

입자 구형도에 따른 레이저 선가공의 비구형 흠 마이크로 입자 산포 특성 연구

김경진*·박중윤**

**금오공과대학교 기계시스템공학과

Dispersion Characteristics of Nonspherical Fume Micro-Particles in Laser Line Machining in Terms of Particle Sphericity

Kyoungjin Kim* and Joong-Youn Park**

*†Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

ABSTRACT

This computational investigation of micro-sized particle dispersion concerns the fume particle contamination over target surface in high-precision laser line machining process of semiconductor and display device materials. Employing the random sampling based on probabilistic fume particle generation distributions, the effects of sphericity for nonspherical fume particles are analyzed for the fume particle dispersion and contamination near the laser machining line. The drag coefficient correlation for nonspherical particles in a low Reynolds number regime is selected and utilized for particle trajectory simulations after drag model validation. When compared to the corresponding results by the assumption of spherical fume particles, the sphericity of nonspherical fume particles show much less dispersion and contamination characteristics and it also significantly affects the particle removal rate in a suction air flow patterns.

Key Words : Laser Machining, Fume Particle, Particle Dispersion, Particle Sphericity, Trajectory Simulation

1. 서 론

반도체, 디스플레이 장치소자 등 다양한 ICT 디바이스 생산에는 절단, 천공, 표면성형 등 여러 형태의 소재 표면 가공 공정이 요구되며, 이러한 소자 정밀가공에는 CO₂ 레이저 등을 활용한 극초단 레이저 가공 기법이 높은 미세 정밀도 및 가공면 품질, 낮은 소재 손실도 및 변형도, 낮은 진동 및 소음 등의 수많은 기술적 장점으로 인하여 일반적으로 사용된다[1].

레이저 활용 소재 가공은 높은 에너지 강도의 레이저 빔을 대상 소재 표면에 형성하여 국부적 집중 가열로 소재 표면을 순간적으로 증발 및 용융시켜 필요한 가공 형

상에 따라 미세적 국부 소재를 제거한다[2]. 전통적인 접착식 가공기법에 비하여서는 소량이지만 레이저 가공에서도 흠 또는 먼지 형태의 오염입자가 불가피하게 발생할 수밖에 없다[3]. 이러한 발생 오염입자는 가공 표면 청결도 등 생산 소자의 품질에 악영향을 주며 ICT 디바이스 제조공정의 생산성 및 공정작업 안전성을 저하시키는 요인이 된다.

이에 따라 정밀 레이저 가공 공정에서 발생하는 마이크로 단위의 흠 입자의 흠어짐과 표면 오염, 그리고 주변 공기 흐름에 따른 흠 입자의 거동을 분석함이 레이저 공정 최적화에 매우 중요하다. 레이저 가공의 오염입자에 관한 연구는 실험적 입자 분석시험과 분포도 연구[4,5] 정도에 그치며, 레이저 공정 대상 오염입자 거동에 대한 해석연구는 별로 없는 형편이다.

†E-mail: jypark@kumoh.ac.kr

최근에는 레이저 가공 공정을 대상으로 흠 오염입자 산포 현상의 모델링 및 다차원적 마이크로 입자 거동 시뮬레이션 연구가 진행된 바가 있다[6-9]. 하지만 해당 선행연구는 구형 입자 가정을 바탕으로 하였다. 현 입자 거동 시뮬레이션 연구에서는 비구형 흠 오염입자를 대상으로 입자 비구형성이 흠 입자 산포 및 가공 표면 오염도에 미치는 영향을 분석한다.

