



인화성 가스를 취급하는 반도체 제조장비에 설치된 가스박스 최적 환기 설계에 대한 연구

조규선 · 김상령* · †양원백**

호서대학교 안전행정공학과 교수, *한국산업안전보건공단,

**승실사이버대학교 산업안전공학과 교수

(2023년 1월 3일 접수, 2023년 3월 3일 수정, 2023년 3월 3일 채택)

A Study on Optimal Ventilation Design for Gas Boxes Installed in Semiconductor Manufacturing Equipment Handling Flammable Liquids

Gyu Sun Cho · Sang Ryung Kim* · †Won Baek Yang**

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

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

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

(Received January 3, 2023; Revised March 3, 2023; Accepted March 3, 2023)

요약

대한민국은 세계 1위의 반도체 생산 국가임에도 불구하고 산업 보호를 위한 현장의 폐쇄성으로 대부분의 연구가 단순한 물질 위험에 대한 위험성평가로 이루어지고 있다. 산업 안전 측면에서 유해위험물질의 누출 상태를 파악하는 가스 감지기 등의 모니터링 시스템 등을 구축하고 있으나, 누출 시 유해위험 물질을 효과적으로 배기하기 위한 연구는 최근에서야 시작되었다. 인화성 물질이 다량 취급되는 반도체 제조설비(가스박스)는 현재 가스 감지기 및 공기투입구를 막는 방법으로 안전관리를 하고 있는데, 공기투입구가 없으면 박스 내부를 음압으로 관리할 수는 있으나 내부 기류가 원활히 생성되지 않아 인화성 물질 누출 시 단시간 희석이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 여러 기준들을 기본으로 하여 가스박스 규모에 따른 덕트 사이즈의 결정, 공기 투입구의 적정크기 연구를 통하여 인화성 누출 시 유해화학물질이 외부로 노출되지 않으면서 배기 성능 요구량을 최소로 할 수 있는 최적 배기 설계를 해보고자 한다.

Abstract - Although Korea is the world's No. 1 semiconductor producing country, most studies are conducted with risk assessment for simple material risks due to the closedness of the site for industrial protection. In terms of industrial safety, a monitoring system such as a gas detector to determine the leakage of hazardous substances has been established, but research on effectively discharging harmful gaseous substances in case of leakage has only recently begun. Semiconductor manufacturing facilities (gas boxes) where a large amount of flammable materials are handled are currently being safety managed by using a gas detector and blocking the air inlet. It is difficult to dilute in a short time in case of leakage of flammable substances. Therefore, in this study, based on various criteria, the size of the duct according to the size of the gas box is determined and the appropriate size of the air inlet is studied to minimize the exhaust performance requirement without exposing hazardous chemicals to the outside in the event of a flammable leak. We want to do an optimal exhaust design.

Key words : semiconductor, gas box, airflow, flammable substances

†Corresponding author:wbyang59@hanmail.net

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

1.1. 연구목적

최근 반도체 공정은 초미세화 공정개발과 같이 산업이 확대됨에 따라 취급하는 위험물질도 비약적으로 늘어나고 있음을 알 수 있다.[1].

안전보건공단은 인화성 가스를 포함한 51개 화학물질 취급 설비 및 연관 설비에 대한 안전성 확보를 위한 공정안전보고서 제출 제도를 시행하고 있다. 그러나 반도체 산업 생산 공정의 복잡성, 위험성이 높아 이러한 법적 제도가 사업장의 안전보건에 대한 기준을 충분히 마련할 수 없다. 다행히 국제반도체장비재료협회(SEMI: Semiconductor Equipment and Materials International)에서 안전에 관한 가이드를 보급하고 있어 이를 참고하고 있으나 이 자료들에 제시된 내용은 구체적인 설계 기준을 제시하지 못하여 반도체 장비를 만드는 제작사마다 각기 다른 기준을 가지고 있다.

