Research Paper

Study on the Development of Small Cooling Module System for Scrubber to Improve Toxic Gas Treatment Efficiency

Dong Sub Lee[†] · Jin Hee Kim

Department of Healthcare & Biotechnology, Kyungwoon University

(Received November 3, 2020; Revised January 18, 2021; Accepted January 22, 2021)

Objectives : Manufacturing – based production facilities are required to install dust collection devices for air pollution prevention facilities. In particular, manufacturing-based companies need low-power hazardous gas treatment devices. However, due to the slowing economic growth, the cost of replacing new hazardous gas treatment devices is increasing, and new products in the form of parts that can be attached to scrubbers that are already installed are urgently needed.

Methods : To deal with residual gas from organic and inorganic compounds used in semiconductor manufacturing processes, the concentration of air pollutants emitted through the process of removing harmful substances from the primary scrubber and re-treatment of gases emitted from the secondary scrubber is further lowered.

Results and Discussion : In this study, a cooling block device which is a hazardous gas treatment part is developed to solve the limitation of scrubber processing capacity from overcapacity harmful gases such as strong toxicity, corrosivity, combustion, and environmental pollution in semiconductor manufacturing process.

Conclusions : In the design factors and performance survey of cooling module using thermoelectric element, it was calculated that the cooling capacity of the peltier thermoelectric element with a margin of 9,300 W was required. Based on these results, the absolute humidity decreased by 5.8 g/kg and the temperature decreased by 9.5 degrees, showing the possibility of solving the problem of the decrease in the effectiveness of hazardous gas treatment of secondary scrubber due to increased moisture.

Keywords : Semiconductor Manufacturing Process, Scrubber, Peltier Thermoelectric Element, Absolute Humidity, Cooling Capacity

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

[†] Corresponding author E-mail: dslee@ikw.ac.kr Tel: 054-479-1236 Fax: 054-479-1237

연구논문

유해가스 처리 효율 향상을 위한 스크러버용 소형 냉각모듈 개발에 대한 연구

이동섭[✉] · 김진희[✉]

경운대학교 보건바이오학과

목적: 제조업 기반의 기업들은 저전력형 대기유해가스 처리장치가 필요한 상황에 직면해 있으나, 경제성장의 둔화로 스크러버의 용량을 확대하는 새로운 유해가스 처리장치의 교체비용에 대한 부담으로 기 설치된 스크러버에 탈 부착이 가능한 부품형태의 처리효율 증대 시스템 보조 장치가 필요한 실정이다. 특히 반도체공정에서 배출되는 유기 및 무기 잔류 유해가스처리를 위해 다단 스크러버에서 유해가스와 수증기가 배가된 처리 용량을 줄이고, 스크러버 효율을 증가시킬 수 있는 기술이 요구되어 진다.

방법: 본 연구에서는 반도체 제조공정의 과용량 유해가스로부터 스크러버 처리능력 한계를 해결하기 위한 열전소자를 이용한 냉각 블록장치를 개발하고자 한다. 이 냉각 블록장치는 1차 스크러버 배기단에서 배출되는 수증기 온도를 이슬점까지 냉각시켜 고상이나 액상 파우더 형태로 액화시키는 원리로 다단 스크러버로 넘어가는 액상 유입물량을 줄여서 스크러버 처리효율을 향상시키는 장치이다.

결과 및 토의: 냉각손실 및 여유율을 고려한 열전소자 냉각용량 설계계산은 여유율 1.5를 고려한 수증기 밀도를 50%로 낮추기 위해서 여유율 포함 약 9,300 W의 peltier 열전소자 냉각용량 전력이 필요한 것으로 분석되어 이에 맞는 냉각모듈을 설계하였다.

결론: 기초 냉각모듈 설계인자에 대한 결과를 토대로 실제 반도체공장 LCD 모니터 공정 후에 배출되는 배기가스에 적용되는 스크러버 배기 환경조건에서 절대습도는 약 5.8 g/kg 감소했고, 온도 하강은 약 9.5℃ 하강한 결과를 보여 배기가스 처리 시스템에서 1차 스크러버로 들어오는 수분의 양이 많아져 2차 스크러버에서 유해가스 처리효율이 떨어지는 문제를 해결할 수 있는 가능성을 보였다.

