



반도체 PR 공정의 인화성 물질 누출 빈도분석을 통한 위험성 평가

박명남 · 천광수* · 이진석** · †신동일***

명지대학교 화학공학과 박사과정, *금강유역환경청 화학안전관리단, **(주)지엘환경기술,
***명지대학교 화학공학과/재난안전학과 교수
(2021년 8월 13일 접수, 2021년 10월 15일 수정, 2021년 10월 16일 채택)

Risk Assessment of Semiconductor PR Process based on Frequency Analysis of Flammable Material Leakage

Myeongnam Park* · Kwang-Su Chun** · Jinseok Yi*** · †Dongil Shin*,****

*Dept. of Chemical Engineering, Myongji University, Yongin, Gyeonggi-do 17058, Korea

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

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

****Dept. of Disaster and Safety, Myongji University, Yongin, Gyeonggi-do 17058, Korea

(Received August 13, 2021; Revised October 15, 2021; Accepted October 16, 2021)

요약

반도체 Photo Resist (PR) 자동화 장비는 여러 인화성 물질을 혼합하여 사용하며, 인화성 물질이 공정 중 누출되는 경우 다양한 사고로 이어질 수 있어 위험성 평가가 필요하다. 본 연구는 PR 자동화 장비에서 사용되는 Acetone, PGMEA의 누출 빈도와 이러한 누출이 화재 사고로 이어질 수 있는 빈도를 빈도분석 방법을 통해 분석하였으며, 현 설비의 추가적인 위험성 경감 조치의 필요성을 평가하였다. IOGP의 공정 누출 데이터와 점화 확률 데이터를 기반으로 누출 빈도 및 점화 확률을 도출하였으며, 이를 조합하여 실제 화재 사고의 빈도를 분석하였다. 반도체 PR 공정 중에 발생할 수 있는 물질 누출에 대한 빈도는 7.30E-03/year이며, 화재 사고는 물질이 누출되었을 때 인화점 이상의 상태로 존재하는 Acetone에 의해 발생할 수 있으며, 빈도는 1.24E-05/year의 수준으로 계산되었다. UK HSE에서 제시하는 자료에 따르면, 1.24E-05/year의 빈도로 발생하는 주요 사고에 대해서는 7명 이내의 사망자를 발생시킬 때 위험성 경감을 위한 추가 조치가 필요 없는 수준 “Broadly Acceptable”이라고 정의하고 있어, 2인 1조로 운영되는 공정의 특성상 별도의 위험성 경감 조치가 요구되지 않는다.

Abstract - Semiconductor Photo Resist (PR) automation equipment uses a mixture of several flammable substances, and when it leaks during the process, it can lead to various accidents, therefore, risk assessment is necessary. This study analyzed the frequency of leakage of Acetone and PGMEA used in PR automation equipment and the frequency at which such leakage could lead to a fire accident through the frequency analysis method, and evaluated the need for additional risk reduction measures in the current facility. Based on the process leak data and ignition probability data of IOGP, leak frequency analysis and ignition probability were derived, and the frequency of actual fire accidents was analyzed by combining them. The frequency of material leakage in semiconductor PR process is 7.30E-03/year, and fire accidents can occur by acetone that exists above the flash point when the material is leaked, the frequency was calculated at the level of 1.24E-05/year. According to the UK HSE, for a major accident occurring with a frequency of 1.24E-05/year, it is defined as “Broadly Acceptable”, a level that does not require additional measures for risk reduction when it causes 7 or less deaths, and due to the process operated by two people, no additional risk reduction are required.

Key words : semiconductor, photo resist, frequency analysis method, risk reduction

†Corresponding author: dongil@mju.ac.kr

I. 서 론

반도체 Photo Resist (PR) 자동화 장비는 여러 인화성 물질을 혼합하여 사용하며, 실내에 설치되는 장비의 특성상 사용되는 인화성 물질이 공정 중 누출되는 경우 다양한 사고로 이어질 수 있고, 전체 설비에 대하여 인명 및 재산 피해를 입힐 수 있어 인화성 물질 혼합 공정에 대한 안전성 평가가 필수적이다.

인화성 물질을 다루는 화학 공장에서는 인화성 물질의 누출에 의한 폭발 또는 화재의 위험성을 평가하는 선행연구들이 이어지고 있다. Dan 외 4명[1]은 LNG Floating Production, Storage and Offloading (FPSO) 플랜트의 LNG 누출, 화재, 폭발의 빈도분석을 수행하여 LNG-FPSO에서의 LNG 누출 위험성 평가를 진행하였으며, Kang 외 3명[2]은 냉동제조 시설에서 암모니아 누출 사고의 위험을 분석하였다. Kodoth 외 6명[3]은 수소충전소에서 수소의 누출 빈도분석을 통해 수소충전소의 위험성을 분석하였다.

