

반도체 산업의 SEMI S6에 따른 실험결과 및 누출률을 기준으로 한 증기 상 물질의 2차 누출 시 폭발위험장소에 관한 연구

김상령·임근영*·양원백**·† 임종국***

한국교통대학교 안전공학과 박사과정, *세이프월드엔지니어링,
숭실사이버대학교 산업안전공학과 교수, *한국교통대학교 안전공학과 교수
(2019년 11월 28일 접수, 2020년 3월 11일 수정, 2020년 3월 26일 채택)

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

Sang Ryung Kim · Keun Young Lim* · Won Baek Yang** · †Jong Guk Rhim
Dept. of Safety Engineering, Korea National University of Trans. Chungju 27469, Korea
**Safe World Engineering, Suwon 16226, Korea*
***Dept. of Industrial Safety Engineering, Soongsil Cyber Univ. Seoul 06878, Korea*
(Received November 28, 2019; Revised March 11, 2020; Accepted March 26, 2020)

요 약

현재 KS C IEC 60079-10-1 등에서 2차 누출 시 누출 구멍의 반경(hole radius)은 권고로 하여 표현되어 있다. 누출 구멍 크기의 과소평가는 누출률에 대한 계산 값의 과소평가로 이어질 수 있고, 안전상의 이유로 검토되는 누출 구멍 크기의 보수적인 계산은 과대평가로 이루어 질 수 있어 과대한 위험장소 범위로 나타낼 수 있기 때문에 이 또한 피해야 한다. 그러므로 누출 구멍의 크기를 추정할 때에는 신중하게 균형 잡힌 접근이 필요하다. 이러한 논리를 바탕으로 하여 급변 연구에서는 반도체 산업에서 적용되는 국제안전규격인 SEMI S6 기준에 따른 실험결과로 위험물질 누출 시 가스박스 내부 농도를 파악하여 안정성을 검토해보고 SEMI F15 누출률 기준, SEMI S6 누출률 기준에 따라 KS C IEC 60079-10-1의 공식을 적용하여 폭발위험장소의 범위 선정을 실시하였다. 이를 바탕으로 하여 향후 반도체 산업 등 폭발위험장소의 적용이 까다로운 FAB 설비의 대안으로 배기성능 향상이 필요한지 여부를 검토해보고자 한다.

Abstract - Currently, in KS C IEC 60079-10-1, the leakage hole radius of secondary leakage is expressed as a recommendation. Underestimation of leak hole size can lead to underestimation of the calculated values for leak rates, and conservative calculations of leak hole sizes, which are considered for safety reasons, can be overestimated, resulting in an overestimated risk range. This too should be avoided. Therefore, a careful and balanced approach is necessary when estimating the size of leaking holes. Based on this logic, this study examines the stability by grasping the concentration inside the gas box when leaking dangerous substances as a result of experiments based on SEMI S6, an international safety standard applied in the semiconductor industry and The scope of explosion hazardous area was determined by applying the formula of KS C IEC 60079-10-1 according to SEMI F15 leak rate criteria and SEMI S6 leak rate criteria. Based on this, we will examine whether the exhaust performance needs to be improved as an alternative to FAB facilities that are difficult to apply to explosion hazards such as semiconductor industry

Key words : hole radius, hazardous area, SEMI

†Corresponding author: jkrhim@ut.ac.kr

I. 서론

인화성 액체의 증기 또는 인화성 가스를 취급하는 공정에서는 폭발위험장소를 구분해야 하며 국내에서는 폭발성 가스 분위기 형성에 관한 기술적인 사항은 KS C IEC 60079-10-1에서 제시하고 있다.

KS C IEC 60079-10-1에서는 폭발위험장소의 범위를 선정하기 위한 계산 근거 및 식을 제시하고 있는데, 전체 지역을 적용하는 연속 누출 등급과 누출 단면적 전체를 적용하는 1차 누출 등급과는 다르게 2차 누출 등급은 누출률을 산정하기 위한 기준을 명확히 할 수 없어 가이드를 제시하고 있으며, 비고 항목을 통하여 장비 제조자 데이터의 적용, 특정 국가 또는 산업코드에서 선택하도록 여러 다른 변수에 대한 내용을 기술하고 있다[1]. 정확한 폭발위험장소 선정을 위해서는 물질별 각 운전조건을 이용하여 확산 모델링 프로그램을 이용할 수 있으나 사업장에서 인화성물질이 사용되고 있는 모든 기기에 대해서 모두 모델링을 하는 것은 어려울 것으로 판단된다[2].

