

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 18, No. 4: September 2022 pp. 129-136

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2022.18.4.129>

## 초고속 미세 액적 충돌을 이용한 나노미터 크기 입자상 오염물질의 세정에 대한 CFD 시뮬레이션

박진효<sup>1)</sup> · 김정건<sup>1),2)</sup> · 이승욱<sup>1)</sup> · 이동근<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 기계공학부

<sup>2)</sup>부산대학교 기계기술연구원

(2022년 9월 14일 투고, 2022년 11월 1일 수정, 2022년 11월 5일 게재확정)

## CFD simulation of cleaning nanometer-sized particulate contaminants using high-speed injection of micron droplets

Jinhyo Park<sup>1)</sup> · Jeonggeon Kim<sup>1),2)</sup> · Seungwook Lee<sup>1)</sup> · Donggeun Lee<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>*School of Mechanical Engineering, Pusan National University*

<sup>2)</sup>*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University*

(Received 14 Sep 2022; Revised 1 Nov 2022; Accepted 5 Nov 2022)

### Abstract

The line width of circuits in semiconductor devices continues to decrease down to a few nanometers. Since nanoparticles attached to the patterned wafer surface may cause malfunction of the devices, it is crucial to remove the contaminant nanoparticles. Physical cleaning that utilizes momentum of liquid for detaching solid nanoparticles has recently been tested in place of the conventional chemical method. Dropwise impaction has been employed to increase the removal efficiency with expectation of more efficient momentum exchange. To date, most of relevant studies have been focused on drop spreading behavior on a horizontal surface in terms of maximum spreading diameters and average spreading velocity of drop. More important is the local liquid velocity at the position of nanoparticle, very near the surface, rather than the vertical average value. In addition, there are very scarce existing studies dealing with microdroplet impaction that may be desirable for minimizing pattern damage of the wafer. In this study, we investigated the local velocity distribution in spreading liquid film under various impaction conditions through the CFD simulation. Combining the numerical results with the particle removal model, we estimated an effective cleaning diameter (ECD), which is a measure of the particle removal capacity of a single drop, and presented the predicted ECD data as a function of droplet's velocity and diameter particularly when the droplets are microns in diameter.

Keywords: Dropwise impaction, Spreading velocity, Effective cleaning diameter, Wafer cleaning

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-51-510-2365, Fax : +82-51-512-5236

Email : donglee@pusan.ac.kr

## 1. 서론

반도체 제조 공정 중 발생하는 무기, 유기, 금속, 비금속 및 폴리머 입자는 타겟 표면을 오염시켜 반도체 소자의 수율을 낮추는 주요 원인이 된다(Hong et al., 2019). 오염 입자를 제거하기 위한 방법으로는 크게 화학적 제거 방법과 물리적인 제거 방법이 있으며(Kern, 1990), 화학적 제거 방법은 독성 화학 물질의 사용 문제와 웨이퍼상 패턴의 선폭(line width)이 100 nm 이하인 경우 높은 종횡비(aspect ratio)로 인해 초순수(ultrapure water) 기반의 세정 용액이 바닥까지 닿지 못하는 문제가 보고되었다(Cho et al., 2020). 이에 환경 및 보건상의 이슈가 적은 세정 용액을 이용한 모넨텀 교환을 통해 나노 오염입자를 제거하는 물리적 제거법이 최근 관심을 끌고 있다(Okorn-Schmidt et al., 2013; Henry and Minier, 2014). 한편 웨이퍼 표면에 고압의 가스를 분사하여 전단력에 의해 입자를 제거하는 연구(Fan et al., 1997; Burdick et al., 2005)도 시도되었다.

유체가 오염된 웨이퍼 표면을 따라 고속으로 흐를 때, 표면의 오염 입자와 모넨텀 교환을 통해 항력, 양력, 회전 모넨텀 등이 발생하고, 그 결과 오염 입자는 각각 슬라이딩(sliding), 리프팅(lifting), 롤링(rolling) 등으로 탈착(detachment) 및 제거(removal)된다. 그 중 항력에 의해 발생하는 회전 모넨텀에 의한 롤링이 나노입자 제거에 지배적인 요인으로 알려져 있다(Zoeteweji et al., 2009). 그러나 전술한 고압의 가스를 분사하는 경우, 액체에 비하여 상대적으로 낮은 가스 밀도(density)와 점도(viscosity)로 인해 나노미터 크기의 오염 입자에 가할 수 있는 항력이 충분히 크지 않아 입자 제거 효율(particle removal efficiency)이 낮아지는 한계를 보인다. 이에 높은 밀도와 점도를 가지는 액체를 고속 분무함으로써 입자 제거 효율을 높이고 초순수의 사용량을 최소화하는 방법이 활발하게 연구되고 있다.