PR 자동화 장비는 아세톤 (Acetone, CAS NO. 67-64-1), 프로필렌 글리콜 모노메틸 에테르 아세트산 (Propylene Glycol Methyl Ether Acetate, CAS NO. 108-65-6)과 같은 주요 인화성 물질을 포함한 다양한 혼합물 및 독성 물질을 다루며, 기존 Boggs [4], Huang과 Wu[5]의 연구에서 PR 공정의 독성 물질에 대한 작업자의 노출 위험성 평가를 수행하였다. 기존 PR 공정의 위험성 평가 연구들은 독성 물질의 노출에 대한 위험성 평가만 수행되어, 본 연구에서는 인화성 물질에 대한 위험성 분석을 수행하였다.

대상 공정에 사용되는 혼합물에 대한 물리적 / 화학적 물성치가 명확하게 제공되지 않거나 혼합 비율에 따라 새로운 물성치를 갖게 되는 물질의 경우, simulation을 수행하는 과정에서 물질의 특성에 대한 가정이 필요하고, 이는 결과의 왜곡을 초래할 수 있다. 이때, CFD simulation은 결과에 대한 신뢰성이 보장되지 않아, 물질의 특성보다는 공정 설비의 물리적인 설계와 연관되어 있어 P&ID (Process and Instrumentation Diagram) 상의 모든 배관 요소 및 부품의 특성들을 반영하여 분석하는 누출 빈도 분석 방법을 주로 사용한다.

본 연구는 PR 자동화 장비를 포함한 반도체 공정 설비로부터 인화성 물질이 누출되는 빈도와 이러한 누출이 화재 사고로 이어질 수 있는 빈도를 빈도분석 방법을 통해 분석하여, 현 설비의 추가적인 위험성 경감 조치의 필요성을 평가하였다.

II. 위험성 평가 방법

2.1. 누출 및 화재 사고 빈도분석

누출 빈도분석은 정상적인 설비 운전 상태에서 물리적인 결함에 따라 발생할 수 있는 누출의 가능성을 판단하기 위해 수행하며, 일반적으로 누출은 플랜지 연결부, 밸브, 배관에 연결된 계기류, 펌프 또는 컴프레서 등 가압을 위한 장비에서 발생한다.

각 누출 요소들의 빈도는 IOGP (International Association of Oil & Gas Producers)에서 2019년에 발간한 ‘Process Release Frequencies’에 따라 계산하였으며[6], IOGP Data는 UK HSE (United Kingdom Health and Safety Executive)에서 제공하는 HCRD (HydroCarbon Release Database)에 근거하고 있다. 이 Data는 10년(2006-2015년)과 21년(1992-2015년) 두 개의 대표적인 Data 수집 기간을 제공한다. 플랜트 산업이 오랜기간동안 발전함에 따라 사용되는 각종 부품들의 품질도 점차 향상되어 왔기에, 2006 년에서 2015년까지의 누출 데이터는 이전에 제공한 1992년에서 2006년까지의 누출 데이터보다 누출 빈도가 낮게 평가되고 있다. 따라서 1992년에서 2015년까지의 누출 데이터를 사용하여 빈도분석을 수행하는 것은 그 결과가 보수적이고 현실적이지 못하다고 판단되며, IOGP 역시 2006년에서 2015년까지 10년간의 누출 데이터를 사용할 것을 권고하고 있다. 본 연구는 IOGP의 권고에 맞게 2006년에서 2015년까지의 누출 데이터를 사용하며, P&ID 상의 PR 공정과 관련한 모든 배관 및 부품 요소에 대한 누출 빈도분석을 수행하였다.

화재 사고 빈도는 누출 빈도와 인화성 물질의 점화 확률의 조합으로 계산할 수 있다. IOGP는 다양한 플랜트 상황에 대한 점화 확률을 제시하고 있으며, PR 자동화 설비의 특성과 사용하는 인화성 물질 특성을 바탕으로 가장 유사한 플랜트 상황에 대한 점화 확률을 확정하고, 이를 반영하여 전체 화재 사고 빈도를 계산하였다.

2.2. 빈도분석 범위 및 절차

PR 자동화 장비를 포함한 공정 설비로부터 인화성 물질이 누출되는 빈도를 다음과 같은 절차를 통해 분석하였다: 1) IOGP의 공정 누출 데이터 기반으로 누출 빈도분석, 2) IOGP의 점화 확률 데이터 기반으로 누출된 인화성 물질의 점화 확률 도출, 3) 누출 빈도와 점화 확률의 조합으로 실제 화재 사고 빈도분석.

III. 누출 및 화재 사고 빈도분석

3.1. PR 장비의 운전 조건

PR 자동화 장비의 주요 인화성 물질은 아세톤, 프로펠렌 글리콜 모노메틸 에테르 아세트산으로, 두 물질은 혼합 탱크 (Mixing Tank)로 처음 주입되며, 진공 탱크 (Vacuum Tank)를 거쳐 펌핑 유닛 (Drum Pumping Unit)으로 이송된다. 이러한 장비 구성을 하나의 패키지로 봤을 때, 유사한 세 패키지가 Clean Room 내부에 설치된다. 세 패키지는 상기 동일한 인화성 물질을 사용하므로 분석에는 세 패키지 중 하나의 패키지만 대표적으로 분석하여 동일하게 적용하였다. 세 패키지는 서로 독립적으로 운영되고, 패키지간 인화성 물질이 서로 공유되고 있지 않기 때문에, 하나의 패키지로부터 발생하는 인화성 물질의 누출 위험성을 세 패키지에 동일하게 적용 가능하다.