주제어: 반도체 제조공정, 스크러버, 펠티어 열전소자, 절대습도, 냉각용량

1. 서론

국내 제조기반 생산시설의 경우 대기오염 방지를 위한 집진장치 설치가 의무화되어 있으며, 유해가스를 대기 중으로 배출시키기 위해 주로 스크러버(Scrubber) 설비를 설치하여 제거효율을 높이는 반도체 제조시설에서는 주로 세정식 스크러버 집진장치(Wet Scrubber)를 사용하고 있다.¹⁾

반도체 산업 환경을 살펴보면 집적도 향상을 위해 미세공정의 확대 및 3차원 구조변화로 소재 수요가 증가하고 있다. 공정 미세화 과정에서 필요한 주요 기술인 DPT(Double Patterning Technology) 및 QPT(Quadruple Patterning Technology) 기술로서 미세공정의 필요에 따라 공정 스텝 수가 증가하고 3차원 구조 확대로 인해 에칭에 필요한 더욱 강력한 케미컬 소재의 사용량이 증가되고 있다.²⁾ 일반 반도체 제

조과정에서도 에칭(Etching), 화학증착(CVD, Chemical Vapor Deposition) 및 세정과 관련된 공정 등은 이미 지구 온난화를 유발하는 유해입자 및 각종 공해물질들이 미처리된 상태의 배출량이 증가하는 추세이다.³⁾

Fig. 1은 반도체 챔버 내부에서 수집한 입자 부산물 종류를 SEM 사진을 통해 나타낸 것으로 대부분 응집상을 나타내고 있으며 응집상 표면에 약 100 nm에서 수 μm 수준의 미세한 구형의 일차 입자(Primary particle)가 존재하고 있음을 확인할 수 있다.

반도체 메탈 공정설비에서 발생하는 파우더 부산물의 경우 각 파우더 부산물에는 WO_3 , TiO_2 , Al_2O_3 등의 물질이 단독 또는 복합적으로 포함되어 있으며 막질 생성 반응으로 부산물이 생성된 것으로 알려져 있다. WO_3 의 경우, 공정 반응식에 의해 텅스텐(W) 막질이 만들어지게 되며, 이때 부생 되는

Scanning electron microscopy images of powder by products collected from process equipment: (a) MTC01, (b) MTC02, (c) MTC03

Transmission electron microscopy images of powder by products collected from process equipment (MTC04):
(a) maker 0.2 μm , (b) maker 100 μm , (c) maker 10 nm

Fig. 1. Types of powder by-products collected inside semiconductor chambers.

SiF_4 등이 배출되는데 이 공정과정에서 전구체로 사용되는 WF_6 및 분해된 W는 챔버 내에서 미량의 수분 및 산소와 반응할 경우, WO_3 가 생성되는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 이러한 공정 가스 및 화학물질들은 강력한 독성, 부식성 및 환경 오염성분 등을 지니고 있어 소량의 배출로도 대기환경의 안전보장이 어렵기 때문에 이에 대한 대책이 매우 필요하다.⁵⁾

반도체 제조공정의 경우 사용되는 유기 및 무기화합물들의 잔류 가스들을 처리하기 위해 각 공정 유틸리티에 붙어 있는 다수의 1차 스크리버에서 유해물질들을 제거하고 배출된 가스를 대기로 내보내기 전 2차 스크리버를 통해 다시 한번 제거함으로써 후단부에서 배출되는 배기가스에 포함된 대기오염물질을 더 낮추어 청정상태를 유지하는 것으로 알려져 있다. 하지만 기 설치된 반도체 제조공정 특성상 스크리버의 처리용량이 정해져 있어 처리용량을 초과하는 유해가스의 유입에 따른 미처리 가스들로 인해 대기오염을 심각하게 오염시킬 수 있다.⁶⁾

