



반도체용 특수가스 공급을 위한 가스캐비닛 내부 유동해석에 관한 연구

김정덕·한승아*·양원백**·†임종국***

한국교통대학교 안전공학과 박사과정, *삼성전자(주) 환경안전센터,
승실사이버대학교 안전공학과 교수, *한국교통대학교 안전공학과 교수
(2020년 9월 16일 접수, 2020년 10월 26일 수정, 2020년 10월 27일 채택)

A study on the Internal Flow Analysis of Gas Cylinder Cabinet for Specialty Gas of Semiconductor

Jung-Duck Kim · Seung-A Han* · Won-Baek Yang** · †Jong-Guk Rhim

Dept. of Safety Engineering, Korea National University of Trans. Chungju 27469, Korea

*Environment & Safety Center, Samsung Electronic DS. Hwasung 18448, Korea

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

(Received September 16, 2020; Revised October 26, 2020; Accepted October 27, 2020)

요 약

일반적으로 반도체를 제조할 때는 인화성, 독성, 부식성의 유해 · 위험물질이 다수 사용되며, 특히 화학적 증착(CVD), 식각(Etch) 등의 공정에서는 특수가스를 사용하여 반도체를 제조하고 있다. 특수가스는 압축 또는 액화가스의 상태로 용기에 충전되어 있는데, 특수가스를 반도체 제조공정에 공급하는 설비로서 가스캐비닛(Gas Cylinder Cabinet)이 사용되고 있다. 이러한 가스공급시스템 내에서 실린더 이상 발생 시 배관 · 계측기 등 공급시스템의 안전 확보를 위해 가스실린더에 설치된 압력방출장치(PSD)를 통해 가스가 방출하게 되는데, 이 경우 가스캐비닛 내부에 방출되는 가스가 캐비닛 외부로 누출될 위험성이 존재한다. 따라서 가스캐비닛 내부의 유체유동을 분석하여 누출에 따른 위험성을 파악하고 이에 대한 위험도 감소를 위한 대책을 제시하고자 한다.

Abstract - In general, when manufacturing a semiconductor, a number of hazardous and dangerous substances such as flammability, toxic, and corrosiveness are used. In particular, semiconductors are manufactured using specialty gas in processes such as CVD and etching. The specialty gas is filled in a container in the state of compressed or liquefied gas, and a gas cylinder cabinet is used as a facility for supplying this specialty gas to the semiconductor manufacturing process. When an accident occurs in the gas supply system, gas is released through a pressure release device installed in the gas cylinder to secure the safety of the supply system. In this case, the gas released inside the gas cabinet, there is a risk of leaking to the outside. After that, by analyzing the gas flow in the gas cabinet, it is intended to identify the risk associated with leak and to provide measures to prevent accidents.

Key words : gas cylinder, gas cabinet, gas cylinder cabinet, specialty gas, semiconductor

1. 서 론

반도체산업은 기술의 발전과 시장의 변화에 대한 속도가 매우 빠른 산업이라 할 수 있다. 기존 메모리반

도체 중심의 공정설비에서 최근에는 파운드리로의 공정변화를 모색하는 것과, 10나노(nm) 공정에서 5나노(nm)이하 공정으로의 초미세화 공정 개발을 추진하는 것은 기술의 발전과 시장의 변화에 대응하기 위한 반도체산업의 특징이다.

이러한 반도체산업의 기술 발전을 위한 필수요건에는 PHOTO 공정에서의 극자외선(EUV, extreme ul-

†Corresponding author:jkrhim@ut.ac.kr

Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

traviolet) 제조장비 도입 등 제조설비의 최신화와 더불어 케미칼 물질에서 특수가스로의 공정 취급물질을 변경하는 물질 변경 등이 수반된다. 이처럼 제조설비의 최신화와 공정 취급물질 변경에 따라 반도체 산업현장에서 사용되는 특수가스의 양은 증가되고 있으며, 특수가스 공급을 위한 공급설비의 투자도 확대되는 추세이다.

