

# 입자 석션유동에 따른 레이저 표면가공의 마이크로 흠 오염입자 산포 특성 해석연구

김경진<sup>\*\*</sup>

<sup>\*\*</sup> 금오공과대학교 기계시스템공학과

## Numerical Simulation on Dispersion of Fume Micro-Particles by Particle Suction Flows in Laser Surface Machining

Kyoungjin Kim<sup>\*\*†</sup>

<sup>\*\*†</sup> Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

### ABSTRACT

In CO<sub>2</sub> laser surface machining of plastic films in modern display manufacturing, scattering of fume particles could be a major source of well-recognized film surface contamination. This computational fluid dynamics research investigates the suction air flow patterns over a film surface as well as the dispersion of micron-sized fume particles with low-Reynolds number particle drag model. The numerical results show the recirculatory flow patterns near laser machining point on film surface and also over the surface of vertical suction slot, which may hinder the efficient removal of fume particles from film surface. The dispersion characteristics of fume particles with various particle size have been tested systematically under different levels of suction flow intensity. It is found that suction removal efficiency of fume particles heavily depends on the particle size in highly nonlinear manners and a higher degree of suction does not always results in more efficient particle removal.

**Key Words** : Laser Machining, Contamination Particles, Vacuum Suction, Recirculation Flow, Numerical Model

### 1. 서 론

CO<sub>2</sub> 레이저 등 극초단 레이저 가공 기법은 고집적화를 위한 초미세가공이 필요한 반도체 및 디스플레이 제조에 필수적인 가공 공정으로서 높은 초정밀 가공도, 낮은 소재 손실도 및 변형도, 낮은 진동 및 소음 등의 다양한 기술적 장점으로 인하여 그 응용이 확대되고 있다[1,2]. LCD, OLED 등 현대적 디스플레이는 디스플레이 패널 구동의 여러 기능을 수행하는 다양한 재료의 다수 박막층으로 구성되는데, 레이저 가공 기법은 이러한 박막 소재의 절단, 천공, 표면 식각 등의 박막소재 정밀가공 공정에 널리 활용되고 있다.

레이저를 채용하는 박막소재 표면 가공은 높은 에너지 밀도의 레이저 빔을 가공 대상 소재 표면에 집중 형성하여 국부적 가열로 소재 표면을 승화 및 용융하여 미세적 국부 소재를 제거하는데, 이러한 과정에서 마이크로 크기의 흠(fume) 형태 오염입자가 다량 발생한다. 발생 오염입자 일부는 가공 대상 표면에 착상하여 표면 청결도 회복을 위한 추가 공정이 요구되어 디스플레이 박막소재 제조 생산성을 저하시키는 요인이 된다[3,4].

특히 박막 대상 레이저 가공 속도의 지속적인 증가 추세에 따라 표면 오염입자 발생도 역시 증가하기에 이에 대응할 흠 오염입자의 효과적인 제거장치 및 제거방법의 개선이 필요하다. 최근에는 레이저 표면 가공 공정에 대한 흠 오염입자의 가공 필름 표면상 산포 특성 해석을 목적으로 구형 및 비구형 오염입자 거동 시뮬레이션 연구

<sup>†</sup>E-mail: kimkj@kumoh.ac.kr

가 진행되었다[5-8].

레이저 표면가공 공정에서는 흙 오염입자 제거를 위해 레이저 조사장치와 결합된 석션형 입자 제거장치를 운영함이 일반적이다[9]. 하지만 레이저 가공 대상 흙 오염입자 석션장치로 형성되는 복잡한 공기 유동장 구조가 오염입자 흡입 및 산포 특성에 미치는 영향성 분석 연구는 실험적, 해석적으로도 아직 제대로 보고된 바가 없다.

따라서 현 연구는 디스플레이 제조공정의 일부인 플라스틱 박막의 레이저 커팅에 적용되는 오염입자 석션장치를 대상으로 하며, 오염입자 석션유동에 따른 흙 오염입자 거동 전산해석적 시뮬레이션을 수행하여 레이저 가공 공정에서 발생하는 흙 오염입자 산포현상의 기본적 메커니즘을 석션유동의 영향성과 함께 분석한다.