미세액적(microdroplet)이 웨이퍼 표면에 수직으로 충돌하면 액적은 그 표면 위에 원형 액막 형태로 퍼져나가게 된다. 이때, 액적 필름의 반경 방향 퍼짐 속도(spreading velocity)는 충돌 직후가 가장 높고 퍼짐(spreading)이 진행됨에 따라 점차 낮아져서, 결국 그 액막은 최대 직경( $D_{max}$ )에 도달하며 퍼짐을 멈추게 된다. 기존의 액적 충돌 현상에 관한 연구

에서는 최대 퍼짐 직경(maximum spreading diameter,  $D_{max}$ )을 초기 액적 직경( $D_0$ )으로 무차원화한  $\beta_{max}$  ( $\equiv D_{max}/D_0$ )를 웨버 수(Weber number, We)와 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)의 함수로 나타내어 충돌 조건별로  $D_{max}$ 를 예측하는 것이 주류를 이루었다. 여기서 We는 충돌 속도에 기초한 액적의 운동 에너지와 표면장력의 비를 나타내는 무차원 수이며, Re는 액막의 퍼짐시 관성력과 마찰력의 비를 나타낸다. Pasandideh-Fard et al. (1996)은 액적이 충돌 후 액막의 형태로 퍼져나갈 때 질량 보존과 에너지 보존에 기초하여 그 퍼짐 속도를 계산하는 수식을 제시하였다. 이와 관련된 실험 결과들은 밀리미터 크기의 액적을 자유낙하로 충돌시켜 시간에 따른 액막의 직경 및 두께 변화, 최대 퍼짐 직경과 이에 도달하는 시간 등을 초고속 카메라를 이용하여 측정하는 방식이 대부분이다(Pasandideh-Fard et al., 1996; Jung and Hutchings, 2012; Yonemoto and Kunugi, 2012; Tan, 2017). 그러나 오염 입자 제거의 관점에서, 부착 입자 주위의 국소 퍼짐 속도가 입자를 탈착시키기 위한 직접적인 요인이 됨에도 불구하고 전술한 연구들은 측정된 파라미터로부터 액막의 평균 퍼짐 속도를 계산하는 데 그쳐있다. 특히, 표면 근처에서의 국소 퍼짐 속도는 유체의 점성으로 인해 액적의 충돌 속도나 평균 퍼짐 속도에 비해 현저히 낮아서 대상 입자가 작아질수록 실제로는 탈착이 어려워진다. 따라서 액체 박막 내부에서 높이에 따른 국소 퍼짐 속도 분포와 액적의 초기 조건(직경 및 충돌 속도)과의 관계를 이해하는 것이 오염 입자 제거 가능성을 정량적으로 예측하기 위한 핵심이 된다. 그러나 얇은 액체 박막 내부의 국소 퍼짐 속도는 측정의 어려움으로 인해 실험적인 연구는 전무하고, 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 시뮬레이션(이후 전산모사)을 통해 드물게 계산되었다. Kondo and Ando (2019)는 200  $\mu\text{m}$  직경의 액적 충돌 현상을 전산모사하여 액적 내부의 국소 퍼짐 속도 분포를 구하였고 이를 바탕으로 입자에 작용하는 항력과 부착력 등의 계산을 통해 유효 세정 반경을 액적의 크기와 충돌 속도의 함수로써 예측할 수 있는 가이드 맵을 제시하였다. 하지만 대부분의 미세 액적-충돌 세정은 고압 분사 노즐을 통해 수많은 액적이 분사되어 단일 액적의 세정 효과보다 multiple droplet에 의한 세정

효과를 야기하므로(Haller et al., 2002; Thoroddsen et al., 2011; Regulagadda et al., 2017), 그들 모델의 실험적인 검증으로까지 이어지지 못하였다.

본 연구에서는 반도체 세정과 패턴 손상 방지를 목표로 마이크로미터 크기의 미세액적이 10-50 m/s로 고속 충돌하는 경우에 대한 세정 효과를 유효 세정 반경으로 정량화하고, 주어진 액적 충돌 조건에서 그 유효 세정 반경이 어떻게 변화하는지 조사하였다. 먼저 전산모사를 통해 액적 충돌 현상을 해석하여 그 결과를 실험 및 기존 문헌으로부터 얻을 수 있는  $\beta_{max}$  (maximum spreading ratio)와 비교하여 검증하였다. 특히, 액적의 시간에 따른 퍼짐 거동을 반경 방향의 국소 퍼짐 속도 분포로써 상세히 관찰하여 이를 기존 모델에 적용함으로써 제거 대상 입자의 크기가 달라질 때 입자의 위치에서 국소 팽창 속도, 입자에 미치는 항력, 및 회전 모멘트 등을 계산하여 단일 액적 충돌에 대한 유효 세정 직경을 추정하였다.

