



## 태양전지 제조용 PCVD설비의 환기 성능 분석(폭발 방지 측면)

이성삼 · †안형환\*

한국교통대학교 안전공학전공 박사수료, \*한국교통대학교 안전공학전공 교수  
(2022년 8월 25일 접수, 2022년 10월 18일 수정, 2022년 10월 19일 채택)

## Analysis of Ventilation Performance of PCVD Facility for Solar Cell Manufacturing (Explosion Prevention Aspect)

Seoung-Sam Lee · †Hyeong-hwan An

Dept. of Safety Engineering, Korea national University of Transportation, 50, Daehak-ro,  
Daesowon-myeon, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, Republic of Korea

(Received August 25, 2022; Revised October 18, 2022; Accepted October 19, 2022)

### 요약

태양광 전지 제조 설비인 PCVD(Plasma Chemical Vapor Deposition)는 NH<sub>3</sub>, SiH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>를 Chamber에 주입하여 생성된 Plasma를 Wafer에 증착시키는 설비이다. PCVD설비에서 Gas 이동과 주입이 Gas Cabinet에서 이루어지며, 내부에는 MFC, Regulator, Valve, Pipe 등이 복잡하게 연결되어 많은 누출 점이 존재한다. 폭발 상한값(UEL) 33.6%, 폭발 하한값(LEL) 15%의 NH<sub>3</sub> 누출 시 폭발을 예방하기 위해서는 NH<sub>3</sub> 농도가 폭발 범위에서 벗어날 수 있는 희석 능력이 있어야 한다. 본 연구는 기존 PCVD의 Gas Cabinet에 대한 NH<sub>3</sub> Gas 누출 시 희석능력을 3D와 수치로 확인할 수 있는 CFD 분석 기법을 활용하여 분석하였다. 그 결과 중희석에 해당되며 설비 개선을 통해 고환기가 가능하다는 결론을 얻었다.

**Abstract** - PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition), a solar cell manufacturing facility, is a facility that deposits plasma generated in a chamber (NH<sub>3</sub>, SiH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> on a wafer. In the PCVD facility, gas movement and injection is performed in the gas cabinet, and there are many leak points inside because MFC, regulator, valve, pipe, etc. are intricately connected. In order to prevent explosion in case of leakage of NH<sub>3</sub> with an upper explosive limit (UEL) of 33.6% and a lower explosive limit (LEL) of 15%, the dilution capacity must be capable of allowing the concentration of NH<sub>3</sub> to be out of the explosive range. This study was analyzed using the CFD analysis technique, which can confirm the dilution ability in 3D and numerical values when NH<sub>3</sub> gas leaks from the existing PCVD gas cabinet. As a result, it was concluded that it corresponds to medium dilution and that testicular ventilation is possible through facility improvement.

**Key words** : PCVD, CFD, explosion range, explosive limits - LEL & UEL, degree of dilution, MFC

### 1. 서론

태양광 전지 생산 산업에 사용되는 설비 중 PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition)는 NH<sub>3</sub>, SiH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub> 가스를 활용해 Chamber 내에서 Plasma를 발생시켜 Wafer에 증착시키는 설비로 이때 인화성 물질인 NH<sub>3</sub>

(Ammonia)와 SiH<sub>4</sub>(Silane)을 공급하는 Gas Line 즉, Fig. 1.과 같은 Gas Cabinet 내에 설치된 Regulator, MFC (Mass Flow Controller), Valve 등 Pipe와 연결된 부분에서 누출될 경우 폭발 분위기를 형성할 가능성이 있는데 제조사는 이에 대한 대비로 누출원을 중심으로 폭발위험장소 구분도를 작성하고 폭발 범위 내의 전기기계·기구를 방폭형으로 설치하거나 환기를 통해 누출되는 가스의 농도를 낮추는 방법으로 폭발을 방지하는 설비로 제작하여야 하지만 현재 대부분의

†Corresponding author:hhahn@ut.ac.kr

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas



Fig. 1. PCVD(Plasma Chemical Vapor Deposition) Gas Cabinet(출처:www.chinasc.com).