PR 자동화 장비의 인화성 물질 혼합 공정 흐름도 (Process Flow Diagram)는 Fig. 1과 같다. 아세톤 PGMEA 는 혼합탱크로 0.1 MPa 의 압력으로 주입되며, 온도는 15~25 °C 수준이다. Batch Time 을 각각 고려했을 때 두 인화성 물질의 운전 조건은 Table 1과 같다.

혼합 공정에는 이들의 효과적인 반응을 위해 다양한 촉매제를 첨가한다. 촉매제는 인화성 물질로 정의되어있으나, 인화점이 공정 운전 조건과 Clean Room 내부 유지 온도보다 현저히 높은 것으로 보고되어 있다. 따라서 이들이 정상 운전 조건에서 누출이 된다 하더라도 그 위험도는 Acetone 및 PGMEA 보다 낮은 것으로 간주할 수 있으며, 촉매제를 포함하고 있는 이들의 혼합물로부터 발생할 수 있는 위험성 역시 단일 물질인 Acetone 및 PGMEA로부터 발생하는 위험성으로 평가될 수 있다.

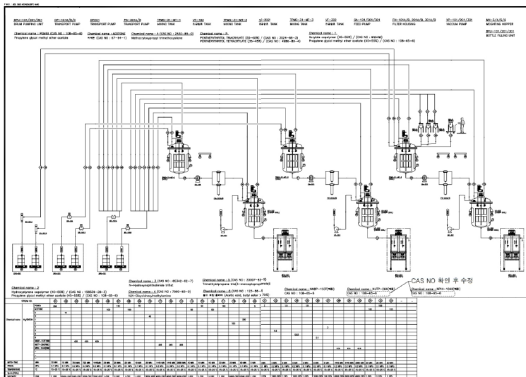


Fig. 1. Process flow diagram of PR process.

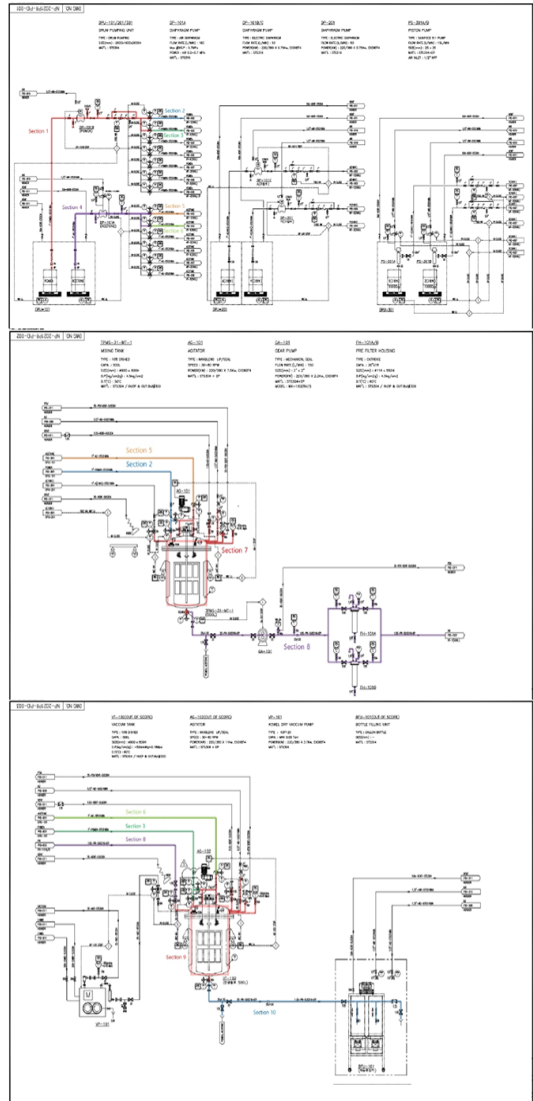


Fig. 2. Process & instrument diagram and isolation section.

