



반도체 제조 공정에서 사용되는 이송배관 연결부위(VCR Fitting)로부터 공정유체 누출사고 예방 대책에 관한 연구

이대준 · 김상령* · 김상길* · 강충상** · †이준원***

송실대학교 안전보건융합공학과 박사과정, *안전보건공단,
송실대학교 안전보건융합공학과 박사과정, *송실대학교 안전보건융합공학과 교수
(2023년 3월 27일 접수, 2023년 6월 23일 수정, 2023년 6월 24일 채택)

A Study on Measures to Prevent Leakage of Process Fluid from the VCR Fitting used in the Semiconductor Manufacturing Process

Dae Joon Lee · Sang Ryung Kim* · Sang Gil Kim* · Chung Sang Kang** · †Joon Won Lee***

*Ph.D, Student, Dept. of Safety and Health Convergency Engineering,
Soongsil University, Seoul, 06978, Korea,*

**Korea Occupational Safety and Health Agency, Ulsan, 44429, Korea*

***Ph.D, Student, Dept. of Safety and Health Convergency Engineering,
Soongsil University, Seoul, 06978, Korea,*

****Professor, Dept. of Safety and Health Convergency Engineering,
Soongsil University, Seoul, 06978, Korea*

(Received March 27, 2023; Revised June 23, 2023; Accepted June 24, 2023)

요약

최근 반도체 공정은 대기업을 중심으로 4차산업에 따른 수요 증가로 메모리 반도체에서 파운드리로의 공
정변화를 모색하고 있으며 10나노(nm) 공정에서 3 나노(nm)이하 공정으로의 초미세화 공정개발과 같이 산업
이 확대되고 있다. 이러한 반도체 칩을 생산하기 위해 사용되는 원료인 특수가스 및 Precursor(전구체) 등의
특성은 유독성, 자연발화성, 인화성, 부식성 물질이다. 이러한 반도체 원료들은 폐쇄시스템으로 운영이 되어
정상 중에는 누출이 되지 않으나 누출 될 경우 가스박스 내부로 확산되고 가스박스 내부에서 적절한 환기가
되지 않는 경우 가스박스 외부로 확산되어 화재, 폭발을 일으키거나 독성 물질의 누출 등 큰 사고로 이어질
수 있다. 최근 반도체 산업에서 원료가 폐쇄시스템으로부터 누출되어 가스박스 내부 및 외부로 확산되는 사고
사례가 발생하고 있으나 가스박스 내부의 적정환기 시스템의 적용 이외에 적절한 예방대책을 제시한 연구
사례를 찾아 볼 수 없었다. 본 연구에서는 반도체 원료 이송배관의 연결부위인 VCR 피팅에서 원료가 누출되
어 가스박스 외부로 확산된 사고사례를 바탕으로 이에 대한 예방대책을 제시하고자 한다.

Abstract - Recently, in the semiconductor process, large companies are seeking process changes from
memory semiconductors to the foundry due to the increase in demand due to the 4th industry. industry is
expanding. The characteristics of special gases and precursors, which are raw materials used to produce these
semiconductor chips, are toxic, pyrophoric, inflammable, and corrosive. These semiconductor raw materials
are operated in a closed system and do not leak to the outside during normal times, but when leaked, they spread
to the inside of the gas box, and when proper ventilation is not provided inside the gas box, they spread to the
outside, causing fires, explosions, or toxic substances. It can lead to major accidents such as leakage. Recently,
there have been cases of accidents in which hazardous materials leaked from the closed system of the semi

†Corresponding author:joonwonlee@ssu.ac.kr

conductor process and spread to the inside and outside of the gas box. . In this study, we propose preventive measures based on the case of an accident in which raw material leaked from the VCR fitting, which is the connection part of the semiconductor raw material transfer pipe, and spread to the outside of the gas box.

