조물의 형상에 따라 화염의 전파 거리와 화염에 의한 온도 분포는 서로 상이하다.

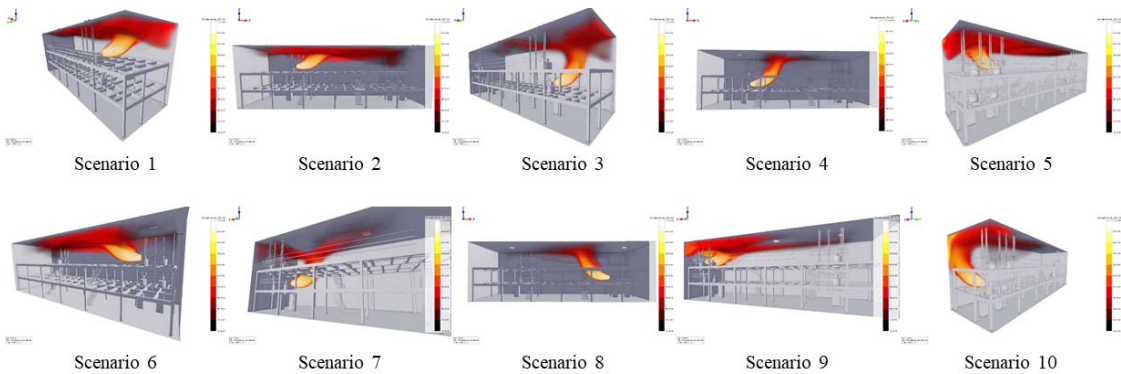


Fig. 6. Flame shapes for scenarios.

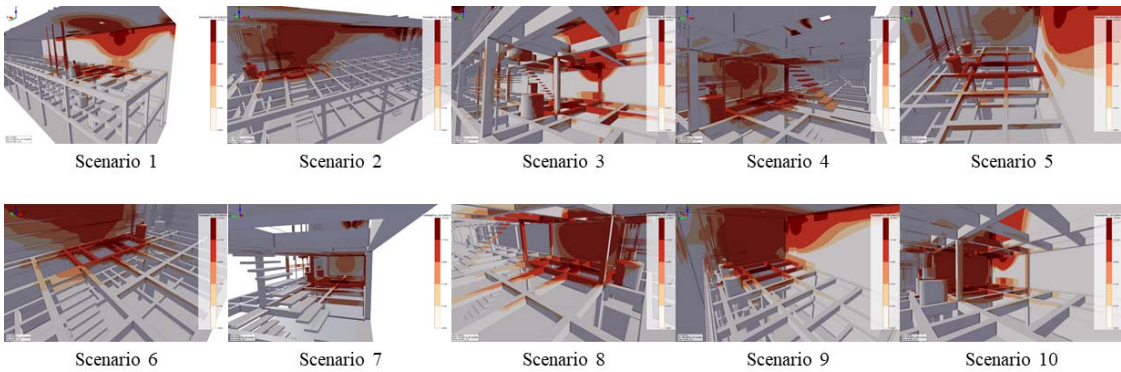


Fig. 7. Radiant heat plot for scenarios.

Acetone이 제트 화재가 되는 경우 화염의 온도는 약 1100 ~ 1150 °C 정도로 형성된다고 보고되어 있다. 시뮬레이션 결과 온도 범위는 1150 °C 까지 나타나고 있으며, 그 이상은 1150 °C 범위가 결과를 포함하고 있다고 봐야 한다. 화염의 최저 온도가 화염의 온도 범위에서 최저값이라고 가정했을 때, 1100 °C 이하의 경우 화염 주변의 대기 온도로 보는 것이 타당하다.

Acetone의 제트 화재로 Clean Room 내부 공간 전체에 온도를 급격하게 상승시키는 시나리오는 발견되지 않았다. 이는 제트 화재의 특성상 방향성이 존재하고, 화염이 물리적인 벽에 닿았을 때 누출원 쪽으로 화염이 되돌아오는 것이 아니라 그 벽면을 따라서 화염과 고온의 열이 분산되기 때문에 Clean Room 중심으로의 열 유입이 제한적이라고 볼 수 있다.

4.2. 복사열 분석 결과

각 시나리오별 복사열 분포는 Fig. 7과 같다. 복사

열은 화염의 중심으로부터 측정되는 지점까지의 거리에 의존하며, Clean Room 내부에서는 대부분 Room을 구성하는 벽면과 내부 빔 구조물이 이러한 복사열을 받게 된다. 최종 복사열은 복사열을 받은 물체의 색상과 흡수 / 방사 / 반사 / 투과율과 관련이 있는데, 모든 물체에 대해서 개별적으로 이런 특성을 정의할 수 없기 때문에 흡수율 85 %, 방사율 85 %로 일괄적으로 계산에 적용하였다.