## 2. 입자 탈착 메커니즘

그림 1(a)과 같이 직경  $D_0$ 의 액적이 웨이퍼 표면에 충돌하면 액막 형태로의 변형과 함께 반경 방향으로 빠른 속도로 퍼져나간다. 여기서, 액적의 퍼짐 속도는 표면과의 마찰과 제한된 초기 부피 등으로 인해 점차 느려지고, 최대 팽창 직경  $D_{max}$ 에 도달하며 멈춘 뒤 다시 수축한다. 그림 1(b)에서 나타낸 바와 같이, 표면에 부착된 입자는 충돌 후 퍼져나가는 액적의 유동에 의해 양력(lift force,  $F_L$ ), 항력(drag force,  $F_D$ ) 및 이로 인한 회전력(rotational force,  $M_D$ )을 받고 부착력(adhesion force,  $F_{ad}$ )과 마찰력(friction force,  $F_f$ )으로 이에 저항한다. Zoetewij et al. (2009)에 따르면, 부착된 입자는 1)  $F_L > F_{ad}$ 일 때 수직으로 탈착되고, 2)  $F_D > F_f$ 에서 표면에서 수평으로 밀려나 결국 탈착되거나, 3) 모멘트 평형이 이루어지지 않아( $\sum M > 0$ ) 회전하며 탈착된다. 이상과 같은 각종 힘들은 입자의 크기와 물성, 부착면의 물성, 부착상태, 액적의 크기 및 종류 등에 따라 달라진다.

먼저, 입자와 표면간의 부착력( $F_{ad}$ )은 반데르발스 힘(Van der Waals force,  $F_{vdw}$ )이 대부분을 차지하며,

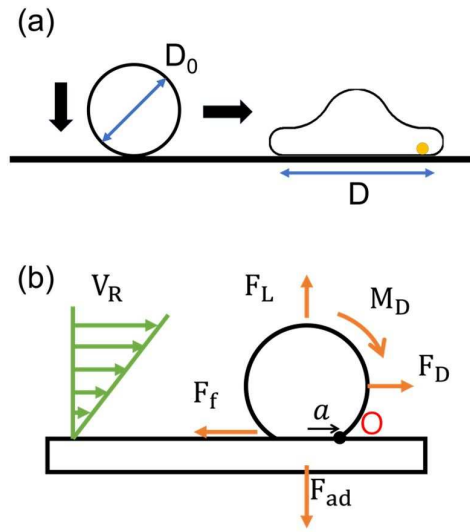


Figure 1 Description of dropwise impact and the forces acting on particles:  
(a) phenomenon description  
(b) free body diagram of a particle.

$F_{vdw}$ 는 식 (1)과 같이 계산되고 하마커 상수(Hamaker constant,  $A$ ), 입자 직경( $d_p$ ), 입자-부착면 사이 거리( $z$ ), Fig. 1(b)에 표시된 접촉단면의 반경(contact radius,  $a$ )의 함수이다(Zoetewij et al., 2009).

$$F_{vdw} = \frac{Ad_p}{12z^2} \left(1 + \frac{2a^2}{zd_p}\right) \quad (1)$$

하마커 상수( $A$ )는 입자-유체-부착면 각각의 물질 종류에 따라 달라지며, 입자 표면과 부착면 사이 거리( $z$ )는 매끄러운 표면에 일반적으로 쓰이는 값인 0.4 nm로 설정하였다(Hinds, 1999). 또한, 부착면과 거의 점접촉을 하는 경질 입자(hard particle)와는 달리, 연질 입자(soft particle)는 부착 시 그림 1(b)처럼 변형하여 부착면상에 원형의 접촉 단면을 가지고  $F_{vdw}$ 를 증가시켜 입자의 탈착을 어렵게 만든다. 일반적으로 접촉 단면의 반경은 경질 입자의 경우 Derjaguin-Muller-Toporov (DMT) 모델을, 반면 연질 입자의 경우 Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 모델을 통해 추정한다(Johnson et al., 1971; Derjaguin et al., 1975). JKR 모델이  $a$ 와 이로 인한  $F_{vdw}$ 를 DMT 모델보다 더 크게 평가하므로, 입자 제거의 관점에서 확실한 입자 탈착을 위한 힘의 하한을 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 입자의 정도