반도체 산업의 가스박스 내부처럼 질량유량조절기와 같은 정밀계장기계기구 좁은 공간에 연속적으로 설치되어 있는 장비는 방폭형 전기 기계기구 사용이 어렵다. 따라서 반도체 관련 국제규격인 SEMI(Semiconductor Equipment and Material Institute)에서는 여러 방법으로 누출률에 따른 위험도를 계산하고 있다. 이번 연구에서는 SEMI F15 누출률에 따른 SEMI S6 실험으로 누출 시 발생하는 인화성가스 농도를 측정하여 안정성을 검토해보고, SEMI F15, SEMI S6에 근거한 기밀부위 누출률을 기준으로 KS C IEC 60079-10-1에 따른 폭발위험장소를 계산하여 SEMI에서 제시된 누출률이 현재 반도체 산업에 문제없이 적용될 수 있는지 판단하고자 한다.

II. 관련 자료 조사

국내의 누출률 및 가이드를 기준으로 폭발위험장소를 계산하는 국가코드, 산업체 코드를 조사하였다.

해당코드는 KS C IEC 60079-10-1, NFPA-497, API RP-505, SEMI F15(2004), SEMI S6)이다.

2.1. KS C IEC 60079-10-1 누출률 계산 및 폭발 위험장소의 범위 선정

KS C IEC 60079-10-1은 IEC 60079-10-1를 기본으로 개정된 것이다. 개정된 내용이 국내에 발행되면서 정확히 규정되지 않는 정의 및 표현방법, 특히 배경농도에 대하여 국제 IEC 및 국내 IEC로 많은

질문이 접수되었으며, 여러 회의를 통하여 현재는 일단락되었다.

Table 1. Calculation Procedure of KS C IEC 60079-10-1 (Gas/Vapor)

STEP	Calculation procedure	
1	Suggested hole cross sections for 2nd of release (Example of Secondary Leak)	
	Sealing elements on fixed parts Typical values at which the release opening may expand. Flanges with compressed fibre gasket	0.25mm up to 5mm
	Sealing elements on fixed parts Typical values at which the release opening may expand. Spiral wound gasket	0.25mm
	Sealing elements on fixed parts Typical values at which the release opening may expand. Ring type joint	0.25mm
2	Release rate	
	Subsonic	$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{M}{ZRT} \frac{2r}{r-1}} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{p_a}{p}\right)^{1/r}\right] \left(\frac{p_a}{p}\right)^{1/r}}$
	Sonic	$W_g = C_d S p \sqrt{\frac{rM}{ZRT} \frac{2r}{r+1} \left(\frac{p_a}{p}\right)^{(r+1)/(r-1)}}$
3	Release characteristic	
	$\frac{W_g}{\rho_g k L E L}$	
4	Chart for assessing the degree of dilution	

반도체 산업의 SEMI S6에 따른 실험결과 및 누출률을 기준으로 한 증기 상 물질의 2차 누출 시 폭발위험장소에 관한 연구

Table 1. continue

STEP	Calculation procedure	
5	Chart for estimating hazardous area distance	
6	Volumetric release rate of flammable gas from source	$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g}$
	Air change frequency and ventilation flux	$Q_2 = CV_0$
	Background concentration	$X_b = \frac{f Q_g}{Q_2}$
7	Critical concentration	$X_{crit} = 0.25 LEL$
	To be considered as highly ventilated rooms or enclosure	$X_b < X_{crit}$
	To be considered as low ventilated rooms or enclosure	$X_b > X_{crit}$

2.2. NFPA-497 누출률 계산 및 폭발위험 장소의 범위 선정

NFPA-497의 특징은 경험적으로 방폭지역 및 거리를 산정하여야 한다고 언급하고 있다. 또한, 결정을 돕기 위해 설비별로 Fig. 1.과 같은 범위를 제시하여 방폭지역 및 거리 산정에 도움을 주고 있다. 게다가 대상물질 선정을 위해 총 265개의 가연성 물질리스트 및 물성정보를 제공하고 있다[2],[3].