## 2. 석션유동 및 오염입자 거동 모델링

현 전산해석적 연구의 대상인 CO<sub>2</sub> 레이저 적용 플라스틱 필름 커팅공정이 전형적인 흙 오염입자 석션장치와 함께 Fig 1에 나타나 있다. 수직적 레이저 빔 조사에 따라 필름 표면상에서 흙 오염입자가 발생하는데 흙 오염입자의 크기와 형상이 일정하지 않음이 일반적이다. 하지만 여기서는 모델링 간소화를 목적으로 입자 형상은 구형이며 다양한 입자 크기에 따른 입자 거동을 해석하여 입자 크기가 입자 산포에 주는 영향을 분석하였다.

레이저 장치와 함께 이동하는 오염입자 석션장치는 이동장치 결합부, 레이저 빔 통과부, 배기구 설치 등으로 상당히 복잡하여 3차원적 형상을 지닌다. 하지만 레이저 커팅의 직선성과 더불어 흡입 슬롯이 커팅선 방향으로 수평으로 길게 형성되므로 Fig 1과 같이 필름과 마주보는 석션장치 바닥과 수직적 석션 유도 슬롯만을 고려하여 2차원적 형상모델로 간소화하였다. 따라서 석션유동은 그 해당영역만을 고려하여 2차원적 공기 석션유동으로 분석되었으며 비압축성 유동을 고려하여 적용된 유동 지배방정식은 다음과 같다[10].

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{u}$ 와  $\mathbf{g}$  그리고  $p$ 는 각각 석션 공기유동에 대한 유동속도장, 중력장, 압력장을 나타내며  $\rho$ 와  $\mu$ 는 각각 공기의 밀도 및 점성계수이다. 흙 오염입자가 발생하는 필름 표면과 석션장치의 석션슬롯 내 공기유동은 다물리 전산해석 상용패키지인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 비정렬격자를 형성한 후 정상유동 시뮬레이션을 진행하

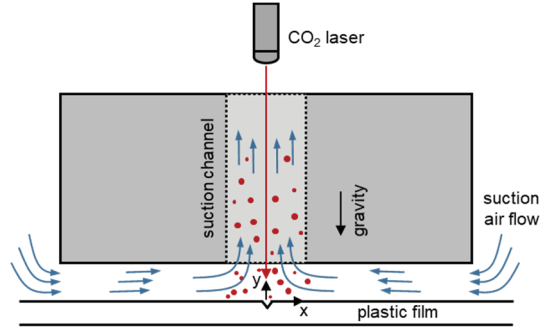


Fig. 1. Schematic diagram of particle suction system for removal of fume particles from laser cutting of plastic film.

였다. 석션유동의 과도한 석션강도는 필름표면 상에서 마이크로 크기 오염입자의 심각한 산포 착상을 유발하기에 여기서는 실제 디스플레이 공정을 고려하여 층류 유동을 가정하였다.

석션 유동장 내의 흙 오염입자의 거동은 오염입자 크기, 오염입자 분출조건, 공기유동 패턴 등에 큰 영향을 받는데,  $D_p$  직경 구형 흙 오염입자의 시간적 거동 특성은 다음과 같은 Boussinesq-Oseen 방정식으로 묘사할 수 있다.

