

SEMI S6를 적용한 CVD 설비의 폭발분위기 조성 가능성 분석

이미정 · 서대원 · 이성희 · 이동건 · 배세종 · 백종배[†]

한국교통대학교 안전공학과
27469 충북 충주시 대소원면 대학로 50
(2022년 6월 17일 접수, 2022년 7월 18일 수정본 접수, 2022년 7월 22일 채택)

Explosion Likelihood Investigation of Facility Using CVD Equipment Using SEMI S6

Mi Jeong Lee, Dae Won Seo, Seong Hee Lee, Dong Geon Lee, Se Jong Bae and Jong-Bae Baek[†]

Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation
50, Daehak-ro, Chungju, Chungbuk, 27469, Korea
(Received 17 June 2022; Received in revised from 18 July 2022; Accepted 22 July 2022)

요 약

반도체, 디스플레이 등 IT(Information Technology) 제품 수요 증가로 관련 산업이 확대되고 있다. 이는 생산설비 증설과 화학물질 사용 증가로 이어지며 화재·폭발의 위험성에도 영향을 미치고 있다. 이러한 위험요인에 대해 정부는 오래전부터 인화성 물질을 제조·사용·취급하는 장소의 사고 예방을 위하여 산업안전보건법 및 KS 기준에 따라 폭발위험 장소로 설정하여 관리토록 하고 있다. 그러나, 폭발위험장소를 설정할 때, 중요한 요소인 환기량을 고려하지 않아 실질적인 폭발분위기 조성 가능성을 예측하기는 쉽지 않다. 이 연구에서는 디스플레이 산업에서 주요 공정인 CVD(Chemical Vapor Deposition) 설비에 SEMI S6 Exhaust Ventilation Test 방법을 적용하여 위험한 설비의 환기 성능을 평가하고, 폭발분위기 조성 가능성을 확인하였다. 그 결과, 가상의 시나리오 내에서 환기 성능이 SEMI S6에서 규정한 기준에 적합하였고, 폭발분위기가 조성될 가능성이 낮음을 확인하였다. 따라서, KS 규격뿐만 아니라 공학적 기법으로 폭발분위기의 형성 여부를 예측한 연구 결과를 통해 합리적이고 경제적인 사고 예방에 도움이 될 것으로 기대된다.

Abstract – Due to the prolonged impact of COVID-19, the demand for Information Technology (IT) products is increasing, and their production facilities are expanded. Consequently, the use of harmful and dangerous chemicals are increased, the risk of fire(s) and explosion(s) is also elevated. In order to mitigate these risks, the government sets standards, such as KS C IEC 60079-10-1, and manages explosion-prone hazardous facilities where flammable substances are manufactured, used, and handled. However, using the standards of KS, it is difficult to predict the actual possibility of an explosion in a facility, because ventilation (an important factor) is not considered when setting up a hazardous work environment. In this study, the SEMI S6, Tracer Gas Test was applied to the chemical vapor deposition (CVD) facility, a major part of the display industry, to evaluate ventilation performance and to confirm the possibility of creating a less explosive environment. Based on the results, it was confirmed that the ventilation performance in the assumed scenarios met the standards stipulated in SEMI S6, along with supporting the possibility of creating a less explosive working condition. Therefore, it is recommended to use the prediction tool using engineering techniques, as well as KS standards, in such hazardous environments to prevent accidents and/or reduce economic burden following accidents.