Key words : leakage, VCR fitting, gas box

I. 서 론

1.1 연구배경

반도체는 우리의 일상생활에서 사용하는 스마트폰이나 가정에서 사용하는 TV, 에어컨, 냉장고 등 전자제품에 데이터의 기억·처리·전송 등의 역할을 담당하는 데 있어 필수적으로 필요한 부품으로 이용되고 있다[1]. 또한 최근에는 자동차용 반도체 부품이 부족하여 차량 출고가 늦어지는 경우가 있다.

이러한 반도체 칩을 생산하기 위해서는 포토, Diffusion(확산), CVD(화학기상증착), PVD(물리기상증착), Implanta(이온주입), Etching(식각), Cleaning, CMP(화학적, 물리적 연마)등 여러 단계의 과정을 거치고 후공정 후 반도체 칩을 생산하게 된다. 이때 사용하는 원료는 유독성, 자연발화성, 인화성, 부식성 원료로서 다른 화학공정에 비해 소량의 화학물질을 사용하지만, 염소가스, 실란, 아르신, 프리커셔류 등의 반도체 원료가 폐쇄시스템으로부터 누출된 후 가스박스 내부에서 적절한 조치를 취하지 못할 경우 2차 봉쇄지역인 가스박스 외부로 누출 되어 화재·폭발·누출 등 다양한 사고의 원인이 될 수 있다[2].

반도체 Fab. 장비는 운전 중에 발생될 수 있는 품질 및 안전상의 이슈(Issue)로 인해 공정 사고를 예방하기 위하여 각종 경보 시스템, 긴급차단장치 등 운전 시의 안전대책을 충분히 확보하고 있다. 그러나 반도체 산업의 사고사례를 살펴보면 정상 운전 시 발생할 수 있는 사고보다는 유지, 보수 중 또는 유지, 보수 후 시운전 단계에서 사고가 주로 발생한다. 반도체 산업의 경우 원료를 이송하는 배관의 각종 연결부품 등은 가스박스 내부에 설치하고 가스박스 외부의 배관은 원료가 누출될 수 없도록 용접으로 되어 있으며 증착 또는 식각 등이 이루어지는 공정 챔버의 경우 진공으로 운영되는 폐쇄시스템(Closed System)으로 구성되어 있다. 그러나 가스박스 내 배관 부속품의 설치상태 불량 또는 유지, 보수 중 인적오류로 가스박스 내 배관 부속품이 풀려 배관 내 원료가 가스박스 내부로 확산되고 가스박스 내에서 적절한 환기가 이루어지지 못한 경우, 가스박스 외부로 확산되는 사례가 발생하고 있다. 이를 근거로 하여 가스박스 내부의 배관 부속품으로부터 원료가 누출되지 않도록 확실한 방법으로

봉쇄조치를 하여야 하며 만일 원료가 누출되더라도 가스박스 외부로 확산되지 않도록 충분한 환기 및 안전대책이 필요할 것으로 판단 된다.

1.2 사고 사례

국내 반도체 산업의 유지, 보수 중 또는 유지, 보수 후 시운전 중 배관 부속품에서 누출된 사고사례를 Table. 1에 정리하였다[3]. 정상작업 중 사고가 발생한 경우도 있지만, 유지, 보수 중 사고가 대다수를 차지하고 있어 사고원인에 대한 정확한 분석 및 대책이 필요함을 설명하고 있다.

Table 1. Cases of accidents related to leakage of semiconductor piping fittings

	발생일	피해	사고 내용
1	2020년 9월	수소공급밸브박스 소손	대기 중이던 트레일러 연결부에서 수소 누출이 확인되어, 결합부를 조이는 과정에서 원인 미상의 점화원에 의해 화재가 발생
2	2020년 10월	1명부상	수산화나트륨(25%) 저장탱크 트랜치 막힘 해소 작업 중 수위계 하부 배관 파손으로 수산화나트륨 50 l 가 누출
3	2021년 1월	2명사망 4명부상	배관 해체 작업 중 배관 내 2.38% TMAH 용액이 잔류된 상태에서 가압 하에 작업 중 분출
4	2021년 7월	1명부상	시운전 중 불산(49%)이송배관의 레듀샤 피팅(Reducer Fitting)에서 불산(49%)이 누출되어 작업자에게 비산
5	2021년 7월	1명부상	TMAH 경보기 알람발생으로 점검자가 배관 체결상태 점검 중 2.38% TMAH 용액 0.5 l 가 점검자에게 비산