2.3. API RP-505 누출률 계산 및 폭발위험장 소의 범위 선정

API RP-505 역시 NFPA-497과 유사하게 Fig. 2. 와 같은 Zone을 구분한 후 운전조건에 따른 범위를 제

5.9.1 Indoor and Outdoor Process-Flammable Liquids. [See Figure 5.9.1(a), Figure 5.9.1(b), Figure 5.9.1(c), Figure 5.9.1(d), Figure 5.9.1(e), Figure 5.9.1(f), Figure 5.9.1(g), Figure 5.9.1(h), Figure 5.9.1(i), Figure 5.9.1(j), Figure 5.9.1(k), Figure 5.9.1(l), Figure 5.9.1(m), and Figure 5.9.1(n).]

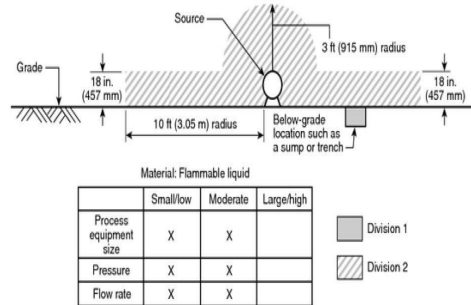
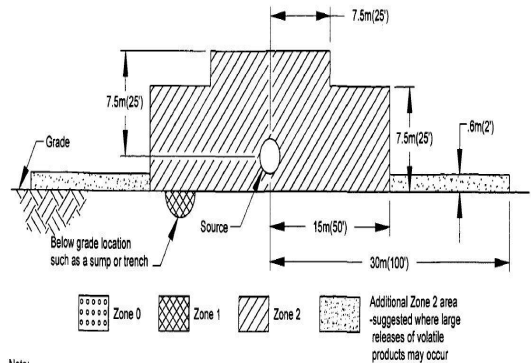


FIGURE 5.9.1(a) Leakage Located Outdoors, at Grade. The material being handled is a flammable liquid.

Fig. 1. Calculation Diagram of NFPA 497.



Note:

Distances given are for typical refinery installations; they must be used with judgement, with consideration given to all factors discussed in the text. In some instances, greater or lesser distances may be justified.

Figure 20—Adequately Ventilated Process Location With Heavier Than-Air-Gas or Vapor Source Located Near Grade (See Section 9.2.1.1)

Fig. 2. Calculation Diagram of API RP-505.

시하여 폭발위험지역 산정에 도움을 주고 있다[4].

2.4. SEMI F15 누출률 지정에 따른 실험 및 폭발 위험장소의 범위 설정

SEMI F15의 기준은 누출률을 지정하는 것이다. 실험방법은 SEMI S6를 적용하는데 1% 육불화황 (SF6) 99%, 질소(N2)사용하여 실시하고 변환식을 통하여 정해진 공간에서 인화성가스의 누출 후 농도를 추정하는 방법을 말한다. 금번 연구에서는 실험을 통하여 인화성 가스 농도를 추정해보고, 지정

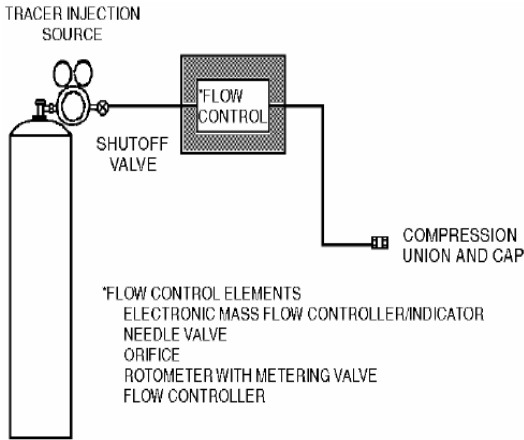


Fig. 3. Schematic Dwg. of Injection Manifold.

된 누출률을 기준으로 KS C IEC 60079-10-1 계산을 통하여 폭발위험장소를 계산하고자 한다[5].