Key words: Explosive atmosphere, SEMI S6, KS 60079-10-1, Display Industry

1. Introduction

최근 IT 제품 수요 증가로 OLED (Organic Light-Emitting Diode) 기반 TV와 PC의 수요 급증 및 메타버스로 대변하는 콘텐츠 산업의 증가와 새로운 플랫폼 산업이 성장과 확대 추세에 있다[1]. 이는 반도체, 디스플레이 등 관련 산업의 생산설비 증설과 화학물질 사용증가로 이어지고 있으며 화재·폭발 발생 가능성에도 영향을 미치

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jbaek@ut.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 고재욱 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

고 있다. 특히, 디스플레이 산업의 주요 공정인 화학기상증착 (CVD, Chemical Vapor Deposition) 공정에서도 다양한 반응가스를 사용하고 있어 예외는 아닐 것으로 판단된다. 이에 오래전부터 산업안전보건기준에 관한 규칙 제230조에서는 인화성 액체나 가스 등의 제조·취급, 인화성 고체 제조·사용 장소에 폭발위험장소를 설정하여 관리하도록 규정하고 있다[2]. 관련 세부 기준으로는 KS C IEC 60079-10-1 : 2017(폭발성 분위기-제10-1부 : 장소구분 - 폭발성 가스 분위기)이 있다[3].

그러나, 이 기준에서는 폭발위험장소 설정에 영향을 주는 희석등급에 대하여 plot 도표를 제공하고 있어서 정확한 값을 구하기 어렵고, 환기량과 관련된 요소도 누출률과 누출특성이 계산에 적용되지 않으므로 실제 환기 성능에 따른 폭발분위기의 형성 가능성을 예측하기 어렵다[4,5].

이 연구에서는 CVD 설비를 대상으로 실증시험을 통해 해당 공정의 환기 성능을 평가하고 폭발분위기 조성 가능성을 확인해보고자 한다.

2. Method

2-1. Literature Review

선행연구에서는 계산식을 활용한 IEC 60079-10-1 Edition 1(이하 1st 라 한다)과 Edition 2(이하 2nd 라 한다)를 비교한 연구가 많았으며, 1st 는 누출의 형태를 반영하지 못하는 점과 2nd 의 경우에는 환기량이 고려되지 않는 점을 문제로 제시하였다. 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

Kim 등은 환기량 변화에 따른 1st 와 2nd 의 폭발위험반경을 비교하였으며, 1st 의 경우에는 환풍기의 추가 설치로 인한 환기량 변화가 폭발위험반경에 큰 영향을 미치나, 2nd 의 경우에는 영향이 없다고 하였다[6].

Choi는 1st 에서 2nd 로 개정되면서 폭발위험장소의 종별과 범위를 정확하게 판단할 수 없는 점을 개선하기 위하여 safety margin을 적용하는 방법을 제시하였다. safety margin 적용이 불가할 경우, 1st 와 2nd 를 비교하여 제시한 conversion factor를 적용한 대책도 제시하였다[4].

Kim은 물질 특성별로 1st 와 2nd 을 보정한 식을 제시하였으며, 가벼운 물질의 경우 분자량과 밀도에, 무거운 물질의 경우 폭발하한에 폭발위험반경이 영향을 받는 것을 확인하였다[7].

Seo는 PHAST로 물질과 운전변수를 고려하여 폭발위험장소 범위를 구하는 연구를 하였으며, 폭발위험장소 범위에 영향을 미치는 물질변수로는 인화 하한계(LFL, Lower Flammability Limit), 증기 밀도, 비열비, 증기압, 인화 상한계(UFL, Upper Flammability Limit)이 있었으며, 운전변수로는 누출공, 압력, 내부온도인 것으로

확인하였다[8].

Noh는 반도체와 FPD(Flat Panel Display) 산업의 청정실에 대한 최적의 폭발위험장소설정 방안을 검토하였으며, FAB 장비는 특수하므로 “설비에 대한 안전기준”이 구체적이고 정확하게 수립되어야 하고, 환경적인 특수성을 고려하여 폭발위험장소 설정 방법에 대하여 충분한 공학적 판단이 필요하다고 하였다[9].

일부 연구에서는 PHAST (Process Hazard Analysis Software Tool) 또는 CFD (Computational Fluid Dynamics)와 같은 공학적 기법을 사용하여 폭발위험반경지역을 계산하였다[10]. Kim은 반도체 산업을 대상으로 SEMI F15 및 SEMI S6 누출률 기준에 따라 SF₆ 추적가스를 사용하여 Test를 하였으며, 시험결과 LEL의 1.62 Vol% 농도만이 존재하여 화재, 폭발 발생 가능성이 작음을 확인하였다[11].