특수가스 공급시스템 중 가스실린더를 이용한 가스캐비닛 공급시스템은 특수가스의 안정적 공급 및 제조설비 증설에 최적화된 설비로 다수의 반도체 제조현장에 널리 적용되고 있다. 그러나, 특수가스의 특성 상 인화성·독성·부식성 등 가스의 위험성이 높아 누출되는 경우 이로 인한 피해 영향범위가 넓고 작업자의 건강에 치명적 영향을 끼치게 된다.[2]

특수가스 공급라인은 가스공급장치, 분배장치 및 제조설비로 크게 구분되어 진다. 가스공급장치의 경우 제조설비에서의 가스 사용량에 따라 저장되는 양을 조절하게 되는데, 가스캐비닛(Gas Cylinder Cabinet), 번들(Bundle), 벌크가스(BSGS), 트레일러(Trailer) 등을 이용하여 가스를 저장·공급하고 있다. 분배장치의 경우 가스캐비닛과 같은 가스공급장치로부터 압력차에 의해 공급되는 일정량의 가스를 VMB(Valve Manifold Box), VMP(Valve Manifold Panel), Valve Box 등 분배설비를 통하여 제조설비로 가스를 공급하고 있다.[3, 11]

Table 1. Major properties of specialty gases

	Silane	Disilane	Dichloro-silane	Chlorine trifluoride
Molecular	SiH ₄	Si ₂ H ₆	Si ₂ H ₂ Cl ₂	ClF ₃
Gas properties	Flammable Toxic	Flammable Toxic	Flammable Toxic	Toxic Corrosive
Cylinder Capacity	-	47 L	47 L	40 L
Initial pressure	-	310 kPa (45 Psig)	124 kPa (18 Psig)	172 kPa (25 Psig)
CAS No.	7803-62-5	1590-87-0	4109-96-0	7790-91-2
Explosion limit (%)	1.4~96	0.4~100	4.1~99	-
Exposure	TWA 5 ppm	TWA 5 ppm	TWA 1 ppm	STEL-C 0.1 ppm
NFPA	F	4	4	0
	R	2	2	3
	H	1	1	4

이와 같이 가스공급장치 중에서 가스실린더를 포함하는 가스캐비닛 공급시스템은 캐비닛 내부에서 압력조절기를 통해 분배장치로 가스를 공급하는 설비로써 취급가스의 위험성이 다른 가스공급장치에 비해 매우 높다. 가스공급시스템에 대한 사고사례는 2015년 청주의 암모니아 누출사고, 2019년 화성의 가스공급배관 화재사고 뿐 아니라 최근에는 2020년 울산의 삼불화질소 폭발사고 등이 지속적으로 발생하고 있다.

가스캐비닛에 대한 기존의 연구들은 가스공급시스템 전반의 이론적 연구이거나 그 대상이 실험실에서 사용하는 소형 캐비닛으로 반도체산업 현장에서 실제 사용되는 것과는 차이가 있다.

따라서 반도체산업용 특수가스 공급을 위한 가스캐비닛 내부에서 가스의 누출이 발생하는 경우 캐비닛 내부의 가스 유동을 분석하여 이로 인한 피해영향 및 위험성을 파악하고 이를 예방하기 위한 안전대책을 도출하고자 하였다.

II. 이론적 배경

2.1 특수가스의 위험성

전자 및 반도체산업에서 주로 사용하는 특수가스가 누출되면 작업자에게 치명적 손상을 가할 수 있는 독성가스일 뿐만 아니라 화재 및 폭발위험이 높은 인화성가스에 해당한다.[7, 8]

인화성, 독성, 부식성 등 각 물질의 특성별로 전자 및 반도체 산업현장에서 대표적으로 사용하는 물질의 주요 물성 및 위험성은 Table 1에 나타내었다.

2.2 특수가스의 저장 및 취급 절차

전자 및 반도체산업에서 사용하는 특수가스의 일반적 사용 절차는 Fig. 1에서와 같이 가스실린더의 입

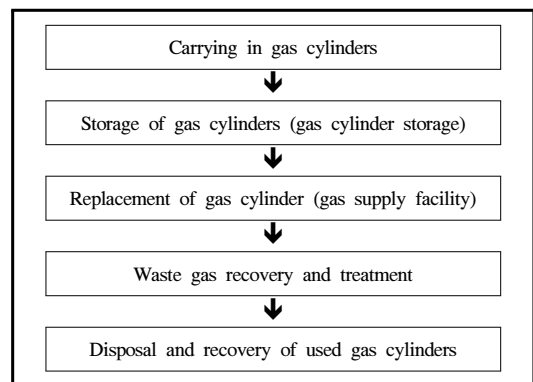


Fig. 1. Procedure for the use of specialty gases.