Fig. 2. Plasma Chemical Vapor Deposition (PCVD) Gas cabinet interior configuration.

(Plasma Chemical Vapor Deposition) 설비는 이러한 문제를 전혀 해결하지 않은 상태로 사용자에게 판매되고 있어 사용 전 유관기관의 사용 승인받기 위해 많은 노력이 필요하여 본 연구자는 이러한 문제점을 개선하기 위해 기존의 설비의 환기량을 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 통해 계산하고 이를 기반으로 환기구 구조를 개선하여 KOSHA GUIDE E-180-2020 「가스폭발위험장소의 설정에 관한 기술지침」의 희석등급 기준으로 고환기화 하는 것이 가능한지를 분석하였다.

## II. 연구의 범위 및 방법

### 2.1 연구의 범위

본 연구는 태양광 전지 생산 설비인 PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposition)에 Plasma 형성을 위해 사용되는  $NH_3$ 와  $SiH_4$ 중 자연발화성가스인  $SiH_4$ 는 공기와 접촉 즉시 연소하기 때문에 본 연구에서 제외하고  $NH_3$ 를 대상으로 하였다. PCVD(Plasma Chemical Vapor Deposition)설비는 Fig. 1과 같이 일체형 Gas Cabinet으로 동일한 모델을 대상으로 하였으며,  $NH_3$ 의 누출원은 MFC (Mass Flow Controller), Regulator 등이 설치되어 있는 Gas Line을 대상으로 하였다. 즉) 누출원에서  $NH_3$ 가 누출되어 배기 포트에 배기되는 기존의 설비의 상태를 확인하고 고환기에 미치지 못하는 경우 Fig. 3. Gas Cabinet의 내부 구조를 변경하여 폭발을 방지할 수 있는 고환기로 개선할 수 있는지를 연구 범위로 정하였다.

### 2.2 연구의 방법

Gas Cabinet 중앙에 배기 포트가 설치된 기존의 PCVD(Plasma Chemical Vapor Deposition) 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 활용하여

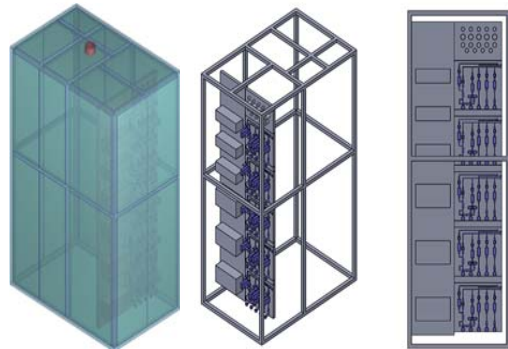


Fig. 3. PCVD(Plasma Chemical Vapor Deposition) Gas Cabinet internal configuration.

내부의 유동과 제어속도를 분석하고 이를 토대로 Gas Cabinet 내부 환기량을 강화할 수 있는 방법으로 구조를 변경하여 내부 유동과 제어 속도를 향상할 수 있는지를 분석하였다. 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)에 활용된 모델은 Siemens(社)의 Simcenter FLO EFD이다. 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics) 프로그램은 Fig. 4.와 같이 3차원으로 열교환기의 성능, 펌프·밸브의 성능과 플랜트 설계 등 다양한 분야에 유체의 흐름과 농도, 속도 등을 분석할 수 있는 특징이 있다.

### 2.3 PCVD Gas Cabinet 구조

PCVD Gas Cabinet은 plasma 생성을 위한 Chamber에  $NH_3$ 를 공급하는 장치이다. 구조는 설비마다 다르기는 하지만 대체로 여러 개의 Chamber에 각각의 가스를 공급하기 위해 별도의 Fig. 3.과 같이 각

stage 두고 Regulator로 일정한 압력으로 MFC를 통해 Chamber에 일정량을 공급하는 역할을 하며 SUS pipe pitting에서 누출될 경우 배기는 Fig. 5와 같이 Gas Cabinet 상부에 1개의 배기 포트와 옥외 환경설비(Scrubber)의 강제 배기 Fan에 의해 배출되는 구조로 되어 있다.