2.5. SEMI S6 누출률 계산 및 폭발위험장소 의 범위 설정

SEMI S6는 누출률의 계산을 배관의 고압부와 저압부에서 단면적의 파단에 따른 유량을 계산하는 방식이다. 계산된 누출률을 기준으로 KS C IEC 60079-10-1 계산을 통하여 폭발위험장소를 계산해 보고자 한다[6].

III. 연구 및 실험 방법

3.1. 실험 및 계산 조건

이번 연구는 실험과 이론 계산으로 나눌 수 있는데 SEMI F15 누출기준에 의한 SEMI S6 실험은 반도체 FAB 설비에서 사용되는 가스박스의 내부에 누출지점을 정하고 3개의 샘플링 포인트를 지정하여 28LPM을 누출시키고, 이에 따라 내부의 농도를 계산하여 폭발하한계와 비교하였다. 확인하고자 하는 물질은 폭발하한계(1.4%)가 낮은 실란(SiH4)를 기준으로 하되, 실험 시에는 SEMI S6 실험방법에 따라 1% 육불화황(SF6), 99% 질소(N2)를 적용하고 실험을 실시한 뒤 식(1)을 활용하여 변환 농도를 계산하였다. 실험 장비인 가스박스의 크기는 가로(1000mm) x 세로(450mm) x 높이(850mm)로 선정하였고 배기 차압 조건은 SEMI S6의 매개변수 예제(가스캐비닛)권고 -183pa ~ -366pa에 따라 -190pa의 배기 차압을 기준으로 하였다[6].

Table 2. Test Gas Result

Sample Point	SF6 Conc.(ppm)	ERC(ppm)	% LEL
1	1.92	192	1.37%
2	2.27	227	1.62%
3	1.28	128	0.91%

$$\frac{SF_6 \text{ 측정값 (ppm)} \times \text{실란 농도 (\%)}}{SF_6 \text{ 농도 (\%)}} \quad (1)$$

이론 계산은 반도체 산업의 국제규격인 SEMI F15에 기재된 누출률인 28LPM과 SEMI S6의 파단 면을 기준으로 계산된 누출률을 기준으로 KS C IEC 60079-10-1의 계산식에 의거 폭발범위를 계산하였다.

3.2. 실험 결과

SEMI F15 누출기준에 의한 SEMI S6 실험결과를 Table 2.에 나타내었다.

실험의 결과를 살펴보면 배기 차압이 -190pa이 유지된 상태에서 SEMI F15의 누출률이 발생되었을 경우 가스박스 내에서는 LEL 1.62% 이하의 농도만이 존재하는 것으로 파악되었다. 이를 다르게 해석한다면 실란(SiH4)이 누출되었을 경우 내부 배기의 차압이 실험 수준정도를 유지할 수 있다면 누출에 따른 화재, 폭발 발생 가능성은 적다고 할 수 있다. 하지만 국내규정인 산업안전보건법 등 기타 법률에서는 SEMI F15 누출률에 따른 농도 실험 결과를 폭발위험장소구분에 적용하지 않으므로 누출률을 기준으로 KS C IEC 60079-10-1의 공식을 적용하여 재계산 하였다.

3.3 SEMI F15 누출률을 기준으로 하는 폭발위험 장소 계산

SEMI F15의 누출률을 기준으로 KS C IEC 60079-10-1의 공식을 적용하여 폭발범위를 계산하였다. 기본적으로 F15의 누출률은 3.1 항목과 같이 1% 육불화황(SF6), 99% 질소(N2)을 테스트 가스로 지정하여 28LPM으로 누출률을 지정하였다.