SEMI S6의 기준을 기반으로 가스박스 내부에 수소 누출을 가정하여 Tracer 실험 및 CFD 프로그램으로 구현하여 내부 유동을 분석한 선행연구에 따르면, 결과적으로 LEL 25% 미만으로 농도가 유지되어 KS C IEC 60079-10-1에 따른 방폭전기계기구가 불필요한 것으로 분석되었다.[2]. 이와 연계하여 본 연구에서는 국제반도체장비재료협회(SEMI: Semiconductor Equipment and Materials International)에 언급되지 않는 반도체 장비가스박스의 덕트 사이즈 결정, 공기투입구의 필요성 여부에 대한 실증 실험을 통해 인화성액체 누출 시 발생할 수 있는 최악의 상황에서 배기 성능 요구량을 최소로 할 수 있는 최적 배기 설계를 하고자 한다.

II. 가스박스 정의 및 누출량 계산

2.1. 가스박스

가스박스에는 인화성 가스 등이 배관을 통해 가스 형태의 프로세스 챔버로 가기 직전 유량 조절 목적으로 MFC를 통과하는데 PT(Pressure Transmitter), AV (Auto Valve) 등이 위치한다. 이러한 계기류는 인화성 물질 누출의 원인이 되고, 화재·폭발 등의 우려가 있기 때문에 Duct를 통하여 배기하고, 가스감지기를 설치하여 누출 감지 시 자동밸브를 자동 차단하는 등의 안전장치를 설치하게 한다. Gas Box를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2. 누출률에 관한 검토

가스박스 내부에는 프로세스 가스의 유량 및 흐름 제어를 위한 밸브가 설치되게 되는데 가스박스를 설

치하는 이유는 누출 시 인화성 액체 등 외부로 누출되지 않게 하는 것이다. 물질별 각 운전조건을 이용하여

Table 1. Suggested hole cross sections for secondary grade of releases

Type of item	Item	Leak Considerations		
		The conditions at which the release opening will not expand	The conditions at which the release opening may expand	The conditions at which the release opening may expand up to a severe failure
		S (mm)	S (mm)	S (mm)
Sealing elements on fixed parts	Flanges with compressed fibre gasket or similar	π 0,025 up to 0,25	⊕ 0,25 up to 2,5	sector between two bolts x gasket thickness ≥ 1 mm
	Flanges with spiral wound gasket or similar	0,025	0,25	sector between two bolts x gasket thickness ≥ 0.5 mm
	Ring type joint connections	0,1	0,25	0,5
	Small bore connections up to 50 mm	≥ 0,025 up to 0,1	≥ 0,1 up to 0,25	1,0

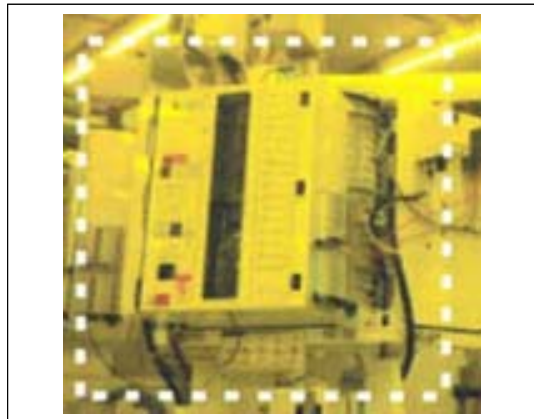


Fig. 1. Gas Box

회산 모델링 프로그램을 이용할 수 있으나, 사업장에서 모든 장치의 모델링을 하기에는 어려울 것으로 판단된다[3]. 누출률 산정 시 최악의 상태는 배관이 파열되어 배관이 유체가 지속적으로 유출되는 걸 생각할 수 있다. 하지만 반도체 제조사업장의 경우 인위적으로 배관을 파손시키는 경우가 아니라면 가스박스 내부 배관 100% 파열은 불가능하다. 누출률 관련해서는 KS C IEC 60079-10-1, SEMI F15(2004), SEMI S6(2009)에서 누출량에 대한 계산식이 존재함을 확인하였고, 계산 결과 가장 보수적인 부분을 누출 시험의 누출률로 선정하고자 한다.