(hardness)에 무관하게 식 (2)와 같이 JKR 모델(Johnson et al., 1971)을 적용하였다.

$$a^3 = \frac{R}{K}(F + 3\pi\Delta\gamma F + \sqrt{6\pi\Delta\gamma F + (3\pi\Delta\gamma R)^2}) \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 접촉한 두 물체 간의 합성 반지름으로 본 연구와 같이 입자가 평평한 표면에 접촉할 경우  $R$ 은 입자 반지름이 된다.  $F$ 는 입자를 부착면으로 누르는 부가적인 외력(정전기력 등)을 의미하는데, 본 연구에서는  $F=0$ 이다.  $\Delta\gamma$ 는 표면과 입자 간의 계면 접촉 에너지(work of adhesion)를 의미한다.  $K$ 는 두 물질의 합성 영률(Young's modulus)값으로, 입자의 영률을  $E_1$ , 부착면의 영률을  $E_2$ 라 할 때 아래의 식 (3)으로 계산된다.

$$K = \frac{4}{3} \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (3)$$

여기서  $\nu$ 는 두 물체의 포아송 비(Poisson ratio)이다. 액막의 퍼짐에 의해 생성되는 양력  $F_L$ 과 항력  $F_D$ 은 각각 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 계산하였다(Burdick et al., 2001).

$$F_L = 1.62\eta d_p^2 \left( \frac{\rho}{\eta} \frac{\partial u}{\partial y} \right)^{\frac{1}{2}} u_R \quad (4)$$

여기서  $\eta$ 는 유체의 점성계수이고  $\rho$ 는 액체의 밀도,  $\partial u / \partial y$ 는 수평방향 유동속도  $u$ 의 수직방향 구배를,  $u_R$ 은 입자의 중심 위치에서 수평방향 유동속도이다.

$$F_D = 0.5\rho u_R^2 C_D A_p \quad (5)$$

$A_p$  ( $=\pi d_p^2/4$ )는 입자의 전면면적(frontal area)이다.  $C_D$ 는 구형 입자에 대한 항력계수로, 식 (6)과 같이 계산된다.

$$C_D = 1.7f = 1.7 \frac{24}{Re_p} \quad (6)$$

여기서  $f$ 는 마찰계수(friction factor)이다. 외부 표면 응력(external surface stress)에 의한 회전력  $M_D$ 는 식 (7)로 계산된다.

$$M_D = 0.5\rho u_R^2 C_M V_p \quad (7)$$

$V_p$ 는 입자의 부피이고, 모멘트 계수  $C_M$ 은 식 (8)으로 계산된다(Burdick et al., 2001).

$$C_M = 0.944f = 0.944 \frac{24}{Re_p} \quad (8)$$

이상의 수식들을 종합해서 그림 1(b)의 O점을 중심으로 모멘트 평형을 평가하여 회전에 의한 입자의 탈착유무를 판단한다.

$$\sum M = (F_{ad} - F_L)a - M_D - 0.5F_D d_p > 0 \quad (9)$$

식 (9)와 같이, 입자에 작용하는 모멘트 합이 양수이면 입자가 제거되는 것으로 판단할 수 있다.

서론에서 서술한 바와 같이, 실험적으로는 수 밀리미터 직경의 조대 액적의 자유낙하로 인한 액막의 퍼짐을 가시화하여 평균 팽창 속도를 측정하는 정도에 머물러, 본 연구와 같이 마이크로미터 크기의 액적이 고속 충돌할 때 액막 내부의 속도분포, 또는 표면에서 수십 나노미터 높이에서의 액체의 팽창속도를 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 전산모사를 통해 미세 액적이 충돌 후 퍼져나갈 때 부착면 상에서의 퍼짐 속도 및 그 구배를 시간별로 계산하였다.

### 3. 액적 충돌 전산모사

액적의 충돌할 때 액막의 퍼짐 거동을 비정상 VOF (volume of fluid) 기법을 이용하여 전산모사하였다. ANSYS Fluent 2020R1이 사용되었으며, 액적 충돌 시 표면에서의 dynamic contact angle (Wang et al., 2007)을 구현하기 위한 UDF(User-Defined Functions)이 도입되었다. 효율적인 계산을 위해 액적의 수직 중심축에 대해 축대칭(axial symmetry)을 설정하고, 부착표면 주변에 수 나노미터 크기의 밀집된 격자(grid)를, 그리고 그 외부에는 조대한 격자를 생성하였다. 또한, 수 밀리미터 직경의 액적에서 시작하여, 10  $\mu\text{m}$ 와 50  $\mu\text{m}$  직경의 미세액적에 대하여 계산을 수행하였고, 액적의 충돌 속도도 밀리미터 사이즈의 큰 액적에 대해서는 1-2 m/s, 그리고 마이크로미터 크기의 미세액적에 대해서는

10-50 m/s 범위에서 10 m/s 간격으로 계산을 수행하였다.