계산을 위해서 누출특성의 값이 필요한데, 희석 등급과 폭발위험장소의 거리를 결정하는 인자로 사용된다.

$$\text{누출특성} = \frac{W_g}{\rho_g k LEL} = 0.033 m^3/s \quad (2)$$

반도체 산업의 SEMI S6에 따른 실험결과 및 누출률을 기준으로 한 증기 상 물질의 2차 누출 시 폭발위험장소에 관한 연구

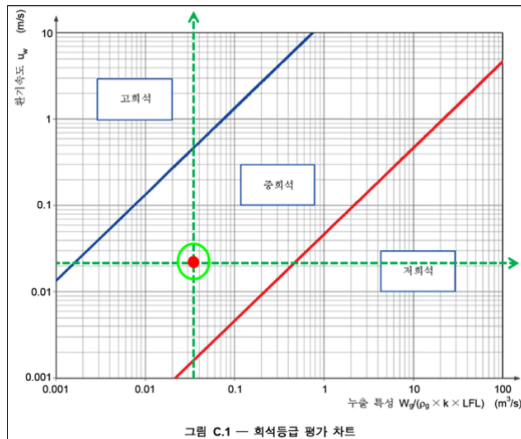


Fig. 4. Chart for assessing the degree of dilution F15 Leak Rate.

여기에서,

W_g : 누출유량(kg/s)

k : 폭발하한에 따른 안전계수로서 0.5 ~ 1 사이의 값이며, 실란(SiH4) 단일 물질이고 폭발하한값의 불확실성이 없어 1 적용

LEL : 폭발하한(vol/vol)

ρ_g : 가스밀도 (kg/m³)

KS C IEC 60079-10-1에서는 폭발위험장소의 결정에 희석의 개념을 적용하였다. 희석등급을 구분하는 것은 환기에 의하여 폭발성 분위기가 형성되는 것을 방지할 수는 없지만, 형성된 가스의 위험농도가 지속되는 것을 막을 수 있기 때문이다. 누출률 대비 환기량이 클수록 폭발위험장소의 범위는 작아지고 폭발성 분위기의 지속시간은 짧아진다. 누출률 대비 환기효과성이 충분히 높은 경우에는 폭발위험장소의 범위가 무시할 수 있는 수준으로 낮아지므로 비폭발위험장소로 간주할 수 있다. 희석등급이란 환기 또는 대기의 공기가 누출된 인화성가스를 안전한 수준으로 희석시킬 수 있는 정도를 말한다. 특정 환기조건에서 누출률이 증가하면 희석등급은 낮아지고 특정 누출유량에서 환기율이 감소하면 희석등급도 낮아진다[7].

희석의 정도를 결정하기 위하여 환기속도가 계산되어야 한다. 환기속도는 배기에서 흡입하는 환기량을 가스박스의 단면적으로 나눈 값인데 환기량이 클수록 내부 체적을 많이 치환시킬 수 있음을 의미한다. 해당 실험에서는 SEMI S6의 권고에 따라 가스 케비닛 조건의 분당 3~4회 환기가 가능

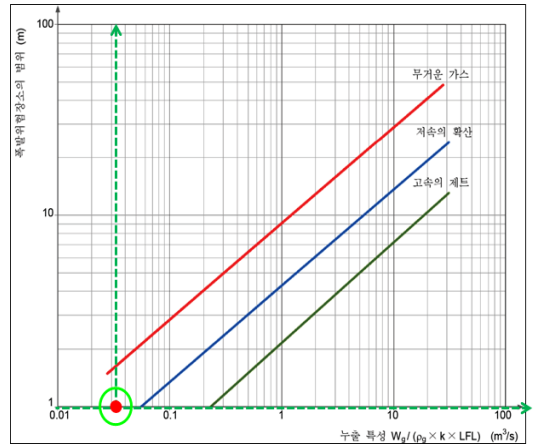


Fig. 5. Chart for estimating hazardous area distances F15 Leak Rate.

한 $2m^3/min$ 을 기준으로 하여 0.022m/s가 계산되었다. 이를 기준으로 희석 여부를 계산하면 Fig. 4와 같은 중희석 결과가 나오게 되며 폭발범위를 계산하면 Fig. 5과 같이 1m가 된다.