Table 1. Operating conditions of flammable materials

Condition	Acetone	PGMEA
Operating Pressure (MPa)	0.1	0.1
Operating Temperature (°C)	15~25	15~25
Mass Flowrate (kg/s)	0.09	0.14

Table 2. Operating conditions of isolation section

Section #	Stream #	Material	Operating Pressure (MPa)	Operating Temperature (°C)	Mass Flowrate (kg/s)
1	01	PGMEA	0.1	15 ~ 25	0.14
2	01	PGMEA	0.1	15 ~ 25	0.14
3	07	PGMEA	0.1	15 ~ 25	0.08
4	06	Acetone	0.1	15 ~ 25	0.08
5	06	Acetone	0.1	15 ~ 25	0.08
6	08	Acetone	0.1	15 ~ 25	0.08
7	03	Mixture	0.1	15 ~ 25	0.02
8	04	Mixture	0.2	15 ~ 25	0.02
9	05	Mixture	0.2	15 ~ 25	0.01
10	05	Mixture	0.2	15 ~ 25	0.01

3.2. 공정 격리 부분

누출 빈도 분석은 전체 공정을 다수의 개별 격리 가능한 Section으로 구분하여 수행한다. 이러한 개별 Section은 공정 내 Shutdown 밸브 또는 정상시 닫힌 밸브들로 구성되며, 개별 Section으로 구분하는 이유는 물질의 누출시 그 양을 개별 Section에 제한하기 위함이다. 만일 이러한 개별 Section이 구분되어 있지 않다면, 누출 사고시 시스템 내 모든 물질이 누출된다고 가정해야 하므로 사고의 지속시간이 현저히 늘어나게 된다.

PR 자동화 장비의 인화성 물질 혼합 공정 계통도 (Process & Instrumentation Diagram)는 Fig. 2와 같다. Fig. 2는 현재 공정에 반영된 Shutdown 밸브 기준으로 10개의 Section으로 나눈 것을 표기하였으며, 누출 빈도는 이러한 개별 Section에 대해서 계산한다. Table 2에 개별 Section의 특성을 정리하였으며, 해당 Section에 존재하는 물질의 총량은 배관 및 장비의 부피로 가정한다. 이러한 물질의 총량은 실제 누출 시간에 직접적인 영향을 끼치며, 가스 운의 형상 및 확산범위 결정에 주요 인자로 작용한다.

정확한 배관의 길이와 피팅 수를 가지고 분석을 수행하는 것이 타당하나, 현재 이에 대한 정보가 정확하게 제공되지 않았기 때문에 본 연구에서는 장비간 배관 길이를 임의의 길이 10 m, 90 도 Elbow 가 각각 6 개씩 있다고 보수적으로 가정하여 분석을 진행하였다.

3.3. 부품 수 결정

IOGP 는 다양한 부품의 종류와 그 부품의 크기,

Table 3. Ignition probability of scenario 6

Release Rate (kg/s)	Ignition Probability
0.1	0.0011
0.2	0.0014
0.5	0.0019
1	0.0024
2	0.0042
5	0.0088
10	0.0155
20	0.0272
50	0.0570
100	0.1000
200	0.1000
500	0.1000
1000	0.1000

그리고 그 부품으로부터 발생할 수 있는 누출 구멍의 크기에 따른 누출 빈도를 제공한다. 부품의 크기는 대표적으로 3 가지 정도로 제공을 하는데, 누출 빈도 분석의 대상이 되는 개별 부품은 제공된 정보 내에서 내삽 (Interpolation) 하여 사용한다.

만약 누출 빈도 계산의 대상이 되는 플랜지의 크기가 50 mm 인 경우, 0 mm 와 174mm 사이에서

내삽하여 값을 추정한다. 개별 부품에 대한 누출 빈도가 계산되면, 여기에 부품의 수를 곱하여 해당 Section에서 그 부품에 의한 전체 누출 빈도를 계산할 수 있다. 부품의 수는 Fig. 2의 공정 계통도를 기반으로 산출하며, 추후 설계 변경에 따른 부품 수 변경이나 배관 길이 변경 등을 고려하여 Fig. 2 기반의 수량에 110 %를 적용하여 누출 빈도를 계산하였다.

실제 공정에는 기어 펌프 (Gear Pump)와 진공 펌프 (Vacuum Pump)가 반영되어 있으나, IOGP Release Frequency Data에는 원심 펌프 (Centrifugal Pump)와 왕복동 펌프 (Reciprocating Pump)에 대한 누출 빈도만 제공한다. 따라서 기어 펌프와 진공 펌프에 대한 누출 빈도는 상대적으로 높은 누출 빈도를 가진 왕복동 펌프로 가정하여 누출 빈도분석을 수행하였다.

IOGP 는 계기류에 대해서도 그 형태와 종류를 구분하지 않고, 대표 누출 빈도를 제공한다. 실제 공정에는 다양한 계기류가 반영되어 있으나 IOGP의 누출 빈도 제공 형태를 고려하여 대표값을 그대로 분석에 반영한다. 혼합 탱크와 진공 탱크도 특정 값이 제공되지 않아 IOGP release Frequency Data 중 공정 탱크 (Process Vessel)에 대한 누출 빈도를 적용하였다.

3.4. 누출 구멍 크기

누출 구멍의 크기에 따라 누출되는 질량 유량이 결정되고, 또한 그 누출 빈도도 결정된다. 일반적으로 작은 누출 구멍이 큰 누출 구멍보다 낮은 빈도

로 발생할 수 있으며, UK HSE 에서도 작은 누출 구멍에 대한 빈도를 상대적으로 높게 평가하고 있다. 하지만 이러한 누출 구멍의 크기로 명확하게 정의하여 분석에 반영하기는 어렵다. 이런 형태의 분석에서는 누출 구멍의 크기를 임의로 정의하여 계산에 반영하는 것이 일반적이며, 따라서 본 보고서에서도 대표적인 하나의 누출 구멍 크기를 결정하여 분석하도록 한다.