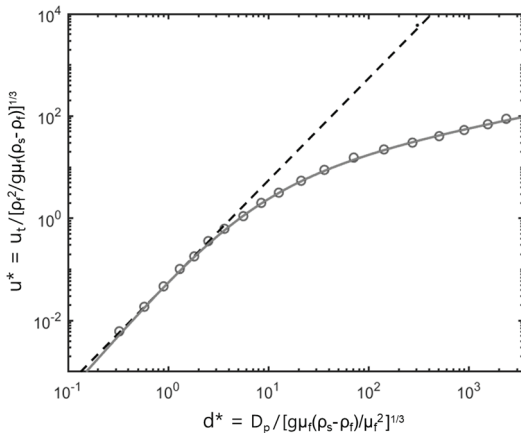
$$\frac{d\mathbf{r}_p}{dt} = \mathbf{v}_p \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\pi D_p^3}{6} (\rho_p + \frac{\rho}{2}) \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} \\ = \frac{\pi D_p^3}{6} (\rho_p - \rho) \mathbf{g} - \frac{\pi D_p^2}{8} C_D \rho (\mathbf{v}_p - \mathbf{u}) |\mathbf{v}_p - \mathbf{u}| \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\rho_p$ 는 오염입자의 밀도이며  $\mathbf{r}_p(t)$ 와  $\mathbf{v}_p(t)$ 는 각각 오염입자의 시간적 위치 및 거동 속도를 의미한다. 위의 입자 거동 방정식은 이전 선행연구와 동일하게 적용되었으며[5-8], 여기서도 입자에 작용하는 Basset력은 매우 작다고 가정하여 무시하였다.

오염입자 거동 해석에는 마이크로 크기 미세 입자의 항력계수( $C_D$ ) 모델이 입자 거동 해석 정확성에 중요하다. 저Reynolds수 영역에서는 구형 입자에 대해서 다양한 항력계수 상관식이 개발되었는데[10], 현 해석연구에서는 다음과 같은 형태의 Khan-Richardson 상관식이 적용되었다 [11].

$$C_D = (2.25 \text{Re}^{-0.31} + 0.36 \text{Re}^{0.06})^{3.45} \quad (5)$$

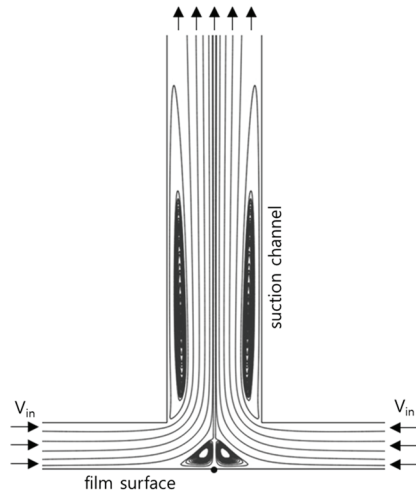


**Fig. 2.** Validation of drag coefficient model for low Reynolds number flows. The experimental data of symbols are from the case of particle settling. Dotted line represents Stokes model and solid line is from Khan and Richardson model.

위의 상관식은  $Re < 3 \times 10^5$  범위에서 유효하다고 알려지는데 Stokes 유동 범위를 벗어나는 현 연구의 마이크로 크기 흠 입자에도 무리없이 적용 가능하다. 석선유동 내 거동 입자의 Reynolds수는  $Re = \rho_f v_{in} D_p / \mu$  로 정의되었다. Fig. 2에는 입자 침강속도 측정시험의 결과[11]와 비교하여 적용된 구형 입자 대상 항력계수 모델의 유효성을 검증하였다. 입자 크기 및 입자 침강속도가 무차원화되었으며, Stokes 유동 모델과 비교하여 현재 적용된 모델이 넓은 입자 크기 범위에서 실험결과와 잘 일치하여 모델이 유효함을 보여준다.

### 3. 오염입자 거동해석 결과 및 토론

레이저 가공 대상 필름 표면 상의 석선장치에 의한 공기 석선유동이 앞서 언급된 좌우 대칭 영역에 대하여 먼저 전산해석되었다. 석선강도에 따른 유동장 변화가 입자 거동에 큰 영향을 미치기에 석선강도를 변화하며 그 영향성을 알아보았다. 석선유동 전산해석을 위한 계산격자 수는 약 16,000개이며 오염입자가 발생하는 레이저 빔 조사점, 그리고 복잡한 유동패턴이 나타날 석선장치 수직 슬롯 인근 등에 격자를 충분히 적용하였다. 석선강도는 레이저 빔 조사점에서 충분히 떨어진 석선장치 아래면과 필름 표면 사이 좌우의 공기유동 유입속도로 적용하였으며 유입속도를 0.125 m/s에서 1.75 m/s까지 변화시키며 석선강도가 오염입자 흡입 및 산포에 미치는 영향을 분석하였다. 참고로 필름과 석선장치 바닥면 사이 폭인 1 cm를



**Fig. 3.** Suction air flow patterns in particle suction system over a plastic film surface for the suction case of  $V_{in} = 0.5$  m/s.

