



## Diffusion 공정 내 스크러버 퇴적 부산물의 위험성 평가

김민지 · 이진백 · <sup>†</sup>정승호\* · <sup>††</sup>이근원\*

아주대학교 환경공학과 석사과정, \*아주대학교 환경안전공학과 교수  
(2024년 01월 26일 접수, 2024년 4월 22일 수정, 2024년 6월 25일 채택)

## Risk Evaluation of Scrubber Deposition By-Products in the Diffusion Process

Minji Kim · Jinback Lee · <sup>†</sup>Seungho Jung · <sup>††</sup>Keunwon Lee

Dept. of Environmenta, and Safety Engineering, Ajou University, 206 World cup-ro,  
Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 16499, Korea

(Received January 26, 2024; Revised April 22, 2024; Accepted June 25, 2024)

### 요약

반도체 제조공정 중 Diffusion 공정에서는 미세 분말 등 여러 반응성 부산물이 발생한다. 부산물은 후처리 및 배기 처리 시스템에 설치된 배관 안에 퇴적되고, 잠재적으로 상당한 분진폭발 위험이 있을 수 있다. 본 연구에서는 Diffusion 공정에서 발생하는 물질 검증, 분석시료 선정, 위험성 분석 3가지 방법으로 진행하였다. Diffusion 공정에서 취급 중인 물질 중 부산물 분진이 발생할 수 있는 원료는 ZrO<sub>2</sub>, TEOS, E-DEOS로 확인되었다. 각 처리시설에서 채취한 부산물을 대상으로 최소착화에너지, 분진폭발 테스트를 수행하였다. 그 결과 최소착화에너지의 경우 모든 부산물이 점화되지 않았다. 하지만, 분진폭발 테스트 결과 ZrO<sub>2</sub>이 부산물 분진에서 최대 7.6 bar, K<sub>st</sub>는 73.3 bar·m/s로 폭발 위험성이 확인되었다. 이를 통해 반도체 공정에서 이러한 위험성을 저감 시키기 위해 배관 내부의 퇴적층이 과도하게 쌓이지 않도록 관리해야 한다.

**Abstract** - In the semiconductor manufacturing process, the Diffusion process generates various reactive by-products. These by-products are deposited inside the pipes of post-processing and exhaust treatment systems, posing a potential risk of substantial dust explosions. In this study, three methods material verification, selection of analysis samples, and risk analysis were employed to address the substances produced during the Diffusion process. Among the materials handled in the Diffusion process, ZrO<sub>2</sub>, TEOD, and E-DEOS were identified as raw material capable of generating by-product dust. Test for Minimum Ignition Energy and dust explosion were conducted on the by-products collected from each processing facility. The results indicated that, in the case of MIE, none of the by-products ignited. However, the dust explosion test revealed that ZrO<sub>2</sub> exhibited a maximum pressure of 7.6 bar and K<sub>st</sub> value of 73.3 bar·m/s, its explosive hazard. Consequently, to mitigate such risks in semiconductor processes, it is excessive buildup.

**Key words** : diffusion process, dust-byproduct, explosion risk, semiconductor industry

### I. 서론

반도체는 스마트폰, TV 등 전자제품의 필수부품으

로서 현대사회에 필수적으로 사용되고 있다[1]. 하나의 반도체칩을 생성하기 위해 확산(Diffusion), 포토(Photo), 식각(Etch) 등 여러 공정을 거치게 된다[2]. 최근 반도체 공정은 4차 산업에 따른 수요에 대응하기 위해 10나노(nm)공정에서 3나노(nm)이하의 초미세화 공정개발산업이 확대되고 있다. 또한, 데이터 저장

<sup>†</sup>Corresponding author:processsafety@ajou.ac.kr

<sup>††</sup>Corresponding author:leekw0@ajou.ac.kr

Copyright © 2024 by The Korean Institute of Gas

를 향상을 위해 확산공정(Diffusion)에 대한 기술개발이 증가하고 있다[3].