복사열은 습도에도 크게 영향을 받는다. 습도가 높은 경우 복사열이 잘 전달되지 못하며, 습도가 낮은 경우 대기중에 열 복사를 방해하는 요소가 없기 때문에 물체에 도달하는 복사열 수준이 높게 평가된다. 보수적인 결과를 고려하여, Clean Room 내부 습도는 낮은 수준의 30 %로 적용하였다.

Clean Room 내부에는 큰 하중을 가진 장비가 없고, 층간 구조물에 직접적으로 연결되는 부수적인 구조물이 없기 때문에, 내부 화재 발생시 층간 구조물 자체

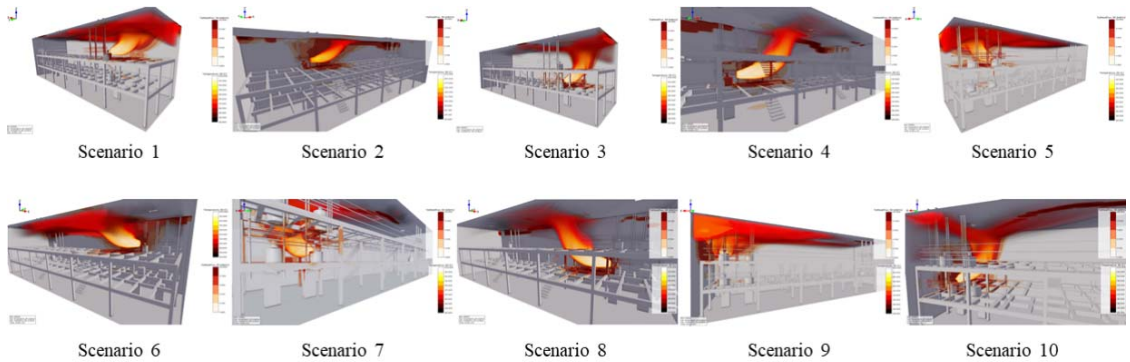


Fig. 8. Combined CFD simulation results for scenarios.

가 스스로 붕괴될 가능성은 매우 희박하다. 복사열에 의해 구조적 강성을 잃을 수 있다고 판단하는 37.5 kW/m^2 수준의 복사열의 분포 범위가 전체 층간 구조물의 크기에 비해 매우 국부적인데, 이 결과가 층간 구조물이 스스로 붕괴될 가능성이 희박한 수준이라는 것을 뒷받침해준다.

반면에, Clean Room 벽면의 경우 높은 복사열이 광범위하게 가해지고 있는 것을 확인할 수 있다. 제트 화염의 특성과도 관련이 있는데, 하지만 이러한 경우에도 벽면이 스스로 붕괴될 수 있다고 판단하는 것은 성급한 부분이 있다. 벽면은 자중을 제외하고는 외부 하중은 없는 것이 일반적인데, 복사열에 노출되었을 때에도 자중에 의한 변형을 제외하고는 구조적 붕괴가 일어날 만한 특별한 요소는 없는 것으로 판단된다.

따라서 본 분석에 따르면, Clean Room 내부의 작업자는 화재 발생 순간에 생명에 직접적인 영향을 끼칠 수 있는 치명적인 중상을 입지 않았다면, 탈출을 위해 층간 구조물을 정상적으로 이용할 수 있다. 화재 상황에서 작업자의 탈출을 고려할 때는, 작업자에게 가해진 복사열의 수준과 노출 가능한 시간을 잘 확인해야 하는데, API (American Petroleum Institute) Standard 521 에서 이를 제시하고 있다[10]. 1.58 kW/m^2 의 경우 작업복을 입은 상황에서 지속적으로 노출이 가능한 수준이고, 4.73 kW/m^2 의 경우 2~3 분 정도를 견딜 수 있는 수준이라고 본다. 6.31 kW/m^2 는 동일한 조건에서 30 초 정도를 견딜 수 있다고 보는데, Clean Room 내부에서 외부로 탈출할 때 적어도 30 초 이상 소요된다고 판단되며, 4.73 kW/m^2 이하의 수준에 노출되는 경우에 작업자는 정상적으로 탈출할 수 있다.