본격적인 결과 해석에 앞서, 전산모사 결과를 검증하기 위해 먼저 상대적으로 관찰이 용이한 직경 2 밀리미터 크기의 액적에 대해 자유낙하 충돌 실험을 수행하였다. 그림 2(a)의 실험 장치 개략도와 같이, 수직으로 설치된 바늘(20G syringe needle blunt 90 degree tip)을 통해 초순수(deionized water) 액적을 중력을 이용해 생성 및 자유낙하를 유도하고 초고속 카메라(Photron Fastcam SA3, Japan)를 이용하여 30,000 fps의 프레임률(frame rate)로 액적의 순간 위치를 이미지화 하고, 이를 분석하여 충돌 직전의 액적의 속도, 크기, 그리고 충돌 후 액막의 퍼짐 직경(spreading diameter)을 시간별로 측정하였다. 바늘 첨단부(needle tip)의 높이를 50-150 mm범위에서 조절하여 액적의 충돌 속도를 0.45-1.45 m/s구간에서 변화하였다. 그림 2(b)에서 흑색은 0.5-2.6  $\mu\text{s}$ 의 범위에서 각각 캡처한 액막을 나타내며,

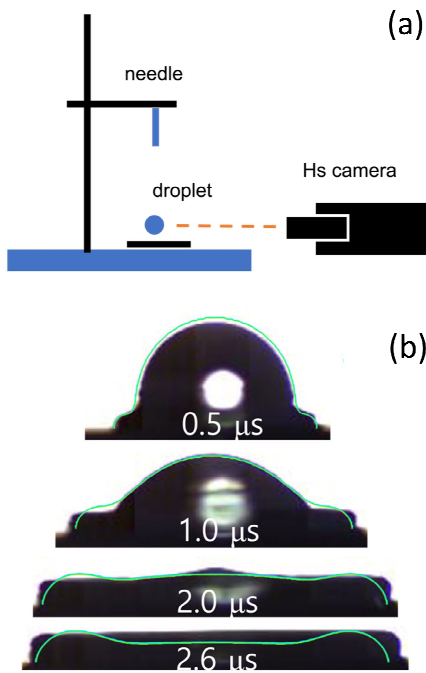


Figure 2 Dropwise impact observation experiment: (a) experiment schematics, (b) high-speed camera images and CFD results (droplet diameter: 2 mm, impact velocity: 1.1 m/s).

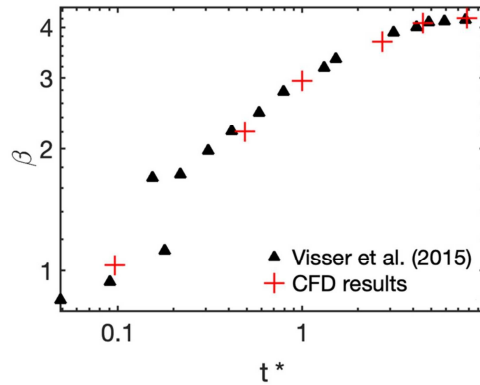


Figure 3 Validation of CFD simulation results. The variation of  $\beta$  depends on dimensionless time  $t^*$ .

녹색 윤곽선은 각 시각에서 전산모사된 액막의 경계를 나타낸다. 전산모사된 액적 윤곽선의 중심부가 갈수록 움푹해지는 것은 윤곽선은 전산모사된 액적의 단면을, 사진은 액적의 외곽을 보여주기 때문이다. 초고속 카메라 이미지와 녹색 윤곽선은 6% 이내로 일치하여 전산모사에서 전체적으로 액막의 충돌 후 퍼짐 거동을 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

또한, 그림 3에서는 Visser et al. (2015)의 실험에서 사용된  $D_0=20 \mu\text{m}$ ,  $U=50 \text{ m/s}$ 의 물 액적 충돌을 전산모사하여 얻어진 액막의 퍼짐도(spreading ratio)  $\beta$ 를 무차원 시간  $t^*$  ( $\equiv tU/D_0$ )에 따라 문헌 결과와

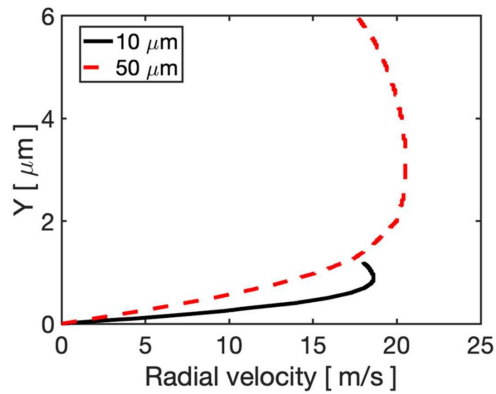


Figure 4 Radial velocity distribution along the film height, Y.