Table 1. Characteristics of NH<sub>3</sub> (Ammonia)

물질명	Ammonia (NH <sub>3</sub> )			
CAS NO	7664-41-7		화학식	NH <sub>3</sub>
			분자량	17.03
위험 유해성	위험등급 (0~4단계)	조건	화재	반응성
		2	4	3
인화점 및 발화등급	인화점		132℃	
	폭발하한값		15%	
	폭발상한값		33.6%	
물리화학적 특성	끓는점		-33.35℃	
	증기밀도(공기=1)		0.59	
	비중(물=1)		해당없음	
	휘발성		100%	
안정성 및 반응성	반응성		결렬하게 중합반응하여 화재와 폭발을 일으킬 수 있음	

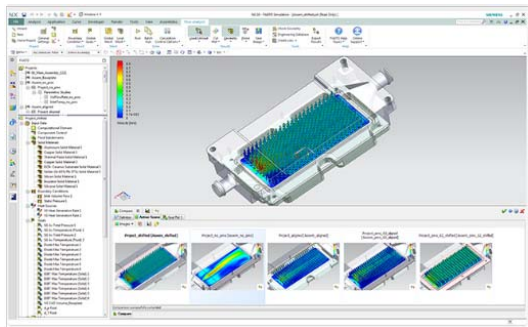


Fig. 4. Simens Simcenter FLOEFD CFD Program 출처: FloEFD | FloanNX Virtual Lab을 위한 Simcenter FLOEFD - Siemens Digital Industries Software (출처: <https://www.Floan.co.kr>).

## 2.4 NH<sub>3</sub>(Ammonia)의 특성

NH<sub>3</sub>(Ammonia)는 인화성 물질로 디스플레이, 반도체 및 태양전지 산업에서 재료에 Plasma를 Wafer에 증착시키는 데 사용되며 인화점 132℃, 폭발범위는 폭발 하한값 15%, 폭발 상한값 33.6%, 분자량 17.03g으로 공기 28.82g보다 가벼우며 Table 1과 같은 특성이 있다.

## III. 연구결과 분석

### 3.1 PCVD Gas Cabinet NH<sub>3</sub> 누출 시 내부유동과 제어 속도 분석

(1) PCVD Gas Cabinet 도식도 및 경계 조건 Gas Cabinet은 Fig. 5와 같이 Gas Line이 있는 패널을 Frame과 그 Frame을 막는 패널로 구성되어 있다. 외부 패널과 Frame 사이에는 2mm의 Gab이 존재하며 외부에서 이를 통해서 유동의 입출이 가능하도록 가정하였다. Main 배기 포트는 Gas Cabinet 상부 중앙과 1050CMH로 내부의 공기를 배출시키고 외부 패널의 모든 틈을 통해서 공기가 흡입되면서 Cabinet 내에서 유동이 이루어질 수 있도록 설정하였다. 해석 영역은 580만 개 수준으로 설정하였다.

(2) 해석 조건 정의

Cabinet

· inlet(유입구)

- Pressure B.C (P=0 Pa) / State=Air

· Outlet (유출구)

-Volume flow rate (V=1050 CMH)

· 난류 모델 (Realizable K- ε model)

· Wall condition (벽 조건)

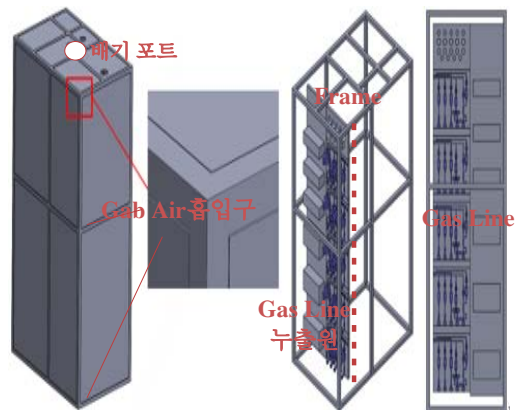


Fig. 5. Gas Cabinet Exhaust(Regulator, MFC, leak point).

