

전산유체역학을 이용한 반도체 제조공정의 PM 전용 후드 설계 연구

홍작령¹ · 구재한² · 박창섭² · 최광민^{1*}

¹삼성전자 건강연구소, ²삼성전자 반도체연구소 환경안전그룹

Design of local exhaust ventilation for preventive maintenance in semiconductor fabrication industry using CFD

Jwaryung Hong¹ · Jae-Han Koo² · Chang-Sup Park² · Kwang-Min Choi^{1*}

¹Samsung Health Research Institute, Samsung Electronics Co. Ltd.,

²Environment Safety Health Group, Semiconductor R&D Center, Samsung Electronics Co. Ltd.,

ABSTRACT

Objective: The aim of this study is to control residual chemicals or by-products generated in chambers during preventive maintenance (PM) in the semiconductor manufacturing industry. We designed local exhaust ventilation using computational fluid dynamics (CFD).

Methods: The air flow characteristics and capture efficiency between rectangular and slot hoods were compared numerically. The software Fluent 18.1 was used to estimate uniform velocity distribution and capture efficiency for contaminants. A metal from group 15 in the periodic table was released at the bottom of the chamber to simulate emissions.

Results: The slot hood had a higher capture efficiency than a rectangular hood under the same conditions because the slot hood provided uniform air flow and higher face velocity. Also, there was no rotating swirl in the plenum for slot, that is why slot had better efficiency than rectangular even though they had similar face velocity. With less than 10 slots, the capture efficiencies for contaminants were nearly 95%. The optimum conditions for a hood to achieve high efficiency was 8 to 10 slots and a face velocity over 1 m/s.

Conclusions: Well-designed ventilation systems must consider both efficiency and convenience. For this study, a slot hood that had high capture efficiency and no work disturbance was designed. This will contribute to protection of the worker's health in a PM area and other areas as well. Also, this study confirms the possibility of the application CFD in the semiconductor fabrication industry.

Key words: capture efficiency, computational fluid dynamics, hood, preventive maintenance, semiconductor industry

I. 서 론


반도체 제조 산업은 기하급수적으로 도약을 거듭하였고, 전 세계적으로 반도체 수요가 지속되면서 현재도 급속한 발전이 계속되고 있다(Statista, 2018). 고집적 반도체 제조를 위해 기술 난이도가 증가하고 공정 기술의 미세화가 진행됨에 따라 금속 및 유기물을 포함하는 화

학물질의 사용이 다양해지고 있는 추세이다. 사용 화학 물질이 공정 챔버 내 잔류하거나 화학물질 간 반응에 의해 생성된 부산물이 생성될 가능성이 있고, 이는 제품 불량을 유발할 수 있기 때문에 사전 예방작업으로 배기 시스템을 가동하거나 생산 및 부대설비의 유지/보수 작업을 진행한다.

반도체 제조 공정에서 생산 수율 향상 및 안정적인

*Corresponding author: Kwang-Min Choi, Tel: +82-31-8037-8841, E-mail: k.m.choi@samsung.com
Samsung Health Research Institute, 1, Samsungjeonja-Ro, Hwasung-City, Gyeonggi-Do, 18448, Korea
Received: April 11, 2019, Revised: May 27, 2019, Accepted: May 29, 2019

 Jwaryung Hong <https://orcid.org/0000-0001-7705-446X>

 Kwang-Min Choi <http://orcid.org/0000-0001-7711-4397>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

생산 운영을 위해 반드시 필요한 작업 중의 하나가 예방적 유지보수(Preventative Maintenance, PM)이다. 설비 고장 방지 및 유지, 보수를 위해 주기적으로 진행하며, PM시 챔버를 오픈하여 부품을 교체하고 챔버 내부를 물 또는 에탄올을 적신 와이퍼로 닦아 내는 등의 작업을 한다. 이 때 챔버 내에 잔류하는 반응물이나 화학물질간의 반응에 의해 부산물이 생성될 경우 작업자 노출이 발생할 수 있다(Park et al., 2011; Choi et al., 2015a; 2015b; Choi 2018). 노출 위험성을 최소화하기 위해 PM 작업 전에 반드시 purge를 통해 잔류물질 및 생성 부산물을 제거한 후 챔버를 오픈하도록 하고 있으며, PM 작업자는 보호 장구(전면형 마스크, 내화학복, 보호 장갑 등) 착용 후 작업을 진행한다. 한편 일부 연구에서는 챔버 세정 작업 중에 발생한 가스가 다른 공정으로 확산되어 타 공정 작업자까지 노출될 수 있는 위험성을 보고하고 있어(Gu, 2003), 국소배기 장치로써 PM 전용 후드를 설치하여 오염물질 주변 확산을 방지하고 있다.

