



반도체 배기 공정에서 복합 처리 방식으로 인한 폭발 사고 예방대책에 관한 연구

최세욱 · 이대준* · 김상령* · 김상길* · 정정희** · †양원백***

호서대학교 안전행정공학과 석사과정, *한국산업안전보건공단, **SK하이닉스,
***승실사이버대학교 산업안전공학과 교수

(2022년 5월 27일 접수, 2022년 10월 13일 수정, 2022년 10월 14일 채택)

A Study on Prevention of Explosion Accidents by Complex Treatment Methods in Semiconductor Exhaust Process

Se Wook Choi · Dae Joon Lee* · Sang Ryung Kim*

Sang Gil Kim* · Jeong Hee Jeong** · †Won Baek Yang***

Dept. of Safety and Public administration, Hoseo Univ., Asan, 31499, Korea,

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

SK hynix 337, jikji-daero, Heungdeok-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, 28436, Korea,

Dept. of Industrial Safety Engineering, Soongsil Cyber Univ., Seoul, 06878, Korea

(Received May 27, 2022; Revised October 13, 2022; Accepted October 14, 2022)

요약

반도체 공장은 인구가 밀집된 지역에 위치하여 제조 공정에서 취급되는 위험물질의 안전한 처리가 무엇보다 중요하다. 특히나 반도체 제조 공정에서 취급 후 배출되는 위험물의 종류는 매우 다양하며 물질별로 연소, 흡수, 흡착 방식 등 처리 방법도 매우 복잡하다. 따라서 최근 반도체 배기 처리 공정에서는 하나의 처리 설비에 두 개 이상의 처리 방식을 적용하고 있는데, 이러한 복합 처리방식 적용으로 예상치 못한 사고가 발생하고 있다. 본 연구에서는 최근의 사고 사례인 Scrubber 방식과 전기 집진방식을 함께 적용한 처리 설비의 사고 원인을 파악하고 예방대책을 제시하여 복합 처리방식 적용 시 유의해야 할 점을 알아보고자 한다.

Abstract - Since semiconductor factories are located in densely populated areas, safe handling of hazardous materials handled in the manufacturing process is of utmost importance. In particular, the types of hazardous substances discharged after handling in the semiconductor manufacturing process are very diverse, and the treatment methods such as combustion, absorption and adsorption methods for each material are very complicated.

Therefore, in recent semiconductor exhaust treatment processes, two or more treatment methods are applied to one treatment facility, and unexpected accidents occur due to the application of such a complex treatment method.

In this study, the cause of accidents in treatment facilities that applied both the scrubber method and the electrostatic precipitation method, which are recent accident cases, are identified, and preventive measures are suggested to find out the points to be noted when applying the complex treatment method.

Key words : semiconductor, hazardous substances discharge, electrostatic precipitation

†Corresponding author:wbyang59@hanmail.net

Copyright © 2022 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

최근의 반도체 공정은 4차 산업에 따른 수요증가로 파운드리로의 공정변화를 모색하고 있으며, 10 나노 (nm) 공정에서 5 나노(nm)이하 공정으로의 초미세화 공정개발과 같이 산업이 확대됨에 따라 취급하는 위험물질도 비약적으로 늘어나고 있다. [1].

반도체 제조 공정은 제조설비(FAB)에 화학물질을 공급하는 공급설비, 반도체를 생산하는 제조설비(FAB)와 반도체 제조 공정에서 발생하는 화학물질을 처리하는 처리설비로 나눌 수 있다[1]. 전체적인 반도체 공정 흐름은 Fig. 1을 통해 확인할 수 있는데, 이러한 반도체 제조 공정에서 배출되는 위험물질은 매우 다양하다. 이러한 물질은 흡수, 세정, 연소 등의 방법으로 안전하게 처리해야 하는데, 처리가 용이한 물질도 있지만 2~3개의 처리방식을 조합해도 충분히 제거될 수 없는 처리 곤란한 가스도 있으며 처리 설비의 개보수를 빈번히 요구하는 가스, 그리고 화재·폭발 방지를 위하여 회색범이 특히 중요한 가스 등 다종다양하다[3].