2013년 SEMATECH와 뉴욕주 유틀카주립대학이 공동으로 반도체 및 관련 사업에서 사용되는 물질과 공정과 관련된 사고 이력을 찾아내는 연구를 수행하였다. 발생한 사고 70건의 근본 원인의 대부분이 펌프 전단, 진공펌프, 배기라인과 같은 후처리 공정에서 발생하였다[4]. 2015년 국내에서 반도체 시제품을 제조하는 공정의 연구전용 장비에서 진공펌프 후단에서 파열되는 사고가 발생하였다. 이 사고는 배기라인에 퇴적된 반응부산물인 산화지르코늄( $ZrO_2$ ) 분체와 미반응 물질의 제거를 위해 승온작업 중 배기라인의 진공펌프 후단의 연결부위가 파열되는 사고였다[5, 6].

반도체 제조공정은 제조설비(FAB)에 화학물질을 공급하는 공급설비, 반도체를 생산하는 제조설비(FAB)와 반도체 제조공정에서 사용 후 생성된 반응부산물과 미반응물질을 처리하는 처리설비로 나눌 수 있다[7]. 전자 및 반도체산업에서 주로 사용하는 특수가스는 유독성, 자연발화성, 인화성, 부식성 등의 원료로서 다른 화학 공정에 비해 소량이다. 그러나 그 취급과정에서 누출된다면 작업자에게 독성 등 치명적인 손상을 가할 수 있을 뿐만 아니라 화재 및 폭발 등 다양한 사고의 원인이 될 수 있다[6]. 특히 반도체 생산챔버 및 후공정 배관 내 상당한 양의 미반응 전구체 물질이 예상치 못한 반응을 일으켜 상당한 양의 부산물을 생성할 수 있다[8, 9]. 또한, 배관에 퇴적된 부산물은 물이나 산소에 노출되면 폭발위험을 초래하기에 적절히 처리해야 한다[10].

Han 등은 TEMAZ와 반응 부산물인 산화지르코늄에 대한 열안전성, 온도변화에 따른 압력 특성을 조사하여 반도체 배관 파열사고 원인을 규명하고 예방대책을 제시하였다[11]. Zhang 등은 원자층증착(Atomic Layer Deposition, ALD)공정에서 사용하는 TEMAZ 및 TDCZ(Tris Dimethylamino Cyclopentadienyl Zirconium)의 원료를 대상으로 물질 특성을 분석하였다[12]. Lee 등은 반도체 산화지르코늄 원자층증착(ALD)공정에서 발생하는 분진 부산물의 특성을 비교하여 폭발위험을 감소시키는 스크러버 처리 방법을 제안하였다[13].

그러나 반도체 확산(Diffusion)공정에서 생성될 수 있는 여러 부산물분진의 특성을 분석 및 평가는 부족한 상태이다. 본 연구는 확산공정에서 발생할 수 있는 3가지 부산물질을 대상으로 부산물 분진의 특성을 비교·분석하여 위험성을 평가하고자 한다.

## II. 이론적 배경 및 대상물질 선정

### 2.1. Diffusion 공정

확산(Diffusion)공정은 웨이퍼 표면 상부에 원자층을 한층 씩 증착하는 방식으로 박막을 증착시키는 첨단 기술이며, 정밀히 증착되는 막질의 제어와 균일한 두께로 막질을 증착할 수 있는 장점이 있다[14]. 확산공정을 크게 나누면 화학기상증착(CVD), 산화반응(Oxidation), 불순물접합(Junction)으로 구분된다. 화학기상증착법 중에는 원자층 증착(Atomic Layer Deposition, ALD)과 질화증착(Nitride Deposition)등의 방법이 존재한다. ALD공정은 지르코늄(Zr)과 오존( $O_3$ )을 이용하여 산화지르코늄( $ZrO_2$ )막을 증착하는 공정이다.