국소배기장치 설계는 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)에서 발간되는 산업환기매뉴얼(Industrial Ventilation Manual, IV manual)과 실험 결과를 바탕으로 설계 기준이 제시된 자료(Burgess 1989, Burton, 1994)를 통해 후드 설계 기준을 참고할 수 있다. 하지만 이 자료들에 제시된 설계 방법은 비슷한 공정에 대한 일반적인 사항일 뿐 특정 공정, 설비에 대한 정확한 설계 기준을 제시하지 못하는 경우도 있다(Goodfellow, 2001). 작업형태, 유해인자 특성 및 작업 공간을 고려하여 설계하는 것이 원칙이지만, 다양한 공정의 모든 조건을 만족시키기 쉽지 않으므로 위치 이동이 가능한 이동식 암후드(arm hood)를 설치하여 사용하고 있다. 하지만 발생원이 후드보다 더 크거나 작업 방해로 인해 오염원과 부착시켜 사용할 수 없는 경우는 실제 후드 제어효율(capture efficiency)은 기대할 수 없다(Kulmala, 2000). Dalla(1952)는 개구부에서 덕트 직경만큼 떨어진 곳에서 측정한 후드의 흡입속도는 덕트 내 유속의 7.5%밖에 되지 않아 오염물질 제어효율은 거의 없다고 보고하였으며, 오염원과 멀어질수록 후드가 작업 주변의 깨끗한 공기까지 흡입하여 효율이 급격히 저하될 수 있다(Cao et al., 2017). 또한 오염원과 슬롯후드의 거리가 2배 늘어나면 효율은 1/5 수준으로 감소되므로 후드를 오염원과 최대한 가깝게 설치

하여 배기하는 것이 중요하다(IV manual 27th, 2010). 특히 오염물질이 작업자의 호흡영역에 들어오지 않도록 후드를 위치시켜야 하지만 실제 현장에서는 다양한 작업 형태를 고려하지 않아 오염물질 제어 효율이 저하될 가능성이 있다.

국소배기 설계 시 오류를 최소화하기 위해 다양한 평가를 거친 후 실제 현장에 적용하여 실험을 통한 테스트를 진행해야 효율적인 방안을 마련할 수 있지만, 모든 현장에 대한 실험은 거의 불가능하다(Ha, 1998). 모형 제작을 통한 테스트는 시간과 경비가 많이 들고 또 어떤 경우에는 현장의 특성을 반영한 실험이 불가능할 때도 있다. 이를 위한 대안으로 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용한 시뮬레이션 기법이 많이 이용되고 있다. CFD는 시각적으로 보이지 않는 유체의 유동을 가시화하고 수치적으로 검증하는 방법으로 1980년대에 이르러 초기 단계의 상용 CFD 코드가 등장함에 따라 항공, 자동차, 원자력 분야를 중심으로 적용범위가 확대되었다(Robert, 2017). 2000년대 이후 컴퓨터 및 소프트웨어 기술의 비약적인 발전으로 기계, 화학단위공정예까지 용도를 확장시켜 대부분의 산업에서 광범위하게 적용되고 있다. 현재에도 기계, 화학, 전기전자, 건설, 환경/에너지 등 다양한 분야의 연구 결과들이 발표되고 있다(Kavli et al., 2017; Rabehi et al., 2017; Ceasar et al., 2018; Li et al., 2018; Weerasuriya et al., 2018).

한편 우리나라에서 산업보건관점의 CFD를 적용한 것은 1998년 산업환기공학에 전산유체역학의 응용 가능성 연구(Ha et al., 1998)를 시작으로 균일류 하에서 작업하는 근로자의 노출농도 예측(Jung et al., 2000), 열원이 존재하는 작업장 내 기류 및 온도장 예측(Jung et al., 2001), 자연환기 벤틸레이션 환기특성 및 배기 유량 산정(Ha & Kim, 2002a; Ha et al., 2002b; Ha & Kim, 2003) 연구 등이 진행되었다. 그 이후로 자동차 검사라인의 환기방안(Kim, 2004), 합성피혁 인쇄공정에서의 산업환기시스템 개선(Lee et al., 2009), 타이어 제조 공정의 온열환경 개선(Lim & Kim, 2011), 인쇄 작업장의 환기 효율평가(Yoo et al., 2013) 연구 등 다양한 산업현장에 CFD 시뮬레이션 기법이 적용되었으며, 작업자의 건강 보호 및 작업환경개선에 유용한 툴로 사용되고 있다.

하지만 반도체 제조산업에서 CFD 적용 연구는 대부분 수율 향상을 위한 오염물질 제거, 편향류 개선 연구

등 생산 관점에 대한 연구가 대부분이며, 산업보건관점에서의 CFD 적용 사례는 매우 부족한 실정이다. 세계적으로도 반도체 산업에서의 CFD를 적용한 산업보건 관련 연구는 대만에서 수행한 연구가 대부분이며, 최근에는 중국에서 수행된 연구가 발표되고 있지만 극히 부족한 실정이다(Chen et al., 2007; Chien, 2007; Shih et al., 2008; Huang et al., 2009; Shih et al., 2011; Li & Zhou., 2015).

따라서 본 연구에서는 반도체 제조공정에서 작업환경 개선 및 작업자 건강보호를 위해 PM 전용 후드를 설계하고자 CFD 시뮬레이션 기법을 이용하였으며, PM 작업에 방해가 되지 않으면서 효율이 높은 방법을 제시하고자 하였다.

II. 연구방법

1. 수치해석 모델

반도체 소자들을 동작시키고 이들의 신호가 섞이지 않게 메탈을 이용해 선을 연결하는 작업을 메탈(metallization)공정이라 하고, 메탈공정의 반응 챔버를 수치해석 모델로 사용하였다. 반응 챔버는 직경 60 cm, 높이 100 cm인 원통형이며, 실제 반응 공정은 챔버 뚜껑이 닫힌 진공상태에서 진행된다. PM이나 장비 점검시에만 뚜껑을 오픈하여 작업을 진행하는데 본 해석에서는 PM 작업 시를 가정하였으므로 챔버 뚜껑이 오픈된 형태로 설정하였다.

