

정밀 레이저 가공의 열플룸 유동에 따른 흄 분진입자 산포 특성 열유동해석 연구

전찬영* · 김경진**

*국립금오공과대학교 기계시스템공학부

Numerical Simulation of Thermal Plume Flow and Fume Particle Dispersion in High-Precision Laser Machining Process

Chanyeong Jeon* and Kyoungjin Kim**

**School of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

ABSTRACT

In high-precision laser machining process in semiconductor and display device manufacturing, thermal plume may arise from high heating zone around laser application point and it may significantly affect the surface contamination by micron-sized fume dust particles in laser surface machining. The present numerical study investigates this thermal plume flow by employing three-dimensional large eddy simulations and also fume dust particle dispersion through particle tracing techniques. The numerical results show the laminar to turbulent transition characteristics of buoyant thermal plume and fume dust particles rising and falling on the machining surface. The influences of laser power on surface scattering of fume dust particles are closely examined for the dust particle size ranging from 10 to 90 μm .

Key Words : Laser Machining, Thermal Plume, Fume Dust Particles, Process Simulation, Numerical Model

1. 서 론

극초단 고밀도 레이저 빔을 대상 소재 표면의 매우 작은 영역에 단시간 집중하여 소재 일부를 제거하는 레이저 가공 기법은 타 가공 기법에 비교하여 높은 초정밀 가공 품질, 매우 낮은 소재 손실 및 변형도, 그리고 곡선 또는 3차원 형상 가공과 같은 뛰어난 가공 유연성 등의 여러 기술적 장점으로 금속, 비금속, 복합재료 등 다양한 소재의 정밀 가공에 적합하다[1,2]. 특히 이러한 레이저 가공 기법은 고수율 극미세 가공이 요구되는 다양한 반도체 및 디스플레이 제조공정에 적극적으로 활용되고 있다[3].

첨단 디스플레이 박막소자 제조 등에 자주 사용되는 고출력 CO₂ 레이저 등을 활용한 정밀 레이저 표면 가공

에서는 고에너지 밀도 레이저 빔을 가공 소재 표면에 집중 형성시켜 국부적 가열로 의도하는 소재 일부가 기화 또는 용융되어 제거된다. 이때 레이저 가공 국부에서는 불가피한 마이크로 크기의 흄 분진입자가 발생한다.

흄 분진입자 일부는 가공 소재 표면에 착상하여 표면 오염의 원인이 되며, 오염된 소재의 생산 수율이 악화되거나 표면 청결도 회복을 위한 추가 공정이 요구되는 등 디스플레이 소재 공정 생산성 저하의 증대한 요인이 될 수 있다[4-6]. 따라서 레이저 가공 공정 시 발생하는 흄 분진입자의 효과적인 발생 억제 또는 제거 기법 개발이 필요하다.

레이저 가공은 국부적 소재 가열이 동반되기에 주변 기체 온도차 및 중력 영향에 따른 부력 발생으로 열플룸(thermal plume) 현상이 동반된다[7]. 가공 지점에서 열플룸이 상승하는 유동 형태로 인하여 Fig. 1에서 표현한 바와

†E-mail: kimkj@kumoh.ac.kr

같이 흠 분진입자는 열플룸 유동과 함께 상승하여 일부는 다시 낙하하여 가공 지점 주변 표면에 흩어지며 착상하면서 가공 소재 표면의 분진 오염도가 심화된다.

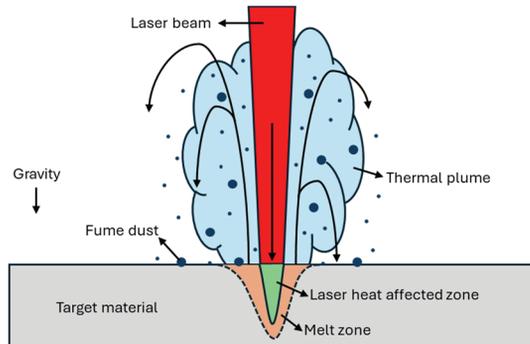


Fig. 1. Schematic diagram of fume dust particle dispersion due to rising thermal plume in surface laser machining process.