따라서 이 연구에서는 선행연구에서 적용한 방법과 다르게 반도체 제조 장비의 안전성능기준을 규정하는 SEMI S6 가이드라인을 준용하여 실증시험을 하였으며, CVD 공정에서 사용하고 있는 화학물질을 대상으로 잠재적 점화원이 될 수 있는 다수의 포인트를 지정하여 CVD 공정의 화재 및 폭발 가능성을 확인하였다.

2-2. SEMI S6 Guidelines

SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International)는 1970년에 설립된 세계 반도체 장비, 재료 산업 및 디스플레이 산업을 대표하는 세계 유일의 국제 협회이다[13]. 이 협회는 반도체 및 디스플레이 산업에서 사용되는 기계·설비에 대한 규격을 제정하고 이를 인증하여 산업 발전의 기반을 조성한다. SEMI S6 안전 가이드라인에서는 반도체 제조장비(SEM)의 배기가스 환기에 대한 안전성능기준 및 적합성 평가를 위한 시험방법을 규정하고 있다[14].

SEMI S6에서 규정하고 있는 적용 범위는 다음과 같다.

- 환기 시스템에 연결하기 위한 배기장치를 통합한 FAB 설비
 - 인명 보호, 장비 보호 및 화재 위험 감소의 목적으로 설치되는 배기장치
 - 성능 및 평가 기준은 공급자가 사용자 또는 다른 공급자에게 제공한 모든 장비에 적용되며, 최종 공급자가 사용자에게 제공하는 장비의 일부로 제공
 - FAB 설비 공급업체가 환기 시스템 설비를 공통적인 성능 기준에 맞게 설계할 수 있도록 돕고 장비 시스템의 환기 요건을 이해함을 위한
 - SEMI S6 규정 중 인화성물질 누출만 고려하여 시험 및 평가 실시
- SEMI S6의 목적은 공정용 화학물질이 최악의 공정조건에서 누출했을 때 배기 능력을 평가하는 것이다. 실제 운용하고 있는 공정 가스를 시험에 직접 사용하는 것은 위험하므로 아르곤(Ar) 또는 질소(N₂)와 수소(H₂)를 혼합한 가스를 실제 사고에서의 양만큼 누출

Table 1. SEMI guidelines

Series No.	Guidelines
SEMI S1	Safety Guideline for Equipment Safety Labels
SEMI S2	Environmental, Health, and Safety Guideline for Semiconductor Manufacturing Equipment
SEMI S6	Safety Guideline for Exhaust Ventilation of Semiconductor Manufacturing Equipment
SEMI S8	Safety Guideline for Ergonomics Engineering of Semiconductor Manufacturing Equipment
SEMI S10	Safety Guideline for Risk Assessment and Risk Evaluation Process
SEMI S14	Safety Guidelines for Fire Risk Assessment and Mitigation for Semiconductor Manufacturing Equipment