물성에 맞는 적합한 재료를 선정해야 한다. [4, 6]

가스캐비닛에 보관하는 용기는 실린더브래킷(Cylinder bracket)이나 체인 등으로 전도방지 장치를 하여야 한다. 또한 가스캐비닛의 배기설비, 경보장치, 긴급차단장치 및 압력센서 등은 비상전원장치 또는 UPS전원에 연동되어야 한다. 그리고, 인화성, 부식성 및 독성 가스를 수용하고 있는 가스캐비닛 기타 방호 구역 내부의 실린더의 머리부분, 압력 조절기 및 제어 장치 등과 같은 모든 누설 위험성이 있는 지점에 최소 0.51 m/sec 환기속도를 제공하는 환기설비를 설치하여야 한다.

인화성, 부식성 및 독성 가스를 수용하고 있는 가스캐비닛에는 가스 감시설비를 설치해야 하고, 감시설비가 작동 시 실린더의 설치장소에서 공정가스의 흐름을 자동으로 차단해야 하고, 비상제어설비에 경보를 발해야 한다. 비상차단밸브는 가스감시설비가 작동되었을 경우, 정전이 16초 이상 지속되는 경우, 캐비닛 환기용 기류가 상실된 경우, 가스캐비닛에 설치되어 있는 화재감지기가 작동되었을 경우, 과류방지스위치가 작동되었을 경우, 지진이 발생했을 경우 등 모든 조건에서 또한 자동적으로 닫혀야 한다. 비상차단밸브와 연결되어 있는 과류방지밸브 또는 과류방지스위치는 모든 공정 가스실린더에 설치되어야 하고, 가능한 한 실린더 연결부에 가깝게 위치되어야 한다.

모든 가스실린더 캐비닛은 수용되어 있는 가스의 명칭과 특정 가스 농도를 표시한 표지를 부착해야 하고, 가스캐비닛 내부에 있는 모든 가스 배관과 밸브는 해당용도(공정, 퍼지 또는 배기 등)를 표시한 표지를 부착하여야 한다. 가스캐비닛에 저장하는 혼재 가능한 공정 가스실린더는 2개 이하이어야 하며, 이들 가스실린더 중 단지 하나 만이 공정배관에 접속되어야 한다. 질소, 아르곤 또는 헬륨 등과 같은 퍼지 가스는 중앙공급식 보다는 실린더로부터 공급되어야 한다. LEL(Lower Explosion Limit)의 25%를 초과하는 농도의 인화성 가스가 가스실린더 퍼지 제어관의 배기라인, 공정장치 퍼지라인 또는 공정장치 진공펌프 배기관 안에 있는 경우, 유출물처리설비를 설치하여야 한다.



Fig. 3. General appearance of gas cabinet.

실란 등과 같은 자연발화성 가스를 저장하는 실린더의 재질은 스틸이나 알루미늄이어야 하며 가스실린더에서 화재가 발생 시 인접한 실린더에 화염의 영향을 방지하기 위해서 이러한 구역을 나타내도록 실린더 사이에 스틸재질의 칸막이를 설치하여야 한다.[4]

III. 본 론

3.1 특수가스 및 가스캐비닛 모델 선정

본 연구의 목적은 특수가스 실린더에서 안전밸브가 작동하는 경우 가스 누출에 따른 가스캐비닛의 내부 유동을 해석하고 외부로의 누출 여부를 확인하는데 있다. 이에 따라 < 2.1 특수가스의 위험성>에서 살펴본 바와 같이 반도체 제조공정에서 사용하는 주요 특수가스 중 가스의 특성, 실린더 용량, 초기압력, 폭발범위 등을 검토한 결과 Table 2에서와 같이 인화성과 독성을 동시에 가지고 있으며, 가스실린더의 용량과 초기압력이 가장 높은 디실란(Disilane)을 연구 모델로 선정하였다. 이 경우 가스캐비닛 내부의 유동해석은 이상기체(Ideal gas)로 반영하여 진행하였다.