2.3. KS IEC 60079-10-1 누출률 계산

KS C IEC 60079-10-1은 국제 표준 IEC 60079-10-1를 기본으로 개정된 것이다. 정상작동 중에는 인화성 물질의 누출이 예상되지 않는 밸브 밀봉부, 피팅부는 2차 누출 등급을 적용하도록 권고되어 있어, 실험에서는 가장 현장에서 많이 적용되는 0.25 mm를 적용하였다.[4],[5].

KS C IEC 60079-10-1에 따른 누출구멍 선정과 관련된 자료를 Table. 1에 작성하였다.

가스의 내부압력이 임계압력(Pc)보다 높다면, 누출 가스의 속도는 음속(sonic, choked)이다. 여기서 임계압력은 다음과 같다.

$$p_c = p_a \left(\frac{r+1}{2} \right)^{\frac{r}{r-1}} (Pa)$$

Pc : 임계압력

Pa : 대기압

r : 비열비

일반적인 경우 대부분의 임계압력(Pc)는 약 0.19 MPa이다. 가스박스 공급압력 중 가장 많이 쓰이는 압력이 40 psi 즉 0.27 MPa 이므로 음속 가스 누출률 계산식을 사용한다.

Table 2. Release rate calculation result

Type of item	Cal. sheet	Pressure (psi)	Hole size S(mm)	Release rate (Liter/Min)	Note
3.4.1	KS C IEC 60079-10-1	40	0.25	31.7	-
3.4.2	SEMI S6	40	31.65	3,146	Pipe rupture (1 m)
3.4.3	SEMI F15	40	2.5	28	-

$$W_g = C_d SP \sqrt{r \frac{M}{ZRT} \left(\frac{2}{r+1} \right)^{(r+1)(r-1)}} (kg/s)$$

Cd : 누출부 특성에 따른 오리피스

S : 개구부 단면적

r : 비열비

M : 분자량

Z : 압축계수

R : 가스상수

2.4. SEMI F15 누출률 계산 및 폭발위험장소의 범위 설정

SEMI F15는 누출률을 미리 규정하는 방식이다. 실험방법은 특별한 유출량에 대한 가이드가 없을 경우 0.25인치 배관에서는 28 SLPM(standard liter per minute)를 정의하고 있고, SEMI S6에 대한 제3차 인증서 많이 사용되고 있다.[6].

SEMI S6 누출률을 기준으로 하는 폭발위험장소 계산

SEMI S6은 단절된 가스 파이프로부터의 방출을 말한다. 누출률은 배관의 길이 'L'이 분모에 있어 길이가 길어질수록 누출량은 줄어든다. 배관의 길이 'L'을 어떤 기준으로 잡으라는 기준은 없다. 누출률 계산시 박스이 높이 1 m를 기준으로 1 m를 결정후 계산을 실시하였다.[7].

$$kM_1^2 : \frac{1 - \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^2}{4f \left(\frac{L}{D} \right) + \ln \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^2}$$

ρ_1 : 다운스트림 조건에서 곧은 관을 통과하는 가스의 밀도

(실란의 경우 1.34 g/cm³)

P : 절대압력 (dynes/cm²), P₁ : 입구 측 절대압력,

P₀ : 출구 측 절대압력

4 : 0.02

L : 관의 길이(cm)

D : 관의 직경(cm)

w : 가스의 질량유량(g/s)

A : 유선의 단면적(cm²)

Q : 가스의 체적유량(l/s)

2.5. 계산결과

Table. 2에 계산 방법별 누출률 계산 결과를 정리하였고, 배관 파단이라는 극단적인 가정보다는 정상시 누출 가능한 즉 예상 가능한 범위의 유량 32 LPM을

적용하였다. 실제 최신 반도체 장비에서 사용하는 기본 프로세스 유량 등을 통해 32 LPM이 적정수준임을 확인하였다.