- No Slip condition ( $u, v, w = 0$ )
- 제어풍속(관리대상물질) 0.4(m/sec) 이상
- : 가스 상태, 포위식 포위형

(3) Gas Cabinet 해석 결과

3.2 PCVD Gas Cabinet CFD 해석 결과 분석

(1) 내부 유동 해석

내부의 유동은 Fig. 6과 Fig. 7과 같이 배기 포트가 설치된 Gas Cabinet의 상부 중앙을 향하여 지면에서 부터 이루어지며 Fig 5와 같이 Cabinet의 여러 개구부

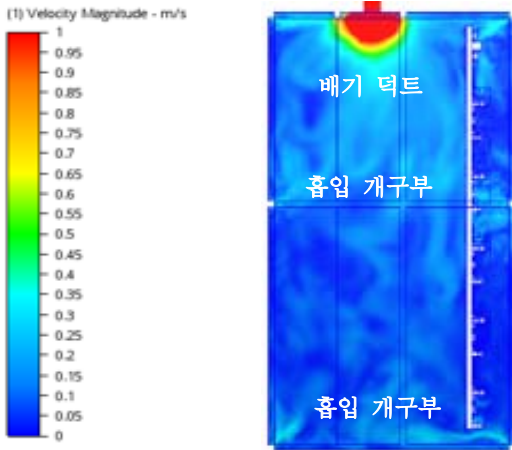


Fig. 6. Analysis result of internal flow and control speed distribution in case of PCVD Gas Cabinet NH<sub>3</sub> leakage.

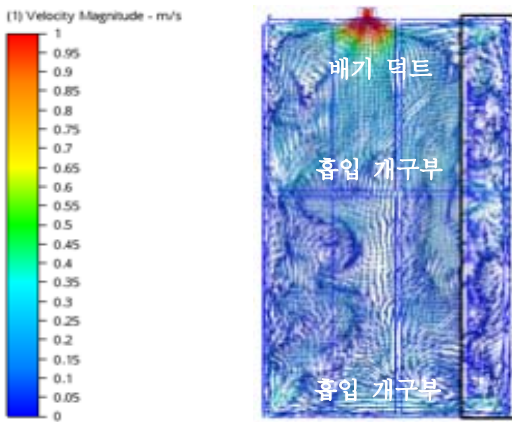


Fig. 7. Analysis result of internal flow and control speed distribution in case of PCVD Gas Cabinet NH<sub>3</sub> leakage.

를 통해 공기가 0.35m/sec 정도로 흡입되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 공기가 흡입되지 않는 부분은 와류가 형성되고 0.05m/sec~ 0.25m/sec로 거의 유동은 이루어지고 있지만 0.05m/sec로 정체에 가까운 상태에 있으며 특히 누출원이 존재하는 Gas Line의 경우 중앙의 배기 포트와 격벽이 형성되어 상부와 하부의 개구부를 제외하고는 내부 유동이 0.05m/sec로 매우 적은 것을 알 수 있다. 해석에서 알 수 있는 것은 외부의 공기 유입을 위한 개구부가 추가로 필요하며 또한 Gas Line의 격벽이 유동을 방해하고 있으므로 이에 대한 개선이 필요하다는 것을 해석해 알 수 있다.

