

승화성 나노 탄환입자와 표면위의 나노 고체입자의 충돌에서의 운동에너지 전달 특성

최민석* · 이진원*†

* 포항공과대학교 기계공학부

Characteristics of Kinetic Energy Transfer in Collisions Between Fragile Nanoparticle and Rigid Particle on Surface

Min Seok Choi* and Jin Won Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Pohang Univ. of Science and Technology

(Received March 10, 2014 ; Revised May 27, 2014 ; Accepted May 27, 2014)

Key Words: MD Simulation(분자 동역학), Nano Particles(나노 입자), Fragile Bullet(승화성 탄환), Kinetic Energy Transfer(운동에너지 전달)

초록: 충돌시 부서져 사라지는 승화성 나노 탄환입자로 표면 위에 붙어있는 고체 나노입자를 가격하는 과정에서 탄환입자로부터 목표입자로의 운동에너지 전달특성을 분자동역학 전산모사 방법을 이용하여 해석하였다. 탄환입자는 이산화탄소로 이루어져있으며 탄환의 크기, 온도 및 발사속도를 바꿔가며 전산모사를 수행하였다. 탄환입자로부터 목표입자에 전달되는 운동에너지 전달비율은 탄환 속도와 크기에 관계없이 일정하였지만 탄환의 온도에 따라 민감하게 변하였는데, 이는 온도에 따른 탄환입자의 결합력의 변화에서 기인하는 것이었다. 동일조건 하의 아르곤 탄환에 비하여 이산화탄소 탄환의 에너지 전달효율은 약 2 배 정도이며, 여기에서 이산화탄소 탄환의 높은 세정성능이 비롯됨을 최초로 확인하였다.

Abstract: The characteristics of kinetic energy transfer during a collision between a rigid target particle on a surface and a fragile bullet particle moving at a high velocity were analyzed using molecular dynamics simulation. Bullet particles made of CO₂ were considered and their size, temperature, and velocity were varied over a wide range. The fraction of kinetic energy transferred from the bullet particle to the target particle was almost independent of the former's size or velocity; however, it was sensitively dependent on its temperature, which can be attributed to the change in the bullet rigidity with temperature. This fraction was nearly twice as high for CO₂ bullets as for Ar bullets. This result explains the reason for the more superior cleaning performance of CO₂ bullets than Ar bullets with regard to contaminants in the 10 nm size range.

- 기호설명 -

BP : 탄환입자
CP : 목표입자
D : 입자의 지름
F_k : 탄환입자로부터 목표입자로의 운동에너지 전달비율
LJ : 레나드-존스 (Lennard Jones)
MD : 분자동역학 (molecular dynamics)

M : 분자량 (amu)
k_b : 볼츠만 상수 (J/K)
r : 분자간 거리 (Å or m)
r_c : 절단 거리 (Å or m)
rδV : 수정항
T : 온도 (K)
V : 속도 (m/s)
V_{LJ} : Lennard-Jones 포텐셜 에너지 (J)
V_{shift} : Shifted-force 포텐셜 에너지 (J)

† Corresponding Author, jwlee@postech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

그리스문자

ε : LJ 포텐셜 우물의 깊이 (J)

σ : LJ 포텐셜 특성 길이 (Å or m)

τ : LJ 포텐셜 특성 시간 (s)

상첨자

* : 아르곤 물성치를 기준으로 한 각 수치의 무차원화 표시

하첨자

b : 탄환입자 (BP)

c : 목표입자 (CP)

1. 서론

재래의 가공기술 중 하나인 샌드블래스트는 모래와 같은 고체입자를 표면에 고속으로 충돌시켜 그 충격력으로 표면을 가공하는 방법인데, 최근 반도체 분야에서 웨이퍼 위에 부착된 나노크기의 오염입자를 제거하기 위해 개발되고 있는 저온입자세정법도 개념적으로는 이와 동일하다.