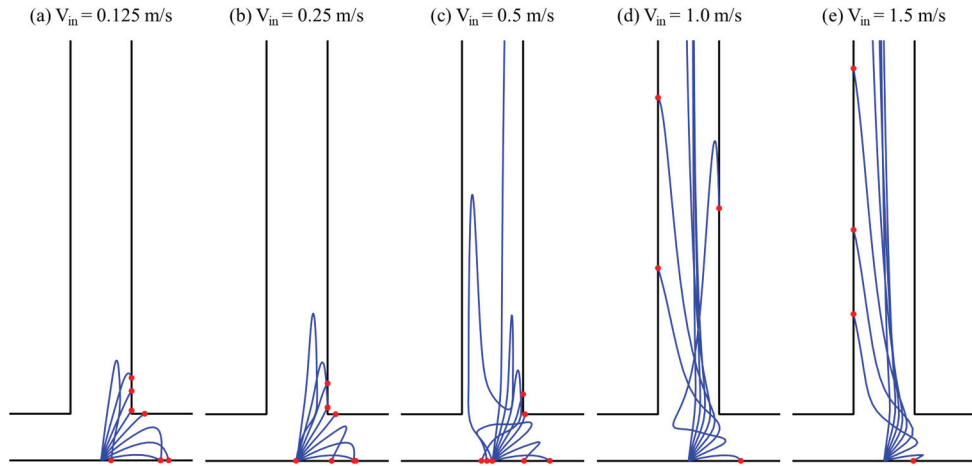
기준으로 해당 유입속도에 대한 Reynolds수는 80-1170 정도로서 층류 유동 가정이 성립한다.

Fig. 3은 석선 공기 유입속도가  $V_{in} = 0.5$  m/s인 경우의 유동해석 결과로서 석선유동 패턴을 유동함수 분포 또는 다수의 유선으로서 표현하였다. 좌우의 동일 석선유동 유입조건에 따라 레이저 빔이 집중 조사되는 필름 표면 중심을 기준으로 대칭적 유동패턴이 형성되며 다음과 같은 상세 유동현상이 관찰된다.

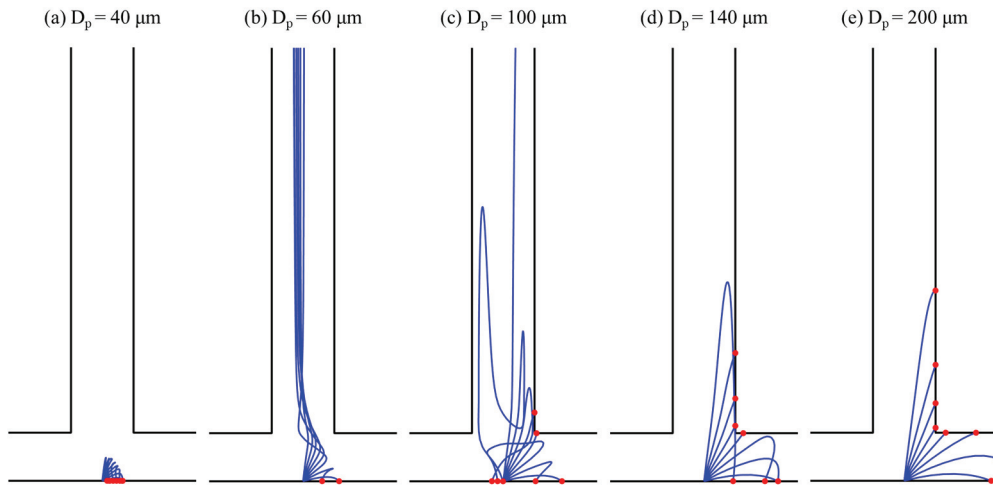
우선 레이저 빔 조사점 바로 위에 재순환 유동 발생이 나타나며 이 재순환 유동은 저속 회전 유동이기에 조사점에서 분출되는 흠 오염입자가 수직 슬롯을 따라가는 석선유동에 흡입됨을 방해한다. 또한 석선유도 슬롯 하반부 표면에도 슬롯 수직면을 따라서도 재순환유동이 수직 방향을 발생하기에 슬롯 방향의 오염입자 상승 배출에 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