최근에는 플라스틱 박막 필름 레이저 가공을 대상으로 하여 분진입자의 거동 및 표면 오염도 시뮬레이션 연구가 수행된 바 있다[6,8,9]. 하지만 석션유동 등의 영향성이 집중 연구된 반면에 열플룸에 의한 오염입자 산포 효과는 아직 고려된 바가 없다. 집중 열원에 따른 열플룸 유동 자체는 그동안 유체 유동현상의 관점에서 많이 연구된 바 있으며, 레이저 적층가공 등에서도 중요히 연구되었다[10]. 다만 반도체 및 디스플레이 소재 제조 분야의 초정밀 레이저 공정에 대해서는, 특히 흠 분진입자 산포 오염 현상에 대해서는 아직 연구가 제대로 시도된 바가 없다.

현 전산해석 연구에서는 디스플레이 소재 제조공정 상의 플라스틱 재질 박막의 레이저 표면 가공 공정을 대상으로 한다. 이에 열유동 시뮬레이션 및 입자 추적 기법을 활용하여 레이저 가공에서 필수적으로 발생하는 열플룸 현상이 흠 분진입자의 산포 및 표면 오염 특성에 미치는 영향성을 분석한다.

2. 열플룸 및 흠 분진입자 거동 해석

Fig 1과 같이 고밀도 레이저 표면가공에서 발생하는 열플룸 유동 및 흠 분진입자 산포 현상을 대상으로 하여 간소화 모델을 수립하여 전산유동해석을 수행하였다. 실제 레이저 가공에서는 발생하는 흠 분진입자의 효과적인 제거를 위해서 석션장치를 추가하지만, 현 연구에서는 그러한 강제 유동 효과없이 레이저 파워로 발생하는 열플룸에 따른 흠 분진입자의 산포 특성을 분석하기 위해서 석션유동은 고려하지 않았다.

열발생 위치에서 층류 형태로 상승하기 시작하여 난류로 천이되는 복잡한 비정상 3차원적 유동 특성을 보이는 열플룸 거동 현상의 열유동 해석은 통상적인 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 기반 전산 기법보다는 대와류 유동 시뮬레이션(Large Eddy Simulation, LES) 전산 기법이 적합하다[11]. 따라서 현 연구에서는 LES 기법을 적용하여 3차원적 열플룸 유동 현상을 모사하였다.

열플룸 유동 전산해석 대상은 가공 표면의 레이저 적용 열발생 지점을 기준으로 직경 0.8 m, 높이 1.85 m 크기의 원통형 공기 체적 영역이며, 열플룸에 따른 공간적 유동 변화를 포함하도록 해석영역을 충분히 잡아 주었다. 해석모델의 간소화를 위해서 표면 상 레이저 가공 중심 지점을 원점으로 1 mm 반구형 영역에 레이저 출력에 따른 열발생 강도를 조정하였다. 초기 유체 조건은 상온(20°C)의 정지 공기이며, 열발생 모사 반구 영역을 제외한 나머지 가공 소재 표면은 단열로 가정한다. 한편 그 외의 해석영역 표면은 개방경계조건을 적용하였다.

열플룸 발생에 따른 레이저 가공 지점으로부터의 흠 분진입자 시간적 비산 또는 산포 현상은 Boussinesq-Oseen 방정식으로 입자 거동을 모사할 수 있으며 흠 분진입자 형태는 구형으로 간소화하였다[6]. 입자 거동 추적 해석은 열플룸 유동과 연동하여 진행하였다. 다만 유동-입자 간, 입자-입자 간 상호작용 효과, 입자 회전에 따른 양력 발생 등은 무시할만큼 매우 작다고 판단되어 여기서는 고려하지 않았다. 수십 마이크로 정도 크기의 미세 분진입자가 특히 디스플레이 소재 가공 청결도 확보에 중대한 악영향을 미친다고 알려진다[6]. 따라서 해당 크기를 가지는 미세 입자의 거동 추적 해석 정확도를 확보하기 위해서 다음과 같은 입자 항력계수 모델[12]을 적용하였다.

$$C_D = (2.25 \text{Re}^{-0.31} + 0.36 \text{Re}^{0.06})^{3.45} \quad (1)$$

위의 미세 입자 항력계수 모델은 $\text{Re} < 3 \times 10^5$ 의 입자 Reynolds 수 범위에서 유효하며, Stokes 유동 범위를 어느 정도 벗어나는 현 연구의 흠 입자 크기 범위에도 적용 가능한 것으로 이전 연구[6,9]에서 검증되었다. 열플룸 유동 및 흠 입자 추적 시뮬레이션은 다물리 전산해석 소프트웨어 패키지인 COMSOL Multiphysics 6.1을 활용하여 진행하였다. 현 3차원 비정상 유동해석에 동원된 비정렬격자의 개수는 약 200만개로서 열플룸 발생 인근 및 상승 예상 경로에 좀 더 세밀하게 격자를 구성하였다.