디실란(Disilane)을 공급하는 가스캐비닛은 Table 3에서와 같이 반도체 제조공정에 설치되어 현재 사용 중인 실물 제품(Two Gas Cylinder, Box Size 796 mm * 550 mm * 1900 mm)을 선정하였다. 다만 Table 3에서 평가물질은 ANSYS Fluent의 물질 데이터베이스 내에 디실란(Si₂H₆)에 대한 물질정보가 포함되어 있지 않아 Si₂H₅로 대체 선정하여 평가를 진행하였다. Si₂H₅은 분

Table 2. Major properties of disilane

Molecular	Gas properties	Cylinder Cap.	Initial pressure	Explosion limit (%)
Si ₂ H ₆	Flammable Toxic	47 L	310 kPa (45 Psig)	0.4~100

Table 3. Flow analysis evaluation conditions

Category	Specifications	Remark
Gas cabinet	796 mm * 550 mm * 1900 mm	Real size
Evaluation substance	100% Si ₂ H ₆	Apply Si ₂ H ₅ in place of Si ₂ H ₆
Leak speed	224.972 m/s	Leak size 12.5 mm, 19.6 MPa

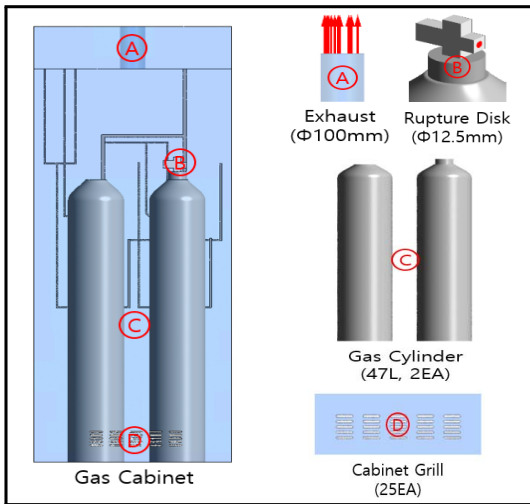


Fig. 4. Gas Cabinet Modeling.

자량(M.W.) 61.22, 비열(Cp1.) 241 J/g·°C의 물성을 지니고 있으며 Si₂H₆은 M.W. 62.22, Cp1. 299 J/g·°C을 지니고 있고 온도 및 압력에 대한 변형이 없어 가스캐비닛 내부의 내부유동 해석을 위한 모델 선정에 적합한 것으로 판단하였다. 또한 누출 속도에 대한 적용은 현장에 설치된 파열판의 실제 제조사 및 제품 사양을 반영(Neriki 社, Leak Size 12.5mm, 19.6MPa)하여 Phast를 통한 누출속도 계산값을 적용하였다.

반도체 제조공정에서 실제 사용하고 있는 가스캐비닛은 Fig. 4에서와 같이 실제 형상 Data를 기반으로 3D CAD작업을 실시하는 방법으로 모델링하였다.

3.2 가스캐비닛 모델링

가스캐비닛 내부 유동해석을 위한 프로그램으로 ANSYS Fluent v.19.3을 이용하여 가스캐비닛과 가스실린더, 배관 등의 형상 및 해석영역을 모델링하였다.

모델링에 사용한 가스캐비닛 내부 유동공간의 격자분할은 Elements 19,369,923 EA, Quality 0.84 (Skewness)로 Mesh Quality Reference를 기준으로 하여 적합한 수준으로 적용하였다. 모델링 기초 데이터를 통해 가스캐비닛 내부에서 유동의 장애요소로 작용하는 2개의 가스실린더 및 배관을 실제 모델링에 반영하여 가스캐비닛 내부의 실제 유동을 모델링할 수 있도록 Fig. 5와 같이 검토하였다.