반도체가공의 수율은 표면오염에 의해 좌우되고, 앞으로 5년 이내에 DRAM 혹은 플래시 메모리장치들의 생산에서 반드시 제거하여야 할 오염입자의 크기가 10nm 수준까지 낮아져야 한다.⁽¹⁾ 세정유체를 이용하는 습식공정에서는 유체유동이 부착입자에 작용하는 항력으로 오염입자를 제거하는데, 표면과 오염입자 사이의 접촉면적당 부착력은 입자의 크기에 반비례하는 반면 유동에 의한 항력은 입자의 단면적에 비례하기 때문에, 나노 입자에 있어서는 이러한 세정방식은 오염입자가 작아질수록 비효율적이 된다.⁽²⁻⁶⁾

나노 크기의 오염입자를 효과적으로 세정할 수 있는 대안 중 하나로 개발되고 있는 입자빔 기법에서는 충돌 시 부서지는 탄환입자를 고속으로 표면상의 오염입자에게 분사하여 오염입자가 고속으로 표면상에서 움직이다가 표면에서 탈착되도록 하는 것이다. 표면에 이차적 오염이 발생하지 않도록 충돌 후에는 완전히 부서져서 기체로 바뀌어 제거되는 승화성 탄환을 이용하여야 하며, 일반적으로 기체나 액체를 고속 팽창시켜 탄환입자를 만드는데, 대체로 아르곤, 질소, 이산화탄소 등이 많이 쓰이고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

최근 이 방법을 이용하여 오염입자와 비슷한 크기의 CO₂ 탄환입자를 초음속으로 쏘서 10nm 부근의 오염입자까지도 제거할 수 있다는 획기적인 사실이 실험적으로 입증되었으나,^(10,11) 이 과정에 대한 메커니즘은 아직 확실히 밝혀지지 않았다. 또

한 아르곤 탄환입자에 대한 분자동역학적 전산모사는 부분적으로 수행되었으나,^(12,13) 탄환입자와 오염입자 사이의 운동에너지 전달률에 대한 일반적인 특성 연구는 아직 없었다.

따라서 이 연구의 목표는 이산화탄소로 이루어진 나노 탄환입자와 나노 고체입자의 충돌 시에 탄환입자로부터 오염입자로의 운동에너지 전달률을 분자동역학방법을 통해 파악하는 것이다.

2. 계산 방법

탄환입자와 오염입자를 이루는 분자들의 움직임을 분자동역학 전산모사를 통해 계산하였다. 각 분자들 사이의 작용력은 아르곤과 이산화탄소 분자들의 거동을 모사하기에 적합한 레나드-존스 포텐셜, 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$V_{LJ}(r) = 4\epsilon [(\sigma/r)^{12} - (\sigma/r)^6] + r\delta V \quad (1)$$

여기서 r (m)은 분자간 거리를 의미하며, σ (m)와 ϵ (J)은 각각 레나드존스 포텐셜의 특성 길이, 특성 에너지를 의미한다. 계산의 편의를 위해 두 분자 사이의 거리가 일정 크기 이상이 되면 작용력이 없다는 절단거리를 도입하며, $r\delta V$ 는 절단오차를 줄이기 위한 수정항을 의미한다. 본 연구에서는 포텐셜이 0이 되는 절단거리 r_c 를 2.5 σ 로 두고 계산 오차 감소 및 절단거리에서의 포텐셜의 불연속점을 없애기 위해 식 (2)의 shifted force potential을 사용하였다.

$$V_{\text{shifted}}(r) = V(r) - V(r_c) - \left(\frac{dV(r)}{dr} \right)_{r_c} (r - r_c) \quad \text{when } r < r_c \quad (2)$$

$$= 0 \quad \text{when } r \geq r_c$$

본 연구에 쓰인 레나드-존스 포텐셜의 이산화탄소, 실리콘 및 오염입자에 대한 특성변수 값들은 Table 1에 정리하였으며, 이 수치들은 기존에 연구된 아르곤 탄환에 대한 연구결과와의 비교를 위해 아르곤의 특성값(Table 2)을 기준으로 전부 무차원화하였다.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾ 서로 다른 종류의 분자들의 경우 Lorentz-Berthelot mixing rule을 이용하여 포텐셜을

Table 1 LJ parameters for CO₂, Si and contaminant particle

	mass (amu)	σ (Å)	ϵ / k_B (K)
CO ₂	44	3.94	195
Si	4×10^9	3.83	202
Contaminant	20	3.41	1200

Table 2 Reference values for nondimensionalized parameters

Condition		
Mass	m_{Ar}	6.65×10^{-26} kg
Length	σ_{Ar}	0.341×10^{-9} m
Time	$\tau_{Ar} = \sigma_{Ar} (m_{Ar} / \epsilon_{Ar})^{1/2}$	2.16×10^{-12} s
Temperature	$T_{Ar} = \epsilon_{Ar} / k_B$	120K
Energy	ϵ_{Ar}	1.66×10^{-21} J
Velocity	$v_{Ar} = (\epsilon_{Ar} / m_{Ar})^{1/2}$	158m/s
Acceleration	$a_{Ar} = \epsilon_{Ar} / m_{Ar} \sigma_{Ar}$	7.32×10^{13} m/s ²

계산하였다. 식 (2)의 미분에 의한 입자들의 속도와 가속도 계산은 Leap frog algorithm 을 이용하였고,⁽¹⁷⁾ 적분 time step 은 $0.002\tau_{Ar}$ (약 4.32×10^{-15} s)로 설정하여 계산하였다.