반도체 제조 공정에서 사용되는 이송배관 연결부위(VCR Fitting)로부터 공정유체 누출사고 예방 대책에 관한 연구

1.3 사고개요 및 연구목적

2020년 00반도체 사업장에서 웨이퍼에 TIN 박막을 증착시키기 위한 CVD(화학기상증착) 장비에 대하여 유지, 보수 후 시운전하던 중 가스박스 내 1차 봉쇄지역인 배관에서 물 반응성물질[TDMAT-Tetrakis(dimethylamino) titanium]이 누출되어 2차 봉쇄지역인 가스박스 외부의 클린룸으로 물질이 확산되어 근로자들이 대피한 사고가 있었다. 일반적으로 반도체 산업에서는 가스의 누출 포인트가 되는 밸브류, 피팅류, 각종 계기류를 가스박스 내부에 취부하게 되는데 가스박스의 공간이 협소하기 때문에 유지, 보수 중에 근처 피팅류를 건드려 피팅류의 나사가 풀리는 사고가 발생할 수 있다. 특히 반도체 원료로 사용되는 프리커셔류, 특수가스 배관에는 VCR 피팅을 사용하는데 VCR 피팅에는 He Leak Test Hole이 있어 나사가 조금 풀리더라도 He Leak Test Hole을 통해 반도체 원료 등이 배관에서 누출되는 사고를 유발할 수 있다. 따라서 반도체용 배관에 사용하는 VCR 피팅의 위험성을 분석하고 현재 국내에서 적용되는 가스박스의 문제점을 파악하여 누출사고가 발생하지 않도록 VCR 피팅의 개선책을 모색하고 가스박스 외부로 누출된 물질

이 확산되지 않도록 가스박스의 최적설계를 통하여 사업장에 적용할 수 있도록 하는 것에 금번 연구의 목적이 있다. VCR 피팅은 Fig. 1에 표현하였다.

II. TDMAT 물질의 가스박스 외부로 확산 사고 원인 분석

2.1. He Leak Test 방법

He Leak Test 시에 He Detector내의 진공펌프를 이용하여 배관을 진공으로 만든 상태에서 헬륨(공유반지름 : 28 pm)가스를 VCR 피팅의 Leak Test Hole에 주입하여 He Detector에서 헬륨이 검출이 되는지 확인하는 방법으로 반도체 산업에서는 개스킷 체결이 적절히 되었는지 확인하기 위하여 널리 사용되고 있다. 반도체 장비의 경우 대다수 진공으로 운영되고 있어 외부의 공기가 챔버 내부로 들어가면 품질의 문제가 발생하기도 하고 안전상의 문제가 발생되기 때문에 He Leak Test 방법을 채택하고 있으며 이는 Fig. 2에 표현하였다.

그러나 가스박스 내부의 배관 구성 중 양압구간(MFC 전단)에 위치한 VCR 피팅이 완전히 체결되지 않았거나 유지, 보수 중 공간적 제약으로 인해 피팅류를 건드릴 경우 피팅류가 풀리는 일이 발생한 사례가 있어 이로 인해 VCR 피팅의 He Leak Test Hole로부터 원료 등이 누출될 위험을 가지고 있다.