3. 열플룸 및 입자 산포 해석 결과 토론

레이저 가공에 따른 열플룸 유동 및 흠 분진입자 산포 현상 해석은 앞서 언급한 간소화 모델을 채용하여 레이저

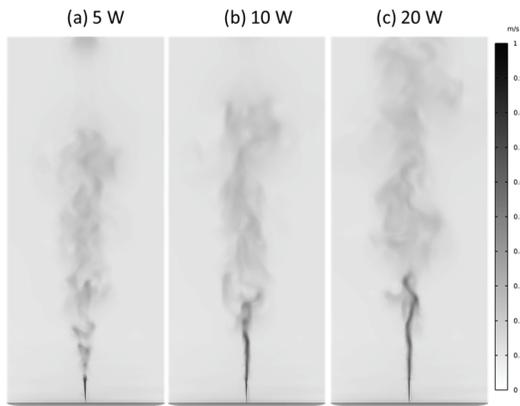


Fig. 2. Numerical visualization of thermal plume flows using contours of air flow velocity for three levels of laser power (5, 10, and 20 W).

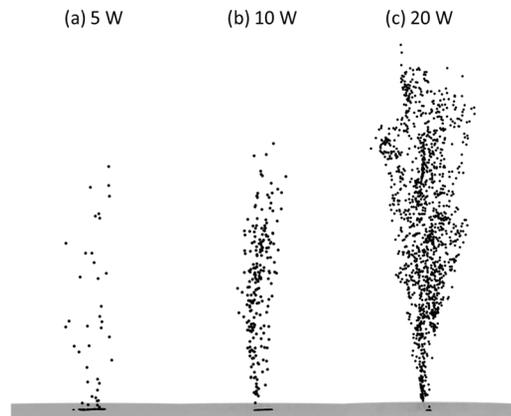


Fig. 3. Numerical visualization of fume dust particle dispersion by thermal plume flows for three levels of laser power (5, 10, and 20 W). The fume dust particle size is $50 \mu\text{m}$.