국소배기장치는 챔버 직경과 같은 60 cm의 원형으로 제작하여 PM 작업 중에도 챔버에 얹어서 사용할 수 있도록 하였고 원형 내부에 개구면을 만들어 챔버에서 오염물질이 발생되더라도 공기 중으로 확산되기 전에 배기되도록 하였다. 후드 모양에 따른 효율 평가를 위해 배기유량, 오염 발생원 등 모두 동일한 조건을 주었으며, 수치해석 조건은 Table 1에 나타내었다. 본 연구에

서 사용한 수치해석 도메인은 Figure 1과 같고, (a)는 장방형(rectangular) 후드 타입으로 20×80 mm (가로, 세로)의 개구면이 30개인 후드이며, (b)는 200×15 mm(가로, 세로) 크기의 슬롯(slot)형태의 후드이다. 슬롯후드는 슬롯 개수를 6, 8, 10, 14개로 변경하여 효율을 평가하였다.

2. 지배방정식

PM 전용 후드 설계를 위한 해석을 수행하기 위해 유동은 정상상태, 비압축성 유체로 가정하였으며, 난류 유동에 대한 지배방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지보존방정식으로 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S_u \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\sum_j (h_j \vec{J}) \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\vec{\tau} \nu) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)은 연속방정식으로 위 식들에 나타나는 변수 ρ 는 유체의 밀도(kg/m³), u 는 속도 성분(m/s), T 는 온도(K), τ_{ij} 는 응력텐서(Pa), h 는 엔탈피(J/kg), S_h 는 화학반응에 의한 엔탈피 증가(kg/(m/s³))를 뜻한다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서 사용한 수치해석 상용 프로그램은 Fluent Ver.18.1이며, 수치해석을 단순화하기 위해 정상상태, 공기의 밀도를 포함한 모든 물성치는 일정하다고 가정하였다. 유체의 흐름은 난류유동이므로, 난류의 수송방정식인 standard k- ϵ model을 이용하여 난류

Table 1. Conditions of numerical analysis

Case	Hood type	Open face number	Face size (mm)	Flow rate (CMM*, m ³ /min)
Case 1	rectangular	30	20 × 80	2.41
Case 2	slot	14	200 × 15	2.41
Case 3	slot	10	200 × 15	2.41
Case 4	slot	8	200 × 15	2.41
Case 5	slot	6	200 × 15	2.41

* CMM : Cubic meter per minute

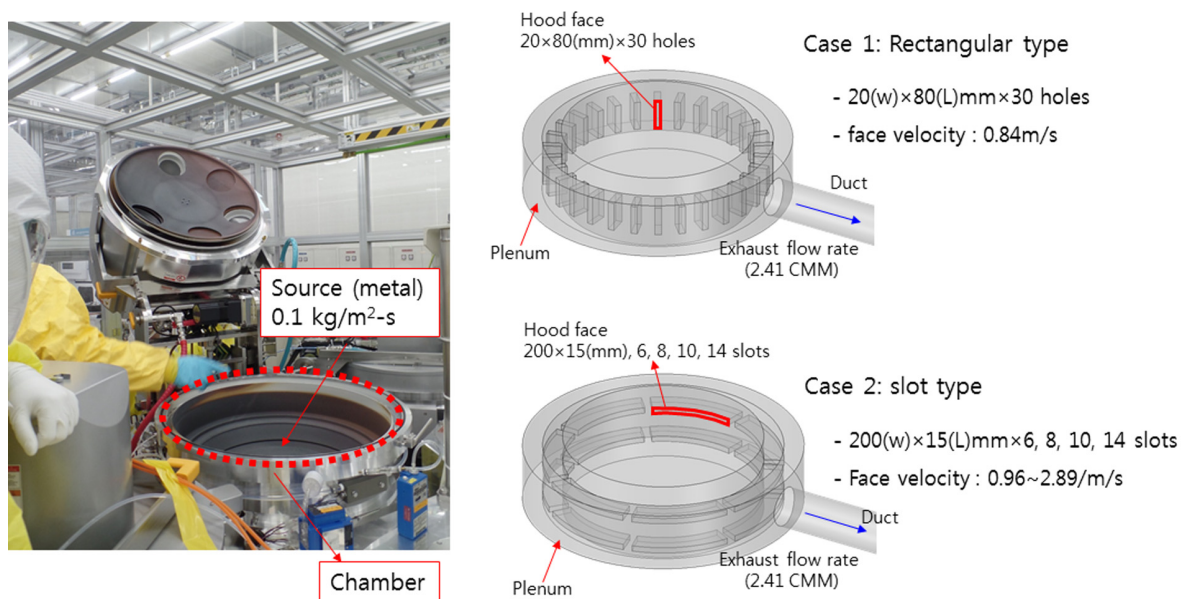


Figure 1. Schematic diagram of hood for PM process

운동에너지를 해석하였다. 이산화방법(discretization)으로는 유한체적법(finite volume method)을 적용하였으며, 연속방정식, Navier-Stokes 방정식 및 $k-\epsilon$ 방정식을 SIMPLE(Semi-Implicit Method Pressure-linked Equations) 알고리즘에 적용하여 계산하였다. 수치해석에서 해의 수렴이 필요하므로 1000회 이상 반복 계산하였고, 반복계산에 의한 종속변수들의 수렴도를 잔차로 확인하여 10^{-3} 이하에 도달하면 수렴된 것으로 판단하였다.