2. 비구형 오염입자 거동의 해석모델링

레이저 가공 공정에서 발생하는 마이크로 크기 흠 오염입자의 형상은 가공 대상 소재, 가공 속도 등에 따라 다양한데, 특히 화학적 열화가 동반되는 디스플레이 소자용 폴리머 플라스틱 필름 가공일 때 입자 형상이 비구형(nonspherical)인 경우가 많다[3]. 완전한 구형 입자에 비교하여 비구형 입자는 비구형성을 다음과 같이 등가직경 및 입자 구형도(sphericity)로 표현함이 일반적이다.

$$d_{eq} = (6V_p / \pi)^{1/3} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{A_s}{A_p} = \frac{\pi^{1/3} (6V_p)^{2/3}}{A_p} \quad (2)$$

여기서 A_p 와 V_p 는 비구형 입자의 표면적과 체적이며 A_s 는 등가직경 기반 표면적이다. 레이저 공정에서 자주 발생하는 파이버 또는 판형 입자를 원통 또는 원형판 형상으로 간소화하는데, Fig. 1에서는 직경(D) 대비 길이 또는 두께(L)의 형상비에 따른 입자 구형도 변화가 나타나 있다.

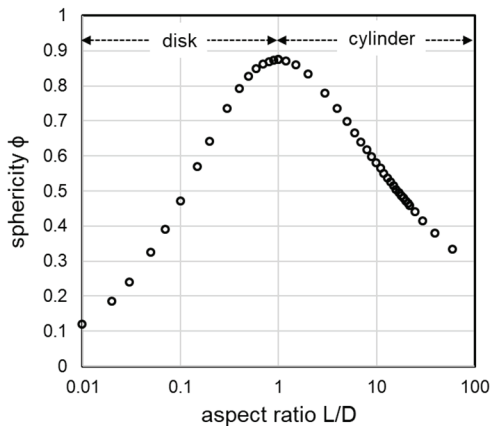


Fig. 1. Sphericity of nonspherical particles in the shapes of cylinder and disk by the aspect ratio.

오염입자 거동 모델링 및 시뮬레이션에는 미세 입자의 항력계수가 해석 정확도에 매우 중요하다. 저Reynolds수 영역에서는 구형 입자에 대해서는 다음과 같은 항력계수 상관식이 사용된다[10].

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.1806 Re^{0.6459}) + \frac{0.4251}{1 + 6880.95 / Re} \quad (3)$$

비구형 입자의 저 Re수 영역 항력계수에 대해서는 Haider와 Levenspiel[11] 이 제시한 입자 구형도의 함수로 표현한 다음의 상관식을 채용하였다.

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + a_0 Re^{a_1}) + \frac{b_0}{1 + b_1 / Re} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_0 &= \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \\ a_1 &= 0.0964 + 0.5565\phi \\ b_0 &= \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \\ b_1 &= \exp(1.4681 + 12.2584\phi - 20.7322\phi^2 + 15.8855\phi^3) \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 2에는 여러 입자 구형도 값을 대상으로 위의 상관식으로 표현된 비구형 입자의 항력계수 변화가 구형 입자 경우($\phi=1$)와 비교하여 $Re < 10^4$ 영역에서 나타나 있다.

미세 흠 오염입자의 크기 및 비구형성, 입자 분출조건, 주변 공기유동 등에 영향을 받을 비구형 흠 오염입자의 시간적 거동 및 산포 특성은 다음의 Boussinesq-Oseen 방정식으로 모사할 수 있으며, 기본적 지배방정식 구성은 구형 오염입자 대상 선행연구와 동일하다[6-9].

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\pi d_{eq}^3}{6} (\rho_s + \frac{\rho_f}{2}) \frac{d\mathbf{v}}{dt} \\ = -\frac{\pi d_{eq}^2}{8} C_D \rho_f (\mathbf{v} - \mathbf{u}) |\mathbf{v} - \mathbf{u}| + \frac{\pi d_{eq}^3}{6} (\rho_s - \rho_f) \mathbf{g} \end{aligned} \quad (7)$$