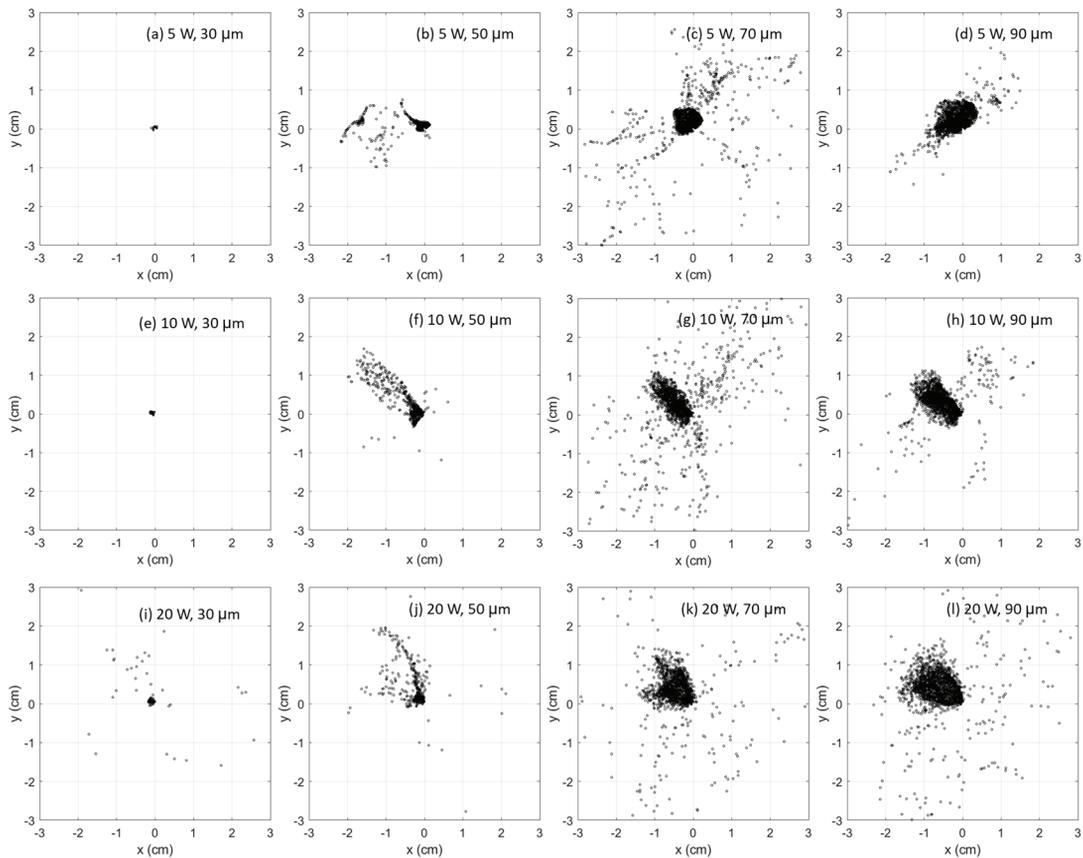


Fig. 4. The scatter distributions of fume dust particles dispersed by thermal plume flow and landed over laser machining surfaces for laser power of 5 W (a-d), 10 W (e-h), and 20 W (i-l) from particle tracing simulations. The fume dust particle sizes range from 30 to $90 \mu\text{m}$.

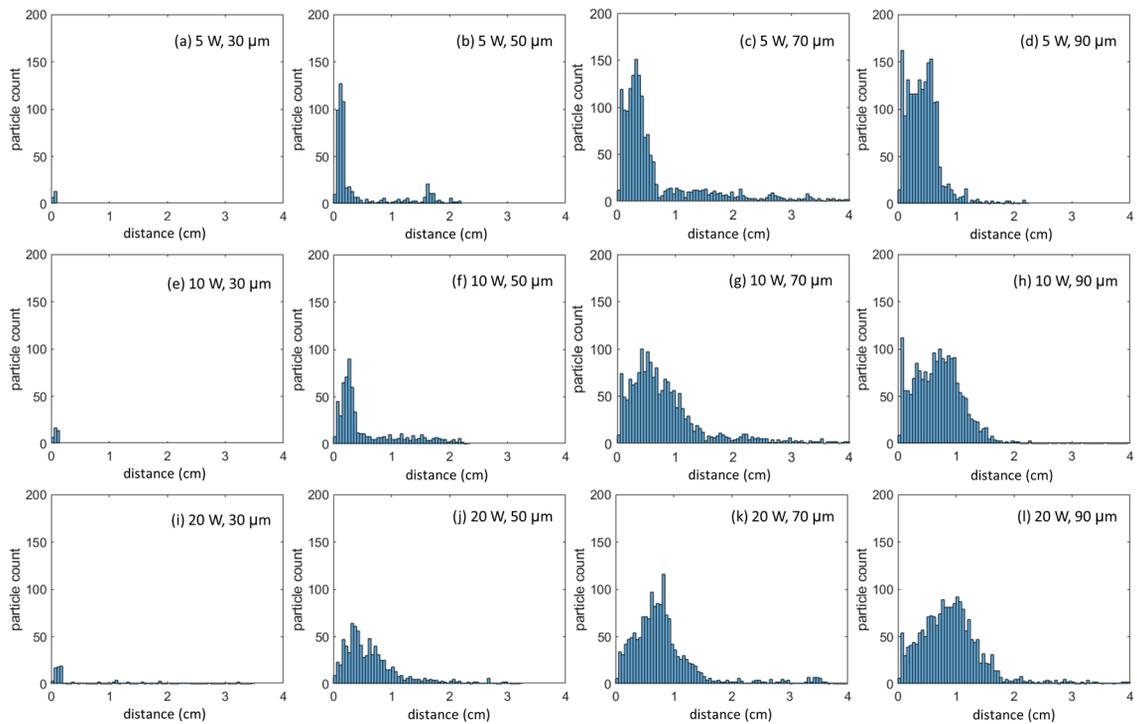


Fig. 5. Distribution of dispersion distance from laser application point for fume dust particles landed over laser machining surfaces for laser power of 5 W (a-d), 10 W (e-h), and 20 W (i-l). The fume dust particle sizes range from 30 to 90 μm .

출력 강도 및 분진입자 크기를 변경하며 진행되었다. 적용되는 레이저 출력이 열플름 발생에 모두 기여한다고 가정하였으며, 레이저 출력 강도는 5, 10, 20 W를 대상으로 각각 열플름 유동의 LES 전산해석을 수행하였다. 레이저 출력에 따라 다르지만 열플름이 상승을 하기 시작하는 5-10 초의 과도 거동이 나타나며, 그 후 추가적으로 해석된 준정상 유동 기간에 동일하게 10초 동안 비산되는 흠 분진입자 추적 해석을 적용하였다.