함께 나타내었다. 여기서 ‘+’로 나타낸 전산모사 결과는 Visser et al. (2015)의 실험과 동일한 조건에서 구해졌으며, 액적 충돌 직후부터 액막의 퍼짐이 거의 멈출 ( $\beta \approx \beta_{max}$ ) 때까지 문헌 결과와 거의 일치하였다. 이어서 액적 내부의 속도분포를 전산모사를 통해 계산하였다. 그림 4는 각각  $t^*=1$ ,  $t^*=0.7$  ( $t^*$ : 액적 반지름으로 무차원화된 반경 방향으로의 거리)에서 액적의 크기가 10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ 일 때의 속도의 크기를 바닥면을 기준으로 높이에 따라 나타낸 그래프이다. 바닥면 근처에 경계층이 형성된 것을 시각적으로 확인할 수 있다.

#### 4. 유효 세정 직경

입자에 작용하는 액적의 반경 방향 속도( $u_R$ )를 전산모사를 통해 얻어냈기에, 이 값을 이용해 입자에 작용하는 힘들을 식 (1)-(9)로부터 계산하였다. 액적 내부의 속도는 위치, 시간에 따라 지속적으로 바뀌기 때문에 각각의 조건에 대해 입자의 제거 가능성을 시간, 위치에 대해 연속적으로 판단해야 한다. 다시 말해, 액적은 충돌 이후 퍼져나갈 때 액적의 운동에너지가 소산, 표면의 계면 에너지로 전환되기 때문에 시간이 지남에 따라 내부 속도가 낮아져 입자 제거 능력이 감소하게 된다. 본 연구에서는 각 충돌 조건에서 액적의 입자 제거 능력을 정량화하기 위해 액적 충돌의 중심으로부터 입자가 제거되는 최대 직경인 유효 세정 직경(effective cleaning diameter,  $D_{removal}$ )을 사용하였다. 앞서 액적의 최대 퍼짐 직경( $D_{max}$ )을 충돌 직전의 액적 초기 직경( $D_0$ )으로 무차원화하여  $\beta_{max}$ 로 나타낸 것과 같이,  $D_{removal}$  또한  $D_0$ 로 무차원화하여 액적의 크기 대비 입자 제거 능력을 나타내었다. 이러한 단일 액적 충돌에 의한 입자 제거 가능성의 정량화 예시로써, 그림 5(a)는 직경 50 nm의 구형 타이타늄(titanium, Ti) 입자에 대한  $D_{removal}/D_0$ 을 나타내고 있다. 검정색 그래프는 초기 직경 10  $\mu\text{m}$  크기의 액적에 의한  $D_{removal}/D_0$ 를 나타내고, 빨간색 그래프는 초기 직경 50  $\mu\text{m}$  액적을 나타낸다. 전체 충돌속도 범위에서  $D_0=50 \mu\text{m}$  액적의  $D_{removal}/D_0$ 가  $D_0=10 \mu\text{m}$ 일 때보다 평균적으로 약 27% 더 높은 것을 볼 수 있다. 그런데, 그림 5(b)와 같이 직경 20 nm의 타이타늄 입자에 대한

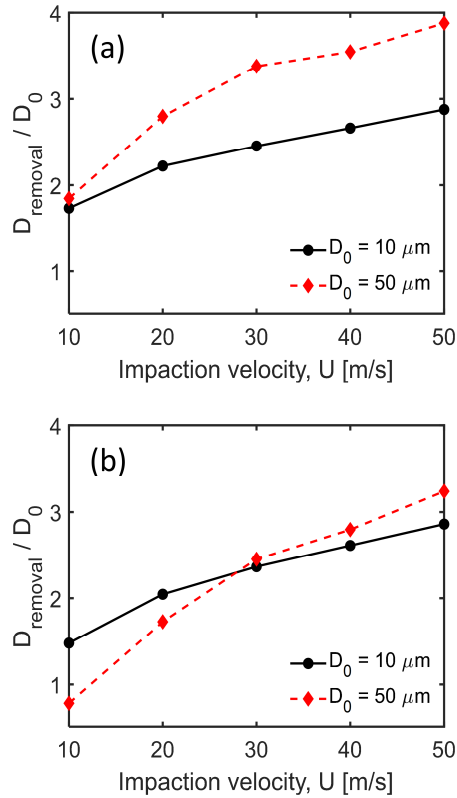


Figure 5 Variation of effective cleaning diameter ( $D_{removal}$ ) with impaction velocity: (a) particle (Ti) diameter: 50 nm, (b) particle (Ti) diameter: 20 nm.