Ref. <https://www.semi.org/en/about-semi-membership/about-semi>

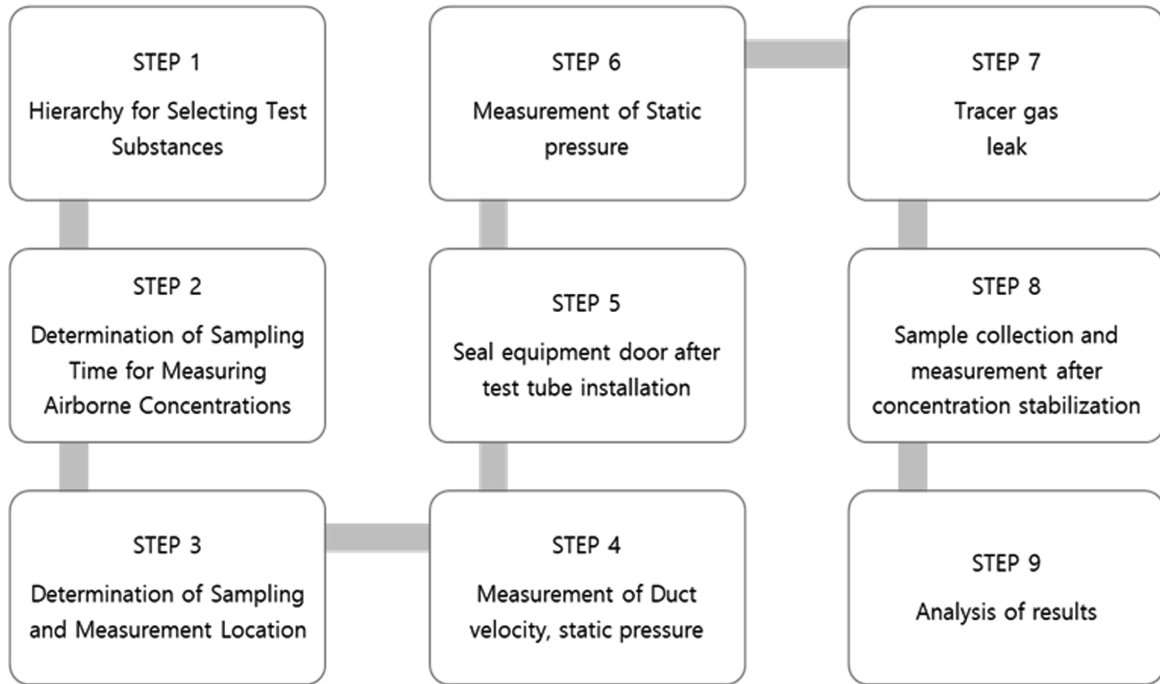


Fig. 1. Test method.

시커 잠재적 점화 지점에서 채취하여 농도를 측정한다. 시료는 Enclosure 내에서 사용되는 가장 위험한 화학물질을 선택하여 추적 가스의 농도 변환을 통해 시험한다. 채취된 시료는 등가방출농도 (ERC, Equivalent Release Concentration)로 계산(Eq. 1)하고, 이를 폭발하한계(LEL) 또는 인화하한계(LFL)와 비교한다. SEMI S2-0818 Section 23.5.5의 허용 가능한 누출 기준은 LEL의 25 Vol% 미만으로 규정된다[15]. SEMI S6에서 제시하고 있는 시험방법은 Fig. 1과 같다.

$$ERC = \frac{(\text{Process Gas Concentration}) \times (\text{Measured Tracer Gas Constration})}{(\text{Injected Tracer Gas Constration})} \quad (1)$$

3. Application

SEMI S6의 시험방법에 따른 단계별 내용은 다음과 같다.

① Step 1 : 대표 화학물질 결정

사용하는 화학물질 중에서 Hazard Index가 가장 낮은 값을 가진 화학물질을 대표 화학물질로 선정한다.

$$\text{Hazard Index} = \text{LEL (ppm)}/\text{Concentration (Vol\%)} \quad (2)$$

이 연구에서는 CVD 공정에서 사용하고 있는 화학물질 중에서 위험도가 높은 SiH₄과 H₂를 대표 화학물질로 하였다. 대상 화학물질과 Enclosure의 파라미터는 Table 2와 같다.

② Step 2 : 추적가스 누출량 결정

추적가스 누출량은 SEMI S6 부록 A1에서 제시한 바와 같이 가스일 경우 Straight tube에서의 누출과 액체일 경우 증발량 산식에 의하여 계산된다.