### 2.2. Diffusion 공정의 부산물 생성

확산공정에서는 Table 1과 같이 다양한 화학물질이 사용되고 있다. 확산공정에서 사용 중인 원료 중 대표적으로 부산물이 발생하는 대표적인 물질은 TDCZ(Tris-dimethylamino-cyclo-pentadienyl-zirconium), TEOS(Tetra Ethoxy Silane), M-DEOS(Methyl Di-etho-

Table 1. Main feedstock chemicals in the Diffusion process

Application for oxide film formation, heat treatment, impurity diffusion	Wafer cleaning applications
$NH_3$ (Ammonia)	$CH_3COOH$ (Acetic acid)
$AsH_3$ (Arsine)	
$BBr_3$ (Boron tribromide)	$NH_4$ (Ammonium fluoride)
$H_2SiCl_2$ (Dichloro silane)	
$F_2$ (Fluorine)	$NH_4OH$ (Ammonium hydroxide)
$N_2$ (Nitrogen)	
$NO$ (Nitrogen monoxide)	HF(Hydrofluoric acid)
$N_2O$ (Nitrus oxide)	
$PH_3$ (Phosphine)	$H_2O_2$ (Hydrogen peroxide)
$POCl_3$ (Phosphorus oxychloride)	
TEOS(Tetra Ethoxy Silane)	$HNO_3$ (Nitric acid)
TMA(Trimethylaluminium)	
4MS(Tetra Methyl Silane)	$H_2SO_4$ (Sulfuric acid)
M-DEOS(Methyl Di-ethoxy silane)	

xy silan)가 있다. TDCZ 내 지르코늄의 결합물질인 메틸아미노(methyl-amino)계열과 CP(Cyclo pentadienyl)가 오존과 만나 산화지르코늄을 생성하고, 지르코늄 카바이드(ZrC) 및 지르코늄질화물(ZrN)의 부산물이 생성될 수 있다. 또한, TEOS와 M-DEOS가 실리콘 카바이드(SiC)를 생성한 후 실리콘의 산화물질과 반응하여 부산물이 생성될 수 있다.

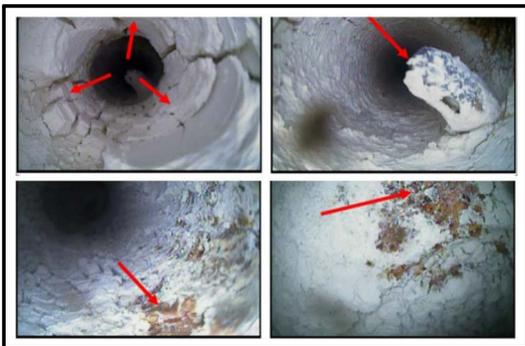
확산공정에서 발생한 부산물은 진공펌프를 사용하여 챔버를 비우며, 미반응 화학물질은 1차 스크러버를 통해 회수 및 처리 후 대기로 방출된다.

**2.3. Diffusion 공정의 부산물 위험성**

확산공정 내 ZrO<sub>2</sub> 등의 부산물은 공기 중의 수분 또는 물과 접촉하여 분해 반응이 일어나 에틸메틸아민, 탄소 및 질소 산화물, 지르코늄 산화물이 생성되어 화재폭발 및 독성 위험성이 있다. 실제 반도체 제조시설 현장의 펌프-스크러버 전단부 사이의 배관 내부와 스크러버 아웃렛 배관 내부에 ZrO<sub>2</sub> 등 부산물이 많이 퇴



**Fig. 1.** Sedimentary dust in dry scrubber inlet piping.



**Fig. 2.** Sedimentary dust in dry scrubber outlet piping.

적된 것을 관찰할 수 있다(Fig. 1, Fig. 2). 퇴적분진과 스크러버 후단을 제거하는 보수정비 작업 중 외부에서 유입된 공기와의 산화반응이 발생할 수 있다.

지르코늄은 반응성이 높은 금속으로 분진의 최소 착화에너지는 0.8 mJ로서 쉽게 발화할 수 있다. Table 2에서 알 수 있듯이 산화지르코늄의 연소열은 타 금속 분진에 비해 크다.