4. 경계조건

수치해석을 위한 경계조건은 원형 후드의 덕트에 velocity inlet 조건을 주어 2.41 CMM(cubic meter per minute)의 유량으로 배기되도록 하였고, 각각의 개구면은 압력차에 의해 기류가 이동할 수 있도록 설정하였다. 후드의 제어효율 평가를 위해 원소 주기율표상의 15족 계열의 금속이 반응 챔버에서 발생하는 것으로 가정하였으며, 챔버 윗면(후드와 챔버가 만나는 지점의 면)에 $0.1 \text{ kg/m}^2\text{-s}$ 의 에너지를 주었다. 국소배기장치의 성능 평가는 포집 효율 테스트를 통해 평가할 수 있으며(Madsen et al., 1994) 효율 평가 방법은 다음과 같다.

$$CE = \left(1 - \frac{m_{out}}{m_g}\right) \times 100(\%)$$

여기서, CE는 오염물질 제어효율, m_g 는 챔버에서 발생하는 오염물질 발생량, m_{out} 은 후드로 배기되지 못하고 외부로 빠져나가는 양을 나타낸 것이다. 실제 클린룸 내부는 top down 방식의 기류 흐름이 형성되지만, 본 연구에서 상하 기류 및 외부 기류에 대한 영향은 무시하였다. 바닥면을 제외한 나머지 면은 압력차에 의한 자유로운 유동이 발생할 수 있도록 pressure outlet 조건을 주었으며, 기류가 유입되는 후드 개구면에 격자(grid)를 조밀하게 생성하고 난류생성 및 기류 흐름 변화에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화 하였다. 장방형 후드의 격자는 약 300만개, 슬롯후드의 격자는 300~350만개의 비정렬 격자를 형성하였고, 생성된 격자는 Figure 2에 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

1. 후드 타입에 따른 효율 평가 결과

1) 장방형 후드 타입 (Case 1)

장방형으로 30개의 홀(hole)을 설치하였을 때, 덕트와 가까운 곳의 개구면의 표면 유속은 최대 2.56 m/s 까지 고속의 기류 흐름이 유지되지만, 덕트 반대편 쪽의 최소 유속은 0.38 m/s로 개구면 위치에 따른 속도 편차가 큰 것으로 확인되었다. 덕트와 먼 쪽 부분에 실제 기류 흐름이 거의 없어 dead zone이 발생할 우려가 있으며, 오염물질 제어효율은 86.6%로 예측되었다(Table 2, Figure 3).

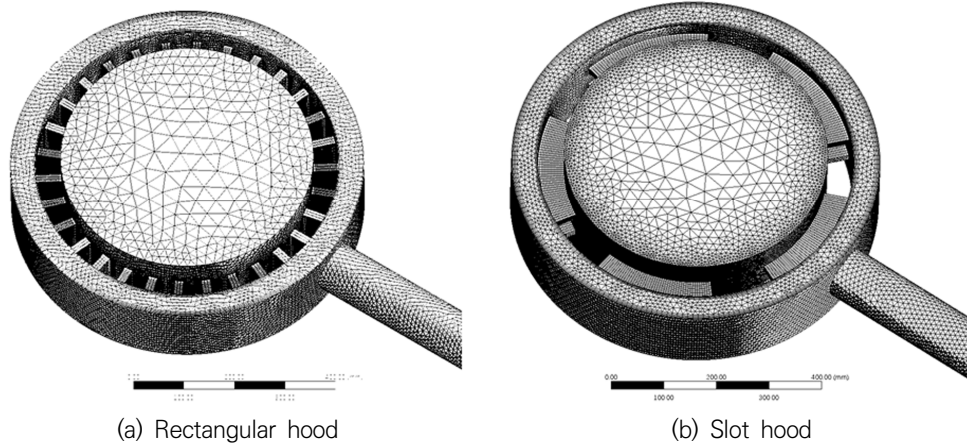


Figure 2. Configuration of hood with the grid pattern

Table 2. Face velocity by location

Point	Face velocity(m/s)	Point	Face velocity(m/s)
1	2.5764	16	0.3798
2	1.9709	17	0.3852
3	2.2031	18	0.3975
4	1.8022	19	0.4225
5	1.4777	20	0.4555
6	1.2186	21	0.5076
7	1.0033	22	0.5731
8	0.8362	23	0.6552
9	0.7077	24	0.7705
10	0.6100	25	0.9109
11	0.5336	26	1.1054
12	0.4797	27	1.3365
13	0.4353	28	1.6321
14	0.4083	29	1.9716
15	0.3941	30	2.3143