또한, 2013년 SEMATECH와 뉴욕 주 유티카 주립 대학의 Nano-scale Science and Engineering 학과가 공동으로 반도체 산업과 반도체 관련 산업에서 사용물질과 공정 관련된 사고이력을 찾아내는 연구결과에

따르면, 최근 5년 동안 발생했던 70건의 사고 근본 원인 분석(Root Cause Analysis) 결과 대부분이 배기, 진공펌프와 같은 후처리 공정에서 주로 발생하는 것으로 나타났다[4]. 이렇듯 반도체 공정이라고 하면 일반적으로 떠올리는 8대 공정도 중요하지만, 이러한 공정에서 취급, 사용, 반응된 배출 물질이 안전하게 처리될 수 있도록 하는 것 역시 매우 중요하다[5].

이러한 배기가스는 처리 방법도 다양하기 때문에 최근에는 연소 후 습식, 흡착, 습식 후 집진 등 복합처리 방식으로 배기가스를 처리하고 있다. 그러나 처리 방식에 따른 위험분석이 되지 않은 상태에서 무분별하게 사용하는 이러한 방식으로 사고가 발생할 수 있다. 이러한 사실을 기본으로 반도체 배기 공정에서 주로 사용하는 복합처리방식이 가진 위험성을 분석해보고 이를 예방하기 위한 예방대책을 알아보고자 한다.

II. 사고 분석

2.1 사고개요

2020년 00 반도체 사업장에서 배기가스를 습식 방식으로 처리하던 Mid. Scrubber에 Nox 저감을 위한 전기집진 방식(Electrostatic Precipitator) 시스템을 추가하여 시운전 중 화재·폭발이 발생하였다. 배기 공정은 취급 물질의 처리 방법에 따라 다양하게 구성되어 있는데, 사고 배기 공정은 Fig. 2와 같이 생산설비에서 1차 Scrubber를 통과 한 뒤, Mid. Scrubber로 흡수 및 집진을 진행하고 마지막으로 옥상 층의 Main Scrubber를 통과하여 대기로 배출하는 공정이다. 해당 사고로

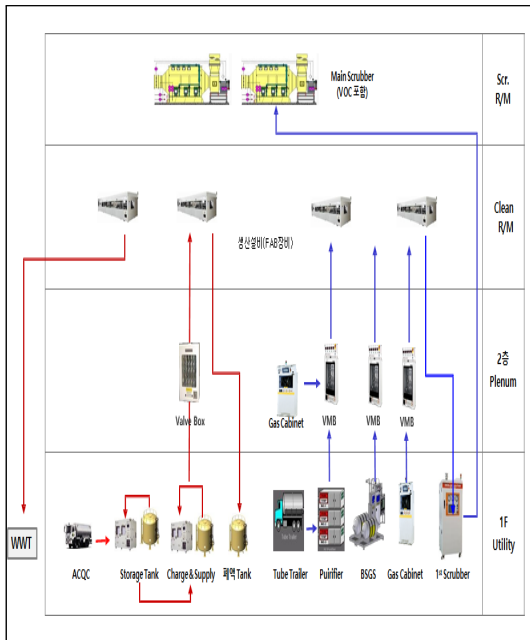


Fig. 1. Chemical supply system for semiconductor.

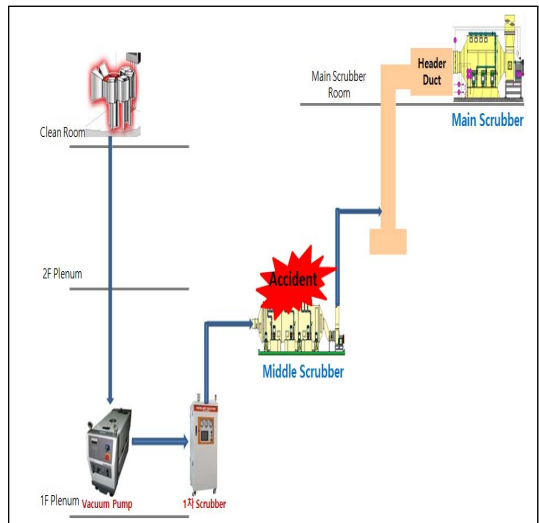


Fig. 2. Accident occurrence process.

근로자 1명이 부상을 당하였고, Mid. Scrubber 내, 외부 배관 파열이 발생하였다.