또한 내부 유동공간의 격자분할은 Fig. 6과 같이 실시하였으며, 모델링 기초 데이터로는 내부 유동 장애요소인 실린더와 배관을 반영하여 모델링을 실시하는 방법으로 진행하였다.[10]

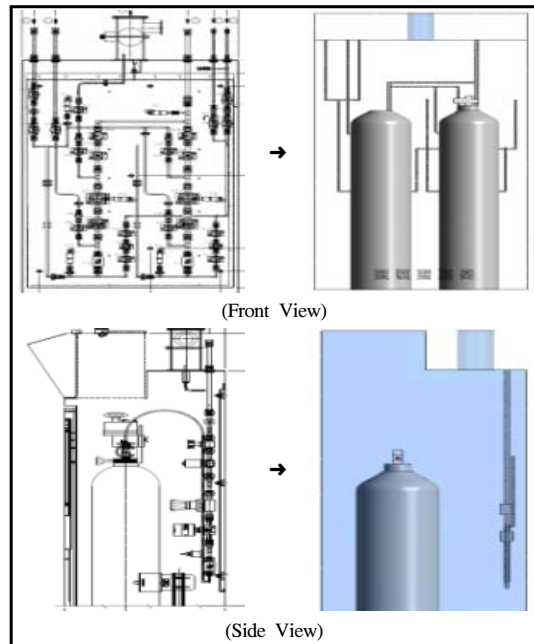


Fig. 5. Modeling Base Data.

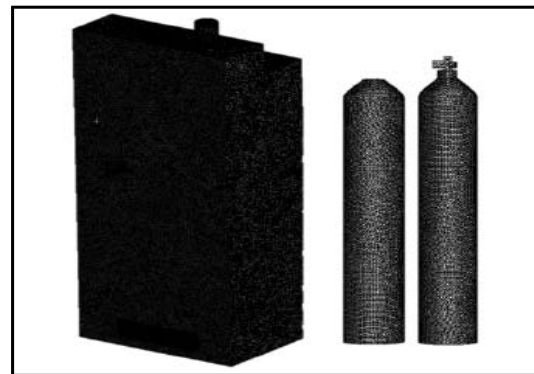


Fig. 6. Gas Cabinet Meshing Method.

IV. 유동해석 결과 및 고찰

4.1 가스캐비닛 외부로의 누출 가능성 해석

가스캐비닛 외부로의 누출에 대한 유동해석에서는 파열판 토출부를 통한 가스 배출 시 가스캐비닛 내부 유동 및 25개의 그릴을 통한 외부로의 누출 여부를 진행하였다. 파열판 토출 시 음속(Choked Flow)의 속도로 인해 배출 방향으로의 Stream Line이 형성되었으며, 강제 배기 Stream의 경우 Gas 배출에 의해 발생

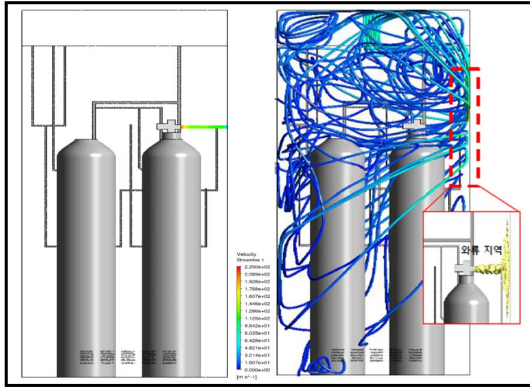


Fig. 7. Flow inside the gas cabinet.

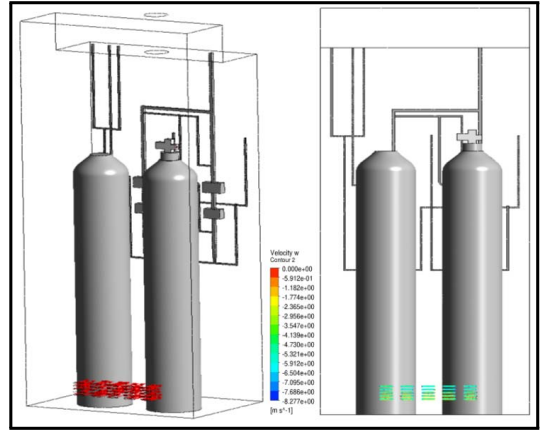


Fig. 8. Air flow in the grill area.

Table 4. Concentration inside the gas cabinet

Position (Z = m)	0.49	0.39	0.29	0.19	0.09
Maximum concentration (%)	40.29	42.54	100.0	45.31	41.41
Average concentration (%)	31.38	30.62	31.80	28.40	27.86

되는 와류로 인해 해당 위치에서 속도가 빨라짐을 확인하였고 배기로 흡입되는 Line이 형성되는 것을 Fig. 7에서와 같이 확인하였다.