반도체 제조업체에서 사용되는 스크리버의 경우 사용되는 유해가스의 분진물과 분진 잔유물들이 스크리버에서 분해되는 과정에서 레진 형태로 변화되어 배관 내벽에 강하게 밀착되며, 지속적인 열로 인해 밀착된 유해가스는 파우더 형태를 거쳐 굳어짐에 따라 배관 내부를 막아 고위험 상황을 야기시킬 수 있다. 최근에는 배관 막힘 현상을 줄이기 위해 1차 스크리버 배기단에 인위적으로 용수를 분사시켜 배관 내벽에 붙어 있는 잔유물들을 제거하는 방법들을 사용하고 있다.⁷⁾

그러나 잔유물 처리를 위해 사용된 수분은 수증기 혹은 액상 파우더 형태로 유해가스를 포함하여 2차 스크리버 입력단으로 유입되기 때문에 다수의 1차 스크리버 단에서 들어오는 수분의 양이 많아져 이를 2차 스크리버에서는 유해가스를 처리할 수 있는 능력을 상실하게 된다.⁸⁾

결국 반도체 소재 수요 증가에 따라 오염물질처리량도 증가할 것으로 예상되며 반도체 소재는 화학반응 이후에는 폐가스와 폐 화학 물질로 잔류하게 되는데 독성이 매우 강하기 때문에 그대로 방류할 수 없어 이를 중화하는 환경처리 기술이 필요한 실정이다.⁹⁾

따라서 본 연구에서는 미세공정 확대 및 3차원 구조변화로 소재 수요가 증가하고 있는 반도체 제조업체들이 공정 스텝수의 증가로 인해 더욱 강한 독성, 부식성, 연소성 및 환경오염성분 등의 과용량 유해가스로부터 스크리버의 처리능력 한계를 해결하기 위한 유해가스 처리부분품인 냉각 블럭 장치를 개발하고자 한다.

냉각 블럭 장치는 1차 스크리버 배기단에 설치되는 부분품 형태이며, 배출되는 수증기 온도를 이슬점까지 냉각시켜 고상 파우더 형태나 액상 파우더 형태로 액화시키는 원리를 적용하는 기술로 1차 스크리버 배기단과 2차 스크리버 입력단 사이에서 발생하는 액상 파우더의 양을 줄일 수 있고, 정제된 가스의 2차 스크리버 입력단 유입으로 2차 스크리버 단에서는 10% 이상의 유해가스 처리능력을 향상시킬 것으로 판단된다.

2. 실험방법

제조업 기반의 국내외 기업들은 저전력형 유해가스 처리장치가 필요한 상황에 직면해 있으나 최근 경제성장의 둔화로 스크러버의 용량을 증대한 새로운 유해가스 처리장치의 교체 비용에 대한 부담으로 인하여 상대적 비용절감이 적고, 기 설치된 스크러버에 탈부착이 자유로운 부분품 형태의 제품이 시급히 필요하다고 사료된다.

본 연구는 나노 단위의 미세공정 및 3차원 패턴을 적용한 고집적 반도체 수요증가에 따라 반도체 제조업체들의 공정 스텝수 증가 및 미세패턴 구현을 위해 더욱 강한 독성의 케미컬 사용의 증대로 인해 유해성 대기환경 오염성분 등의 과다 사용을 줄이기 위해 운용하고 있는 1차 스크러버(Scrubber)의 처리능력 한계를 증대시킬 목적으로 개발된 비교적 간단한 냉각블록 장치로서 배기가스 중 유해가스 감소를 위한 대기환경 유해가스 처리용 전기장치 제품이다.

2.1. 실험 설계

반도체 공정 끝단에 있는 1차 스크러버의 경우 공정별로 배관의 모양, 크기 및 주 배출되는 유해가스의 종류가 다른 것은 물론 배기단 주변의 온도환경이 다르기 때문에 이러한 환경에서도 유해가스를 포집하여 배출을 차단하기 위해서는 적어도 이슬점 온도보다 큰 온도편차(6°C 이상)를 가질 수 있도록 냉각블록을 구성할 수 있는 냉각블록 조립기술이 필요하다.