HCRD 보고서에 따르면 대부분의 누출 구멍의 크기는 누출이 발생할 수 있는 부품의 크기와 연관된다. HCRD 에서 조사한 부품의 크기와 누출 구멍 크기의 상관관계에 따르면, 약 60 % 의 분포로 누출 구멍의 크기는 부품의 크기의 약 5 %로 가정할 수 있다[6].

만약 누출 빈도 계산의 대상이 되는 플랜지의 크기가 50 mm 인 경우, 가연성 물질 혼합 공정의 배관 크기가 2" 이하인 점을 감안하면 누출 구멍 크기는 최대 2.5 mm 로 가정할 수 있는데, 공정 조건을 반영하여 2.5 mm 의 누출 구멍으로부터 누출되는 가연성 물질의 누출량을 계산하면 0.04 kg/s 이하다. 이 수준에서는 가연성 물질의 누출로 인한 화재 사고 결과를 CFD Simulation으로 평가하기 어려워 누출 구멍의 크기를 좀 더 크게 가정할 필요가 있다.

본 논문에서는 상기 내용을 토대로 가연성 물질 혼합 공정을 구성하는 2" 배관의 15 % 수준인 7.5 mm 로 누출 구멍 크기를 가정하였으며, 누출 빈도 분석 및 사고 결과 분석을 그에 맞게 각각 수행한다. 이 분석 결과는 전체 누출 구멍 크기 분포의 약 80 % 수준을 대표한다고 볼 수 있다.

Table 4. Initial release rate and ignition probability of major materials in mixing process

Hole Diameter 7.5 mm	Major Material	
	Acetone	PGMEA
Discharge Coefficient	0.61	0.61
Liquid Density (kg/m ³)	790	965
Initial Pressure (MPa)	0.2	0.2
Atm Pressure (MPa)	0.1	0.1
Height of Hydrostatic Pressure (m)	0	0
Initial Release Rate (kg/s)	0.3387	0.3744
Ignition Probability	0.0016	0.0017

3.5. 점화 확률

모든 가연성 물질의 누출이 직접적인 점화로 이어지지 않는다는 사실은 실제 화재 사고의 빈도를 계산하기 위해서는 누출 빈도분석 결과에 점화 확률을 반영해야 한다. IOGP는 다양한 플랜트 환경에서의 점화 확률을 제시하고 있으며, 인화성 물질의 혼합 공정은 설비의 전체 규모와 인화성 물질의 화학적 특성을 고려했을 때, 시나리오 6 “Small Plant Liquid (Liquid release from small onshore plant)”가 가장 적합하다. 시나리오 6 에 해당하는 점화 확률을 Table 3에 정리하였으며, 본 논문 3.4 항에서 제시한 누출 구멍의 크기 및 누출률에 근거하여 점화 확률을 계산하였다.

점화 확률은 물질의 누출률과 깊은 관련이 있다. 누출률은 비압축성 유동에 대한 Bernoulli Equation 인 식 (1)로 계산할 수 있으며, 초기 누출률이 일정

Table 5. Release frequencies for equipment

Equipment	Size of Equipment					
	2.0"	1.5"	1.0"	3/4"	1/2"	1/4"
Pipe	1.15E-05	1.23E-05	1.34E-05	1.38E-05	1.42E-05	1.47E-05
Flange Joint	1.59E-06	1.47E-06	1.29E-06	1.23E-06	1.17E-06	1.08E-06
Manual Valve	8.67E-06	8.89E-06	9.22E-06	9.33E-06	9.45E-06	9.61E-06
Actuated Valve	3.91E-05	3.95E-05	3.99E-05	4.01E-05	4.02E-05	4.03E-05
Instrument	3.66E-05					
Process Vessel	1.80E-04					
Filter	2.72E-04					
Pump	1.00E-03					

하게 지속된다는 보수적 가정을 적용하였다. 인화성 물질은 배관 내부에서 액상으로 존재하기 때문에 누출 계수 (Discharge Coefficient)는 0.61을 적용하였다 [7].

$$Q_0 = C_D A \sqrt{2\rho_L [(P_0 - P_a) + \rho_L g h]} \quad (1)$$

여기서, Q_0 는 초기 누출량(kg/s), C_D 는 누출계수 (일반적으로 0.61), A 는 누출구멍의 크기(m^2), ρ_L 는 액체의 밀도(kg/m^3), P_0 는 액체의 초기 압력(N/m^2), P_a 는 대기압($10^5 N/m^2$), g 는 중력가속도($9.81 m/s^2$), h 는 구멍으로부터 액체표면의 높이(m)이다.