Table 2. Specification of chemical and enclosure

Specification	Equipment	
	CVD Process Equipment	Equipment
Representative Chemical	SiH ₄	H ₂
State	Vapor	Vapor
Low Explosion Limit (LEL, Vol %)	1.4	4.0
Vapor Density (as compared to air)	Heavy	Light
Size of Enclosure (m ³)	0.245	

이 연구에서는 SEMI S6에서 권고하고 있는 Straight tube를 이용하여 추적가스를 누출시켰으며, 누출량은 실제 대상공정에서 공급하고 있는 SiH₄와 H₂의 양인 7 LPM(Liter per Min)과 30 LPM으로 각각 정하였다.

③ Step 3 : 추적가스 누출 위치 및 잠재 점화원 결정

추적가스를 누출시킬 위치와 잠재 점화원이 될 수 있는 기계·부품을 결정한다. 그리고 추적가스 누출위치는 Equipment 내 유량과 압력이 가장 높은 PRV(Pressure Regulator Valve) 전단과 배기 Duct와 멀리 떨어진 MFC(Mass Flow Controller) 후단으로 하였으며, 대상물질에 대한 누출위치는 Table 3과 같다.

점화원 위치는 잠재적으로 점화 가능한 H₂ PT Sensor, H₂ MFC, N₂ MFC, N₂ PT Sensor, N₂O MFC, H₂ PT Sensor Connector,

Table 3. Release location

Category	Chemical	Location
Test 1	SiH ₄	In front of the PRV
Test 2	H ₂	In front of the PRV
Test 3	SiH ₄	Behind the MFC
Test 4	H ₂	Behind the MFC

Table 4. Duct specification

Specification	Input
Duct static pressure (Pa)	-47.8
Size (mm)	2 × 120
Shape	Round
Exhaust amount (m ³ /min)	19.03
Enclosure static pressure (Pa)	-10.75

Control Panel, N₂ PT Sensor Connector로 하였다.

④ Step 4 : Duct 속도 측정 및 Door 밀봉 후 정압 측정

Duct 속도 측정은 SEMI에서 규정하고 있는 Duct Traverse method를 사용하여 측정하여야 한다. 그러나, 설비 구조상 측정이 불가하여, Enclosure 내 duct에서 측정한 값을 사용하였다. 시험에 사용될 Straight tube 설치 후 Enclosure의 door를 밀봉한다. 밀봉 후에는 Enclosure의 정압을 측정한다. 측정한 값은 Table 4와 같다.

⑤ Step 5 : 추적가스 누출 시작

추적가스를 누출시키기 전에 잠재 점화원 주변에서 배경농도인 Sample을 채취하여 농도를 측정한다. 이때 Sample의 농도가 추적 가스 농도에 영향을 줄 수 있으므로, LEL의 1 vol%를 초과할 경우, 영향인자를 조정하여 재분석한다. 이 연구에서는 배경농도 측정 시 추적가스는 검출되지 않았다.

SEMI S6-0618 A2-3.2.2 Note 81에 따르면 주로 SF₆가 추적가스로 사용되었으나, 지구온난화 가스로 확인이 되면서 더 이상 추적 가스를 특정하지 않고, 적절한 가스를 사용하는 것이 가능하다고 명시되어 있다. 따라서 이 연구에서는 추적가스를 채취하는 물질인 수소와 농도를 조절하기 위한 질소 및 아르곤을 혼합한 혼합가스를

Table 5. Tracer gas concentration

Specification	SiH ₄	H ₂
Tracer Gas Conc. (%)	H ₂ 5/N ₂ 95	H ₂ 2/Ar 98

Table 6. Experiment 1 result

Ignition Source Location	Maximum H ₂ Con. (ppm)	ERC (ppm)	% of LEL
H ₂ PT Sensor	5	250	1.79
H ₂ MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ MFC	10	500	3.57
N ₂ PT Sensor	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ O MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
H ₂ PT Sensor Connector	30	1,500	10.71
Control Panel	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ PT Sensor Connector	0 (Not Detected)	0.0	0.0