아울러 본 연구 결과물을 각 스크러버에 적용하기 위해서는 정확한 전력기준 용량에 대한 계산이 필요하며, 이 용량계산을 바탕으로 적용을 위한 냉각블록의 용량에 대한 검토를 병행했다.

반도체 공정에서 사용되는 가스라인의 경우 주로 SUS 316 재질을 사용하고 있으며 이는 SUS 304에 비해 내 화학성 및 내 부식성이 강하다고 알려져 있기 때문이다.¹⁰⁾ 그러나 본 연구에서는 SUS를 Housing Body로 적용 시 열전도도가 낮아 사용이 불가한 관계로 열전소자를 이용한 냉각블록의 냉각율을 높이기 위해서 부득이 열전도도가 높은 알루미늄(Al) 재질을 사용함에 따라 유해가스에 전달 수 있고 동시에 내구성을 확보하기 위해서는 배관 내부 및 외부에 유해가스를 전달 수 있는 장치설비가 필요하며 Fig. 2와 같다.

3. 실험결과

3.1. 열전소자를 이용한 냉각모듈 설계인자 및 성능조사

열전소자는 재료의 양단에 온도차가 존재하면 기전력이 발생하는 현상(seebeck effect)을 이용하는 소자로서 열에너지를 전기에너지로 직접 변화할 수 있고, 또한 열전소자는 전기에너지를 열에너지로 직접 변환할 수 있어 냉각소자로 사용

Fig. 2. Schematic diagram of research application.

된다.¹¹⁾

열전소자에서 냉각 에너지 효율은 성능계수(COP, Coefficient of Performance)로 나타내는데 이것은 모듈에 주어진 투입전력(P)에 대한 흡열량(Q)의 비율 즉 (Q/P) 이지만, 실제 펠티어 모듈에서는 성능계수가 아주 적은 값으로 나타나며 소형냉각고에서는 일반적으로 0.2 정도로 나타난다.¹²⁾

본 연구에서는 열전소자를 이용한 1차 스크러버에 적용될 냉각블록 모듈의 설계 및 성능분석에 대하여 연구를 수행하였다. 열전소자의 최적 냉각능력을 도출하기 위해 열전소자의 필요 흡열량 및 최적 COP 조건에 따른 발열량을 도출하고, 냉각정도를 파악하였다.

냉각기술에는 크게 냉매나 응축기를 이용하는 증기압축방식의 chiller를 이용하거나 냉각, 난방모드를 다 갖춘 heat pump를 사용하여 아주 높은 성능계수(COP)를 나타낸다. 하지만 이런 방식은 냉매를 이용하기 때문에 환경적인 측면에서 문제를 야기시키고 또한 압축기가 필요하므로 설비 사이즈가 커지고 냉매사용으로 인한 배관이 있어 복잡해진다. 열전소자를 이용한 냉각방식은 크기가 작아서 여러 가지에 응용력이 있으며 냉매를 사용하지 않고, 직접 표면이 가열, 냉각되므로 간단한 것이 특징이다. 또한 전류를 이용하여 온도차를 제어할 수 있어서 미세한 온도조정이 가능하며 설정온도로 만드는 시간이 증기압축방식에 비하여 빠르다. 하지만 성능계수 COP가 1을 넘기 어렵고 0.5 내외로 분포한다. 즉 1 kW의 전기를 사용하여 절반정도의 냉각에 사용하는 열량 손실이 가능하다는 단점도 있다. Fig. 3에서의 열전소자를 이용한 냉각블록 실험장치 성능계수에 따른 인가전력량 도출실험에서는, 성능계수 COP 0.5를 적용한 열전소자 후보군에서 $V_{\max} = 17.5 \text{ V}$ 의 50%인 8.75 V 전압인가 시 $dT = 10^{\circ}\text{C}$, Current = 4.5 A의 경우 흡열량 = 60 W, 방열량 = 60 W + $(8.75 \text{ V} \times 4.5 \text{ A}) = 99.4 \text{ W}$ 를 Fig. 4에서와 같이 확인할 수 있었다.