분자동역학 전산모사의 시스템 구성은 실리콘 평판과 그 위에 붙어있는 오염입자, 그리고 V(m/s)의 속력을 가진 나노 크기의 탄환입자로 이루어진다 (Fig. 1).

무차원 탄환 지름(D_b^*)은 10~16 범위이며, 탄환을 구성하는 입자 개수는 탄환 지름에 맞추어 조정하였다. 평판은 탄환과 동일한 수밀도를 가지도록 하여 22440 개의 Si 원자로 구성하였으며, 평판의 질량은 $4 \times 10^9 \text{ amu} = 6.6 \times 10^{-15} \text{ g}$ 정도로 매우 크게 설정하여 움직임이 거의 없도록 구현하였다. 시뮬레이션에서 오염입자의 구조 형태에 따른 세정 결과 차이가 거의 없기 때문에, 계산시간 단축을 위해 실제 반도체 내에 존재하는 폴리머 형태 등의 다양한 구조를 지닌 오염입자를 단순화하여 같은 크기 내에서 적절한 결합력 및 적절한 부착 에너지를 지닌 가상 LJ 분자를 이용하였다. 오염입자의 지름(D_c^*)은 탄환지름의 변화폭의 중간 크기인 13 (4.4 nm)이며, 20amu 인 LJ 분자들 2056 개로 이루어져있다. 오염입자의 수밀도는 탄환입자의 약 2 배정도이고, 포텐셜 우물 깊이 ϵ^* 는 10 이며, 이 값은 오염입자가 Al 이나 Cu 입자보다 약간 부드러운 입자임을 나타낸다.

전체적인 계산 영역 크기는 $140\sigma_{Ar} \times 60\sigma_{Ar} \times 40\sigma_{Ar}$ ($x \times y \times z$)로 되어있으며, x 방향과 z 방향은 주기적 경계조건을 주었고 위쪽 y 방향으로 반사 경계조건을 주었다. 전체 영역을 x 방향으로 길게 잡은 이유는, 이 거리가 짧은 경우 충돌 후의 탄환입자의 파편이 이동하고 있는 오염입자의 움직임을 방해할 수 있기 때문에 이러한 영향을 최소화하기 위해서이다.

초기에 탄환입자와 오염입자는 일단 전부 면심입방구조로 배치하고, 평판은 다이아몬드 격자구

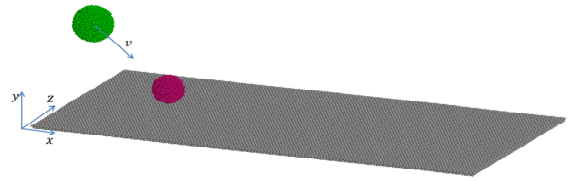


Fig. 1 System configuration of the MD simulation

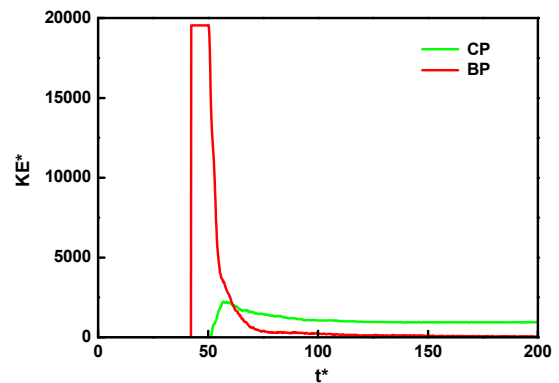


Fig 2 Time change of kinetic energy of the CO₂ BP and the CP at a removal condition of $D_b^* = 16$ and $V_b^* = 4.0$