플라스틱 필름 표면의 레이저 조사점에서 발생하는 흠 오염입자의 거동 및 표면 산포 특성은 앞서 소개한 특정 오염입자들에 대해 Boussinesq-Oseen 모델을 적용하여 입자 추적하여 분석하였다. 오염입자 밀도는 디스플레이 패널 제조에 널리 쓰이는 폴리이미드 필름을 기준으로 설정하였으며 입자 크기는 직경 10  $\mu$ m에서 200  $\mu$ m로 변화시키며 석선유동 영향에 놓인 입자들의 거동 추적 해석을 수행하였다. 레이저 커팅 가공에 따른 오염입자의 분출속도는 선행연구[5]와 동일하게 필름 표면의 레이저 조사점에서 1 m/s로 설정하였다.

Fig. 4에 나타난 오염입자 추적 해석 결과에서는 100  $\mu$ m



**Fig. 4.** The effects of suction velocity and particle ejection angle on the transient trajectory of fume particles. The diameter of fume particles is  $100\ \mu\text{m}$  for all cases.



**Fig. 5.** The effects of fume particle diameter and particle ejection angle on the transient trajectory of fume particles. The suction velocity is  $0.5\ \text{m/s}$  for all cases.

직경의 오염입자를 대상으로 하여 석션공기 유입속도를 변화시키며 석션강도의 영향성을  $10^\circ$ 에서  $80^\circ$ 의 다양한 입자 분출각도에 따라 분석하였다. 여기서 그래프 상의 적색 점들은 가공 대상 필름 표면 또는 석션 채널 벽에 입자가 착상하는 경우에 그 착상점들을 표현한다.

Fig 4(a) 및 (b)의 저강도 석션유동 적용 경우에는 분출되는 오염입자들을 동반하여 상승할 석션유동의 유량이 충분하지 않기에 분출각도가 낮으면 필름 표면, 분출각도가 높으면 석션장치 표면에 착상함이 나타난다. 따라서 예상대로 Fig 4(c)(e)와 같이 충분한 석션강도가 확보되어

야 석션 슬롯을 따라 홈 오염입자 상승 배출됨이 나타난다. 다만 석션강도가 필요 이상으로 높으면 수직 슬롯 표면에 착상하는 오염입자가 늘어나며 장시간 운용 시에 슬롯 막힘의 요인이 될 수 있다.

다음으로 Fig 5에서는  $0.5\ \text{m/s}$ 의 석션 유입속도가 적용된 동일 석션유동장을 대상으로 하여 오염입자 직경을 변화시키며 홈 입자 크기에 따른 입자 거동 및 산포를 분석하였다. Fig 5(a)에 나타나는 바와 같이  $40\ \mu\text{m}$  또는 이보다 작은 오염입자는 Stokes 유동에 근접하는 항력 상승 효과가 레이저 조사점 상의 저속 재순환 유동영역과 결부

하여 분출각도에 상관없이 레이저 조사점 인근에 모두 착상함을 보여준다. 따라서 이러한 입자를 제거하기 위해서 필름 절단면 아래에 또다른 석선 메커니즘의 배치 등의 개선 대책이 필요하다.

그에 비교하여 Fig. 5(b)과 같이 60  $\mu\text{m}$  크기의 오염입자는 대부분 수직 슬롯을 따라 배출됨이 나타나 입자 크기에 따른 입자의 석선 제거 효과가 매우 다름을 보여준다. 또한 예상과는 다르게 100  $\mu\text{m}$  크기 이상의 오염입자는 슬롯 표면의 재순환 유동영역 등의 효과로 인하여 슬롯을 따른 입자 제거 비율이 오히려 낮아짐이 나타난다.