반도체 PR 공정에서 주로 다루는 인화성 물질인 Acetone과 PGMEA의 7.5 mm 누출 구멍에 대한 두 물질의 누출률 및 점화 확률을 Table 4에 나타내었다.

IV. 결 과

4.1. 부품별 누출 빈도

PR 자동화 장비를 구성하는 각 부품의 누출 빈도는 Table 5과 같다. 누출 빈도 계산시 누출 구멍 크기는 3.4절의 내용을 토대로 7.5 mm로 가정하였으며, IOGP 에서 제시한 대표 부품 크기들 사이에서 내삽하여 실제 공정에 사용된 부품의 누출 빈도를 도출하였다.

4.2. 공정내 부품 수 결정

공정 계통도 기반으로 Table 6과 같이 부품 수를 결정하였다. 추후 설계 변경을 고려하여 부품 수는

Fig. 2에 반영된 것에 110 %를 가정하였다. 배관 플랜지 연결부는 하나의 수량으로 고려하였으며, 밸브류는 각각 두 개의 플랜지를 추가로 고려하였다. 4.1항의 밸브에 대한 누출 빈도는 밸브 자체의 누출을 고려한 것이므로, 추가 플랜지의 누출 빈도가 더해져야 한다. 단, 안전밸브의 경우 밸브의 전단에만 유체가 존재하기 때문에 한 개의 플랜지만 추가로 고려하였다. 4.1항의 계기류에 대한 누출 빈도 역시 계기류 자체에서 발생하는 누출을 고려한 것이므로, 배관과 계기류의 연결부에 한 개의 플랜지를 추가로 고려하였다. 용접 연결부는 누출이 없는 것으로 간주한다.

4.3. 누출 빈도분석 결과

4.1 항의 부품별 누출 빈도와 4.2 항의 부품 수를 토대로 각 Isolation Section 별 누출 빈도를 계산하였다. 누출 빈도는 물질의 특성과는 큰 연관성이 없고, 과거에 발생한 누출 사고 사례의 통계적 수치와 현재 설계에 반영된 부품의 종류 및 크기에 따라 계산된다. 반도체 PR 자동화 설비 중 인화성 물질을 혼합하는 공정 중에 발생할 수 있는 물질 누출에 대한 빈도를 계산하고, Isolation Section 별 누출 빈도를 더하여 전체 혼합 공정에 대한 누출 빈도를 계산하였으며, 이를 Table 7과 같이 정리하였다.

Table 7에 따르면, 인화성 물질인 Acetone과 PGMEA가 혼합 탱크로 처음 주입되어 진공 탱크 및 펌핑 유닛으로 이송되는 구간에서 발생할 수 있는 누출 사고의 빈도가 7.30E-03/year로 계산되었다. 이는 물질이 공정 중 누출되는 단일 사고가 천 년에 7.3 회 정도로 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

모든 위험성은 단일 사고의 빈도와 그 결과의 조

반도체 PR 공정의 인화성 물질 누출 빈도분석을 통한 위험성 평가

Table 6. Part count for each isolation section

Isolation Section	Number of Equipment (ea)								
	# 1	# 1	# 1	# 2	# 3	# 4	# 4	# 5	# 6
	1.0"	3/4"	1/2"	1.0"	1.0"	1.0"	1/2"	1.0"	1.0"
Pipe	5.5 m	0.2 m	0.2 m	5.5 m	5.5 m	5.5 m	0.2 m	5.5 m	5.5 m
Flange Joint	33.0	2.2	3.3	7.7	7.7	16.5	3.3	2.2	2.2
Manual Valve	9.9	1.1	1.1	1.1	1.1	3.3	1.1	-	-
Actuated Valve	2.2	-	-	2.2	2.2	2.2	-	1.1	1.1
Instrument	2.2			-	-	1.1		-	-
Process Vessel	-			-	-	-		-	-
Filter	-			-	-	-		-	-
Pump	1.1			-	-	1.1		-	-
Isolation Section	Number of Equipment (ea)								
	# 7	# 7	# 7	# 7	# 7	# 8	# 8	# 8	# 8
	2.0"	1.5"	1.0"	3/4"	1/2"	2.0"	1.5"	1.0"	3/4"
Pipe	0.2 m	0.4 m	5.5 m	0.4 m	1.1 m	5.5 m	5.5 m	0.2 m	0.2 m
Flange Joint	3.3	2.2	13.2	4.4	11.0	8.8	19.8	1.1	1.1
Manual Valve	-	1.1	1.1	2.2	4.4	3.3	6.6	-	-
Actuated Valve	1.1	2.2	-	-	1.1	-	-	1.1	-
Instrument	1.1					7.7			
Process Vessel	1.1					-			
Filter	-					2.2			
Pump	-					1.1			
Isolation Section	Number of Equipment (ea)								
	# 8	# 8	# 9	# 9	# 9	# 9	# 10	# 10	
	1/2"	1/4"	1.5"	1.0"	3/4"	1/2"	2.0"	1.5"	
Pipe	1.1 m	1.3 m	0.7 m	0.2 m	0.4 m	0.9 m	5.5 m	5.5 m	
Flange Joint	14.3	15.4	4.4	7.7	7.7	11.0	2.2	18.7	
Manual Valve	5.5	6.6	1.1	1.1	2.2	3.3	1.1	4.4	
Actuated Valve	-	-	2.2	-	-	1.1	-	2.2	
Instrument	7.7		-			-			
Process Vessel	-		-			-			
Filter	2.2		-			-			
Pump	1.1		-			-			