Table 7. Experiment 2 result

Ignition Source Location	Maximum H ₂ Con. (ppm)	ERC (ppm)	% of LEL
H ₂ PT Sensor	65	1,300	3.25
H ₂ MFC	5	100	0.25
N ₂ MFC	10	200	0.50
N ₂ PT Sensor	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ O MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
H ₂ PT Sensor Connector	220	4,400	11.0
Control Panel	5	100	0.25
N ₂ PT Sensor Connector	25	500	1.25

사용하였다. 수소는 온난화 물질이 아니며, 질소와 아르곤을 사용하면 불활성 가스로 사용할 수 있고, 비중이 작아 대표물질의 비중을 선택함으로써 정확성과 신뢰성을 높일 수 있다.

⑥ Step 6 : Sample 분석

추적가스가 누출되면 안정화되는 시간이 필요하며, 안정화 시간은 SEMI S6 A2-6에 의해 계산할 수 있다. 시험농도의 안정화 시간은 5분 이하로 해야 하는데 이 시험에서는 5분 동안 안정화한 후 Sample을 채취하였다. 측정된 추적가스 농도는 H₂ Gas 검지기를 통해 측정되며, Eq. 1을 통해 실제 사용되는 공정가스 값으로 변환하여 분석할 수 있다.

4. Result

점화원 위치에 따른 시험 1의 결과는 Table 6과 같다. 최대 ERC는 1,500 ppm이 측정되었으며, LEL의 10.71 vol%로 25 vol% 미만이므로 환기 성능이 적합하다는 것을 확인하였다.

시험 2의 결과는 Table 7과 같다. 최대 ERC는 4,400 ppm로 측정되었으며, LEL의 11.0 vol%로 25 vol% 미만이므로 환기 성능이 적합하다는 것을 확인하였다.

시험 3의 결과는 Table 8과 같다. 최대 ERC는 500 ppm이 측정되었으며, LEL의 3.57 vol%로 25 vol% 미만이므로 환기 성능이 적합하다는 것을 확인하였다.

시험 4의 결과는 Table 9와 같다. 최대 ERC는 3,100ppm이 측정되었으며, LEL의 7.75 vol%로 25 vol% 미만이므로 환기 성능이 적합하다는 것을 확인하였다.

5. Conclusion and Suggestions

화재·폭발을 예방하기 위하여 인화성 물질을 제조·사용·취급하는 공정에서는 KS C IEC 60079-10-1 : 2017에 따라 폭발위험장소를

Table 8. Experiment 3 result

Ignition Source Location	Maximum H ₂ Con. (ppm)	ERC (ppm)	% of LEL
H ₂ PT Sensor	5	250	1.79
H ₂ MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ MFC	5	250	1.79
N ₂ PT Sensor	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ O MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
H ₂ PT Sensor Connector	10	500	3.57
Control Panel	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ PT Sensor Connector	0 (Not Detected)	0.0	0.0

Table 9. Experiment 4 result

Ignition Source Location	Maximum H ₂ Con. (ppm)	ERC (ppm)	% of LEL
H ₂ PT Sensor	155	3,100	7.75
H ₂ MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ PT Sensor	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ O MFC	0 (Not Detected)	0.0	0.0
H ₂ PT Sensor Connector	115	2,300	5.75
Control Panel	0 (Not Detected)	0.0	0.0
N ₂ PT Sensor Connector	15	300	0.75

설정토록 규정되어 있다. 그러나, 이 기준은 폭발위험장소 설정에 중요한 요인인 환기량을 고려하지 않기 때문에 환기가 충분히 이루어져 폭발분위기가 형성되지 않을 때도 불필요한 방폭시설을 설치해야 하는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 불합리한 점을 확인하고자 이 연구에서는 FAB 설비 중 인화성 물질을 취급하는 CVD 공정에 대해 실증시험을 하여 환기가 일정수준 이상으로 유지될 때 폭발분위기 조성 가능성 유무를 검증하고자 하였다.