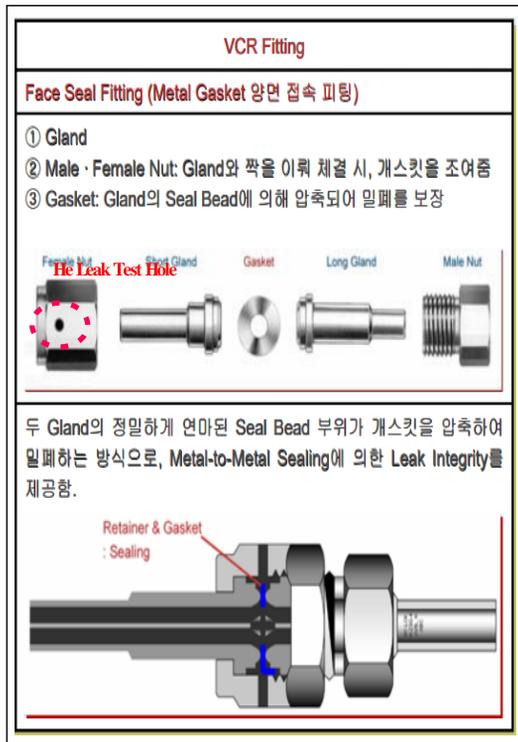


Fig. 1. VCR Fitting.

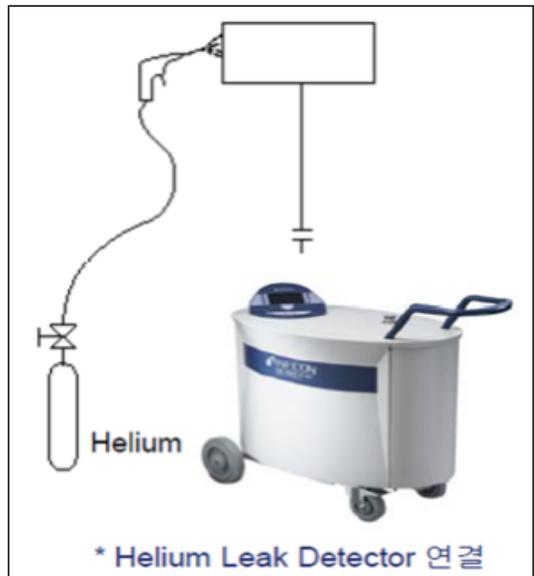


Fig. 2. Method for He Leak Test.

2.2. 사고 원인 분석

(1) 가스박스 내 밀봉관리상태 미흡

사고 설비의 경우 급기를 할 수 있도록 Air Intake가 있어야 하나 별도의 Air Intake가 없이 배관과 가스박스 사이의 틈새를 통하여 Air가 유입되는 형태로 구성되어 있으며 이는 반도체 원료(TDMAT)가 1차 봉쇄 지역에서 누출 시 2차 봉쇄지역 외부로 누출되는 통로 역할을 하였다.

Fig. 3에서는 밀봉되지 않은 배관과 가스박스 사이의 틈새에 의해 누출된 사고 내용을 보여 준다.

(2) 1차 봉쇄지역인 VCR 피팅의 풀림방지조치 미 실시

좁은 가스박스 내부에서 유지, 보수 작업 시에는 근처 피팅류에 외력을 가할 수 있으며 VCR 피팅의 경우 외부 힘에 의하여 잘 풀리는 성질이 있으나 이에 대한 관리상태가 이루어지지 않아 사고가 발생하였다. 반도체 산업에서는 과거에 피팅류가 풀리는 경우가 자주 발생하여 피팅류를 완전히 조립한 후 마킹(Marking) 또는 봉인을 하여 조금이라도 풀릴 경우 이를 확인하고

적절한 조치를 취할 수 있도록 관리하고 있다.

III. 사고결과 분석

3.1. 계산 및 Simulation

He Leak Test Hole을 통해 분사되는 액체 및 미스트의 양은 현실적으로 완벽히 해석할 수 없기 때문에 KS C IEC 60079-10-1의 누출량 계산시 사용하는 계산식을 이용하여 검토하였고 누출 Simulation은 TDMAT가 아닌 물로 Simulation을 하여 검증하였다.