Table 7. Release Frequency for each isolation section

	Isolation Section									
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10
Release Frequency (/year)	1.40E-03	1.82E-04	1.82E-04	1.37E-03	1.20E-04	1.20E-04	6.40E-04	2.48E-03	5.09E-04	2.97E-04
Total Release Frequency (/year)	7.30E-03									

Table 8. Fire event frequency for each isolation section

	Isolation Section									
	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6	# 7	# 8	# 9	# 10
Release Frequency (/year)	1.40E-03	1.82E-04	1.82E-04	1.37E-03	1.20E-04	1.20E-04	6.40E-04	2.48E-03	5.09E-04	2.97E-04
Ignition Probability	0.0017									
Fire Frequency (/year)	2.38E-06	3.09E-07	3.09E-07	2.33E-06	2.05E-06	2.05E-07	1.09E-06	4.21E-06	8.66E-07	5.06E-07
Total Release Frequency (/year)	1.24E-05									

합을 이용해 수치적으로 지표화 할 수 있는데, 일반적으로 사고의 빈도가 높게 평가될 경우 그 사고로 인한 결과가 미미하며, 인명 / 재산 / 환경에 심각한 악영향을 초래할 수 있는 사고는 그 빈도가 상대적으로 낮게 나타난다.

설비를 구축함에 있어 경제성을 고려한다면, 설계 단계에서 예측 가능한 모든 사고에 대해서 위험성 제거를 수행하는 것은 일반적이지 않다. 설비를 소유하고 운영하는 자가 위험성을 제거하기 위한 수치적 기준을 제시할 경우 정량적으로 이를 분석하여 설계에 직접적인 위험성 제거 조치를 반영할지 여부를 결정할 수 있다. 이러한 수치적 기준은 사망에 이를 수 있는 작업자 수와 그 사고에 대한 빈도의 조합으로 제시되는데, 일반적으로 인화성 물질의 누출 사고만으로는 작업자가 직접적으로 사망에 이르게 되는 경우가 드물어 밀폐 공간에서의 질식 사고가 주요 원인인 경우를 제외하고는 물질의 누출만으로는 치명적 인명 사고로 이어질 수 없다. 하지만 누출된 물질이 그 환경에서 점화 가

능한 상태이거나, 이미 존재하는 화재가 누출된 물질에 전이되어 2차 / 3차 사고로 이어진 경우는 화재 / 폭발 등의 사고에 의해 주변 작업자가 사망에 이를 수 있다. 따라서 인화성 물질의 누출 사고는 그 자체의 빈도로 위험성을 분석할 것이 아니라 누출된 물질이 점화되어 작업자를 사망에 이르게 할 수 있는 빈도를 분석하는 것이 타당하다.

4.4. 화재 사고 빈도분석 결과

Table 4에 Acetone 및 PGMEA 에 대한 점화 확률을 계산하였으며, 4.3 항의 각 누출 빈도와 계산된 점화 확률의 조합으로 화재 사고 빈도를 계산할 수 있다. Acetone 및 PGMEA 의 점화 확률은 0.0001의 차이만 존재하므로, 계산의 단순화를 위해 두 물질이 동일하게 0.0017의 점화 확률을 갖는다고 가정한다.

반도체 PR 자동화 설비 중 인화성 물질을 혼합하는 공정 중에 발생할 수 있는 Isolation Section 별 화재 사고 빈도는 Table 8와 같으며 전체 화재 사고

빈도는 $1.24E-05/year$ 로 계산되었다. 이는 인화성 물질이 공정 중 화재 사고로 이어지는 것이 십만 년에 1.24 회 정도로 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

UK HSE 에서 제시하는 ‘Acceptable Risk Criteria’에 Table 8의 결과를 적용하면, 동시에 약 7명 이상의 작업자를 사망에 이르게 하는 사고가 아니라면, 그 사고는 UK HSE에서 위험성 경감을 위한 추가 조치가 필요하지 않은, 충분히 수용 가능한 위험성을 가지는 영역으로 정의하고 있는 ‘Broadly Acceptable’ 영역에 있다. 그 이상인 경우 ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 범위에 있는 위험성이라고 판단하며, 합리적으로 실행가능한 수준까지 위험성을 감소시켜야 하는 것이 원칙인데, 공정의 특성상 7명의 작업자가 동시에 Clean Room 내부에 상주하지 않으며, 따라서 인화성 물질의 화재 사고로 인해 모든 작업자가 사망한다고 하더라도 본 위험성은 ‘Broadly Acceptable’ 영역에 있기 때문에 허용할 수 있는 위험 수준이라고 판단할 수 있다.