시험 결과, SEMI S6에서 요구하는 누출 발생 시, 환기성능을 고려하면 허용기준인 LEL의 25 vol% 이내로 측정되어, 폭발분위기가 조성되지 않음을 확인할 수 있었다.

따라서 선행연구 및 이 연구 결과와 같이 환기성능이 고려된 산업코드를 준용하여 입증된 결과를 현장에 적용하는 것에 대해 규제기관에서는 긍정적으로 검토할 가치가 있다고 판단된다. 이를 통하여, KS 규격뿐만 아니라 공학적 기법을 적용하여 폭발분위기가 형성될 수 있는지를 예측함으로써, 합리적이고 경제적인 사고예방에 도움이 될 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 연구는 2022학년도 삼성디스플레이와 환경부 주관 화학물질 특성화대학원의 지원을 받아 수행하였음.

Reference

1. KEIT PD Issue Report, vol 22-1,2, p. 126, 2022.
2. Article 230 of Ordinance of the Ministry of Employment and Labor No. 337 (Partial Amendment 2021.11.19.)
3. Explosive atmospheres - Part 10-1:Classification of areas - Explosive gas atmospheres, 2017.
4. Choi, J.-Y., "An Analysis on the Main Amendment of Hazardous Area Classification in Korea and a Study on Its Limitation," *Korean Journal of Hazardous Materials*, **6**(1), 8-17(2018).
5. Kim, N. S., "A Study on Application of Ventilation and Classification of Explosion Hazardous Area According to the Revised KS Standard," *Ph.D Thesis of Incheon National University*, 70-73(2018).
6. Kim, N. S. et al., "A Study on the Examination of Explosion Hazardous Area Applying Ventilation and Dilution," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **22**(4), 27-31(2018).
7. Kim, D.-Y. et al., "A Study on the Improvement of Classification of Explosion Hazardous Area using Hypothetic Volume through Release Characteristic," *Journal of the Korea Safety Management & Science*, **19**(2), 31-39(2017).
8. Seo, M., et al., "A Study on Determination of Range of Hazardous Area Caused by the Secondary Grade of Release of Vapor Substances Considering Material Characteristic and Operating Condition," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **22**(4), 13-26(2018).
9. Noh, H. S., et al., "A Study of Explosion Hazard Proof Modeling for Risk Minimization to Semiconductor & FPD Manufacture Equipment and Clean Room," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **22**(1), 78-85(2018).
10. Shin, S. M., "A Study on the Establishment of Hazardous Classification Area for Scrubber with Cabinet Type at Semiconductor Process," *Master Thesis of Seoul National University of Science and Technology*, 50-54(2019).
11. Kim, S. R. et al., "A Study on the Explosion Hazardous Area in the Secondary Leakage of Vapor Phase Materials Based on the Test Results and the Leak Rate According to SEMI S6 in the Semiconductor Industry," *Journal of the Korean Institute of Gas*, **24**(2), 15-21(2020).
12. <https://www.semi.org/en/about-semi-membership/about-semi>.
13. SEMI S6-0618 – Environmental, Health, and Safety Guideline for Exhaust Ventilation of Semiconductor Manufacturing Equipment.
14. SEMI S2-0821 – Environmental, Health, and Safety Guideline for Semiconductor Manufacturing Equipment.

Authors

Mi Jeong Lee: Doctor's course, Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; pslab@ut.ac.kr

Dae Won Seo: Energy Appliance Certification Team Manager, SZU Korea, Seoul 03908, Korea; daewon@szukorea.com

Sung Hee Lee: Environment Safety Technology Team Safety Group, Senior Professional, Samsung Display, Asan 31454, Korea; sunghee78.lee@samsung.com

Dong Geon Lee: Master's course, Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; ehdrijs9894@naver.com

Se Jong Bae: Ph.D. Professor, Department of Medicine, University of Alabama at Birmingham, Alabama 35762, U.S.A; bsejong@uab.edu

Jong-Bae Baek: Ph.D. Professor, Department of Safety Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea; jbbak@ut.ac.kr