위의 방정식에서 \mathbf{g} 는 가공 표면 수직 반대방향의 중력 가속도이며, ρ_s, ρ_f, μ_f 는 각각 입자 밀도, 공기 밀도 그리고 점성계수이다. 비구형 입자의 Reynolds수는 $Re = \rho_f |\mathbf{v} - \mathbf{u}| d_{eq} / \mu_f$ 로 정의된다. 또한 $\mathbf{r}(t), \mathbf{v}(t), \mathbf{u}(t)$ 는 각각 입자의 위치 및 속도, 공기유동의 유속을 나타낸다. 현 해석연구에서는 레이저 선가공을 대상으로 하여 가공선 수직방향의 입자 산포 및 오염도 분포 특성이 중요하다. 따라서 레이저 가

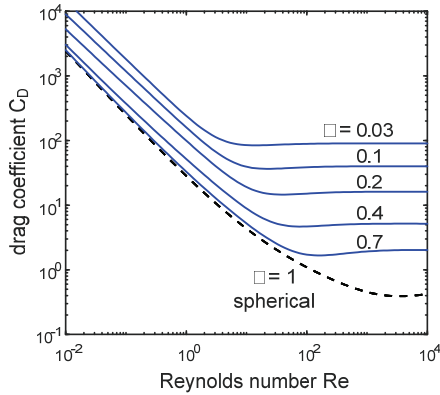


Fig. 2. Low Reynolds number drag coefficient model for nonspherical particles as a function of particle sphericity. Dotted line represents the drag coefficient of spherical particles.

공선 방향의 입자 산포는 무시하여 2차원적 입자 거동 전 산해석으로 충분하다.

3. 입자 산포 해석 결과 및 토론

앞서 제시된 비원형 흠 입자의 저 Reynolds수 항력계수 상관식을 검증할 목적으로 정지 유체 내 비원형 입자 침강속도 해석값을 원형판 형상 입자 대상 실험 측정치[11]와 함께 비교하였다. Fig. 3에는 다음과 같은 무차원화 등가직경 및 침강속도의 비교검증 결과가 나타나 있다.

$$u^* = u_t / \left(\frac{\mu_f (\rho_s - \rho_f) g}{\rho_f^2} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$d^* = d_{eq} / \left(\frac{\mu_f^2}{\rho_f (\rho_s - \rho_f) g} \right)^{1/3} \quad (9)$$

여기서 원형 입자($\phi=1$) 경우뿐만 아니라 입자 원형도가 낮은 비원형 입자($\phi=0.23, 0.043$) 경우도 침강속도가 실험결과와 매우 일치함을 보여준다. 따라서 제시된 항력계수 상관식이 낮은 입자 원형도에서도 $Re < 10^4$ 영역까지 유효함이 검증된다.

레이저 표면 가공에서 발생하는 흠 오염입자는 입자 크기와 더불어 입자 분출속도 및 각도 역시 균일하지 않다. 따라서 오염입자 산포 현상의 연구에는 입자 발생조건이 특정한 통계적 확률분포를 가짐을 상정하여 수많은 입자들의 랜덤 샘플링을 통하여 입자 거동 시뮬레이션을 진행하였다.

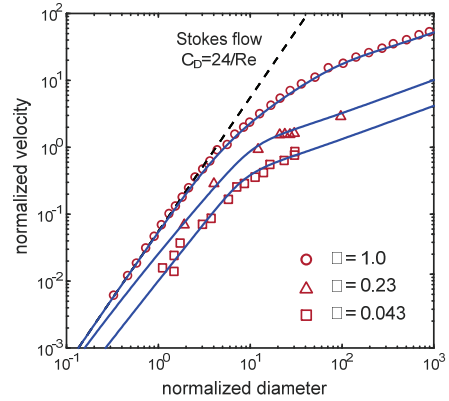


Fig. 3. Model validation of nonspherical particle drag correlation by comparing particle sedimentation velocity in a viscous fluid with measurements. Dotted line uses Stokes model of $C_D = 24/Re$.