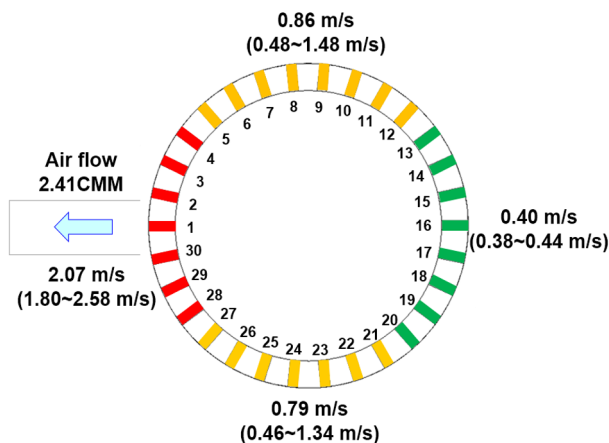


Figure 3. Distribution of velocity

특히 충만실(plenum)의 주 기류에 의한 유동이 개구면 입구로 빠르게 유입되는 기류 유동과 중첩되어 순환되면서 2차 유동이 발생하였다. 충만실 내부 2차 유동은 소용돌이 현상의 와류(rotating swirl)를 생성시킴으로써 충만실 주 기류 방향의 운동량을 감소시키고, 공기 흐름을 저해하며, 오염물질이 정체되는 구간을 형성하였다(Figure 4). 이 정체 구간은 모든 입구 영역에서 확인되었으며, 덕트와 가까울수록 기류 유입속도가 빨라진 와류가 발생되었다. 덕트의 유동속도가 빨라질 경우 많은 파동속도 성분이 발생하게 되고, 이 파동속도 성분은 양쪽의 벽면에서 발생하는 경계층 발달로 두 경계층이 혼합되어 파동속도 성분의 값이 커지게 된다(Lim et al., 1997) 이러한 이유로 인해 난류에너지가 커지고 공기의 흐름이 막혀 배기 효율은 떨어지게 된다. Chen et al.(2007)의 연구에서도 기류의 재순환 영역이 발생한 덕트 구간의 오염물질 농도가 원활한 기류 흐름이 있는 덕트 구간보다 10배 이상 높았다고 보고하고 있다. Joung et al.(2000)은 각 기류들의 충돌로 와류가 발생하고 운동량이 손실되어 제어효율이 저하된다고 하였다. 후드의 오염물질 제어 기능을 최대화하기 위해서는 덕트 내부 와류 생성을 최소화하고 후드 개구면 유속을 균일하게 형성되도록 설계하는 것이 중요하다(Kulmala, 2000).

2) 슬롯 후드 타입 (Case 2)

슬롯 후드는 가로/세로비(ratio)가 0.2 이상인 후드를 말하며(Dalla, 1952), 공기의 흐름을 균일하게 하고 제어효율을 증가시키기 위해 사용되어 진다(Fletcher