만약 실내에서 고희석이 선정되어 폭발범위가 무시할 수 있는 정도로 작아지게 된다면, 이에 대한 검증이 KS C IEC 60079-10-1에 의해 이루어져야 한다. 이때 적용되는 개념이 LEL의 25%로 일반적으로 규정되는 임계농도(X_{crit})와 누출과 환기에 의한 기류 사이에 정상 상태가 확정되는 기간 이후에 가스박스 등 대상 부피에 인화성 물질의 평균농도를 의미하는 배경농도(X_b)이다. 임계농도가 배경농도 보다 높은 값을 나타낸다면 정상 상태가 되더라도 위험이 해소되었다고 볼 수 없으므로 비록 고희석 일지라도저희석으로 판단되어 폭발위험지역이 된다. 단, 지금과 같은 경우에는 1m의 범위가 계산되었으므로 임계농도(X_{crit}), 배경농도(X_b)의 계산은 필요가 없고 저희석으로 구분되기 때문에 이에 맞는 방폭형 계장기계구를 선정하면 된다.

3.4 SEMI S6 누출률을 기준으로 하는 폭발위험장소 계산

SEMI S6의 누출률을 기준으로 하는 폭발위험장소 계산 시 기본 전제 조건은 단절된 가스 파이프로부터의 방출을 말한다. 곧은 관, 즉 가스박스 내의 곧은 배관 연결 점에 Fitting으로 되어 있는 부분의 조건을 기준으로 하여 질량 유량을 구하고 이를 기준으로 하여 폭발위험장소를 계산한다. 계산 시 필요한 배관의 직경은 일반적으로 가스박스에

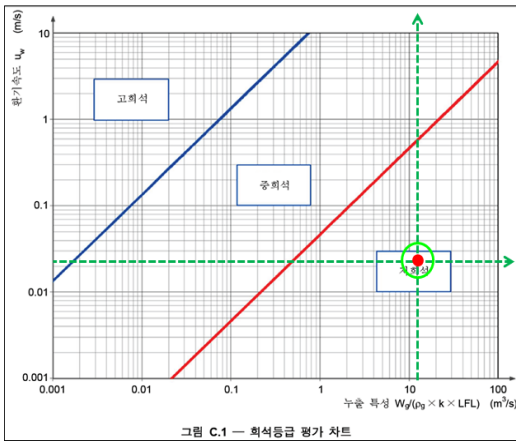


Fig. 6. Chart for assessing the degree of dilution S6 Leak Rate.

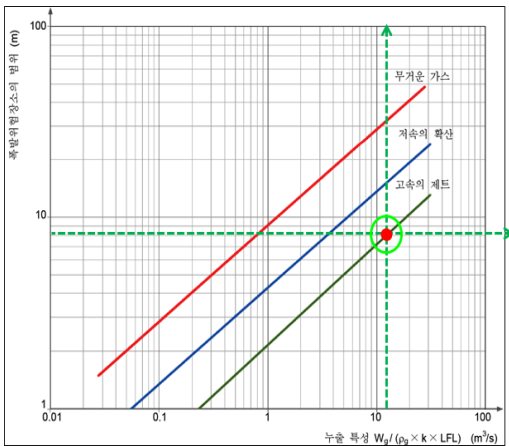


Fig. 7. Chart for estimating hazardous area distances S6 Leak Rate.

사용되는 크기인 1/4inch, 길이는 가스박스 높이와 같은 850mm로 결정하였으며, 압력은 취급되는 반도체 물질에 따라 다르지만 일반적으로 2~5barg에서 운전 되므로 3barg로 선정하였다. 거리에 따른 압력강하는 공정 시뮬레이션 프로그램인 ASPEN PLUS를 사용하여 일반적인 공정설계 시 적용하는 배관 유속 10m/s를 기준으로 5884 dynes/cm²를 적용하여 P₁, P₀ 를 구분하였다[12].

$$\text{누출율} = W = A(\rho_1 P_1 k M_1^2)^{0.5} = 24.28 \text{kg/s} \quad (3)$$

여기에서,

W : 누출유량(kg/s)

$$k M_1^2 : \frac{1 - \left(\frac{P_0}{P_1}\right)^2}{4f\left(\frac{L}{D}\right) + \ln\left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2}$$

ρ₁ : 다운스트림 조건에서 곧은 관을 통과하는 가스의 밀도 (실란 1.34g/cm³)

P : 절대압력 (dynes/cm²)

P₁ : 입구 측 절대압력 (dynes/cm²)

P₀ : 출구 측 절대압력 (dynes/cm²)