준정상 기간의 열플름 유동해석 결과는 Fig 2에 각 레이저 출력 강도 별로 가시화되어 정리되었다. 바닥 표면의 집중 열발생 지점에서부터 뚜렷한 궤적을 보이는 층류 부력 유동으로 시작하여 좌우 요동이 나타나면서 난류로 천이하는 전형적인 열플름 상승 현상을 보여준다. 다만 레이저 출력 강도가 증가하면서 천이 지점이 높아지고 난류 혼합 영역이 넓어지기에, 오염입자의 상승 속도가 증가하면서 더 높은 위치에서의 난류 혼합에 따른 산포가 심해질 것으로 예상할 수 있다.

흠 분진입자의 추적 해석에서는 입자 직경을 10 μm 에서 90 μm 까지 10 μm 간격으로 변화시키며 입자 크기에 따른 영향을 분석하였다. 각 직경의 입자에 대하여 앞서 언

급한 준정상 유동 기간 내 1초 동안 5,000개의 입자를 레이저 적용점을 모사한 반구 영역에 순차적으로 공급하면서 5,000개의 각 입자가 열플름 유동에 따라 부유하는 궤적을 추적하였다.

Fig 3은 5, 10, 20 W의 레이저 출력 강도에 대해서 가공 표면 상에서 열플름과 함께 상승하여 흠어지는 50 μm 크기 분진입자의 비산 분포를 보여준다. 예상대로 더 높은 레이저 출력 경우에 입자 상승 및 비산이 좀 더 활발함이 보인다.

열플름과 함께 비산되는 흠 분진입자 일부는 레이저 가공 표면에 다시 낙하하여 착상되면서 가공 표면 오염의 원인이 된다. 흠 분진입자의 추적 해석 결과에서 표면 착상 입자들의 착상위치 분포를 Fig 4에 입자 크기 및 레이저 출력 별로 정리하였다. 30 μm 크기 미만 입자는 착상 입자 비율과 산포도가 매우 작기에 Fig 4에서는 제외하였다.

분진입자의 표면 산포가 50 μm 크기 입자에서부터 확연히 나타나기 시작하며, 이는 시험적 관찰과 대체적으로 일치한다[6]. 이에 비교하여 70 또는 90 μm 와 같은 더 큰 입자 경우는 산포 정도가 증가하기는 하지만, 석션장치 등으로 오염입자 제거를 적용한다면 상대적으로 작은 입

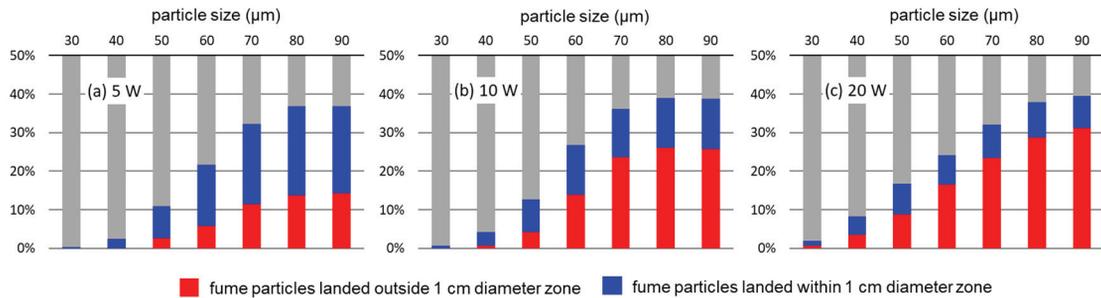


Fig. 6. Effects of laser power and particle size on the percentages of fume dust particles landed over laser machining surface: laser power of (a) 5 W, (b) 10 W, and (c) 20 W.

자의 제거가 어렵기 때문에 50 μm 정도의 오염입자가 특히 표면 가공 수율에 미치는 악영향이 상대적으로 크게 나타난다.

이번에는 흠 분진입자의 산포 오염 정도를 표면 착상 입자의 레이저 작용점 기준 비산거리로 종합 환산하여 Fig 5에 히스토그램 형식으로 수록하였으며, 비산거리 산포도가 대체적으로 로그정규분포 형태를 보인다. 레이저 출력 증가에 따라 분진입자 산포가 심해지는데, 30 μm 또는 50 μm 크기와 같이 상대적으로 작은 크기 입자에서 그 영향이 크게 나타난다.