3.2. 누출량 계산

누출량 계산 조건은 Table 2에 작성하였는데 분출 시 누출량은 폭발위험장소를 계산할 때 사용하는 식을 적용 하였다[4],[5],[6],[7]. 또한 개구부 단면적은 He Leak Test Hole 2 mm 직경에 0.1 mm 틈새 2 Hole이 있다고 가정하여 0.4 mm²를 적용하였고 운전온도는 건물 내부의 일반 온도 293K를 적용하였다. 마지막으로 개구부에서의 누설압력은 운전압력인 300 kPa·G를 적용하였다.

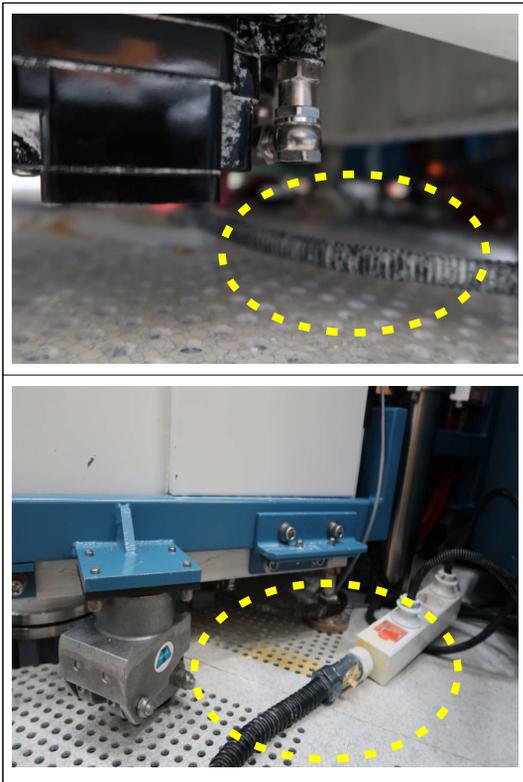


Fig. 3. Signs of leakage out of the gas box.

Table 2. Calculation Condition

	적용
주위의 절대온도, Ta(°C)	20.0 °C
개구부에서의 누설압력, Δp(Pa) * 게이지압력 기준	300 kPa·G
증기밀도, ρg(kg/m ³)	9.31765 kg/m ³
LFL에 따른 안전계수, k	1.0
유출계수, Cd ≤ 1 * 원형 오리피스 : 0.95-0.99 / 모난 오리피스 : 0.5-0.75	0.75
누출 개구부의 단면적, S(mm ²) * 우측 누출 구멍 단면적(권고) 참고	0.40 mm ²
물질량, M(kg/kmol)	224.01 kg/kmol
인화하한, LFL(vol/vol)	0.002 vol/vol
주위의 절대온도, Ta(K)	293.0 K
외부압력(대기압력), pa(Pa)	101,325.0 Pa
액체밀도, ρ(kg/m ³)	947.0 kg/m ³
이상 기체상수, R(J/kmol K)	8,314 J/kmol K
누출 개구부의 단면적, S(m ²)	4.00E-07 m ²

반도체 제조 공정에서 사용되는 이송배관 연결부위(VCR Fitting)로부터 공정유체 누출사고 예방 대책에 관한 연구

이를 근거로 하여 식(1)의 결과 값, 식(2)의 누출특성 결과 값을 얻을 수 있다.

$$W = C_d S \sqrt{2\rho\Delta P} = 0.02261 \text{ kg/s} \quad (1)$$

$$\text{누출특성} = \frac{W_g}{\rho_g k L F L} (\text{m}^3/\text{s}) = 0.03236 \text{ m}^3/\text{s} \quad (2)$$

3.3. 누출 Simulation

해당 조건에서 동일한 물질(TDMAT)로 누출 시험을 실시하여야 하나 TDMAT는 물 반응성물질이며 인화점이 -30°C 의 위험물로 직접 시험을 실시할 경우 위험을 초래할 수 있어 물을 이용하여 누출 시험을 실시하였다. 누출시험은 VCR 피팅의 풀려진 각도별로 시험을 실시하여 Leak Test Hole로부터 얼마만큼의 유체가 흘러나오는지 검증을 하였으며 45도 각도 뿐 아

니라 15도 각도로 풀렸을 때도 많은 양의 물질이 누출됨을 확인할 수 있었다.