III. 연구 및 실험 방법

3.1. 가스박스 배기 장치 설계 기준

선정된 누출률인 32 LPM 기본으로 실험을 실시하였다. 실험가스는 SF6가스를 대표적인 인화성 가스인 수소로 등가환산하여 적용하였다, 가스박스 설치 시 기본 조건은 국제반도체장비재료협회(SEMI: Semiconductor Equipment and Materials International)등을 참고로 하여 선정하였다.

- ① 폭발 분위기의 신속한 희석을 위해 분당 4-5회 이상의 공기 치환이 가능 할 것
- ② 덕트 반송속도는 5 m/s 이상이 되도록 하여 누출된 인화성 가스 등이 빠르게 제거될 것
- ③ 누출 후 빠른 시간 내에 인화성 가스 농도가 폭발 하한의 25% 이내가 되도록 할 것

3.2. 가스박스 형태

연구를 위한 가스박스는 상대적으로 규모가 큰 디스플레이용 가스 가스를 선정하였다. 메모리 반도체 장비 급의 가스박스에서는 내부 계기 설치 등의 불편함이 있어 국내 디스플레이 반도체 제조공정에서 현재 사용 중인 실물의 크기를 가스박스 실험 대상으로 선정하였다.

가스박스 외부치수는 600 mm × 350 mm × 1,000 mm이며, 체적은 0.21 m³이다. 가스박스 배기를 위한 덕트의 직경은 75, 150 mm가 장착이 가능하고, 가스박스 전면에 가로 10mm, 세로 125 mm 공기투입구를 아래와 같이 제작하였다. 또한 누출 후 농도측정을 위해 상부 하부에 6군데 Sampling 지점을 설치하였다. 제작된 가스박스는 Fig. 2와 같다.

3.3. 실험가스 선정

가스박스 내부 누출 시험 시 실제 수소가스를 사용하면 매우 위험하므로 SF6와 같은 불활성 가스를 질소가스에 희석하여 추적가스로 사용하고, 시료를 가스박스 내부에서 채취 후 분석한다. 분석된 시료는 다음 공식에 따라 등가방출농도(ERC: Equivalent Release Concentration)를 계산한다. 농도 계산식은 다음과 같다.

$$ERC (ppm) = \frac{\text{Measured Concentration of SF6 (ppm)} \times \text{Process gas Concentration (\%)}}{\text{Concentration of Tracer Gas used during testing (\%)}}$$



Fig. 2. Gas box for experiment

3.4. Duct 실험방법

CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 활용하여 가스박스의 공기구를 모두 막고 시뮬레이션을 한다면 공기 흐름이 없어 계산 오류가 발생하겠지만, 실제로 210 L체적의 가스박스에 덕트를 연결 후 배기를 실시하면 가스박스의 이음매 부분에서 생기는 틈을 통해 공기가 들어가 덕트에 풍속과 정압이 측정 될 수 있다. 따라서 해당 목적을 위해서는 Simulation이 아닌 직접 실험이 목적에 더 부합된다고 할 수 있다.

3.4.1. 최적 덕트 구경 선정 방법

① 150 mm 덕트를 연결하여 환기횟수가 5회 이상 나올 수 있는 속도까지 팬의 속도를 조절한다. 박스에 공기투입구는 단면적 가로 10 mm 세로 12 mm를 1개씩 열면서 덕트에서의 풍속을 측정하였다. 측정된 풍속으로 풍량을 산출하였고, 시간당 환기 횟수를 확인하였다.

② 75 mm 덕트를 연결하여 환기횟수가 5회 이상 나올 수 있는 속도까지 팬의 속도를 조절한다. 이번에는 덕트 단면적이 150 mm 비해 25%로 축소되기 때문에 박스의 공기투입구는 면적 비율이 커지므로 단면적 가로 10 mm, 세로 125 mm를 50%씩 열면서 풍속을 측정하였다. 측정된 풍속으로 풍량을 산출하였고, 시간당 환기 횟수를 확인하였다.