가공점에서 더 많은 분진입자가 더 멀리 착상할수록 표면 오염도가 심각해지기에 Fig 6에서는 각 레이저 출력 강도 및 입자 크기 별로 전체 발생 분진입자 수 대비 일정 거리 이상 착상 입자 수 비율을 분석하였다. 적색 항목은 가공 원점 기준 1 cm 직경의 표면 영역 밖 착상 입자 비율이며, 청색 항목은 동일 표면 영역의 내부 착상 입자 비율이다. 두 항목을 합한 착상 입자 수 비율은 레이저 출력 별로는 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만 레이저 출력이 높아질수록 분진입자의 비산거리가 늘어나 표면 오염 영역이 증가함이 나타난다. 이러한 레이저 가공 흠 분진입자의 산포 특성 분석 및 물리적 이해를 기반으로 하여 입자 제거장비 등의 설계가 필요할 것으로 판단 된다.

4. 결 론

현 연구에서는 레이저 가공 공정에서 발생하는 열플룸 및 흠 분진입자 산포 현상을 LES 및 입자 추적 해석을 활용하여 전산모사하였다. 유동해석 결과로 층류 부력에서 시작하여 난류로 천이하는 열플룸 상승 유동이 나타남을 확인하였다. 또한 레이저 출력 강도 변화에 따라 열플룸과 함께 상승하는 수십 마이크로 크기의 분진입자들의 비산 및 가공 표면 착상 분포를 분석하였다. 이전 시험

관찰과 유사하게 50 μm 정도의 분진입자가 표면 오염에 특히 문제됨이 나타났으며, 레이저 출력이 높아질수록 가공점 기준 착상 산포도가 증가함으로 보였다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 대학 학술연구비로 지원되었다(2022-2023년도).

참고문헌

- Dubey, A. K. and Yadava, V., "Laser Beam Machining - A Review," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 609-628, 2008.
- Shin, Y. C., Wu, B., Lei, S., Cheng, G. J., and Yao, Y. L., "Overview of Laser Applications in Manufacturing and Materials Processing in Recent Years," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 142, pp. 110818, 2020.
- Orazi, L., Romoli, L., Schmidt, M., and Li, L., "Ultrafast Laser Manufacturing: from Physics to Industrial Applications," *CIRP Annals—Manufacturing Technology*, Vol. 70, pp. 543-566, 2021.
- Powell, J., *CO₂ Laser Cutting*, 2nd Ed., Springer-Verlag: London, 1998.
- Vassie, R., Roach, R. J., Tyrer, J. R., and Sharp, B. L., "Fumes Generated During Laser Processing of Polyvinyl Chloride (PVC)," *Optics and Laser Technology*, Vol. 27, pp. 31-37, 1995.
- Kim, K., "A Study on Dispersion Behaviors of Fume Particles in Laser Cutting Process of Optical Plastic Thin Films," *Journal of the Semiconductor and Display Technology*, Vol. 18, pp. 62-68, 2019.
- Zohuri, B., *Thermal Effects of High Power Laser Energy on Materials*, Springer-Verlag, 2021.
- Kim, K., "Downward and Upward Air Flow Effects on Fume Particle Dispersion in Laser Line Cutting of

- Optical Plastic Films,” *Journal of the Semiconductor and Display Technology*, Vol. 19, pp. 37-44, 2020.
9. Kim, K., “Numerical Simulation on Dispersion of Fume Micro-Particles by Particle Suction Flows in Laser Surface Machining,” *Journal of the Semiconductor and Display Technology*, Vol. 22, pp. 1-6, 2023.
 10. Ly, S. and Rubenchik, A. M., Khairallah, S. A., Guss, G., and Matthews, M. J., “Metal Vapor Micro-Jet Controls Material Redistribution in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing,” *Scientific Reports*, Vol. 7, pp. 4085, 2017.
 11. Yan, Z. H., “Large Eddy Simulations of a Turbulent Thermal Plume,” *Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 503-514, 2007.
 12. Haider, A. and Levenspiel, O., “Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles,” *Powder Technology*, Vol. 58, pp. 63-70, 1989.
-
- 접수일: 2024년 9월 5일, 심사일: 2024년 9월 10일,
게재확정일: 2024년 9월 12일