IV. 예방 대책

4.1. 1차 봉쇄지역인 VCR피팅의 풀림방지 조치 실시

(1) 풀림방지장치(Lock Device) 설치
가스박스 내 VCR 피팅에 풀림방지장치(Lock Device)를 설치하여 좁은 공간에서 유지, 보수를 하더라도 의도하지 않는 외력에 의하여 풀리지 않도록 하여야 한다.

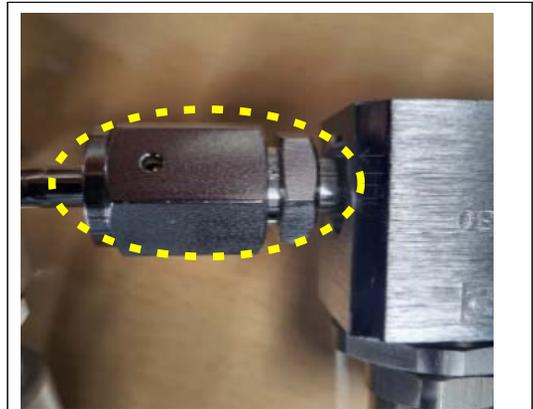
(2) 나사가 풀렸는지 확인할 수 있도록 눈관리 실시
나사의 위치가 정상상태인지 풀렸는지 확인할 수 있도록 I 마킹 또는 봉인조치를 하여 유지 보수 후 풀린



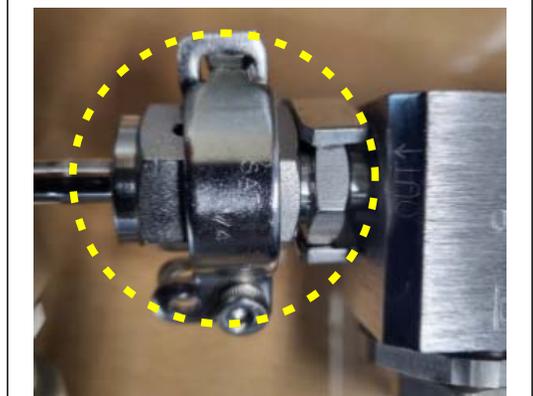
Fig. 4. Simulation in case a thread is released by a 15 degree.



Fig. 5. Simulation in case a thread is released by a 45 degree.



풀림방지장치 설치전



풀림방지장치 설치후

Fig. 6. Installation of a lock device.



Fig. 7. Attaching a marking label for male and female threads.

경우 이에 대하여 적절한 조치를 취할 수 있도록 확인 절차를 설비, 유지, 보수 절차서에 포함하여야 한다

4.2. 인터록 시설 개선

반도체 산업에서는 가스감지기와 연동하여 장비를 원료의 긴급차단 등 운전을 정지 시키지는 않고 있다. 이유는 흔히 사용하는 접촉연소식 가스감지기의 경우 반도체 산업에서 자주 사용하는 F화합물이 많아 접촉 분해시 일반 냉매가스도 감응하여 가스감지기가 울리는 등 오작동이 항상 존재하고 있으며 그 외 인화성 물질의 경우도 오작동이 자주 발생한다. 또한 장비를 정지할 경우 생산에 많은 차질이 있어 대다수는 가스감지기와 연동하여 사용을 하지 않고 있다. 현재 오작동이 없는 가스감지기를 개발하려고 반도체 대기업에서 연구하고 있으며 조만간 오작동이 없는 가스감지기를 개발하여 가스가 누출된 경우 물질이 더 이상 투입되지 않도록 연동장치가 작동하여 물질이 외부로 확산되지 않도록 조치할 것으로 예상된다

4.3. Air Intake 이외의 개구부는 밀봉조치.

장비가 신설되거나 이설 시에는 배관 인입부 또는 케이블 인입부는 최대한 밀봉시키고, 사용하지 않는 개구부는 마감 조치하여 Air Intake이외로 공기가 유입되지 않도록 최대한 밀봉하여야 한다. 이는 사고 사례에서 보았듯이 1차 봉쇄지역인 배관에서 누출되더라도 밀봉되지 않은 개구부를 통하여 가스박스 외부로 물질이 확산되지 않도록 조치하여야 한다.