2.2 사고 사례

국내 반도체 배기 처리 공정의 사고 사례를 Table. 1에 정리하였다[6]. 단순 작업 중 사고가 발생한 경우도 있지만, 물질에 대한 정확한 특성과 성질을 모른 채 작업 도중 발생한 사고도 존재한다. 이는 아직까지 반도체 배기 처리 공정을 구성할 때 물질에 따라 연구가 추가적으로 필요함을 설명하고 있다.

2.3 Mid. Scrubber 구조 및 형태

사고가 발생한 Mid. Scrubber 계통을 Fig. 3에 나타내었다. 해당 설비는 3단계로 나눌 수 있는데, 반도체 제조 공정에서 발생한 NO를 O₃를 활용하여 NO₂로 산화시키는 산화 UNIT, NO₂를 환원제와 기·액 접촉

으로 염으로 전환하는 환원 UNIT, 마지막으로 환원 UNIT을 통과하여 발생한 다양한 염을 집진하는 전기 집진부로 구성된다.

2.4 사고 발생 원인

(1) 가연물 발생

Mid. Scrubber에 설치된 전기집진부는 전극봉과 전극판이 FRP Body안에 설치되어 있는 구조이다. 사고 조사 결과 설치 작업 중 발생한 5~10 μm 크기의 FRP 분진에 대한 Cleaning 작업이 미 실시 되어 퇴적되어 있음을 확인하였고, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 이러한 분진이 미세하게 공기 중에 부유하면 가연성 분진, 공기의 혼합기가 형성될 위험이 있다. 또한 분체는 액체보다 대전 위험성이 높는데, 금번 사고 발생 Mid. Scrubber 공정과 같이 산화 목적의 오존이 함유된 물질이 유입될 경우, 분체의 유동 및 전하 분리에 의해 대전이 빠르게 증가하게 되며, FRP와 같은 절연 공간에서는 전하 누설이 없기 때문에 전전을 더욱 촉진시킨다[7].

(2) 과잉 산소 발생

Mid Scrubber에는 반도체 제조 공정 작업 중에 발생한 NO를 NO₂로 변화하기 위하여 O₃를 공급하는 산화 UNIT가 설치되어 있었으며, 사고 당시 내부의 O₃와 O₂ 농도는 각각 2.2 %, 43 %였다. Fig. 5는 Hydrocarbon의 한 종류인 항공유를 연소 챔버에 투입한 후 압력을 1 atm으로 고정하고 산소 농도를 21 % ~ 40 %로 증가시키면서 측정하였을 때 최소 점화 에너지를 도시한 그래프이다. 그림에서 볼 수 있는바와 같이 산소 농도가 증가함에 따라 측정된 최소 점화 에너지는 감소하였다. 이러한 결과는 산소농도가 증가하여 낮은 에너지에서도 산화 열분해 반응이 보다 쉽게 일어나기 때문으로 사료된다[8].

Table 1. Accident Case

발생 일시	피해	사고 내용
1 2015년	7명 부상	이상과압 발생으로 배기 처리 공정으로 유입되는 배관 파열 및 가스 누출
2 2016년	20명 대피	배기 배관내부에 퇴적되어 있는 반응 부산물 제거를 위해 가열 도중 배관 파열
3 2020년	1명 부상	배기공정에 투입되는 수산화나트륨 공급설비 배관 중간에 위치한 체크밸브에서 Leak 발생에 따른 점검도중 누출
4 2021년	1명 부상	배관 체결상태 점검 중 위험물질이 근로자에게 비산되어 부상

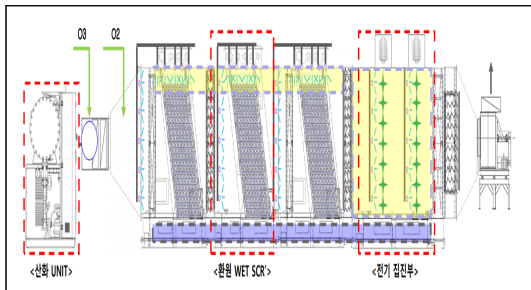


Fig. 3. Mid. Scrubber structure and form.



Fig. 4. FRP dust at the top of electrostatic precipitator.