4f : 0.02

L : 관의 길이(cm)

D : 관의 직경(cm)

w : 가스의 질량유량(g/s)

A : 유선의 단면적(cm²)

SEMI S6의 기본 관점인 단절된 가스 파이프에서의 누출률은 24.28kg/s였다. 이를 3.3 항과 같은 계산식 및 조건을 기준으로 한 결과를 Fig. 6, Fig. 7에 표현하였다. 계산된 누출률이 일반적으로 계산되는 결과 값보다 수십 배 이상 크기 때문에 고희석이 아닌 저희석으로 계산되었으며, 폭발범위도 8m로 계산되었다. 여기서 저희석의 의미는 누출이 진행되는 동안에 인화성 가스의 농도가 높고 누출이 종료된 이후에도 폭발성 분위기가 오랫동안 지속되는 경우로 볼 수 있으므로 환기속도를 높여 중희석 이상으로 변경하는 것이 바람직하다.

IV. 결론

4.1 SEMI F15 누출률 실험 및 계산 결과

SEMI F15를 누출률을 기준으로 가스박스 내의 농도를 파악해 본 결과 실란(SiH₄) LEL의 1.62%에 불과함을 알 수 있었다.

그러나 국내 산업안전보건법 등 기타 법률에서는 SEMI F15 누출률 기준 SEMI S6 실험 결과를 폭발위험장소 구분에 인정하지 않으므로 해당 누출률을 기준으로 KS C IEC 60079-10-1의 공식을 적용하여 다시 계산하였을 경우에는 중희석이 되며 폭발위험장소가 계산되었다. 이를 개선하기 위해서는 환기속도의 상승이 필연적으로 필요한데, 현재 반도체 산업에서 이를 개선할 수 있는 방법은 오직 배기 풍량의 증가가 유일하다[13].

반도체 산업의 SEMI S6에 따른 실험결과 및 누출률을 기준으로 한 증기 상 물질의 2차 누출 시 폭발위험장소에 관한 연구

4.2 SEMI S6 누출률 계산 결과

SEMI S6의 누출률을 기준으로 한 폭발범위는 8m로 계산되었다. KS C IEC 60079-10-1에 단절된 배관유량 기준을 적용하면 1차 누출이 되며이를 반도체 가스박스에 적용하는 것은 상당히 보수적이고 과한 적용이라고 할 수 있다.

REFERENCES

- [1] KS C IEC 60079-10-1 "장소 구분 - 폭발성 가스 분위기", 26-81, (2015)
- [2] Seo, M. S., and Kim K. S., and Hwang Y. W., and 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*, 4, 14-14, (2018)
- [3] NFPA 497, "Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas", 5-22, (2017)
- [4] API, R.P. 505, "Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2", 10-21, 89-103, (2012)
- [5] SEMI F15-93, "Test Method For Enclosure Using Sulfur Hexafluoride Tracer Gas and Gas Chromatography", 2,-3, (2004)
- [6] SEMI S6, "EHS Guideline For Exhaust Ventilation of Semiconductor Manufacture Equipment", 32-53, (2009)
- [7] Kim, J. H., and Lee M. K., and Kil S. H., and Kim, Y. G., "Area Classification of Hazardous Gas Facility According to KGS CG101 Code", *KIGAS*, 4, 55-55, (2019)
- [8] IEC 60079-10-1/Ed2 : Explosive atmospheres - Part 10-1, "Classification of areas -Explosive gas atmospheres", 27-91, (2013)
- [9] KOSHA GUIDE E-150, "In setting of gas explosion danger place General Guidelines", *KOSHA*, (2017)
- [10] KOSHA GUIDE E-151, "Gas explosion risk location Guidance on the Assessment of Flammable Substances in Korea", *KOSHA*, (2017)
- [11] KOSHA GUIDE E-152, "Gas explosion hazard Technical paper about ventilation evaluation in small setting", *KOSHA*, (2017)
- [12] KOSHA GUIDE W-1, "Technical Guidelines for Industrial Ventilation Equipment, korean", *KOSHA*, (2019)
- [13] SEMI S2, "Industrial Guidelines for Semiconductor Equipment, korean", 51-55