Fig. 3. Experimental unit for cooling block using thermoelectric elements.

Fig. 4. Experimental results of heat absorption and heat dissipation of applied thermoelectric elements.

열전소자를 이용한 냉각블럭의 모듈 설계에서 냉각용량을 설정하기 위한 기초실험을 수행하여 냉각용량을 설정하였다. 우선 냉각용량을 설정하기 위한 기초 조사로 사용된 냉매인 물의 온도에 따른 수증기 밀도를 계산하고 증발잠열을 발생시켜 온도를 냉각시키는 수증기 밀도가 절반으로 줄어지는 지점에서의 온도를 계산하였다.

수증기 밀도를 35°C, 상대습도 98% 조건에서 수증기의 포화증기압(P) 계산을 아래의 Antoine Equation에서 계산하였다.

$$\log_{10} P = A - \left(\frac{B}{T+C} \right) \quad (1)$$

P : 증기압(Bar), T : 온도(K), A, B, C : Antoine Equation Parameters

또한 수증기 밀도를 이상기체 방정식을 이용한 포화 증기밀도를 계산하고 이를 토대로 포화증기밀도(N)를 계산하였다.

$$P = N \kappa T \quad (2)$$

P : 포화증기압, N : 포화증기밀도, κ : 볼츠만 상수

$$N = \frac{0.045 \text{ bar} \times 10^5 \text{ pa/bar}}{1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 308.15 \text{ K}} \approx 1.34 \times 10^{24} \text{ m}^{-3} \quad (3)$$

계산된 포화증기밀도를 이용하여 수증기 밀도를 계산하고 이를 토대로 수분이 50% 감소될 때의 포화증기밀도를 계산을 통하여 22°C에서 수증기 밀도가 절반으로 감소함을 Fig.

Fig. 5. Density of saturated water vapor according to temperature.

5와 같이 알 수 있었다.

수증기 밀도 = 포화증기밀도 × 상대습도 =

$$1.34 \times 10^{24} \text{ m}^{-3} \times 98\% = 1.31 \times 10^{24} \text{ m}^{-3} \quad (4)$$

수분이 50% 감소되는 포화증기밀도는

$$1.31 \times 10^{24} \text{ m}^{-3} \times 50\% = 6.57 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$$

또한 22°C의 공기로 냉각시키기 위해 필요한 열량은 응축 잠열 발생에 필요한 에너지와 공기 온도 하강에 필요한 에너지 그리고 수증기 온도 하강에 필요한 에너지의 합으로 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{잠열} &= \text{무계당 잠열} - \frac{\text{분자량} \times \text{밀도}}{\text{아보가드로수}} \times \text{펄프속도} \\ &= 2,244 \text{ W(a)} \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 6. Gas temperature and moisture removal capacity according to theoretical peltier cooling capacity.

$$\begin{aligned} & \text{공기 온도 하강 에너지} \\ &= \text{공기의 부피당 비열} \times \text{온도변화} \times \text{펌프속도} \quad (6) \\ &= 786.5 \text{ W}(b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{수증기 온도 하강 에너지} \\ &= \text{수증기의 등압 비열} - \frac{\text{수증기 밀도}}{\text{아보가드로 수}} \\ & \quad \times \text{온도변화} \times \text{펌프속도} \quad (7) \\ &= 53.15 \text{ W}(c) \end{aligned}$$

따라서 수증기 냉각을 위해 필요한 열량에너지는 (a)+(b)+(c)로 계산되어지며 3,082.2 W로 계산되었다. Fig.6과 같이 냉각손실 및 여유율을 고려한 peltier 열전소자 냉각용량은 냉각손실 50%로 가정하고 펄티어 인가전력(냉각열량/0.5=6,166 W)에 여유율 1.5를 고려하면 9,250 W의 에너지가 드는 것으로 계산되었다. 따라서 수증기 밀도를 50%로 낮추기 위해서는 여유율포함 약 9,300 W의 peltier 열전소자 냉각용량 전력이 필요한 것으로 분석되어 이에 맞는 냉각모듈로 설계하였다.