산화지르코늄의 원료물질인 TDCZ의 물질특성을 Table 3에 나타내었다. TDCZ는 자연발화 온도가 402°C

**Table 2.** Comparison of heat of combustion magnitude of metal oxides

Material	Heat of combustion (-ΔHc at 298K)kJ/mol
Zirconium oxide(ZrO <sub>2</sub> )	1100.6
Silicon Oxide(SiO <sub>2</sub> )	910.9
Titanium Oxide(Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	760.5
Boron oxide(B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	636.4
Chromium oxide(CrO <sub>3</sub> )	569.9

**Table 3.** TDCZ Material properties

Category	Contents
Product	Tris Dimethylamino Cyclopentadienyl Zirconium
CAS Number	33271-88-4
color	Light yellow
smell	Ammonia flavor
Structural formula	Zr(C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> )(N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>
molecular weight	288.55(Zirconium composite conditions)
molecule size	4.81 μm
melting point (°C)	-20
Boiling (°C)	198
Explosion range (Vol%)	2.8-144
Vapor pressure (Pa) at 70°C	60
specific gravity	1.163
viscosity (mPa·s) at 25°C	8.17
Auto-ignition temperature (°C)	402 (Amine complex conditions)

이므로 챔버 내 공정조건인 300°C에서의 발화위험성은 낮을 것으로 예상된다. 그러나 TDCZ의 미반응물이 매우 작은 압축 공기 등에 의한 강한 마찰에 의해 쉽게 발화할 수 있다[15]. 그러나 TDCZ의 Zr 성분은 산소공급이 되지 않는 밀폐배관조건에서도 반응 위험성이 나타날 수 있으며, 착화 발생 시 분해가스에 의한 압력상승으로 배관이 파열될 가능성이 있다. 또한, TDCZ의 미반응물이 회수되어 스크리버에 축적된다면 미반응 지르코늄의 성분이 증가할 수 있기에 사고예방의 측면에서 화재 및 폭발 위험성 검토가 필요하다.

### III. 분석시료 및 방법

#### 3.1. 분석시료 선정 및 분석 절차

시료선정은 실제 가동 중인 반도체 생산시설의 Diffusion 공정에서 부산물이 발생 될 수 있는 3개의 물질(ZrO<sub>2</sub>, TEOS, D-DEOS)을 대상으로 하였다. 1차 처리시설의 연결되어있는 배관의 총 7개의 부산물 분진 샘플을 채취하여 Table 4와 같이 정리하였다.

1차 스크리버는 확산공정에서 발생한 유해 배기 가스를 흡착하거나 직·간접 산화 등으로 처리하여 배출시킨다. 반도체 산업에서 범용적으로 사용하고 있는 1차 스크리버는 Dry 스크리버와 Burn Wet 스크리버가 있다. Dry 스크리버는 물리 및 화학흡착으로 유해 배기가스를 처리하는 방법으로 폐수처리가 불가능한 공정에서 주로 사용한다. Burn Wet 스크리버는 LNG를 연료로 배기가스를 직접 산화하여 처리하는 방법으로 식각(Etch)공정에서 주로 적용된다. 따라서 본 연구에서는 1차 스크리버 처리 후 발생 된 부산물을 고려하였다.

Table 4. Dust sample materials inside the piping

Case	By-product name	Sample location
1	ZrO <sub>2</sub>	Scrubber Untreated By-products
2		Dry By-products after scrubber treatment
3		Burn Wet By-products after scrubber treatment
4	TEOS	Scrubber Untreated By-products
5		Dry By-products after scrubber treatment
6	M-DEOS	Scrubber Untreated By-products
7		Dry By-products after scrubber treatment

분석 절차는 확산공정 부산물 분진을 최소착화에너지(Minimum Ignition Energy, MIE)와 분진폭발테스트 분석을 통해 위험성을 확인하였다.