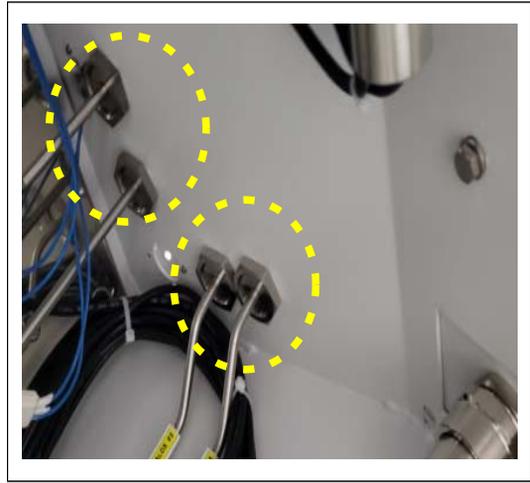


Fig. 8. Sealing between pipes and piping entry of a gas box.

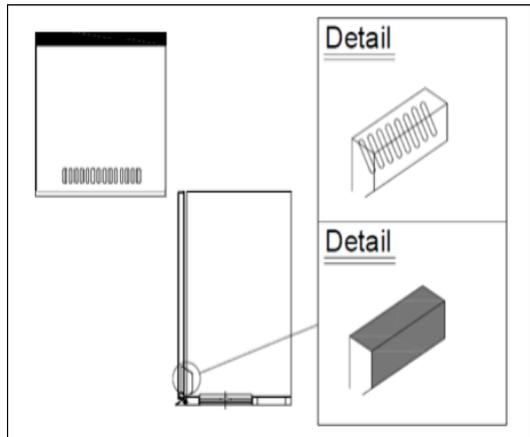


Fig. 9. Baffles for air Intake.

4.4. Air Intake에 Baffle[9] 또는 가림막 설치

Air Intake는 VCR피팅 등 누출원으로 부터 원료가 누출되어 직접 분사된 원료가 도달될 경우 외부로 확산되는 통로가 될 수 있다. 따라서 Air Intake에는 직접 분사된 물질이 외부로 확산되지 않도록 가림막 또는 Baffle을 설치하여 물질이 2차 봉쇄지역인 가스박스 외부로 확산되지 않도록 특별한 조치를 하여야 한다 [8]. Fig. 2는 Air Intake에 가림막을 설치하는 예를 보여주고 있다.

반도체 제조 공정에서 사용되는 이송배관 연결부위(VCR Fitting)로부터 공정유체 누출사고 예방 대책에 관한 연구

4.5. Air Intake 및 배기 덕트의 적절한 위치 선정

공기보다 무거운 원료의 경우 하부에 배기 덕트가 위치하고 상부에 Air Intake가 있어 공기의 흐름을 원활하게 하는 설계가 되어야 하며 반대로 공기보다 가벼운 원료의 경우 상부에 배기 덕트가 있고 하부에 Air Intake가 위치해 있도록 설계에 반영하여야 한다

4.5. 희석시키기에 충분한 풍량 및 충분한 정압 유지

인화성 물질의 경우 가스 박스 내부의 인화성 물질의 인화하한계(LFL)의 25%이내를 유지하기 위하여 Air Intake로부터 충분한 풍량의 Air가 유입이 되어야 하며 또한 가스 박스 각 부위에 Dead Zone이 발생하지 않도록 충분한 정압을 유지하여야 한다[9]. 이를 위해서 후드로부터 덕트 직경의 7.5 D 떨어진 곳에 정압 측정 및 속도를 측정[8]하도록 반도체 환기관련 가이드라인에 규정하고 있으며 국내 반도체 산업의 사업장에서는 덕트에서의 정압이 100 Pa 이하인 경우에는 알람을 발하거나 인터록을 설치하여 설비가 정지 시키도록 하고 있다[10].