기초 냉각모듈 설계인자에 대한 결과를 토대로 실제 반도체공장 LCD 모니터 공정 후에 배출되는 배기가스에 적용되는 scrubber 배기환경인 온도 20°C-35°C, 상대습도 90% 이상, 유입유량 최대 3,000 LPM과 유사한 적용환경을 만들어 온도 하강과 습도 제거정도를 실험하였다.

Fig.7에서 peltier 열전소자를 이용한 냉각모듈 시스템을 통과한 배기가스 포함된 수분량의 경우, 9일간의 실험에서 44-57%의 제습효과를 보였다. 이러한 제습효과는 배기가스 처리 시스템에서 1차 스크러버에서 들어오는 수분의 양이 많아져 2차 스크러버에서 유해가스 처리효율이 떨어지는 문제를 해결할 수 있는 가능성을 보였다.

Fig.8에서는 수증기 제거와 더불어 2차 스크러버의 유입유량의 온도를 8-10°C 정도 낮추어 제습에 의한 유입가스 온도

Fig. 7. Water vapor change after passing through cooling module system.

Fig. 8. Temperature change after passing through cooling module system.

하강에 대한 냉각모듈 시스템의 냉각효율을 보였다.

4. 결론

국내 제조기반 생산시설의 경우 대기오염 방지를 위한 집진장치 설치가 의무화되어 있으며, 유해가스를 대기 중으로 배출시키기 위해 주로 스크러버(Scrubber) 설비를 설치하여 제거효율을 높이며, 반도체 제조시설에서는 주로 세정식 스크러버 집진장치(Wet Scrubber)를 사용하고 있다.

반도체 제조공정의 경우 반도체 공정 시 사용되는 유기 및 무기화합물들의 잔류 가스들을 처리하기 위해 각 공정 유틸리티에 붙어 있는 1차 스크러버에서 유해물질들을 제거하고 배출된 가스를 대기로 내보내기 전 2차 스크러버를 통해 제거함으로써 후단부에서 배출되는 배기가스에 포함된 대기오염 물질을 더 낮추어 청정상태를 유지하는 것으로 알려져 있다. 하지만 기설치된 반도체 제조공정 특성상 스크러버의 처리용량이 정해져 있어 처리용량을 초과하는 유해가스의 유입에 따른 미처리 가스들로 인해 대기오염을 심각하게 오염시킬 수 있다.

본 연구는 미세공정 확대 및 3차원 구조변화로 소재 수요가 증가하고 있는 반도체 제조업체들이 공정 스텝 수의 증가로 인해 더욱 강한 독성, 부식성, 연소성 및 환경 오염성분 등의

과용량 유해가스로부터 스크러버의 처리능력 한계를 해결하기 위한 유해가스 처리부분품인 냉각 블럭 장치개발이다.

이러한 냉각 블럭 장치는 1차 스크러버 배기 단에 설치되는 부분품 형태이며 배출되는 수증기 온도를 이슬점까지 냉각시켜 고상 파우더 형태나 액상 파우더 형태로 액화시키는 원리를 적용하는 기술로 1차 스크러버 배기 단과 2차 스크러버 입력단 사이에서 발생하는 액상 파우더의 양을 줄일 수 있고 정제된 가스의 2차 스크러버 입력단 유입으로 2차 스크러버 단에서는 약 10% 이상의 유해가스 처리능력을 향상시킨다.

열전소자를 이용한 냉각모듈러 설계인자와 성능조사에서 열전소자의 최적 냉각능력을 도출하기 위해 열전소자의 필요 흡열량(60 W)와 최적 COP 조건에 따른 발열량(99.4 W)을 도출하고, 열량손실에 따른 냉각 가능성을 파악하였다.