4.3. Monitor point 분석 결과

Monitor Point에서 읽은 최대 복사열과 온도 값을 Table 3에 정리하였다. Simulation을 수행한 시간 내

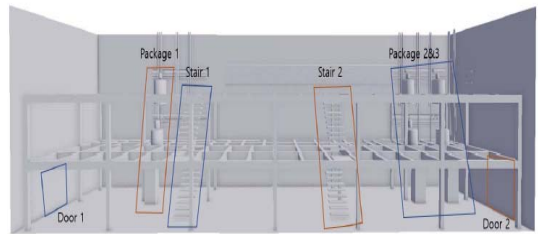


Fig. 9. Clean room interior.

Monitor Point에서 읽힌 값 중에 최대값을 읽은 것이며, 온도가 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 에 가깝거나 그 이상일 경우 해당 Monitor Point가 화염에 직접적으로 닿은 것으로 볼 수 있다.

API 521에 따르면 6.31 kW/m^2 수준으로 노출될 경우 작업복을 입은 상황에서 30 초 정도 견딜 수 있다고 보는데, 해당 복사열을 지속적으로 받는 경우를 가정한 것이기 때문에 화재 발생시 작업자가 즉각적으로 반응하여 6.31 kW/m^2 이하의 지역으로 대피한다면 그 이상도 견딜 수 있다고 보는 것이 타당하다. 만일 초기 6.31 kW/m^2 의 복사열에 노출된 작업자가 수초 이내에 그 지역을 벗어나 4.73 kW/m^2 이하의 지역으로 이동한다면, 작업자가 견딜 수 있는 시간은 좀 더 현실적으로 30 초 이상으로 볼 수 있는 것이다. 따라서 화재 발생 초기에 작업자가 6.31 kW/m^2 이하의 복사열에 노출된 경우, 신속하게 그 지역을 벗어나 낮은 수준의 복사열을 받는 곳으로 이동한다면 Clean Room 내부에서 충분히 안전하게 탈출할 수 있는 것으로 판단된다. 단 본 결과의 전제 조건은, 작업자는 화재가 발생한 패키지에서 먼 쪽의 계단을 이용하여 1층으로 이동해야 하며, 해당 패키지에서 먼 쪽의 문을 이용하여 Clean Room 외부로 나가야 한다. Clean Room의 층간