$D_{removal}/D_0$ 의 경우, 충돌 속도가 30 m/s 이상일 때는 거의 유사한  $D_{removal}/D_0$ 을 보이다가 충돌 속도가 30 m/s 미만이면  $D_0=10 \mu\text{m}$ 의 경우가 근소하게 더 큰  $D_{removal}/D_0$ 을 가짐을 보여주고 있다. 이는 경계층의 형성과 관계가 있으며, 그림 4와 같이 동일한 무차원 시간 및 위치에서 속도 경계층을 확인했을 때  $D_0=50 \mu\text{m}$  액적이 형성하는 경계층 속도 분포에서의 최고 속도는 약 20 m/s로  $D_0=10 \mu\text{m}$  액적의 19 m/s 보다 근소하게 더 빠르지만 경계층 두께가 상대적으로 더 얇은 10  $\mu\text{m}$  액적이 표면 근처에서 상대적으로 더 높은 속도를 가질 수 있기 때문에 더 나은 입자 제거 능력을 가진다. 게다가, 만약 세정을 위해 동일한 부피의 액체가 공급된다면 액적의 수가  $D_0$ 의 세제에 반비례하는데 비하여 단일 액적의 세정 영역은 유효 세정 직경( $D_{removal}$ )의 세제에 비

레하므로  $D_{removal}/D_0$ 이 유사한 경우 액적의 크기가 작아도 더 나은 세정 성능이 나타날 가능성을 또한 있을 것으로 추정된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 반도체 세정과 패턴 손상 방지를 목표로 미세액적이 고체 표면에 충돌할 때 발생하는 액적의 퍼짐을 전산모사 하여 그 퍼짐 속도 분포를 상세히 관찰하였다. 그 결과, 액적의 퍼짐과 함께 나타나는 속도 경계층 데이터를 획득하였다. 기존 모델 중 가장 유력한 입자 탈착 메커니즘으로 알려진 회진력에 의한 탈착에 계산결과를 적용하여 세정 효과를 조사하였으며, 이러한 단일 액적에 의한 입자 제거 능력을 유효 세정 직경( $D_{removal}$ )으로 정량화하였다. 전산모사 결과는 기존 문헌들로부터 얻을 수 있는  $\beta_{max}$  (maximum spreading ratio)와 비교하여 검증하였고, 유효 세정 직경의 계산은 10  $\mu\text{m}$ 와 50  $\mu\text{m}$  직경의 미세액적이 10-50 m/s로 고속 충돌하는 경우에 대하여 다루어 졌다. 전산모사 결과를 바탕으로 주어진 액적 충돌 조건(액적의 충돌 속도 및 크기, 오염입자의 크기 등)에서 단일 액적의 세정 능력을 조사하였다. 유효 세정 직경은 액적의 속도, 크기가 커짐에 따라 증가하였지만 액적의 초기 직경 대비 유효 세정 직경( $D_{removal}/D_0$ )은 충돌 속도 30 m/s 이하에서 오히려 액적의 초기 직경( $D_0$ )이 작은 경우가 더 높은 것으로 나타나 조건에 따라서는 액적의 크기를 줄이는 것이 세정에 더 유리하였다.

실제 반도체 산업에서의 물리적으로 입자를 제거하는 세정 공정은 다수의 액적을 충돌시켜 입자 제거를 수행하므로, 본 연구에서 제안한 유효 세정 직경은 크기 분포를 지닌 액적들의 다중 충돌 상황에 적용될 필요가 있으며 이 때 세정 효율 예측을 위한 핵심적인 데이터로 활용될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구는 이 과제는 부산대학교 기본연구지원 사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