또한 냉각손실 및 여유율을 고려한 peltier 열전소자 냉각용량은 인가전력(냉각열량/0.5= 6,166 W)에 여유율 1.5를 고려한 수증기 밀도를 50%로 낮추기 위해서 여유율포함 약 9,300 W의 peltier 열전소자 냉각용량 전력이 필요한 것으로 분석되어 이에 맞는 냉각모듈을 설계하였다.

기초 냉각모듈 설계인자에 대한 결과를 토대로 실제 반도체공장 LCD 모니터 공정 후에 배출되는 배기가스에 적용되는 스크러버 배기환경조건에서 절대습도는 18 g/kg에서 7.5 g/kg으로 약 5.8 g/kg 감소했고, 온도 하강은 24.2℃에서 14.7℃로 약 9.5℃ 하강한 결과를 보여 배기가스 처리 시스템에서 1차 스크러버로 들어오는 수분의 양이 많아져 2차 스크러버에서 유해가스 처리효율이 떨어지는 문제를 해결할 수 있는 가능성을 보였다.

References

1. M. S. Park, J. H. Yoon, A study on the trend of international environmental regulations and the countermeasures of semiconductor equipment industry, *Clean Technology*, 3(1), 48-65(1997).
2. Y. J. Kim, S. H. Jung, D. G. Song, B. W. Han, Trend of Wet Electric Dust Collection Technology for Atmospheric Environment, 1st ed., *Machinery and Materials*, pp. 38-34 (2007).
3. B. W. Han, H. J. Kim, Y. J. Kim, K. S. Han, Removal characteristics of gaseous contaminants by a wet scrubber with different packing materials, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(6), 744-751(2007).
4. A. Jaworek, W. Balachandran, M. Lackowski, J. Kulon, A. Krupa, Multi-nozzle electro spray system for gas cleaning processes, *J. Electrostat.*, 64(3-4), 194-202(2006).
5. G. H. Moon, J. Y. Kim, Development of volatile organic compound pretreatment device for removing exhaust gas from display manufacturing process, *Appl. Chem. Eng.*, 30(5), 523-529(2019).
6. K. M. Choi, M. K. Jung, H. C. An, Physicochemical characterization of powder byproducts generated from a metalization process and its 1st scrubber in the semiconductor industry, *J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg.*, 25(3), 294-300(2015).
7. T. H. Park, C. S. Lee, H. J. Kim, Experimental a study on the removal for hazardous white smoke and aerosols using dielectric coagulation system to treat off-gases from semiconductor manufacturing, in *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, Korean Society for Precision Engineering, Jeju, Korea, pp. 1221-1222(2012).
8. H. W. Park, W. B. Cha, S. H. Uhm, Highly efficient thermal plasma scrubber technology for the treatment of perfluorocompounds (PFCs), *Appl. Chem. Eng.*, 29(1), 10-17 (2018).
9. H. G. Park, C. H. Oh, D. H. Kim, S. J. Park, A study on the efficiency of pollution control using the scrubber with a spiral filter and a cyclone system for decreasing particulate matter and odor inducing compounds, *J. Odor Indoor Environ.*, 18(2), 112-120(2019).
10. W. B. Yang, J. K. Rhim, S. M. Hong, A case study on the TEMAZ explosion accident in semiconductor process, *J. Korean Inst. Gas*, 21(6), 52-60(2017).
11. D. H. Kim, G. H. Lee, Development trend of new technology for thermoelectric cooling elements, *Korea Institute of Materials Science*, 16(2), 95-103(2004).
12. S. Y. Yoo, C. P. Hong, W. S. Shim, A study on the performance of thermoelectric module and thermoelectric cooling system, *Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, 16(1), 62-69(2004).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Dong Sub Lee

Department of Healthcare & Biotechnology, Kyungwoon University, Professor, ORCID[®] 0000-0001-7053-978X: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing - original draft.

Jin Hee Kim

Department of Healthcare & Biotechnology, Kyungwoon University, Professor, ORCID[®] 0000-0001-8496-4269: Conceptualization, Data analysis, Writing - original draft, Writing - review and editing.