선행연구[6-9]와 동일한 방식으로 오염입자 분출속도는 평균 1 m/s, 표준편차 1 m/s의 로그정규분포를, 표면 수직방향 대비 분출각도는 평균 0°, 표준편차 25°의 정규분포를 가정하였다. 발생 오염입자 직경 분포는 실험적 연구의 입자 분포도[4]를 근거로 하여 평균 12 μm , 표준편차 10 μm 의 로그정규분포로 입자 거동 해석을 진행하였다.

레이저 선가공의 오염입자 랜덤 시뮬레이션은 우선적으로 정지된 상온 공기 상태에서 앞서의 흠 오염입자 분출 조건 확률분포로 랜덤 샘플링된 5,000개 흠 입자를 대상으로 하였다. Fig. 4에는 입자 구형도 $\phi = 1, 0.3, 0.1$ 인 경우에 가공 표면 상에 착상된 오염입자들의 가공선 수직방향의 거리로 표현된 산포 특성을 입자 크기에 따라 정렬하여 보여준다. 결과를 관찰하면 원형 입자에 비교하여 비구형성이 높을수록 가공선에서의 산포도가 작아지는 경향을 보인다. 따라서 구형 입자를 가정한 흠 입자 산포 현상 해석이 실제 현상보다는 과장된 결과를 보여 줄 수 있음이 나타난다.

디스플레이 소자용 박막 필름의 레이저 선절단 가공에서는 가공선 기준 허용범위 밖으로의 입자 착상은 디스플레이 픽셀을 가려 소자 불량으로 이어질 수 있다[6]. Fig. 5에서는 Fig. 4에 수록된 동일 조건 및 각 입자 원형도에 대하여 이러한 레이저 가공선 허용범위로 설정된 ± 1 mm 영역 외로 착상된 입자의 크기 분포가 원편의 초기 발생 분포와 비교하여 정리되어 있다. 입자 원형도가 낮을수록 허용범위 밖으로 상대적으로 큰 오염입자들이 주로 착상됨을 보여준다.

실제 레이저 표면 가공에서는 발생하는 흠 입자의 제거를 목적으로 석션 또는 블로잉 방식의 가공선 주변 공

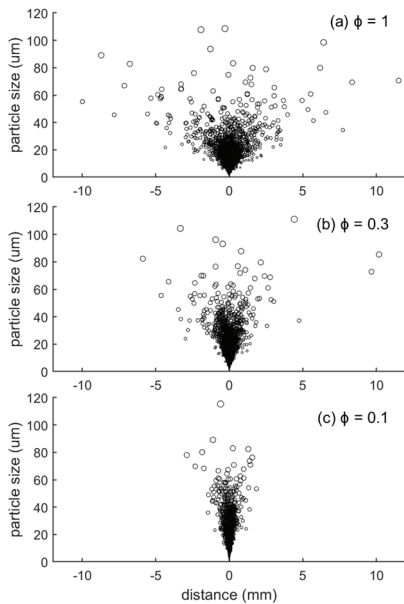


Fig. 4. Particle dispersion on target piece surface for randomly sampled 5,000 fume particles ejected into a quiescent air environment. The particle sphericity is given as (a) $\phi = 1.0$, (b) 0.3, and (c) 0.1, respectively.

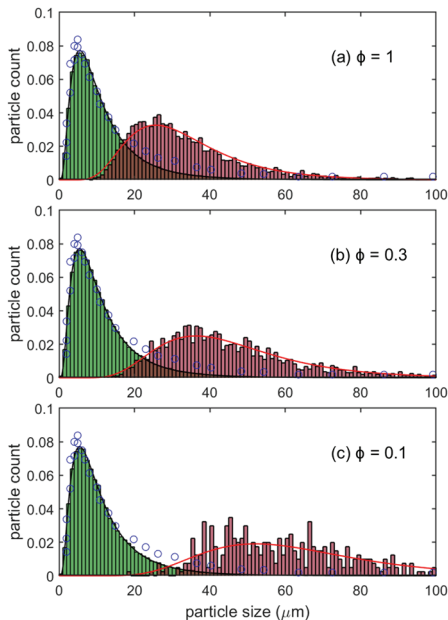


Fig. 5. Particle size distributions of initial fume particle generation (left) and fume particles dispersed out of target margin (± 1 mm). The particle sphericity is given as (a) $\phi = 1.0$, (b) 0.3, and (c) 0.1, respectively. Symbols are measured data [4].