3.4.2. 공기투입구 위치 선정 방법

3.4.1에 따라 덕트 구경이 선정되면 공기투입구의

위치 조절을 통하여 Sampling 지점에서의 인화성 가스 농도를 측정하여 최적의 개구부 위치를 파악하였다.

IV. 실험결과

4.1. 150 mm 덕트 실험결과

가스박스에서 공기투입구를 모두 닫는 것은 내부에 진공을 유도할 수 있으나, 실제적으로 누출 시 기류가 형성되지 못하여 정제될 수 있으므로 공기투입구를 점차 열어서 환기횟수와 유속이 적정 수준이 되는 지 파악하고 이를 Table. 3에 제시하였다. 150 mm에서는 덕트 반송속도는 5 m/s 이상이 불가하여 누출된 인화성 가스의 제거가 어려운 것으로 검토되었다.

4.2. 75mm 덕트 실험결과

75 mm 덕트에서는 공기투입구를 1개만 열어도 6.4 m/s로 적절한 반송속도가 유지되었다. 환기횟수, 유속이 전부 유지되는 것은 75 mm 덕트에 공기투입구가 1개 이상일 경우로 판단되었다. 실험 결과를 Table. 4에 제시하였다.

Table 3. 150 mm duct, experiment result

Air intake			Opening area(m ²)	Velocity (m/s)	Ventilation time/min
Ver.	Hor.	No.			
0.01	0.125	0	0	1	5.05
0.01	0.125	1	0.00125	1.5	7.57
0.01	0.125	2	0.0025	1.8	9.09
0.01	0.125	3	0.00375	2	10.1
0.01	0.125	4	0.005	2.1	10.6

Table 4. 75 mm duct, experiment result

Air intake			Opening area(m ²)	Velocity (m/s)	Ventilation time/min
Ver.	Hor.	No.			
0.01	0.125	0	0	4.1	5.18
0.01	0.125	0.5	0.000625	4.9	6.19
0.01	0.125	1	0.00125	6.4	8.08
0.01	0.125	1.5	0.001875	6.8	8.58
0.01	0.125	2	0.0025	7	8.84

4.3. 공기투입구 위치에 따른 인화성 가스 농도 측정 결과

환기횟수, 유속이 전부 유지되는 75 mm 덕트를 기준으로 하여 공기투입구의 개방개수를 다르게 하여 인화성 가스 농도를 측정하였다. 샘플링 사진을 Fig. 3, 실험사진을 Fig. 4, Fig. 5에 제시하고, 결과를 Table. 5, Table. 6에 나타내었다. 한쪽 측면에만 공기투입구를 개방하는 방식을 등가환산식으로 검토하면 Table. 5과 같이 수소 LEL 25%를 일부 구간에서 초과하여 화재·폭발의 우려가 있는 것으로 나타났다.



Fig. 3. Gas box sampling point



Fig. 4. Air inlet open proportion to duct area

Table 5. Test Gas Result

Sample Point	SF6 Conc.(ppb)	ERC(ppb)	% LEL
1	81.27	8,127	20.32
2	105.76	10,576	26.44
3	102.52	10,252	25.63
4	69.39	6,939	17.35
5	82.10	8,210	20.53
6	104.64	10,464	26.16

Table 6. Test Gas Result(both opening)

Sample Point	SF6 Conc.(ppb)	ERC(ppb)	% LEL
1	81.95	8,195	20.49
2	90.90	9,090	22.73
3	77.18	7,718	19.30
4	71.42	7,142	17.86
5	80.35	8,035	20.09
6	91.11	9,111	22.78



Fig. 5. Air inlet open proportion to duct area(both openings)

공기투입구의 위치를 좌우 양쪽으로 분리한 실험 결과를 등가환산하여 Table. 6에 나타내었다. 결과적으로 데드존이 발생하지 않아 모든 구간에 수소 농도의 LEL 25% 이하로 유지됨을 확인할 수 있었다.