#### 3.2. Diffusion 공정 부산물 분진 폭발 위험성평가

##### 3.2.1 최소착화에너지

최소착화에너지는(Minimum Ignition Energy, MIE)는 폭발을 시작하는데 필요한 최소 에너지이다[16]. 최소착화에너지는 분진 폭발 등의 위험성을 예방 검토 시 사용될 수 있기에 분진을 취급하거나 저장, 가공하는 공정에서 매우 중요하다. Switzerland의 Kuhner 회사에서 제작한 MIKE-3으로 분석하는 것이 표준화되어 있다. 분산된 분진을 폭발 용기 튜브의 전극사이 스파크를 이용하여 착화되는 실린더 내부에서의 화형이 전파되는 모습을 통해 폭발여부를 판단한다. 최소착화에너지는 입자크기의 영향을 받지만, 실제 공정에서 채취한 시료를 사용하여 입자크기에 따른 영향은 고려하지 않았다. 시험조건은 Table 5와 같다.

##### 3.2.2 분진 폭발 테스트

부산물의 폭발압력 특성을 측정하기 위해 내부시험규격(ASTM E1226-19)에서 제시한 바와 같이 10 kJ 화학점화기와 20L Switzer Chamber를 사용하였다 [17]. Table 6과 같은 조건에서 생산된 시료의 특정량을 6L의 분진 저장 용기에 보관하고 최대 20 bar 공기 중으로 주입한 후 먼지와 공기의 혼합물은 저장 용기의 밸브를 열어 구형 용기에 분산시켰다. 60 ms의 착화 지연시간 경과 후, 5 kJ의 착화에너지로 분진과 공기의 혼합물이 폭발했을 때의 폭발 특성을 측정하였고, 압력 파형을 관찰하였다.

Table 5. Minimum ignition energy test conditions

Temperature	20°C ~25°C
Humidity	50 ± 5 % R.H.
Pressure	101.3 kPa
Dispersion Pressure	7 bar

Table 6. Dust explosion test conditions

Temperature	20°C ~25°C
Pressure	0.8~1.0 bar
Dispersion pressure	7 bar

### IV. 분석 결과

#### 4.1 Diffusion 공정 분진 폭발 위험성 평가

##### 4.1.1 최소착화에너지

부산물 분진을 포함한 모든 가연성 물질에는 자체 MIE가 있어야 한다. 따라서, 분진 시료 샘플 7개를 대상으로 MIE를 측정하였다. 측정 결과 Table 7과 같이 최소착화에너지가 모두 1000 mJ에서 접화되지 않았다. 이러한 결과는 부산물 샘플의 일반적인 정전기 방전에너지 분진 착화가 일어나기 어렵다는 것을 알 수 있다.

대전체가 방전할 경우의 불꽃 방전 에너지(E)는  $E=1/2 \cdot (CV^2)$ 로 나타낸다. 여기서, C는 물체 접촉 표면간의 전기용량(F; Farad), V는 접촉 전위차(Volt)를 의미한다.

Jonassen[18]에 의하면(Jonassen, 1995) 최소착화에너지(MIE;  $W_{min}$ )는 다음 식과 같이 폭발 안전 전압( $V_{ex}$ ; Explosion-safe voltage)과 정전용량에 의해 정해진다.

$$V_{ex} = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{min}}{C}} \tag{1}$$

정전용량 측정 자료에 따르면 Polyethylene 및 Butyl rubber는 각각 321, 216 pF, Polyvinyl chloride(PVC)의 정전용량은 200~300 pF이다[19]. 만일 최소 착화에너지( $W_{min}$ )를 1000mJ로 가정하고 정전용

**Table 7.** Evaluation results of Minimum ignition energy

Case	By-product name	Sample location	MIE
1	ZrO <sub>2</sub>	Scrubber Untreated By-products	> 1000 mJ
2		Dry By-products after scrubber treatment	
3		Burn Wet By-product after scrubber treatment	
4	TEOS	Scrubber Untreated By-products	
5		Dry By-products after scrubber treatment	
6	M-DEOS	Scrubber Untreated By-products	
7		Dry By-products after scrubber treatment	

량 300 pF을 적용하여 계산하면, 폭발안전전압( $V_{ex}$ )은  $V_{ex} = [(2 \cdot 1000 \times 10^{-3}) / (300 \times 10^{-12})]^{0.5} = 81649.6$  V이다. 즉, MIE가 1,000 mJ 이라면 대전 전압이 81649.6 V 이상에서만 정전기에 의한 착화위험성이 발생할 수 있다. 실제 반도체 C 사업장에서 측정한 Dry 스크러버 후단 배관의 전압을 Table 8에 나타내었다. 최대 전압은 206.2 V로 위험이 없음을 보여준다.