(2) 내부 제어 속도 해석

내부의 제어 속도는 가스 상태를 기준으로 산업안전보건법이 정하는 0.4m/sec를 충족하느냐를 기준으로 하였다. 해석 결과 Fig. 6과 Fig. 7의 결과에서처럼 배기 포트가 설치된 Gas Cabinet의 상부 중앙의 일부는 0.4m/sec ~ 1m/sec 수준이지만 그 외 배기 포트에서 멀수록 0m/sec ~ 0.05m/sec 수준으로 정체된 수준의 속도임을 알 수 있다. 공기가 흡입되는 개구부의 경우도 0.2m/sec ~ 0.3m/sec를 넘지 않는 것을 알 수 있으며 특히 배기 포트와 격벽이 설치된 Gas Line의 경우는

함수	정의	본 분석과의 연관성	적용값
Ap	폴 표면 넓이 (m <sup>2</sup> )	일정시간 일정속도로 제한된 영역에서 토출되기 때문에 본 해석에서의 넓이는 토출단면(2.5mm <sup>2</sup> )으로 정의 된다.	0.0000025 m <sup>2</sup>
uw	폴 표면 위의 풍속 (m/s)	정의에서 표현하는 부분은 증발 속도이기 때문에 본 해석에서는 토출 속도로 정의 된다. 20LPM이 토출단면(2.5mm <sup>2</sup> )의 면적에서 토출되는 평균 속도로 정의 된다.	133.33 m/s
M	물질량(kg/kmol)		17.03 kg/kmol
T	절대온도 (K)	상온 (20°C) 기준으로 정의 된다.	293.15 K
Pv	온도 T에서의 증기압 (kPa)	1013 kPa	1013000 Pa
R	기체상수 (8314 J/kmol K)		8314 J/kmol K

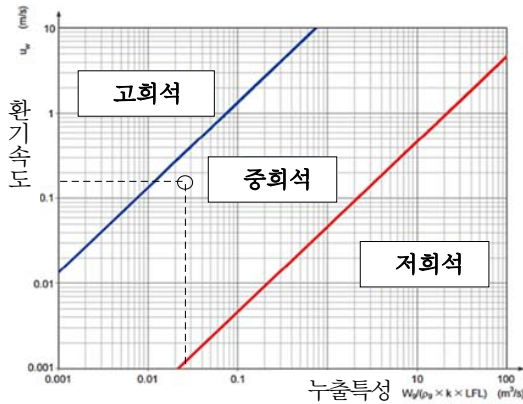


Fig. 8. PCVD Gas Cabinet Dilution Rating Table for NH<sub>3</sub> Leakage.

외부와 연결되는 Cabinet 지면의 흡입구의 평균속도는 0.15m/sec 정도로 기준 속도 0.4m/sec에 턱없이 못미치며 그 외의 경우는 0m/sec로 유동이 거의 없으며 법적 기준을 충족시킬 수 없다는 것을 알 수 있다.

(3) PCVD 희석 등급 평가

폭발위험을 예방할 수 있는지를 확인하기 위하여 CFD를 활용한 결과를 KS C IEC 60079-10-1, Annex B.7.3\* 증발률의 누출률의 계산 공식에 반영하였으며, 본 방폭인증 개정안에서 누출 증발률에 대해 제시하는 공식은 아래와 같으며, 각 항목의 의미 및 본 분석을 통한 접근으로 각 값을 정리하였다.

상기의 조건을 KS C IEC 60079-10-1, Annex C.3.5\* 희석등급의 평가표를 이용한 희석 등급을 확인결과 는 다음과 같다

누출 증발률은

$$W_e = \frac{6.55(133.333^{0.78} \times 0.0000025 \times 1013000 \times 17.03^{0.677})}{8314 \times 293.15} = 0.002108 \left( \frac{kg}{s} \right)$$

따라서 누출특성은

$$\text{누출특성} = \frac{W_e}{\rho_p k LFL} = \frac{0.002108}{0.57 \times 0.5 \times 0.15} = 0.02382 \text{ (m}^2\text{/s)}$$

○ 희석등급

Fig. 7.의换气속도(0.2m/sec)

누출특성(0.02382(m<sup>2</sup>/s))을 반영하여 희석등급을 평가하였다.