V. 결론

반도체 PR 자동화 설비 중 인화성 물질을 혼합하는 공정 중에 발생할 수 있는 물질 누출에 대한 빈도는 $7.30E-03/year$ 로 계산되었다. 누출 빈도는 배관 플랜지 연결부, 밸브, 계기류, 펌프 및 탱크 등의 개별 누출 빈도를 토대로 공정 계통도 상의 이들의 실제 수와 조합하여 계산하였다. 해당 결과는 물질이 공정 중 누출되는 단일 사고가 천 년에 7.3 회 정도로 발생할 수 있다는 것을 의미한다.

누출 사고는 누출 그 자체로 인명 및 재산 피해를 가져오지는 않는다. 인화성 물질의 누출은 화재, 폭발 및 질식 사고로 이어질 때 주요 사고로 구분하는 것이 일반적인데, Clean Room 내부의 HVAC 시스템이 시간당 10 회의 공기 회전율을 가지고 있기 때문에 누출된 인화성 물질이 정체된 상태로 존재하다가 발생할 수 있는 폭발이나, 산소 농도의 감소 및 15 분 이상 독성 물질의 흡입에 따른 작업자 질식 사고는 일어나기 어렵다고 판단된다. 또한 인화성 물질이 누출되었을 때 시스템 내 압력이 감소한 것을 압력 센서로 감지하여 공정을 멈추거나, Clean Room 내부에서 가스 감지기로 기화된 인화성 물질을 감지할 수 있기 때문에 폭발 및 질식 사고로 이어지는 것을 작업자가 충분히 방지할 수 있다고 볼 수 있다.

화재 사고는 물질이 누출되었을 때 인화점 이상의 상태로 존재하는 Acetone에 의해 충분히 일어날

수 있다. 인화성 물질을 혼합하는 공정은 내압이 존재하기 때문에 제트 화재로 발생할 가능성이 매우 크며, 그 빈도는 $1.24E-05/year$ 의 수준으로 계산된다. 이 결과는 Clean Room 내부에서 화재 사고가 십만 년에 1.24 회 정도로 발생할 수 있다는 것을 의미한다. UK HSE (United Kingdom Health and Safety Executive)는 사고 빈도와 그에 따른 사망자 수를 가지고 ‘허용할 수 있는 위험 수준 (Acceptable Risk Criteria)’을 제시하는데, $1.24E-05/year$ 의 빈도로 발생하는 주요 사고에 대해서는 7명 이내의 사망자를 발생시킬 때 위험성 경감을 위한 추가 조치가 필요 없는 수준 “Broadly Acceptable”이라고 정의하고 있다. Clean Room 내부는 원료 투입시, 제품 포장시, 설비 세정시에만 작업자가 상주하는데, 2인 1조로 운영되며 최장 6시간 작업을 수행한다. 따라서 화재 사고가 발생하여 2명의 작업자 모두의 생명에 지장을 준다고 하더라도 UK HSE 에서 제시하는 ‘허용할 수 있는 위험 수준’이라고 판단할 수 있으므로, 인화성 물질을 혼합하는 공정의 현재 설계는 1) 설비 책임자가 정량적 분석과 무관하게 더 높은 안전 수준을 요구하는 경우, 2) 설비 책임자가 UK HSE 가 제시하는 위험 수준 평가 기준을 받아들일 수 없는 경우를 제외하고는 별도의 위험성 경감 조치가 요구되지 않는다.

REFERENCES

- [1] Dan, S., Lee, C., Park, J., Shin, D. and Yoon, E. S., “Quantitative Risk Analysis of Fire and Explosion on the Top-Side LNG-Liquefaction Process of LNG-FPSO”, *Process Safety and Environmental Protection*, **92**(5), 430-441, (2014)
- [2] Kang, S., Lee, I., Moon, J. and Chon, Y., “Risk Analysis of Ammonia Leak in the Refrigeration Manufacturing Facilities”, *Journal of the Korean Institute of Gas*, **21**(1), 43-51, (2017)
- [3] Kodoth, M., Aoyama, S., Sakamoto, J., Kasai, N., Khalil, Y., Shibutani, T. and Miyake, A., “Leak Frequency Analysis for Hydrogen-based Technology Using Bayesian and Frequentist Methods”, *Process Safety and Environmental Protection*, **136**, 148-156, (2020)
- [4] Boggs, A., “A Comparative Risk Assessment of Casting Solvents for Positive Photoresist”, *Applied Industrial Hygiene*, **4**(4), 81-87, (1989)
- [5] Huang, S., Wu, K., “Health Risk Assessment of Photoresists Used in an Optoelectronic Semicon-

- ductor Factory”, *Risk Analysis*, **39**(12), 2625-2639, (2019)
- [6] IOGP, “Risk Assessment data directory-Process release frequencies”, IOGP Report 434-01, (2010)
- [7] John, S. ‘A Guide To Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations, SMPT, (1999)