##### 4.1.2 분진 폭발 테스트

분진 폭발의 특성은 분진 접화 후 압력 증가율 및 최고 압력과 같은 실험적으로 결정된 특성의 함수이다. 접화 후 최대 압력 상승률은 분진 폭발의 견고성을 나타내며, 이를 통해 상대적인 기준으로 폭발 거동을 비교할 수 있다[20].

분진 폭발 분석 결과를 Table 9와 같이 정리하였다. 각 Parameter인 최대폭발압력( $P_{max}$ ), 최대폭발압력 상승속도( $(dP/dt)_{max}$ )와 부피 기준으로 표준화된 최대폭발압력 상승속도( $K_{st}$ )는 폭발 강도를 확인할 수 있도록 구분된다.

여기서 분진폭발 실험에 있어서 폭발 용기의 용적 크기에 따라 Fig. 3와 같이 폭발압력상승속도( $dP/dt$ )

**Table 8.** Domestic semiconductor company C factory dry scrubber rear pipe constant

No.	Voltage (V)						
1	-187.5	16	-186.6	31	61.2	46	-147.2
2	-164.4	17	-206.2	32	76.4	47	-148.2
3	-48.6	18	-159.4	33	108	48	-150.2
4	-135.4	19	-160.8	34	118.4	49	-152.2
5	-119.4	20	-144.4	35	83.4	50	-151.2
6	-122.2	21	-154.6	36	83.4	51	-144.2
7	-130.25	22	-160.5	37	93.5	52	-124.75
8	-170.2	23	-161.6	38	109.8	53	-93.2
9	-168.8	24	-134.6	39	201.4	54	-88.8
10	-161.2	25	-0.8	40	153	55	-91.8
11	-172.5	26	16.6	41	-85	56	42
12	-174.8	27	22.2	42	-140.2	57	149.4
13	-177	28	30	43	-145.4	58	118
14	-178.6	29	37.2	44	-148.4	59	133
15	-184.4	30	48.6	45	-149	60	140.4

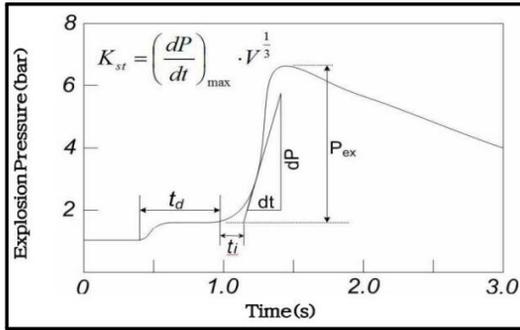


Fig. 3. Explosion pressure profile and explosion index( $K_{st}$ ).

Table 9. Dust explosion parameters

Parameter	Units	Description
$P_{max}$	bar	Maximum explosion pressure at constant volume explosion
$(dP/dt)_{max}$	bar/s	Maximum explosion pressure rate at constant volume explosion
$K_{st}$	bar·m/s	Increase in volume normalized maximum explosion rate at constant volume explosion

Table 10. Dust explosion classification

Dust Explosion Class	$K_{st}$ (bar·m/s)	Explosion Characteristics
St-0	0	No Explosion
St-1	1 ~ 200	Weak or Medium-Scale Explosion
St-2	201 ~300	Large-Scale Explosion
St-3	> 300	Extremely Large Scale Explosion

가 변하기 때문에 장치의 크기에 따른 영향보정을 위하여 분진 폭발 지수(Dust Explosion,  $K_{st}$ )가 사용되고 있다. 최대 폭발압력 상승 속도 [ $\text{bar/s}$ ]를  $(dP/dt)_{max}$ , 폭발 용기의 체적을  $V$ 라고 하면, 식(2)와 같은 관계식으로 계산할 수 있다[21]. 또한, 분진 폭발 지수( $K_{st}$ )값에 따라 Table 10과 같이 분진 폭발 등급(Dust explosion class)으로 구분할 수 있다[22].