조를 이루도록 하였다. 계산의 용이함을 위해 면심입방구조를 사용하였다. 오염입자를 평판에 서서히 부착시키는 동안 평판과 오염입자는 Nosé-Hoover 서모스탯을 이용하여 300K 로 일정온도를 유지하였으며, 이 때 오염입자의 부착에너지는 약 $200\epsilon_{Ar}$ 이다. 이 값은 비슷한 크기의 Si 오염입자를 평판에 부착 시켰을 때와 비슷하며,⁽¹⁸⁾ 물질에 따른 부착에너지의 변화 정도는 크지 않기 때문에 오염입자의 부착 조건으로 매우 적합하다고 판단 된다. 오염입자의 부착이 끝난 후, 전체 계는 다시 20000 타임 스텝 동안 서모스탯을 이용하여 온도를 일정하게 유지시킨다. 이 과정에서 오염입자와 평판의 온도는 300K 로 유지시키며, 탄환입자의 온도는 생성조건을 고려하여 36K, 108K 의 두 가지 경우를 고려하였다. 탄환입자는 오염입자의 중심을 향해 45° 각도로 발사하고, 이 이후에는 평판만 300K 로 일정온도를 유지시킨다.

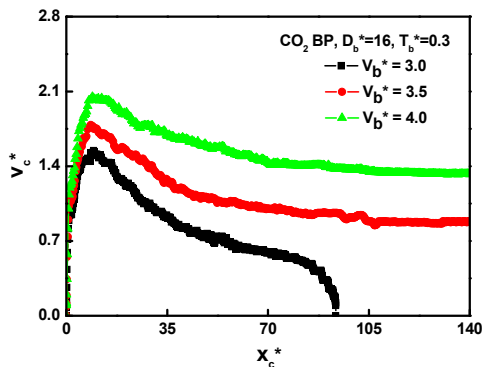
3. 결 과

3.1 오염입자와 탄환입자 사이의 운동에너지 전달 기본특성

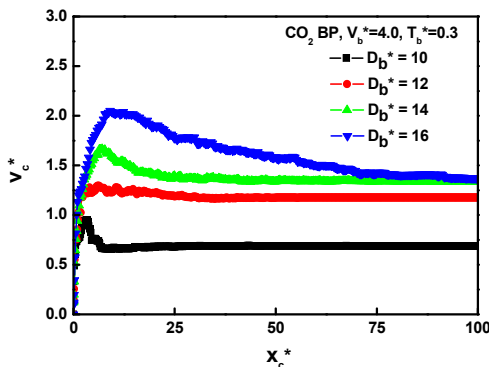
탄환입자가 평판 위의 오염입자에 정면충돌을 할 때 탄환입자는 순간적으로 운동에너지가 감소하며 오염입자는 일정한 양의 운동에너지를 얻는

다(Fig. 2). 탄환 입자는 충돌 이후 완전히 부서지기 때문에, 질량 중심 운동에너지는 일정시간이 지나면 완전히 0이 된다. 오염입자는 충돌 이후 미끄러짐과 회전을 하면서 이동하며, 이 과정 동안 주변의 부서진 탄환 입자 파편 및 평판에 의한 인력에 의해서 서서히 속도가 감소한다.

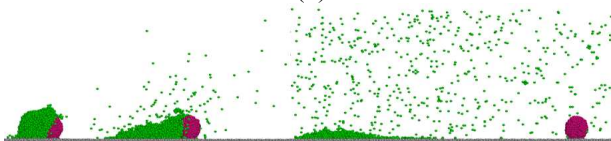
만약 초기에 얻은 운동에너지가 충분히 크다면, 오염입자는 일정 거리를 미끄러지는 형태로 이동하다가 어느 순간 회전운동을 병행하면서 평판으로부터 떨어져 나가게 되는데, 이 시점 이후 오염입자의 운동에너지는 거의 변하지 않는다. Fig. 2의 예를 보면, 탄환입자의 초기 운동 에너지는 $19500\epsilon_{Ar}$ 이고, 오염입자는 $6.5\tau_{Ar}$ (~14ps)의 시간 동안 최대 $2240\epsilon_{Ar}$ 의 운동에너지를 얻기 때문에, 충돌하는 동안 운동 에너지 전달률(F_k)은 약 $2240/19500 \approx 0.115$ 로 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig 3 Change of CP velocity with moving distance on the substrate: for (a) BP velocities, $V_b^* = 3.0, 3.5, 4.0$ and (b) BP sizes, $D_b^* = 10, 12, 14$ and 16 ; (c) snapshots taken at $x_c^* = 10, 20$ and 80 for $V_b^* = 3.0$ and $D_b^* = 16$ (green: BP components; purple: CP)

3.2 탄환의 크기와 속도에 따른 운동에너지 전달률의 변화

평판과 오염입자 조건은 그대로 둔 채로 서로 다른 3 가지 탄환발사속도($V_b^* = 3.0, 3.5, 4.0$)와 4 가지 탄환크기($D_b^* = 10, 12, 14, 16$)를 가진 36K의 이산화탄소 탄환입자를 이용한 경우에 대한 전산모사를 수행하였다. 충돌 후 오염입자의 운동 특성은 탄환의 속도에 따라 크게 변하지만[Fig. 3(a)] 탄환크기에 따른 특성 변화는 상대적으로 작았다[Fig. 3(b)].