기 유동이 적용된다. 선행연구[7]에서 2차원적 정체점 유동으로 모사한 슬롯형 장치 기준 석션과 블로잉 유동의 흡 입자 산포도 분석을 여기서는 비원형 흡 입자 경우에도 적용하였다. Fig 6에 나타난 유동계수 $K = +10$ s'은 블로잉 유동이며 유동계수 $K = -10$ s'은 석션 유동이다. 유동계수 $K=0$ 은 정체 공기 조건을 의미한다.

동일 초기 입자 분출조건을 기준으로 하여 세 가지 유동 형태 별로 입자 원형도를 0.1에서 1까지 변화시키며 각 해석 경우 당 총 흡 입자 발생 수 100,000개로 입자 거동 랜덤 시뮬레이션을 진행하였다. Fig 6(a)는 총 분출 입자 수 대비 가공선 ± 1 mm 영역 외로 착상된 입자 비율을 보여준다. 유동 형태에 따라 그리고 입자 구형도 변화에 따라 가공선 허용 영역 외로 산포 및 착상하는 흡 입자량이 크게 영향을 받음이 확인된다.

Fig 6(b)는 ± 1 mm 영역 외로 산포된 입자들의 평균 크기 분석 결과를 정리하였다. 정체 공기 또는 석션 유동에 비교하여 블로잉 유동 경우에 산포도가 예상대로 높게 나타난다. 다만 입자 원형도에 따라 크게 영향받는 입자 산

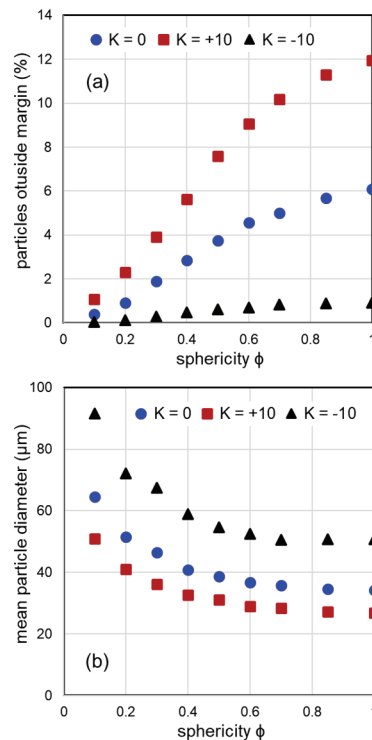


Fig. 6. The effects of particle sphericity on (a) total percentage and (b) mean particle diameter of fume particles dispersed out of target margin (± 1 mm). Each data point is based on randomly sampled 100,000 fume particles.

포 비율과는 달리 허용 영역 밖으로 산포된 평균 입자 크기는 입자 원형도가 0.6 이상에서는 큰 변화를 보이지 않고 입자 원형도가 충분히 낮은 경우에서나 입자 구형도의 영향이 크게 나타나기 시작한다.