- Burdick, G. M., Berman, N. S., and Beaudoin, S. P. (2005). Hydrodynamic particle removal from surfaces, *Thin Solid Films*, 488(1-2), 116-123.
- Chequer, L., Carageorgos, T., Naby, M., Hussaini, M., Lee, W., and Bedrikovetsky, P. (2021). Colloidal detachment from solid surfaces: Phase diagrams to determine the detachment regime, *Chemical Engineering Science*, 229, 116146.
- Cho, Y., Choi, H., Mo, S., and Kim, T. (2020). Removal of nano-sized surface particles by CO<sub>2</sub> gas cluster collisions for dry cleaning, *Microelectronic Engineering*, 234, 111438.
- Derjaguin, B. V., Muller, V. M., and Toporov, Y. P. (1975). Effect of contact deformations on the adhesion of particles, *Journal of Colloid and interface science*, 53(2), 314-326.
- Erkan, N., and Okamoto, K. (2014). Full-field spreading velocity measurement inside droplets impinging on a dry solid surface, *Experiments in fluids*, 55(11), 1-9.
- Fan, F. G., Soltani, M., Ahmadi, G., and Hart, S. C. (1997). Flow-induced resuspension of rigid-link fibers from surfaces, *Aerosol Science and Technology*, 27(2), 97-115.
- Frommhold, P. E., Mettin, R., and Ohl, C. D. (2015). Height-resolved velocity measurement of the boundary flow during liquid impact on dry and wetted solid substrates, *Experiments in Fluids*, 56(4), 1-17.
- Haller, K. K., Ventikos, Y., Poulidakos, D., and Monkewitz, P. (2002). Computational study of high-speed liquid droplet impact, *Journal of applied physics*, 92(5), 2821-2828.
- Henry, C., and Minier, J. P. (2014). Progress in particle resuspension from rough surfaces by turbulent flows, *Progress in Energy and Combustion Science*, 45, 1-53.
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2nd Ed., New York, John Wiley &

- Sons, Inc.
- Hong, S., Kim, J., Won, J., Qureshi, N., Chae, S., Wada, Y., Hiyama, H., Hamada, S., and Kim, T. (2019). A water polishing process to improve ceria abrasive removal, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 8(8), 430.
- Johnson, K. L., Kendall, K., and Roberts, A. (1971). Surface energy and the contact of elastic solids, *Proceedings of the royal society of London. A. mathematical and physical sciences*, 324(1558), 301-313.
- Jung, S., and Hutchings, I. M. (2012). The impact and spreading of a small liquid drop on a non-porous substrate over an extended time scale, *Soft Matter*, 8(9), 2686-2696.
- Kern, W. (1990). The evolution of silicon wafer cleaning technology, *Journal of the Electrochemical Society*, 137(6), 1887.
- Kondo, T., and Ando, K. (2019). Simulation of high-speed droplet impact against a dry/wet rigid wall for understanding the mechanism of liquid jet cleaning, *Physics of Fluids*, 31(1), 013303.
- Okorn-Schmidt, H. F., Holsteyns, F., Lippert, A., Mui, D., Kawaguchi, M., Lechner, C., Frommhold, P. E., Nowak, T., Reuter, F., Piqué, M. B., Cairós, C., and Mettin, R. (2013). Particle cleaning technologies to meet advanced semiconductor device process requirements, *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 3(1), N3069.
- Pasandideh-Fard, M., Qiao, Y. M., Chandra, S., and Mostaghimi, J. (1996). Capillary effects during droplet impact on a solid surface, *Physics of fluids*, 8(3), 650-659.
- Regulagadda, K., Bakshi, S., and Das, S. K. (2017). Morphology of drop impact on a superhydrophobic surface with macro-structures, *Physics of fluids*, 29(8), 082104.
- Tan, H. (2017). Numerical study on splashing of high-speed microdroplet impact on dry microstructured surfaces, *Computers & Fluids*, 154, 142-166.
- Thoroddsen, S. T., Thoraval, M. J., Takehara, K., and Etoh, T. G. (2011). Droplet splashing by a sling-shot mechanism, *Physical review letters*, 106(3), 034501.
- van Dam, D. B., and Le Clerc, C. (2004). Experimental study of the impact of an ink-jet printed droplet on a solid substrate, *Physics of Fluids*, 16(9), 3403-3414.
- Visser, C. W., Frommhold, P. E., Wildeman, S., Mettin, R., Lohse, D., and Sun, C. (2015). Dynamics of high-speed micro-drop impact: numerical simulations and experiments at frame-to-frame times below 100 ns, *Soft matter*, 11(9), 1708-1722.
- Wang, X. D., Lee, D. J., Peng, X. F., and Lai, J. Y. (2007). Spreading dynamics and dynamic contact angle of non-Newtonian fluids. *Langmuir*, 23(15), 8042-8047.
- Yonemoto, Y., and Kunugi, T. (2017). Analytical consideration of liquid droplet impingement on solid surfaces, *Scientific reports*, 7(1), 1-11.
- Zoetewij, M. L., Van der Donck, J. C. J., and Versluis, R. (2009). Particle removal in linear shear flow: model prediction and experimental validation, *Journal of adhesion science and technology*, 23(6), 899-911.