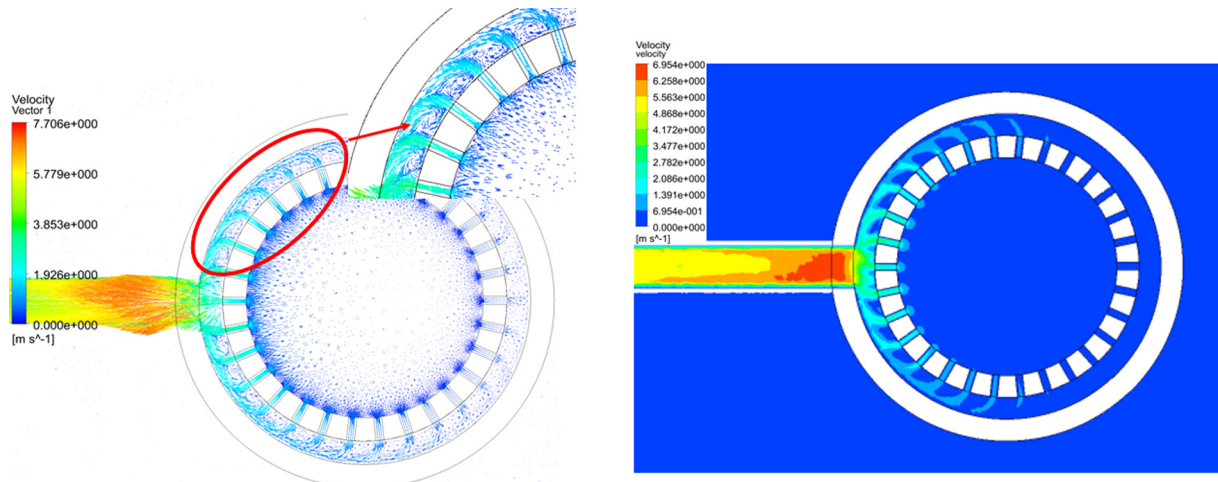


Figure 4. Velocity vector and contour of rectangular hood

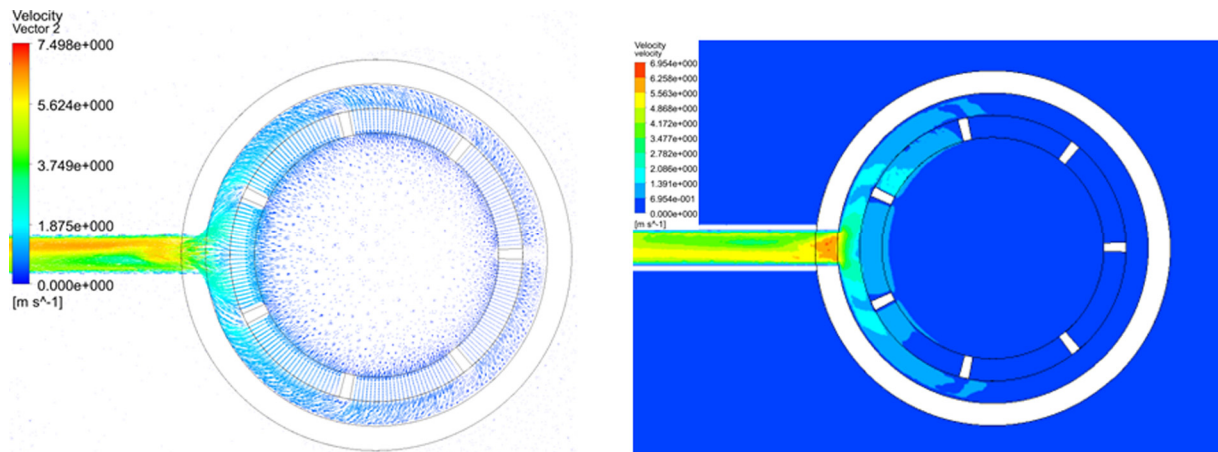


Figure 5. Velocity vector and contour of slot hood

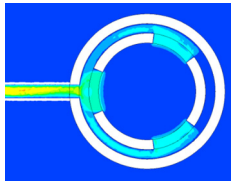
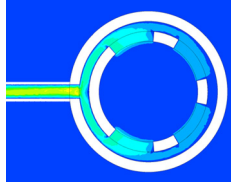
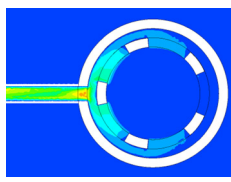
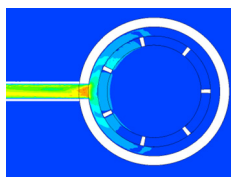
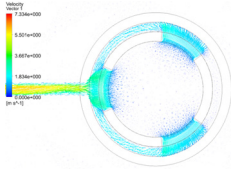
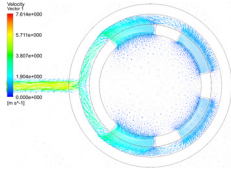
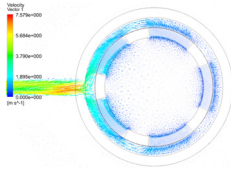
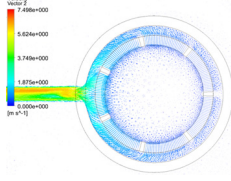
et al., 1982). 동일 유량일 때 개구면을 작게 하여 표면 유속을 높일 수 있으며, 특히 저유량에서 빠른 유속이 필요한 시스템에 적용할 수 있다(Betta et al., 2004). Case 2는 Case 1과 같은 유량, 동일한 원형 후드 형태에 개구면만 슬롯으로 변경하여(슬롯 개수 14개) 유속 분포 및 제어효율을 평가한 것이다. 개구면적이 장방형 후드와 비슷하여 표면 유속 범위와 개구면 유속의 최대, 최소 비율이 유사한 수준이었다. 반면, 오염물질 제어효율은 장방형 후드보다 6.5% 증가한 93.1%로 슬롯 타입이 장방형보다 우수한 것으로 평가되었다. 이는 장방형 후드에서 관찰되었던 와류현상이 슬롯 후드에서는 발생하지 않아 원활한 기류 흐름이 형성되었기 때문으로 판단된다.

Figure 5는 슬롯 후드의 vector 및 속도 분포 contour

를 나타낸 것이다. Iwasaki & Ojima(1997)의 연구에서는 혼합 챔버에 원형의 슬롯후드를 사용했을 때, 작업 중 발생하던 유기용제 및 입자들이 TLV(Threshold Limit Value) 기준 이하로 감소되었고, 특히 200 ppm을 초과하던 methyl ethyl ketone은 슬롯 타입의 원형 후드(circular slot hood) 설치 시 10.12 ppm 수준으로 농도가 감소하였다. 또한 같은 슬롯후드에서도 입구 모양이 원형일 때 사각 형태보다 유입손실계수(entry loss fraction)가 적어서 제어 효율 및 에너지 효율 면에서도 뛰어나다고 보고하고 있다(Iwasaki & Ojima, 1997, IV manual 27th, 2010).

슬롯 타입의 원형 후드는 화학 반응조, 호퍼, 전기 분해 등 수시 또는 주기적으로 개방된 형태로 작업이 진행되는 공정의 오염물질 제어에 효과적인 방법이다

Table 3. Face velocity and capture efficiency by slot number

	Slot hood_6 faces	Slot hood_8 faces	Slot hood_10 faces	Slot hood_14 faces
Velocity contour				
Velocity vector				
Mean velocity(range) (m/s)	2.22 (1.82~2.89)	1.62 (1.15~2.37)	1.35 (0.81~2.18)	0.88 (0.30~1.89)
Velocity ratio	1.59	2.06	2.69	6.30
Capture efficiency(%)	94.1	94.2	94.7	93.1

(Iwasaki & Ojima, 1997). 따라서 본 연구에서는 표면 유속 증가로 균일류 형성이 가능하고, 높은 제어효율을 기대할 수 있는 슬롯 타입을 PM용 후드로 적용하고, 슬롯 개수 변경을 통해 최적의 조건을 찾고자 추가 시뮬레이션(Case 3~5)을 수행하였다.

2. 슬롯 개수에 따른 효율 평가 결과 (Case 2~5)

배기 유량은 동일한 상태에서 슬롯 개수만 변경하였을 때 슬롯 개수가 적을수록 개구면적 감소로 표면 유속은 증가하였으며, 최대/최소 유속비도 줄어드는 것을 확인하였다. Table 3은 슬롯 개수에 따른 표면 유속, 최대/최소 유속비 및 제어효율을 나타낸 것이다. 슬롯 개수가 6개일 때, 평균유속은 2.22 m/s(1.82~2.89 m/s), 최대/최소 유속비는 1.59배로 유속 편차가 가장 낮았다. 슬롯이 8개, 10개일 때는 평균유속 1.62 m/s(1.15~2.37 m/s), 1.35 m/s(0.81~2.18 m/s), 유속비는 각각 2.06, 2.69배로 예측되었다. 슬롯이 14개로 많아 질 때, 장방형(Case 1)과 개구 면적이 비슷하여 표면 유속이 낮고, 균일류 형성이 되지 않았다. 현재 유량에서 슬롯 표면 유속이 최소 0.8 m/s 이상은 유지되도록 설계하여야 최대/최소 유속비가 3배를 넘지 않았다. 제어효율 평가에서 슬롯후드가 10개 일 때(개구면적 : 0.03 m²) 94.7%로 가장 높은 효율을 나타냈으며, 8개, 6개일 때 각각 94.2%, 94.1%로 평가되었다. 슬롯 개수가 10개 이하일 때 슬롯 개수에 따른 제어 효율에는 큰

영향이 없는 것으로 예측되었다.