Table 3. Maximum radiation level and temperature for scenarios

#	Max. Rad. (kW/m ²)	Max. Temp. (°C)	Max. Rad. (kW/m ²)	Max. Temp. (°C)	Max. Rad. (kW/m ²)	Max. Temp. (°C)	Max. Rad. (kW/m ²)	Max. Temp. (°C)	Max. Rad. (kW/m ²)	Max. Temp. (°C)
Scen.	1		2		3		4		5	
301	13.1	447.1	1.6	251.5	2.9	228.8	1.0	174.8	0.2	44.9
302	15.5	355.3	1.3	159.5	15.3	367.4	3.6	213.8	1.3	115.2
304	0.2	51.9	1.5	276.8	0.7	83.8	0.9	212.3	12.5	417.2
305	0.1	41.3	0.0	24.0	0.1	41.6	0.0	24.0	15.7	497.3
306	9.2	381.6	1.8	175.3	7.7	249.0	1.5	117.5	0.1	42.5
307	2.9	237.7	0.2	84.9	4.9	214.2	0.7	127.4	1.1	131.0
308	2.2	175.5	0.3	120.3	1.4	134.1	0.2	32.8	1.6	196.5
309	0.6	86.6	2.0	204.1	1.5	137.4	1.7	126.8	4.8	227.2
310	0.1	44.0	0.0	24.0	0.4	67.5	0.0	24.0	10.1	415.4
311	5.8	405.8	1.0	154.5	9.7	307.2	1.8	122.2	0.2	62.0
312	2.4	231.1	1.1	86.6	3.2	206.0	2.4	126.9	1.0	124.4
313	3.2	183.3	12.3	309.8	1.6	148.9	9.2	261.7	3.2	191.8
314	1.1	119.8	2.7	200.9	1.1	110.2	2.4	128.9	2.6	235.0
315	0.3	72.3	0.0	24.0	0.3	68.5	0.0	24.0	7.4	465.8
316	4.1	367.6	0.8	201.9	6.6	306.9	1.9	121.1	0.7	96.7
317	4.0	211.2	8.9	423.4	4.1	199.4	4.9	152.1	1.4	126.0
318	1.1	187.9	16.4	391.8	5.3	234.4	9.1	229.2	1.7	183.2
319	1.2	136.8	5.5	257.6	1.6	166.3	4.8	181.0	2.8	252.2
320	0.9	101.6	0.0	24.0	0.5	70.9	0.0	24.0	6.9	343.0
Scen.	6		7		8		9		10	
301	0.0	24.0	0.1	38.1	0.0	24.0	0.3	51.2	0.0	30.2
302	1.5	258.4	0.9	97.1	1.1	212.0	2.1	156.5	0.7	89.5
304	1.7	308.5	5.6	247.8	6.0	247.2	8.4	361.0	3.5	201.0
305	1.5	263.1	6.1	274.0	1.3	162.4	81.7	1305.7	19.8	542.0
306	0.0	24.0	0.2	47.8	0.0	24.0	0.2	57.3	0.1	30.8
307	1.8	196.6	1.3	154.8	2.4	147.5	1.6	186.0	1.2	113.1
308	0.7	119.6	2.7	184.4	0.9	116.8	2.0	168.1	3.3	204.3
309	0.8	199.3	5.8	229.1	4.2	169.6	6.2	220.4	4.4	221.6
310	2.0	240.5	10.8	312.2	1.5	189.0	47.3	1150.6	13.6	394.3
311	0.0	24.0	0.2	55.5	0.0	24.0	0.2	79.6	0.1	33.5
312	3.2	196.9	1.0	119.5	3.2	151.1	1.4	157.9	1.4	139.5
313	1.5	129.2	1.8	175.3	2.4	140.2	2.2	177.8	3.0	201.1
314	11.0	322.5	3.8	212.6	13.0	363.7	3.0	243.0	4.9	197.4
315	2.5	259.8	10.8	359.2	2.9	208.1	18.0	673.8	16.0	403.2
316	0.0	24.0	0.3	62.4	0.0	24.0	0.3	71.5	0.2	44.8
317	4.7	220.7	1.6	139.8	3.8	175.8	1.3	151.2	1.5	131.3
318	12.4	399.2	3.3	245.0	8.9	284.7	2.9	280.5	3.3	228.8
319	50.8	1066.6	3.2	254.3	8.7	294.1	5.0	372.1	8.8	254.9
320	2.3	272.1	7.3	308.4	4.4	251.2	12.5	560.0	14.2	341.3

계단 위치와 외부와 연결된 문의 위치는 Fig. 9와 같다. 만약 Package 1 에서 화재가 발생한 경우 작업자는 Stair 2를 통하여 1층으로 이동해야 하며, Door 2를 이용하여 Clean Room 외부로 나가야 한다. 또한 Package 2 또는 3 에서 화재가 발생한 경우 작업자는 Stair 1을 이용하여 1층으로 이동해야 하며, Door 1을 통하여 Clean Room 외부로 탈출해야 한다.

Simulation은 10 초 동안 수행되었는데, 10 초 이내에서 누출된 주변 화염은 충분히 성장되었고, 각 Monitor Point에서 측정된 값의 변화 역시 최대값을 보인 이후 점차 떨어지는 경향을 볼 수 있다. 몇 가지 경우에서 10 초에서 최대값을 보이지 않는 것을 볼 수 있는데, 이는 화염에서 멀리 떨어진 Monitor Point에서 주로 나타나며, 전체 결과에 영향을 끼치지 않는 경우라고 판단할 수 있다.

V. 결론

FLACS CFD - Fire Module을 이용하여 10개의 누출 시나리오에 대해 CFD Simulation을 수행하였고, Clean Room 내부 구조물 및 내부 공간에 가상으로 설정한 Monitor Point에서의 복사열 및 온도 변화 값을 확인하였다.

Clean Room 내부에서 발생한 화재는 층간 구조물에 높은 복사열을 전달하는 것으로 나타났지만, 그 범위가 상당히 제한적이고, 층간 구조물에 의해 지지되는 높은 하중을 가진 장비가 없어 해당 구조물이 단일 화재 사고로 인해 붕괴될 가능성은 희박한 것으로 보인다. 또한 구조적 강성을 잃을 수 있다고 판단하는 37.5 kW/m² 수준의 복사열 분포 범위가 전체 층간 구조물의 크기에 비해 매우 국부적으로 나타났으며, 따라서 Clean Room 내부 화재 발생시 층간 구조물은 온전하게 보전될 수 있다.