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \times V^{1/3} \quad (2)$$

Table 11. Dust explosion results

Case	By-product name	Dust explosion (bar/a)	explosion Whether	$(dP/dt)_{max}$ (bar/s)	Kst (bar·m/s)	Dust Explosion Class
1	ZrO <sub>2</sub>	7	O	249	67.6	St-1
2		7.6	O	270	73.3	St-1
3		0.9	X	14.7	4.0	St-1
4	TEOS	1.0	X	16.4	4.5	St-1
5		0.9	X	14.7	4.0	St-1
6	M-DEOS	0.9	X	14.7	4.0	St-1
7		0.8	X	13.1	3.6	St-1

총 7개의 부산물 분진 시료를 대상으로 분진 폭발 장치에서 얻은 압력 결과를 Table 11과 같이 정리하였다. ZrO<sub>2</sub> 스크러버 미처리 부산물(case 1)와 ZrO<sub>2</sub> Dry 스크러버 후 부산물(case 2)의 피크 압력은 각 7 bar, 7.6 bar로 최대 폭발압력 상승 속도는 270 bar/s로 유사하며 폭발성이 있음을 확인하였다. Fig. 3을 참조한  $K_{st}$ 는 73.3 bar·m/s이며, Table 10을 통해 St-1 등급임을 알 수 있다. 그 외 ZrO<sub>2</sub> Burn Wet 스크러버 처리 후 부산물(case 3), TEOS(case 4, 5), M-DEOS(case 6, 7)의 경우 16.4 bar/s의 최대 압력 상승률과 함께 0.8~0.9 bar로 확인하였다. 이때  $K_{st}$ 의 값은 4.33 bar·m/s이며, St-1 등급으로 확인될 수 있다. case 1, 2의 부산물 시료는 다른 부산물 시료와 폭발 등급은 같으나 최대폭발 압력상승속도는 약 15배 높았다.

## V. 결론

본 연구의 목적은 반도체 확산(Diffusion)공정에서 발생하는 부산물의 물질 특성을 평가하여 부산물로 인한 폭발 위험을 줄이는 데 있다. 반도체 생산시설의 다운 스트림에서 발생할 수 있는 3개의 원료물질을 대상으로 최소 착화 에너지 및 화재 및 폭발 위험성 분석을 수행하였다. 최소착화에너지 분석에서 모든 부산물질이 1000 mJ 이상으로 정전기 방전에너지에 의한 분진착화는 일어나기 어려운 사실을 확인하였다. 그러나 분진폭발 테스트에서 산화지르코늄(ZrO<sub>2</sub>)의 스크러버 미처리 부산물과 Dry 스크러버 처리 후 부산물에서 최대 7.6 bar까지 폭발될 수 있는 위험성(폭발 등급, St-1)이 확인되었다.

산화 지르코늄(ZrO<sub>2</sub>) Dry 스크러버 처리 후 부산물의 폭발 압력시험에서 큰 위험성을 가지고 있다. 분진 입자가 작을수록 발열 속도가 증가할 수 있고 발화 위

험성은 높아진다. 이러한 위험성을 저감 시키기 위해서는 배관 내부의 퇴적층이 쌓이지 않도록 지속적인 관리가 필요하다. 또한 화재폭발 발생시에 배관을 통한 폭발 피해가 확대되지 않고, 배관 내부의 자연발화 위험성을 예방하기 위해 배관 내 퇴적 분진의 정기적 관리 체계가 확립되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012787, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)