또한 가스캐비닛 전면부에 위치한 25개의 그릴에 대한 w-Velocity의 값의 경우 -5.783 m/s의 평균값(최대값 -2.784 m/s, 최소값 -8.848 m/s)으로 음수의 값을 나타내며, 이를 통해 가스캐비닛 하단 그릴부에서는 외부 공기가 흡입되고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과를 통해 가스캐비닛 전면부 하단에 위치하고 있는 그릴을 통한 외부공기의 100% 흡입을 확인하였고 가스캐비닛 내부에서 외부로의 누출은 없음을 Fig. 8에서와 같이 확인하였다. 이는 가스캐비닛 내부에서의 누출위치가 변경될 경우 모델링에 따른 결과가 달라질 수 있음을 의미한다.

4.2 가스캐비닛 내부에서의 가스농도 해석

가스캐비닛 내부는 <3.1 특수가스 및 가스캐비닛 모델 선정>에서 언급한 바와 같이 배기(Exhaust)시스템이 상시 가동되는 구조이며, 가스캐비닛 하부에 설치된 그릴을 통해 외부공기가 가스캐비닛 내부로 흡입되고 내부공기는 상시 배기시스템을 통해 외부로 배출된다. 이때 배기시스템의 운전 조건은 배기구의

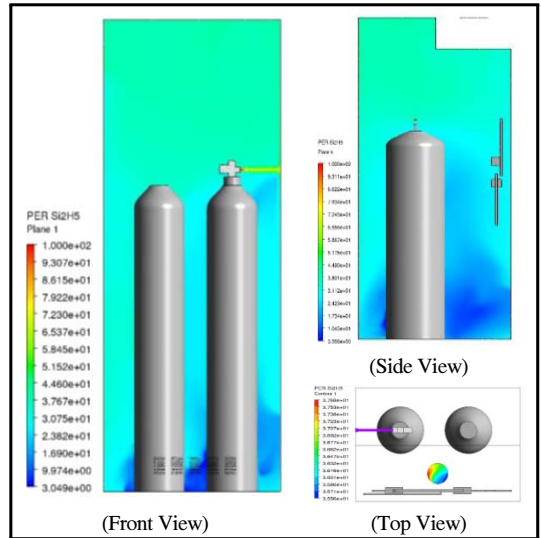


Fig. 9. Distribution of concentration inside.

크기 \varnothing 100 mm, 배기 속도 9.4 m/s로 실제 반도체공정에서 사용되는 조건을 적용하였다.

가스캐비닛 내부 농도는 100% Si_2H_5 배출을 가정하여 내부 농도 분포를 검토하였다. 이 경우 내부 농도는 배출위치를 반영한 평면농도, 측면농도, 배기구 위치의 농도로 구분하여 해석하였으며, 배출위치에서의 평면농도와 측면농도의 경우 가스캐비닛 배기시스템으로 인한 강제 배기에 의하여 하부보다는 상부의 가스농도가 더 높게 형성되고 있으며, 이러한 경향은 평면 및 측면에서의 농도 분석결과가 서로 유사함을 Fig. 9에서와 같이 확인하였다.

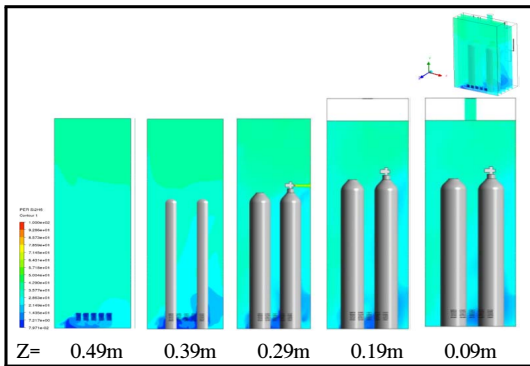


Fig. 10. Maximum and average concentration.

또한 배출위치를 포함한 가스캐비닛 내부의 전체 평면별 농도에 대한 분석 결과 일반적인 예측과 동일하게 가스가 누출되는 배출위치($Z = 0.29\text{ m}$)에서 가장 높은 농도(최대농도 100%, 평균농도 31.8%)가 발생하고, 배출위치에서 멀어질수록 가스의 농도가 낮아짐($Z = 0.09\text{ m}$ 일 때 최대농도 41.41%, 평균농도 27.86%, $Z = 0.49\text{ m}$ 일 때 최대농도 40.29%, 평균농도 31.38%)을 Table 4 및 Fig. 10에서 확인하였다.