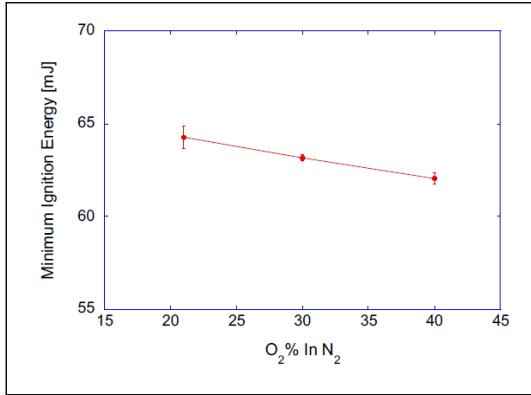


Fig. 5. Measured MIE as a function of oxygen concentration at 1 atm.

(3) 점화원 발생

전기집진기는 고전압에 의한 코로나 방전을 통해 입자를 대전시켜 정전방식으로 집진하는 설비를 말한다. 이러한 방식으로 배기가스 내에 있는 Mist, 먼지와 같은 유해 성분을 처리하게 되는데, 두 전극 사이에 인가한 전압이 FRP Body(비전도성 구역)에서 완벽히 해소되지 못하고 남은 잔류전하의 정전에너지가 FRP 분진의 최소 점화 에너지보다 높아 점화원으로 작용한 것으로 판단된다.

III. 사고원인 검증

3.1 전기집진기 잔류전하 및 정전에너지 검토

(1) 잔류전하 실험 결과

사고 발생 설비를 축소하여 제작된 전기집진기에 전압을 인가하여 잔류전하가 발생하는지 알아보았다. 실험조건은 Table. 2로 선정하였고, 실험을 위해 설치된 장비는 Fig. 6과 같다. 잔류전하 측정 위치는 도전성 부분인 전극봉 및 집진판, 비도전성 부분인 FRP Body의 상부(애자부)와 하부로 결정하였다.

전체적인 실험 사진은 Fig. 7로 확인할 수 있다. 17 KV 전압을 인가한 후 일정 시간 동안 FRP Body의 측정 결과를 Table. 3에 제시하였고, 전극봉 및 집진판의 측정 결과를 Table. 4에 제시하였다.

실험의 결과로 비전도성인 FPR Body에는 최소 1.7KV의 잔류전하가 측정되었고, 전도성인 전극봉 및 집진판에는 전류 전하 없이 즉시 방전됨을 확인할 수 있었다.

(2) 정전에너지 계산

실험을 통하여 전기집진기의 Capacitor를 측정하



Fig. 6. Laboratory equipment.

Table 2. Experimental condition

Volume	3 m ³
Applied voltage	17 KV
Discharge electrode distance	4 cm
Duration	2.5 hr

Table 3. Measurement result of FRP body

Measurement time	0.5 Hr	1 Hr	1.5 Hr	2 Hr	2.5 Hr
Top	1.7 KV	1.7 KV	1.7 KV	1.7 KV	1.7 KV
Bottom	4.4 KV	4.2 KV	4.1 KV	4.0 KV	4.1 KV

Table 4. Measurement result of electrode and dust collector

Electrode	Dust collector	Note
0 KV	0 KV	Instant Discharge

결과 Fig. 8과 같이 $0.7 \times 10^{-9} F$ 으로 나타났다. 실험 장비는 현장 전기집진기의 크기를 반영하지 않았으므로 이를 비율로 고려하면 $4.7 \times 10^{-9} F$ 으로 계산할 수 있다. 이를 식(1)을 통해 검토한 결과 최소 6.79 mJ의 정전에너지가 발생한 것으로 나타났다.



Fig. 7. Experiment photo.

$$\frac{1}{2} CV^2 \quad (1)$$

여기서,

C: Capacitor, $4.7 \times 10^{-9} F$

V : 잔류전하, 실험 시 최소값 1.7 KV

유사 플라스틱 계열 분진인 PMMA, PE가 10 mJ 이하의 최소 점화 에너지를 가지고 있으므로 실험을 통한 FRP 분진의 정전에너지가 화재·폭발에 접화원 역할을 했을 것이라 추정할 수 있다[6].

3.2 산소 농도에 따른 화재·폭발 가능성 검토

FRP 분진과 정전에너지가 존재하였을 때, 산소 농도에 따른 화재·폭발 여부를 확인하기 위하여 실험을 실시하였다. 사고 당시 내부의 O₂ 농도는 43 % 였으므로 O₂ Bottle과 Air Compressor를 사용하여 챔버 내부를 다양한 농도로 만든 뒤 사고 당시 전압을 인가하여 어떤 현상이 발생하는지 알아보았다. 실험조건은 Table. 5와 같다.