본 연구에서는 표면 유속, 유속 편차 및 제어효율 평가를 통해 슬롯 개수가 적을수록 효율이 높아지는 것이 확인되었다. 하지만 슬롯 표면 유속이 높다고 흡입력이 증가되는 것은 아니며, 슬롯 속도를 3.3 m/s에서 33 m/s로 변화시켰을 때까지 차이는 크지 않다. 또한 후드 압력 손실은 슬롯속도의 제곱에 비례하므로 손실을 줄이기 위해 가능한 슬롯 속도를 낮추어야 한다(IV manual 27th, 2010). 따라서 PM 전용 후드 설계에서는 반응 챔버에 올릴 수 있는 원형 후드에 슬롯 타입의 개구면을 8~10개로 하여 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 PM 작업 시 적용할 수 있는 후드 설계를 위해 CFD를 이용하였으며, 작업 형태에 따라 후드 이동이 필요 없고, 작업에 방해되지 않도록 챔버에 올려놓고 쓸 수 있는 형태의 후드를 설계하였다. 개구면을 슬롯으로 했을 때 균일류 형성이 잘 되었으며, 층만실에서 와류가 발생되지 않아 오염물질 제어효율도 높았다. 슬롯 속도가 높다고 효율이 높은 것은 아니므로 슬롯 개수는 표면 유속이 1.0 m/s 이상 유지되면서 효율이 높은 8~10개로 제작하는 것이 적당하였다.

공학적 관리를 통한 작업환경 개선은 대체나 차단이

불가능할 경우 적절한 배기 장치 설치와 운영이 가능하도록 하는 것이다. 이때 가장 중요한 것은 작업을 방해하거나 사용에 불편함을 느끼지 않는 것이다. 본 연구에서는 이런 문제점을 최소화하고, 호흡영역 보호 및 주변으로의 오염물질 확산을 제어할 수 있는 방안을 수치해석 방법으로 제시하였다. 산업보건영역에서 CFD의 적용 가능성은 다양하며, 작업환경관리를 위한 효과적인 툴인 것으로 판단된다.

References

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Industrial Ventilation, A Manual of Recommended Practice, 27th ed. Lansing, MI: ACGIH, 2010
- Betta V, Cascetta F, Labruna P, Palombo A. A numerical approach for air velocity predictions in front of exhaust flanged slot openings. *Build. Environ.* 2004;39(1): 9-18 DOI: 10.1016/j.buildenv.2003.07.004
- Burgess WA. Recognition of health hazards in industry, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc.; 1995. p. 227-245
- Burton DJ. Industrial ventilation_A self study companion to the ACGIH ventilation manual. Utah: Carr Printing.; 1994
- Cao Z, Wang Y, Duan M, Zhu H. Study of the vortex principle for improving the efficiency of an exhaust ventilation system. *Energy Build.* 2017;142(1):39-48 DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.03.007
- Cesar PC, Achille C, Kuhn S, Ameloot R. 3D printing in chemical engineering and catalytic technology: structured catalysts, mixers and reactor. *Chem Soc Rev.* 2018;47(1):209-230
- Chen SC, Tsai CJ, Li SN, Shih HY. Dispersion of gas pollutant in a fan-filter-unit(FFU) cleanroom. *Build Environ.* 2007;42(5):1902-1912 DOI:10.1016/j.buildenv.2006.02.023
- Chien CL, Tsai CJ, Ku KW, Li SN. Ventilation control of air pollutant during preventive maintenance of a metal etcher in semiconductor industry. *Aerosol Air Qual Res.* 2007;7(4):469-488 DOI: 10.4209/aaqr.2007.01.0007
- Choi KM, An HC, Kim KS. Identifying the hazard characteristics of powder byproducts generated from semiconductor fabrication processes. *J Occup Environ Hyg.* 2015a; 12(2): 114-122 DOI: 10.1080/15459624.2014.955178.
- Choi KM, Kim JH, Park JH, Kim KS, Bae GN (2015b) Exposure characteristics of nanoparticles as process by-products for the semiconductor manufacturing industry. *J Occup Environ Hyg.* 2015b;12(8):153-160 DOI: 10.1080/15459624.2015.1009983
- Choi KM. Airborne PM2.5 characteristics in semiconductor manufacturing facilities. *AIMS Environ Sci.* 2018; 5(3):216-228 DOI: 10.3934/environsci.2018.3.216
- Dalla Valle JM. Exhaust hoods. 2th ed. New York: Industrial Press; 1952. pp.1-146
- Fletcher B. Centreline velocity characteristics of local exhaust ventilation hoods. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1982;43(8):626-627 DOI: 10.1080/15298668291410305
- Goodfellow HD. Industrial ventilation design guidebook. San Diego: Academic Press; 2001
- Gu KW. Pollutants dispersion control during the maintenance of metal etching machine in semiconductor industry. Master's thesis, Taiwan Chiao Tung University, Taiwan. 2003
- Ha HC, Kim TH, Shim KJ. Applicability of computational fluid dynamics on industrial ventilation engineering. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 1998;8(2):163-177
- Ha HC, Jung YJ, Kim TH. Estimation of ventilation rates for general gravity ventilator. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2002a;12(1):27-34
- Ha HC & Kim TH. Characteristics of ventilation efficiency for various gravity ventilators. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2002b;12(1):35-45
- Ha HC & Kim TH. Estimation of ventilation rates for general gravity ventilator with width and height. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2003;13(1):35-44
- Huang SH, Shih HY, Li SN, Chen SC, Tsai CJ. Spatial and temporal distributions of a gaseous pollutant during simulated preventive maintenance and pipe leaking events in a working cleanroom. *IEEE Trans Semicond Manuf.* 2009;22(3):391-398
- Iwasaki T & Ojima J. Design of a circular slot hood for a local exhaust system and its application to a mixing process for fine particles and organic solvents. *Ind Health.* 1997;35(1):135-142
- Joung JM, Kim JH, Yoo YT. A characteristics of a secondary flow in a corner section of square duct. *Korean Soc Mech Eng.* 2000;36(16):753-758
- Jung YJ, Kim HT, Ha CH, Kim TH. Prediction of worker's exposure in a uniform free stream. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2000;10(2):140-149
- Jung YJ, Ha HC, Kim TH, Yoo GJ. Prediction of airflow and temperature field in a room with convective heat source. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2001;11(1): 78-84