## 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] Lee, K. W., "An Evaluation of Chemical Reactivity Hazard in Semiconductor Process", *Spring conference of the KIGAS*, 5-5, (2015)
- [3] Lee, D. J., Kim, S. R., Kim, S. G, Kang, C. S., Lee, J. W., "A Study on measures to prevent leakage of process fluid from the VCR fitting used in the semiconductor manufacturing process", *KIGAS*, **27**(2), 79~85, (2023)
- [4] Trammell, S., McIntyre, A., "Environmental safety and health aspects of R&D and manufacturing with advanced processing materials - best known methods and standardization", The SESA 36th Annual International High Technology ESH Symposium and Exhibition, Scottsdale, AZ, USA, (2014)
- [5] Yang, W. B, Seo, B. W., Kim, S. G., "Accident Investigation Report of TEMAZ Explosion in Semiconductor Process", Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA), Ulsan, Republic of Korea, (2015)
- [6] Yang, W. B., Rhim, J. K., Hong, S. M., "A case study on the TEMAZ explosion accident in semiconductor process", *KIGAS*, **21**(6), 52-60, (2017)
- [7] Kim, J. D., Kwon, K. S., Rhim, J.K., 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)
- [8] Hausmann, D.M., Kim, E., Becker, J., Gordon, R.G., "Atomic layer deposition of hafnium and zirconium oxides using metal amide precursors", *Chem. Mater.*, **14**, 4350-4358, (2002)
- [9] Sherer, J.M., *Semiconductor Industry: Wafer Fab Exhaust Management* CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, (2010)
- [10] Chen, J.R., "Characteristics of fire and explosion in semiconductor fabrication processes", *Process Saf. Prog.*, **21**, 19-2, (2002)
- [11] Lee, K., Han, I, "Study on the Causes of Duct Rupture accident of Exhaust gas facility in the Zirconium Deposition Process", *Spring conference of the KIGAS*, 207-207, (2016)
- [12] Zhang, S., Speed, D.E., Trammell, S.R., Sharfstein, S.T., "Reactivity of deposited byproducts generated from ZrO<sub>2</sub> atomic layer deposition" *J. Loss Prev. Process Ind.*, **45**, 78-87, (2017)
- [13] Lee, K., Song, D., Lee, J., Lee, C. G., Shin, G. A., & Jung, S., "Evaluating effectiveness of dust by-product treatment with scrubbers to mitigate explosion risk in ZrO<sub>2</sub> atomic layer deposition process" *Journal of Hazardous Materials*, **400**, 123284, (2020)
- [14] O'Neill, B.J., Jackson, D.H.K., Lee, J., Canlas, C., Stair, P.C., Marshall, C.L., Elam, J.W., Kuech, T.F., Dumesic, J.A., Huber, G.W., "Catalyst design with atomic layer deposition", *ACS Catal.*, **5**, 1804-1825, (2015)
- [15] Randeberg, E., Eckhoff, R.K., "Initiation of dust explosions by electric spark discharges triggered by the explosive dust cloud itself", *J. Loss Prev. Process Ind.*, **19**, 154-160, (2006)
- [16] Jonassen, N.I.E.L.S., *Explosions and static electricity*, In Electrical Overstress/Electrostatic 116 Discharge Symposium Proceedings, IEEE, 1-337, (1995)
- [17] ASTM E1226, standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds, ASTM, (2019)
- [18] Man, C.K., Harris, M.L., "Participation of large particles in coal dust explosions", *J. Loss Prev. Process Ind.*, **27**, 49-54, (2014)
- [19] Crowl, D.A., Louvar, J.F., *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications (3rd ed.)*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, (2011)
- [20] Han, W.S., "Changes in explosion characteristics due to mixing of Al and Zn dust", *Spring Academic Paper Presentation Paper Collection*, 435-437,

- (2011)
- [21] Amyotte, P.R., Echhoff, R.K., “Dust Explosion Causation, Prevention and Mitigation: An Overview”, *J. Chem. Health & Safety*, **17**(1), 15~28,
- (2010)
- [22] Eckhoff, R.K., *Dust Explosion in the Process Industries, 3rd edition*, Gulf Professional Publishing, USA, (2003)