실험결과 30 % 이상의 농도에서 화염이 발생하였는데, 농도가 높아짐에 따라 전압 인가 후 화염 발생 시간이 점차 감소함을 알 수 있었다. 이는 FRP 분진이 고농도 산소와 혼합되어 있을 때 외부에서 가해진 에너지로 인하여 화재·폭발이 발생할 수 있음을 직접적으로 보여주는 것이다. 실험 결과를 Table. 6으로 요약하였고, 관련 사진을 Fig. 8에 제시하였다.

IV. 결과 및 고찰

4.1 Mid. Scrubber 운영 위험성 검증 강화

반도체 폐기 물질 처리를 위하여 복합 처리 방식이 필수적이 된다면, 이에 대한 위험성 분석이 더욱 세심히

Table 5. Experimental condition

	1st	2nd	3rd	4th	5th
FRP Powder	50 g	50 g	50 g	50 g	50 g
Chamber Volume	7 L	7 L	7 L	7 L	7 L
O ₂ Concentration	21 %	30 %	35 %	43 %	50 %

Table 6. Experimental result

	1st	2nd	3rd	4th	5th
O ₂ Concentration	21 %	30 %	35 %	43 %	50 %
Explosiveness	X	X	O	O	O
Explosion time	X	X	2~3 sec.	2~3 sec.	1~2 sec.

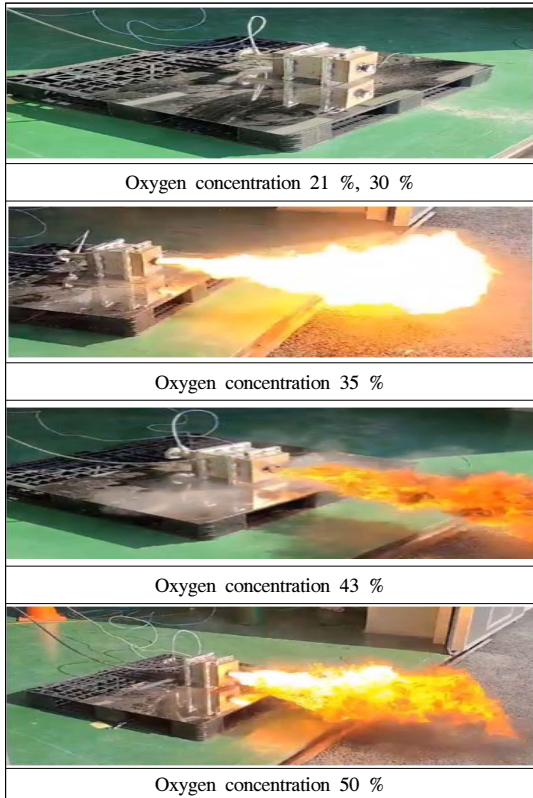


Fig. 8. Experimental results according to oxygen concentration

이루어져야 한다. 습식 Scrubber 방식과 전기 집진 방식이 각각 설치되어 있었다면 FRP 분진 발생 우려는 없었을 것이고, 과량의 산소분위기도 발생하지 않았을 수 있다. 따라서 복합 처리 방식을 적용할 경우에는 각각의 운영부서, 운전 협력업체, 제작 회사들이 전부 모여서 운영 시 발생할 수 있는 문제점에 대한 공학적인 논의를 먼저 실시하고, 위험성 평가 등을 통해 타당성을 검증 한 뒤 작업을 수행해야 한다.

4.2 Mid. Scrubber 운영 절차 보완

(1) 공사 후 내부분진 제거를 위한 물 세척 절차 반영 기준에 설치되어 있는 Mid. Scrubber에 전기집진기 추가 설치 작업이 앞으로도 계속 이루어 질 예정이므로, 공사가 완료되면 추가 Nozzle을 제작하여 고압 Spray를 통해 내부 분진을 처리할 수 있도록 해야겠다. 또한 세척 후 분진이 확실히 제거되었는지 확인할 수 있도록 Sight glass를 집진기 측면에 설치하는 것이 바람직 하겠다.

(2) 전기집진기 가동 후 정지 시 Wet Spray 절차 반영 발생한 잔류전하가 공기 중에 다량의 수분에 의해 축적되기 전에 방전되는 것에 착안, Wet Spray를 제작하여 가동 후 정지 시 수분을 통하여 방전시킬 수 있도록 한다.