- Kavli HP, Oquz E, Tezdogan T. A comparative study on the design of an environmentally friendly RoPax ferry using CFD. *Ocean Eng.* 2017;137(1):22–37 DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.03.043
- Kim TH, Ha HC, Park SC, Kim JC. Ventilation strategy for final test line in automobile assembly factory. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2004;14(1):1–12
- Kulmala I. Experimental validation of potential and turbulent flow models for a two-dimensional jet enhanced exhaust hood. *Am Ind Hyg Assoc J.* 2000;61(2):183–191
- Lee SW, Kim TH, Kim JM, Kim JC. A valuation and improvement of industrial ventilation system of printing process in synthetic leather factory using dimethylformamide. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2009;19(2):113–126
- Li J & Zhou YF. Occupational hazards control of hazardous substances in clean room of semiconductor manufacturing plant using CFD analysis. *Toxicol Ind Health.* 2015;31(2):123–139 DOI: 10.1177/0748233712469996
- Li J, Fei ZY, Xu YF, Wang J, Fan BF et al. Study on the optimization of the deposition rate of planetary GAN-MOCVD films based on CFD simulation and the corresponding surface model. *R Soc Open Sci.* 2018;5:1–17 DOI: 10.1098/rsos.171757
- Lim JH & Kim TH. Improvement of hot work environment in the curing processes of a tire manufacturing company. *J Korean Soc Occup Environ Hyg.* 2011;21(1):1–10
- Lim MT, Jeong KB, Choi YC and Yoo YT. A study on the corner flow characteristics in the entrance region of a square duct. *J Archit Inst Korea Struct Constr.* 1997;13(4):285–293
- Madsen U, Breum No, Nielsen PV. Local exhaust ventilation_a numerical and experimental study of capture efficiency. *Build Environ.* 1994;29(3):319–323 DOI: 10.1016/0360-1323(94) 90029-9
- Park SH, Shin JA, Park HH, Yi KY, Chung KW et al. Exposure to volatile organic compounds and possibility of exposure to by-product volatile organic compounds in photolithography processes in semiconductor manufacturing factories. *Saf Health Work.* 2011;2(3):210–217 DOI: 10.5491/SHAW.2011.2.3.210
- Rabehi R, Chaker A, Aouachria Z, Tingzhen M. CFD analysis on the performance of a solar chimney power plant system: Case study in Algeria. *Int J Green Energy.* 2017;14(12):971–982 DOI: 10.1080/1543 5075.2017.1339043
- Robert WL. The history of multiphase science and computational fluid dynamics. Switzerland: Springer; 2017. p.185–187 DOI: 10.1007/978-3-319-66502-3
- Shih HY, Huang SH, Li SN, Chen SC, Tsai CJ. Simulation and testing of pollutant dispersion during preventive maintenance in a cleanroom. *Build Environ.* 2009;44(12):2319–2326 DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.03.018
- Shih YC, Yang AS, Lu CW. Using air curtain to control pollutant spreading for emergency management in a cleanroom. *Build Environ.* 2011;46(5):1104–1114 DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.11.011
- Statista, Semiconductor sales revenue worldwide from 1987 to 2018, April. 20, 2018. Available from URL: <https://www.statista.com/statistics/266973/global-semiconductor-sales-since-1988/>
- Yoo SJ, Kang JW, Yang JH. A study on evaluation of ventilation efficiency from ventilation system and volume in the small printing facilities using CFD. *J Archit Inst Korea Plan Des.* 2013;29(6):263–270 DOI: 10.3130/jaabe.15.119
- Weerasuriya AU, Hu ZZ, Zhang XL, Tse KT, Li S, et al. New inflow boundary conditions for modeling twisted wind profiles in CFD simulation for evaluating the pedestrian-level wind field near an isolated building. *Build Environ.* 2018;132(15): 303–318 DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.01.047

홍좌령(SP), 구재한(SP), 박창섭(PP), 최광민(PP)

SP : Senior Professional

PP : Principal Professional