V. 고찰 및 결론

반도체 장비 가스박스에 대한 최적 배기 방법을 연구하기 위하여 0.21 m³(Box size 600 mm × 350 mm × 1,000 mm)를 제작하여 덕트 반송 속도를 기준으로 덕트 사이즈를 계산하였고, 가스박스에 수소를 대신할 추적가스(SF6 1%+ N2 99%) 32 L를 누출시키면서 가스박스 내부의 농도를 측정하여 다음의 결과를 확인하였다.

5.1. 가스박스에서 배기 덕트 단면적의 중요성

가스박스에서 배기 덕트 단면적은 인화성 가스와 같은 위험물질 누출 시 반송에 중요한 영향을 준다. 가스박스 체적에 분당 환기량 5회 이상의 환기량과 가스의 적정 반송속도 5 m/s 이상을 고려하면 덕트의 직경은 반송속도를 만족하지 못하는 150 mm 보다는 75 mm가 적당한 것으로 분석되었다.

5.2. 가스박스에 수소가스 누출 시 공기투입구 크기 변화에 따른 가스박스 내부의 폭발 분위기 형성 여부

실험 시 한쪽 측면만 공기투입구를 개방한 경우 데드존이 발생하여 LEL의 25%가 넘는 Gas box 구간이 3분내 발생하였다. 즉, 공기투입구는 반드시 존재하여야 하나 그 위치가 적정하여야 함을 알 수 있었다. 결과적으로 좌우 양쪽으로 배치하였을 때 데드존이 발생되지 않고 기류가 원활히 흘러가서 등가 농도인 수소 농도가 LEL 25% 미만으로 분석되었다.

결과적으로 국제반도체장비재료협회 관련 규격을 만족하기 위해서는 75mm의 덕트 크기와 개구부 양쪽 배치가 필요하였다.

5.3. 추후연구

가스박스를 외국에서는 Toggle box, Jungle box라고 부르기도 한다. 그만큼 가스박스에는 각종 밸브가 정글처럼 있다는 뜻이다. 이번 연구에서는 반도체 제조 공장에서 사용하는 실증 모델로 실험을 한 것이 아니므로 박스내부의 배관 및 밸브로 인한 배기 유체 저항을 이 연구에서는 반영하지 못하였고, 예산 문제상 덕트의 크기를 75mm와 150mm로 한정할 수 밖에 없었다. 추후에 독성물질에 대한 안전성 평가를 위해 실험을 실시할 경우에는 배관 및 덕트크기를 다양화하여 좀 더 정확한 연구가 필요하겠다.

REFERENCES

- [1] Kim, J. D., Han, S. A., Rhim, J.K., 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] Shin, E. K., LEE, K. H., Kang, C. K., Jung, S. H., "Tracer Gas Test and CFD Analysis of Semiconductor Gas Box for Flammable Gas Leakage", *Energies*, 15(21), 8166-8180, (2022)
- [3] Seo, M. S., Kim K. S., Hwang Y. W., Chun, Y. W., "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", *KIGAS*, 22(4), 14-14, (2018)
- [4] KS C IEC 60079-10-1 "장소 구분 - 폭발성 가스분위기", 26-81, (2015)
- [5] IEC 60079-10-1/Ed2 : Explosive atmospheres - Part 10-1, "Classification of areas -Explosive gas atmospheres", 27-91, (2013)
- [6] SEMI F15-93, "Test Method For Enclosure Using Sulfur Hexafluoride Tracer Gas and Gas Chromatography", 2,-3, (2004)
- [7] SEMI S6, "EHS Guideline For Exhaust Ventilation of Semiconductor Manufacture Equipment", 32-53, (2009)
- [8] KOSHA GUIDE E-150, "In setting of gas explosion danger place General Guidelines", KOSHA, (2017)
- [9] KOSHA GUIDE E-151, "Gas explosion risk location Guidance on the Assessment of Flammable Substances in Korea", KOSHA, (2017)
- [10] KOSHA GUIDE E-152, "Gas explosion hazard Technical paper about ventilation evaluation in small setting", KOSHA, (2017)
- [11] SEMI S2, *Industrial Guidelines for Semiconductor Equipment, korean*, 51-55, (2012)