전압을 인하한 전기집진기에 30초 동안 상부세척,

Table 7. Results of cleaning the inside of the electrostatic precipitator (bottom area)

Location	Condition	Washing Time	Residual charge
Top	Dry	-	1.7KV
Bottom	Wash	30 sec.	0KV

Table 8. Results of cleaning the inside of the electrostatic precipitator(all area)

Location	Condition	Washing Time	Residual charge
Top	Wash	30 sec.	0KV
Bottom	Wash	30 sec.	0KV

전체세척 실시한 뒤 잔류전하를 측정 한 결과를 Table. 7, Table. 8에 제시 하였다.

실험에서 알 수 있듯이 전기집진기가 구동 된 후 습식 환경을 조성하여 잔류전하를 제거한다면, FRP Powder의 분진폭발 가능성을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

실험에서 알 수 있듯이 전기집진기가 구동 된 후 습식 환경을 조성하여 잔류전하를 제거한다면, FRP Powder의 분진폭발 가능성을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 FRP 내부 O₂ 농도에 따른 인터록 설치 검토

NO를 NO₂로 변화하기 위하여 과잉 산소 공급이 반드시 필요하다면, 농도 모니터링을 통한 인터록 설비 구축을 검토해야 한다. Table. 6을 통해 30 %의 O₂ 농도에서는 화염이 발생하지 않음이 측정되었으므로, 실제 설비 구동 전 농도에 따른 안전성 실험을 실시한 뒤 일정 농도 이상에 도달할 경우 인터록이 작동될 수 있도록 연동장치를 구비하여 추가 산소가 공급되지 않도록 하는 장치를 설치하는 것이 바람직 하겠다.

V. 결 론

본 연구에서는 반도체 배기 공정에서 습식과 전기 집진을 활용한 복합처리 방식의 문제점 파악하고 예방대책을 제시하였다.

결과 및 고찰에 제시한 기준을 바탕으로 반도체 배기 처리 공정(습식, 전기집진방식)에 적용한다면 동일 사고 예방에 충분히 기여할 수 있을 것이라 판단된다. 단, 복합 처리방식은 발생사고와 같은 형태만 존재하지 않고 흡착, 연소 방식 등 여러 형태로 구성되어 있으므로 형태별로 위험분석을 세심하게 실시하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있겠다.

REFERENCES

[1] Kim, J. D., and Han, S. A., and Rhim, J.K., and Ynag, 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] Kim, J. D., and Kwon, K. S., and Rhim, J.K., and Ynag, W.B., "A Study on Flow Analysis according to the Cause of Gas Leakage in the Specialty Gas Supply Device for Semiconductors", *KIGAS*, 25(2), 74-75, (2021)

[3] Kim, Y. J., and Hwang, J. H., "Semiconductor manufacturing process exhaust gas treatment technol-

- ogy", *Air Cleaning Technology*, 3, 15-22, (2001)
- [4] Shasha Zhang and David E., and Susan T., "Re activity of deposited byproducts generated from ZrO_2 atomic layer deposition, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 45, 78-87, (2017)
- [5] Samsung Semiconductor Story Blog "Samsung semiconductor story"
- [6] Status and Cases of Chemical Accidents in National Institute of Chemical Safety,
<https://icis.me.go.kr/search/searchType2.do>
- [7] Han, W. S., and Lee, K. W., and Seo, D. H., and Lee, J. S., Byun J. H., "A Study on reduction of fire explosion accidents by static ignition", *OSHRI*, 8-20, (2019)
- [8] Kwon, H. J., Park, S. H., "A Study on the minimum ignition energy measurements for liquid jet A1 fuel under at elevated oxygen concentrations and reduced atmospheric pressures", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 16(3), 90,-91, (2017)
- [9] KOSHA GUIDE P-127, "Technical guidelines for safe operation of semiconductor manufacturing process", KOSHA, (2012)
- [10] KOSHA GUIDE P-122, "Technical Guidelines for the Safety of Bulk Systems Handling Gases in Semiconductor Processes", KOSHA, (2012)
- [11] KOSHA GUIDE P-16, "Technical guidelines for fire prevention and protection of semiconductor manufacturing facilities", KOSHA, (2012)