결과는 고환기에 미치지 못하는 중희석에 해당하는 것으로 평가되었으며, PCVD Gas Cabinet은 NH<sub>3</sub>의 누출이 발생할 경우 환기를 통해 폭발 위험을 방지할 수 없다는 것을 확인하였다,

IV. 결론

본 연구는 CFD 분석 기법을 통해 PCVD Gas Cabinet의 내부유동 및 제어 속도를 분석한 결과 NH<sub>3</sub> 누출 시 기존 설비의 환기장치는 중 희석의 환기 능력으로 폭발 분위기 형성을 예방할 수 없는 것을 확인할 수 있었다. 현재의 PCVD설비를 유관기관의 승인을 받아 사용하기 위해서는 환기 능력을 강화하거나 폭발범위 내의 전기기계·기구를 방폭형으로 교체하는 것이 필요하다. 사용자 입장에서는 이 두 가지의 해결 방법 중 경제적 부담이 큰 방폭을 적용하는 것 보다는 환기 개선을 통한 희석능력을 강화하는 방법이 합리적인 선택이 될 수 있지만 유관기관에서는 현재의 계산식을 통한 희석등급 결정 방법을 신뢰하지 않는 경우가 많기 때문에 경제적 부담이 있어도 방폭을 적용하는 경우가 일반적이다. 하지만 PCVD 설비 내부 모든 장소의 내부유동과 제어 속도를 3D와 수치로 확인할 수 있는 CFD 분석 기법은 더욱더 신뢰할 수 있는 개선 방법을 도출할 수 있고 개선 후의 결과를 쉽게 예측할 수 있는 장점이 있다.

REFERENCES

- [1] Rules on Industrial Safety Standards Article 230, Establishment and Management of Explosive Places, Article 232 Prevention of Explosion or Fire, etc. Ministry of Legislation, 230-232,(2021)
- [2] Kim, D.H., “Technical Guidelines for Field Booths in Explosive Places”, KOSHA GUIDE E-11-2012 Korea Occupational Safety and Health Agency, 3-4, (2012)
- [3] LEE, G.W., “Technical Guidelines for Calculation of Lower Explosive Limits for Combustible Gases and Vapor Mixtures”, KOSHA GUIDED-22-2012 Korea Occupational Safety and Health Agency, 1-5, (2012)
- [4] LEE, S. H., “Technical Guidelines for Design of Equipment with Fire and Explosion Hazardin Gas and Vapor”, KOSHA GUIDED-33-2012 Korea Occupational Safety and Health Agency, 3-7, (2012)
- [5] Kim, G. Y., “Technical Guidelines for Modeling Leak Sources”, KOSHA GUIDE P-92-2012 Korea Occupational Safety and Health Agency, 2-11, (2012)
- [6] Kim, N. Y., “Technical Guidelines for Safety easures for Leakage of Flammable Materials”, KOSHA



- GUIDE P-18-2012 Korea Occupational Safety and Health Agency*, 3-4, (2012)
- [7] Kim, D. H., “Technical Guidelines for Prevention of Explosion in Explosive Locations”, *KOSHA GUIDE E-21-2012 Korea Occupational Safety and Health Agency*, 1-12, (2012)
- [8] Choi, S. G., “Technical Guidelines for Design, Selection, and Installation of Electrical Equipment Used in Explosive Places”, *KOSHA GUIDE E-172-2018 Korea Occupational Safety and Health Agency*, 3-19, (2012)
- [9] Jung, J. H., Ryu, b.h., “Guidelines for the establishment of gas explosion-hazardous places”, *KOSHA GUIDE E-180-2020 Korea Occupational Safety and Health Agency*, 9-27, (2012)
- [10] Hwang, S. S., “Guidelines for Industrial Ventilation Facilities”, *KOSHA GUIDE W-1-2019 Korea Occupational Safety and Health Agency*, 2-24, (2019)