4.7. Air Intake 용 가스박스 개구부의 적정 사이즈 결정

반도체 환기관련 가이드라인에 따르면 가스박스의 개방 통로의 통과 속도는 0.75 m/s ~1.0 m/s로 권고하고 있다[8]. 희석시키기에 충분한 양이 개구부 면적을 통과 할 수 있도록 개구부의 크기를 선정하도록 설계 하여야 한다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 반도체 원료가 이송배관 부품으로부터 누출된 사례를 통하여 2단계(1차 봉쇄지역 및 2차 봉쇄지역) 조치 모두 실패하여 클린룸으로 확산된 사고의 원인에 대해 분석하였다.

반도체 산업은 누출될 경우 사회적 파장이 크므로 원료가 누출되지 않도록 엄격한 관리가 필요하며 해당 설비는 적절한 기준을 바탕으로 설계 및 검토되어야 하나, 국내에 정확한 관련 기준이 없어 본 연구를 통하여 국내 실정에 맞도록 기준을 제시하려고 하며 예방조치 시 아래의 우선 순위에 따라 설비를 구성하도록 제언 하고자 한다.

- (1) 1차 봉쇄지역인 VCR 피팅의 풀림방지조치
- (2) 가스감지기와 장비와 인터록 시설 개선
- (3) 가스박스로 누출된 원료를 희석시키기에 충분한 풍량 및 충분한 정압 유지

- (4) Air Intake 이외의 개구부는 밀폐조치 실시
- (5) Air Intake에 Baffle 또는 가림막 설치
- (6) Air Intake 및 배기덕트에 대한 적절한 위치 선정
- (7) Air Intake 용 가스박스 개구부의 적정 사이즈 결정

본 연구에서 제시한 기준을 바탕으로 현장에서 반도체 장비의 배관 및 가스박스에 공통적으로 적용한다면 배관 내부의 원료가 가스박스 외부로 확산되어 근로자에게 피해를 입히는 사고가 발생하지 않아 사고로 인해 발생하는 직접피해 및 간접피해예방에 도움이 될 것이라 판단된다.

REFERENCES

- [1] Kim, J. D., and Han, S. A., and Rhim, J.K., and Yang, W.B., "A Study on the Internal Flow Analysis of Gas Cylinder Cabinet for Specialty Gas of Semiconductor", *KIGAS*, 24(5), 74-75, (2020)
- [2] Yang, W. B., and Rhim, J. G., and Hong, S. M. "A Case Study on the TEMAZ Explosion Accident in Semiconductor Process", *KIGAS*, 21(6), 52-60, (2017)
- [3] Kim, S. G., "A study on the optimal exhaust ventilation design for gas panel of semiconductor equipment", *Korea National University of Transportation*, (2022)
- [4] KOSHA GUIDE E-151, *Gas explosion risk location Guidance on the Assessment of Flammable Substances in Korea*, KOSHA, (2017)
- [5] KGS GC101, *Criteria for classification and scope calculation of types of explosive atmosphere in gas facilities*, KGS (2018)
- [6] KS C IEC 60079-10-1, *Classification of areas - Explosive gas atmosphere*, (2015)
- [7] EN 60079-10-1 Explosive atmospheres-Part 10-1- Classification of areas-Explosive gas atmospheres, (2020)
- [8] Semi S6-707^E, *EHS Guideline for Exhaust Ventilation of Semiconductor Manufacturing Equipment*, 41-57 (2007)
- [9] Semi S2-0712a, *Environmental, Health and Safety Guideline for Semiconductor Manufacturing Equipment*, (2012)
- [10] Shin, W.C., *A Study on the Safety Evaluation and Safety Design Method for the Emission Gas Treatment System at Semiconductor Deposition Process*, SEOULTECH, 59-60, (2022)