V. 결론

반도체산업용 특수가스 공급을 위한 가스캐비닛에 대한 본 연구에서 실제 제조공정에서 사용하는 가스캐비닛 실물 제품(Two Gas Cylinder, Box Size 796 mm * 550 mm * 1900 mm)과 모델가스인 디실란(100% Si_2H_6), 그리고 배기시스템(배기구 크기 $\varnothing 100\text{ mm}$, 배기 속도 9.4 m/s)을 적용하여 내부 유동에 대한 해석은 다음의 결과를 나타낸다.

- (1) 가스캐비닛 내부에서 가스 누출 시 가스캐비닛 전면부 하단에 위치한 그릴에서 지속적으로 외부 공기가 100% 흡입되고 있음을 확인하였고, 이로 인해 가스캐비닛 내부에서 그릴을 통한 외부로의 누출 가능성은 낮다.
- (2) 가스캐비닛 내부 농도는 배기시스템으로 인한 강제 배기에 의하여 가스캐비닛 상부의 가스농도가 하부보다 더 높게 형성되었으며, 배출위치를 포함한 전체 평면농도에 대한 분석 결과 배출위치에서 가장 높은 농도가 발생하고 배출위치에서 멀어질수록 농도가 낮아진다.

연구결과에 따르면 가스캐비닛에서의 누출 위치, 누출 속도, 누출가스의 특성 등이 바뀌는 경우 다른 결

과가 나올 수 있다. 따라서 누출 위치, 속도, 가스 특성 등의 변경에 따른 추가 연구가 필요하다.

또한, 향후에는 가스캐비닛 내부에서의 유해위험 물질 누출 시 위험성이 낮은 안전농도로의 회귀시간 분석 및 배기시스템 운전조건의 변동에 따른 가스캐비닛 내부에서의 유동해석 등에 대한 추가 연구를 통해 가스캐비닛에 대한 안전운전 조건, 안전운전 절차 등의 개선방안을 마련하는 것이 필요하다. 아울러 누출로 인한 화재·폭발사고 예방을 위하여 방폭형전기 기계기구, 불꽃감지기 및 자동소화설비 등의 설치의 무화를 위한 제도 강화도 필요하다.

REFERENCES

- [1] Lee K, "Reactivity Considerations with Miscibility of Process Gases in Semiconductor industry", KIGAS Vol. 20, No. 4, pp 15-24, (2016)
- [2] Jang Y., Jung S., Park K., "Consequence Analysis for Accidental Gas Release in Labs", KIGAS Vol. 19, No. 4, pp 29~34, (2015)
- [3] Lee M, "Special gas supply facilities and exhaust gas treatment facilities in semiconductor factories", Samwoo Eng., Refrigeration and air conditioning technology, pp 109-117, (1997)
- [4] KOSHA Guide P-149-2016, Technical guidelines for storage of gas cylinders in storage cabinets, Korea Occupational Safety and Health Agency, (2016)
- [5] KOSHA Guide P-12-2012, Special gas handling safety technical guidelines in the electronics industry, Korea Occupational Safety and Health Agency, (2012)
- [6] KGS Code AA913, Facility, technology, and inspection standards for manufacturing cylinder cabinets for high pressure gas, Korea Gas Safety Corporation, (2017)
- [7] Yoon J. "Dispersion Analysis for Accidental Special Gas Release in Semiconductor Industry", A-Jou Univ., pp 3-16, (2019)
- [8] Lee J. "Analysis of the Actual condition on the Safety Management for Treatment and Transport of Special High Pressure Gas", Choong-Ju Univ., pp 8-20, (2009)
- [9] Jung J., Yoon J., "Numerical Analysis on Shock Waves Influence Generated by Supersonic Jet Flow According to Working Fluids", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Soci-

- ety Vol. 17, No. 7 pp. 510-517, (2016)
- [10] ANSYS FLUENT Theory Guide 19.3 ANSYS Inc., (2020)
- [11] Bong W, Gas supply system for semiconductor manufacturing, Patent publication number 10-2008-0014870, (2008)