Fig 6에 분석됨과 같이 석선형 유동이 레이저 가공선 주변의 흡 입자 산포도를 가장 줄일 수 있는 유동 형태이며 이는 입자 상당량이 상승하는 유동에 따라 착상하지 않고 상부로 배출되는 경향에 따름이다[9]. Fig 7에서는 석선 강도의 증감, 즉 유동계수의 증감에 따른 흡 입자의 석선 배출량 대상 영향성을 입자 구형도를 변화시키며 분석하였다. 예상대로 석선 강도의 증가에 따라 상부 배출량이 대폭 증가한다. 한편 입자 구형도가 감소하면 상부 배출량도 감소하는데 이는 항력 증가에 따라 가공선 주위 착상 입자가 늘기 때문으로 분석된다. 다만 Fig. 7(a)에 나타난 석선 배출 입자들의 평균 크기는 석선 강도 및 입자 비구형성에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 파악된다.

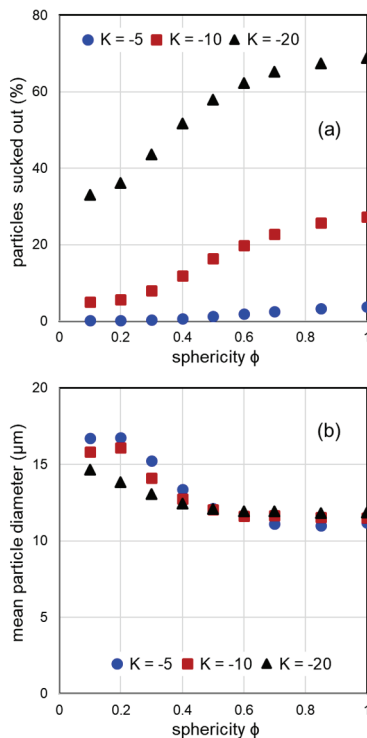


Fig. 7. The effects of particle sphericity on (a) total percentage and (b) mean particle diameter of fume particles sucked upward from target piece surface. Each data point is based on randomly sampled 100,000 fume particles.

4. 결 론

레이저 선가공의 흡 오염입자 거동에 관한 현 해석연구에서는 흡 입자의 비구형성을 고려하여 가공선 주변의 입자 산포에 따른 가공표면 오염도를 랜덤 샘플링 기반 전산 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 흡 오염입자의 비구형성이 증가하면 흡 입자의 가공선 주변 산포도가 크게 감소하고 석선 유동에 따른 입자 배출량도 큰 영향을 받는다. 따라서 원형 입자 간소화 가정을 채용한다면 비구형 흡 입자가 발생할 레이저 공정의 실제 현상과 상당한 차이를 보일 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 지원된 논문이다(과제번호: 2019-104-012).

참고문헌

1. Cho, K. W. and Park, H. J., "Laser Processing Technology in Semiconductor and Display Industry", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, pp. 32-38, 2010.
2. Dubey, A. K. and Yadava, V., "Laser Beam Machining - A Review", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, pp. 609-628, 2008.
3. Powell, J., CO₂ Laser Cutting, 2nd Ed., Springer-Verlag: London, 1998.
4. Malkusch, W., Rehn, B. and Bruch, J., "In Vitro Method for Medical Risk Assessment of Laser Fumes", Optics and Laser Technology, Vol. 27, pp. 39-43, 1995.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Kim, K. and Park, J. Y., "Assessment of Air Flow Misalignment Effects on Fume Particle Removal in Optical Plastic Film Cutting Process", Journal of the Semiconductor and Display Technology, Vol. 19, pp. 51-

- 58, 2020.
9. Kim, K. and Park, J. Y., “Fume Particle Dispersion in Laser Micro-Hole Machining with Oblique Stagnation Flow Conditions”, *Journal of the Semiconductor and Display Technology*, Vol. 20, pp. 77-82, 2021.
10. Brown, P. B. and Lawler, D. F., “Sphere Drag and Settling Velocity Revisited”, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 203, pp. 222-231, 2007.
11. Haider, A. and Levenspiel, O., “Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles”, *Powder Technology*, Vol. 58, pp. 63-70, 1989.
-

접수일: 2022년 3월 17일, 심사일: 2022년 6월 17일,
게재확정일: 2022년 6월 21일