각 층은 2 곳의 계단 구조물로 서로 연결되어 있다. Simulation 분석 결과에 따르면, 화재 사고로 인해 2 곳의 계단 구조물이 동시에 높은 복사열에 노출되는 시나리오는 없는 것으로 확인되었으며, 따라서 화재 발생시 부상을 입지 않은 작업자는 둘 중 온전하게 보전된 계단 구조물을 통하여 탈출 문이 있는 1 층으로 이동할 수 있다.

Clean Room 벽면의 경우 높은 복사열이 광범위하게 가해지고 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 이러한 경우에도 벽면이 스스로 붕괴될 수 있다고 판단하는 것은 성급한 부분이 있는데, 벽면은 자중을 제외하고는 외부 하중은 없는 것이 일반적이므로 복사열에 노출되었을 때에도 자중에 의한 열 변형을 제외하고는 구조적 붕괴가 일어날 만한 특별한 요소는 없다.

API Standard 521 에 따르면, 6.31 kW/m²에 노출된 작업자는 약 30 초 정도를 견딜 수 있는 것으로 보고 있는데, 이는 해당 복사열을 지속적으로 받는 경우를 가정한 것이기 때문에 화재 발생시 작업자가 즉각적으로 반응하여 6.31 kW/m² 이하의 지역으로 대피한다면 그 이상도 견딜 수 있다고 보는 것이 타당하다. 만일 초기 6.31 kW/m²의 복사열에 노출된 작업자가 수 초 이내에 그 지역을 벗어나 4.73 kW/m² 이하의 지역으로 이동한다면, 작업자가 견딜 수 있는 시간은 좀 더 현실적으로 30 초 이상으로 볼 수 있다는 것이다. 또한 복사열 및 온도 상승의 수준은 아래층으로 이동하면서 급격하게 낮아지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 제트 화염의 부상 (Lifted Flame) 효과에 따라 하부보다는 상부에 더 큰 영향을 끼쳤기 때문으로 볼 수 있다. 이러한 분석을 근거로, 6.31 kW/m²에 노출된 작업자도 화재가 발생한 Clean Room 내부에서 충분히 탈출할 수 있는 것으로 판단할 수 있으며, 다음의 조건을 전제로 한다: 1) 화재가 발생한 패키지에서 멀리 떨어진 곳의 계단 구조물을 이용하여 아래층으로 이동, 2) 화재가 발생한 패키지에서 멀리 떨어진 1층 탈출 문을 통하여 Clean Room 외부로 탈출. 본 연구를 통해 인화성 물질 및 유해물질을 다루는 반도체 PR 공정에서 화재 사고 발생 시 작업자들의 최적 탈출 경로 확보를 통해 피해 규모를 감소시킬 수 있으며, 화재 탐지기를 적절한 위치에 설치할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Woodburn, P. J. and Britter, R. E., "CFD Simulation of a Tunnel Fire-Part I", *Fire Safety Journal*, **26**(1), 35-62, (1996)
- [2] Woodburn, P. J. and Britter, R. E., "CFD Simulation of a Tunnel Fire-Part II", *Fire Safety Journal*, **26**(1), 63-90, (1996)
- [3] Roh, J. S., Ryou, H. S., Park, W. H. and Jang, Y. J., "CFD Simulation and Assessment of Life Safety in a Subway Train Fire", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(4), 447-453, (2009)
- [4] Jang, C. B. and Choi, S., "Simulation and Damage Analysis of an Accidental Jet Fire in a High-Pressure Compressed Pump Shelter", *Safety and Health at Work*, **8**(1), 42-48, (2017)
- [5] Yang, R., Khan, F., Yang, M., Kong, D. and Xu, C., "A Numerical Fire Simulation Approach for Effectiveness Analysis of Fire Safety Measures in Floating Liquefied Natural Gas Facilities", *Ocean Engineering*, **157**, 219-233, (2018)

- [6] Wang, J., Yu, X. and Zong, R., “A Dynamic Approach for Evaluating the Consequences of Toxic Gas Dispersion in the Chemical Plants Using CFD and Evacuation Modelling”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **65**, 104156, (2020)
- [7] D’Silva, S., Mulders, T., Stock, H. and Erdmann, A., “Modeling the Impact of Shrinkage Effects on Photoresist Development”, *JM3*, **20**(1), 014602, (2021)
- [8] Gexcon AS, “FLACS-CFD v21.1 User’s Manual”, 59-60, (2021)
- [9] IOGP, “Risk Assessment Data Directory-Process Release Frequencies”, IOGP Report 434-01, (2010)
- [10] American Petroleum Institute, “API Standard 521 Pressure-relieving and Depressuring Systems”, Sixth Edition, (2014)