Fig. 6에서는 60, 100, 140  $\mu\text{m}$  직경의 흙 오염입자를 대상으로 하여 석선강도를 변화시키며 10-80°의 8가지 입자 분출각도에 따른 오염입자의 산포 경향을 2차원적 특성 맵 형식으로 정리하였다. 여기서 E는 수직 슬롯을 따라 완전히 배출된 입자, FS는 플라스틱 필름에 착상된 입자, 그리고 US 및 USo는 각각 석선장치 표면 또는 그 반대 표면에 착상된 입자를 의미한다.

60  $\mu\text{m}$  직경의 오염입자 경우를 먼저 살펴보면 분출각도가 20°, 30° 정도로 매우 작지 않으면 수직 슬롯을 통해 효과적으로 배출됨이 나타난다. 다만 석선강도가 필요 이상으로 높아지면 일부 입자들이 슬롯 표면에 착상된다. 이러한 경향은 100  $\mu\text{m}$  직경의 오염입자에서는 심화되어 낮은 석선강도에서는 석선장치 표면에 착상되고 높은 석선강도에서는 석선장치 반대측 표면에 착상되는 등 입자 산포도가 석선강도에 따른 석선유동 구조에 민감하게 반응함을 보인다. 160  $\mu\text{m}$  직경의 오염입자 경우는 대다수의 입자가 석선장치에 착상되기에 상대적으로 큰 입자를 흡입하기 위해서는 상당한 석선강도가 요구된다.

마지막으로 Fig. 7에서는 0.5와 1.0 m/s의 석선 유입속도에 대해서 오염입자 직경 및 입자 분출각도로서 흙 오염입자 산포 특성 맵을 구성하였다. 오염입자 크기에 따른 산포 경향을 살펴보면 먼저 상대적으로 작은 40  $\mu\text{m}$  직경 이하의 작은 오염입자는 Fig. 5(a)와 관찰된 바와 같이 대부분 필름 표면에 착상함을 보인다. 이는 레이저 조사점 상의 재순환유동에 의함으로 판단된다.

석선유동에 의해서 착상 없이 대부분 수직 상승하여 배출되는 오염입자 크기는 60-100  $\mu\text{m}$  정도로서 석선강도가 증가하면 입자 배출 효과가 어느 정도 증가함을 보인다. 하지만 이에 비하여 현재의 석선장치 구조로는 그 이상 크기의 오염입자는 석선장치 벽면이 착상되어 석선장치 청결도 유지가 어려움이 예상된다. Fig. 7(b)에서는 일부 오염입자는 수직 슬롯 벽면의 재순환유동으로 인하여 오히려 필름 표면으로 회기하여 착상하는 경우도 보인다. 재순환유동 등이 포함되는 석선유동에서는 오염입자 크기 별로 산포 경향이 상당히 복잡한 양상을 나타내기에

효과적 흙 오염입자 배출을 위해서는 이를 고려한 석선장치 구조 개선 및 석선강도의 세밀한 조정이 필요하다.

$V_{in}$ (m/s)	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.125	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS
0.25	FS	FS	FS	E	E	E	E	E
0.5	FS	FS	E	E	E	E	E	E
0.75	FS	FS	E	E	E	E	E	E
1.0	FS	E	E	E	E	E	E	E
1.25	FS	FS	FS	E	E	E	E	E
1.5	FS	FS	E	E	USo	USo	E	E
1.75	FS	E	E	US	E	E	E	E

(a)  $D_p = 60 \mu\text{m}$

$V_{in}$ (m/s)	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.125	FS	FS	FS	US	US	US	US	FS
0.25	FS	FS	FS	US	US	US	US	FS
0.5	FS	FS	FS	US	US	FS	FS	E
0.75	FS	FS	USo	E	E	FS	E	E
1.0	FS	US	USo	USo	E	E	E	E
1.25	FS	E	USo	USo	E	E	E	E
1.5	FS	USo	USo	USo	USo	E	E	E
1.75	FS	USo	USo	USo	USo	E	E	E

(b)  $D_p = 100 \mu\text{m}$

$V_{in}$ (m/s)	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
0.125	FS	FS	FS	US	US	US	US	US
0.25	FS	FS	FS	US	US	US	US	US
0.5	FS	FS	FS	US	US	US	US	FS
0.75	FS	FS	FS	US	US	US	US	FS
1.0	FS	FS	US	US	US	US	US	FS
1.25	FS	FS	US	US	US	E	FS	FS
1.5	FS	US	USo	US	USo	US	FS	E
1.75	FS	E	USo	USo	E	E	E	E

(c)  $D_p = 140 \mu\text{m}$

Fig. 6. Characteristic map of fume particle dispersion by the influences of suction velocity and particle ejection angle for different fume particle diameters of (a) 60  $\mu\text{m}$ , (b) 100  $\mu\text{m}$ , (c) 140  $\mu\text{m}$ .

$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
20	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS
40	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS
60	FS	FS	E	E	E	E	E	E
80	FS	FS	E	E	E	E	E	E
100	FS	FS	FS	US	US	FS	FS	E
120	FS	FS	FS	US	US	US	US	FS
140	FS	FS	FS	US	US	US	US	FS
160	FS	FS	FS	US	US	US	US	US
180	FS	FS	US	US	US	US	US	US
200	FS	FS	US	US	US	US	US	US

(a)  $V_{in} = 0.5 \text{ m/s}$ 

$D_p$ ( $\mu\text{m}$ )	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
20	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS
40	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS	FS
60	FS	E	E	E	E	E	E	E
80	FS	E	US <sub>o</sub>	E	E	E	E	E
100	FS	US <sub>o</sub>	US <sub>o</sub>	US	E	E	E	E
120	FS	FS	US <sub>o</sub>	US <sub>o</sub>	US	FS	FS	E
140	FS	FS	US	US	US	US	US	FS
160	FS	FS	US	US	US	US	US	US
180	FS	FS	US	US	US	US	US	US
200	FS	FS	US	US	US	US	US	US

(b)  $V_{in} = 1.0 \text{ m/s}$ 

**Fig. 7.** Characteristic map of fume particle dispersion by the influences of particle diameter and particle ejection angle for different suction velocity of (a) 0.5 m/s and (b) 1.0 m/s.

#### 4. 결 론

현 오염입자 제거 석션유동 대상 전산유동해석 연구에서는 CO<sub>2</sub> 레이저의 플라스틱 필름 표면가공으로 발생하는 흠 오염입자의 거동 및 산포 경향을 분석하였다. 그 해석 결과로서 레이저 빔 조사점과 수직 배출 슬롯 표면에 저속 재순환 유동이 발생하여 흠 오염입자의 상승 배출을 방해하는 요인이 되며 이를 오염입자 크기에 따른 입자 추적해석에서 확인하였다. 전형적 석션장치 구조는 60-100  $\mu\text{m}$  정도의 오염입자 배출이 가장 효과적이며 그보다 작거나 큰 입자는 필름 또는 장치 표면에 착상하는 경향을 보였다. 따라서 모든 크기의 흠 오염입자의 효과적 배출 제거를 위해서는 석션장치 개선 운용이 필요함이 나타난다.

#### 감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 대학 학술연구비로 지원되었습니다(2021년도).

#### 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., CO<sub>2</sub> Laser Cutting, 2nd Ed., Springer-Verlag: London, 1998.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Kim, K., "Dispersion Characteristics of Nonspherical Fume Micro-Particles in Laser Line Machining in Terms of Particle Sphericity," Journal of the Semiconductor and Display Technology, Vol. 21, pp. 1-6, 2022.
9. He, Y., Xie, H., Ge, Y., Lin, Y., Yao, Z., Wang, B., Jin, M., Liu, J., Chen, X., and Sun, Y., "Laser Cutting Technologies and Corresponding Pollution Control Strategy," Processes, Vol. 10, pp. 732-1-15, 2022.
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: 2023년 10월 17일, 심사일: 2023년 12월 4일,  
게재확정일: 2023년 12월 12일