탄환이 크더라도 ($D_b^* = 16$) 탄환속도가 낮다면 ($V_b^* = 3.0$), 오염입자는 평판 위를 미끄러지다가 결국 떨어지지 못하고 멈추고, 탄환입자의 속도가 더 높아져야만 ($V_b^* = 3.5, 4.0$) 최종적으로 평판에서 서부터 떨어져 나가는 것을 알 수 있다. 특히 $V_b^* = 4.0$ 경우에는 탄환의 크기에 상관없이 항상 오염입자는 떨어지는 것을 볼 수 있다[Fig. 3(b)].

에너지 전달의 가장 중요한 특징은, 오염입자가 가속되는 동안 이동하는 거리는 탄환의 속도에는 거의 영향을 거의 받지 않고 오로지 탄환 크기에 따른 영향만이 보여진다는 점이다(Fig. 3). 즉 충돌하는 동안 오염입자의 속력은 탄환입자의 속력보다 낮기 때문에 항상 초반에 큰 가속이 일어나게 되는데, 이러한 가속이 일어나는 동안 이동하는 거리는 탄환의 크기에 비해 상당히 작은 거리이지만 탄환입자의 크기에 비례하여 커지게 된다. 이러한 현상은, 탄환운동에너지의 대부분은 충돌 시 평판에 의해 소실되고, 오염입자에는 작은 양만이 전달된다는 것을 나타낸다. 오염입자의 감속은 가속구간 이후에 바로 나타나는데, 감속의 대부분은 탄환입자의 부서진 파편들로부터 생기는 뒤쪽 방향의 인력에 의해 생기게 된다. 따라서 오염입자의 감속이 지속되는 시간 및 이동거리는 평판에 부딪혀 부서지는 탄환의 파편의 양에 비례하며, 탄환의 입자가 클수록 파편에 의한 인력도 같이 증가하게 된다[Fig. 3(c)].

오염입자가 평판으로부터 떨어지기 위해 필요한 속력은 탄환입자의 파편에 의한 총 인력이 커질수록 높아야 하며, 최종적으로 떨어지는 시점까지의 이동거리는 탄환입자가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 바꿔 말하면, 매우 작은 탄환입자를 이용하여 세정하는 경우엔 충분한 발사속도를 가질 수 있다면 짧은 시간, 짧은 거리 범위 내에서 오염입자를 제거 할 수 있음을 의미한다. 탄환의 크기와 속도에 관계없이 F_k 는 거의 일정한 값을 나타내었으며 (0.112-0.115), 오염입자를 제거하기 위해선 탄환의 크기보단 탄환의 속도가 더욱 중요한 요

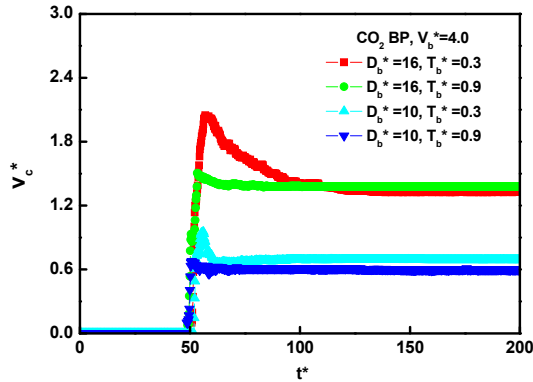


Fig 4 Time change of CP velocity at two different BP temperatures, $T_b^*=0.3$ and 0.9 , for two different BP sizes, $D_b^*=10$ and 16 . ($V_b^*=4.0$)

소임을 알 수 있는데, 이는 큰 탄환입자를 저속으로 쏘는 경우엔 ($D_b^* = 16, V_b^* = 3.0$) 작은 탄환을 고속으로 쏘는 경우($D_b^* = 10, V_b^* = 4.0$)에 비해 운동에너지는 2.3 배나 높아지지만 오염입자는 오히려 작은 운동에너지를 가진 탄환입자의 조건에서 떨어진다는 사실로부터 이를 유추할 수 있다.

3.3 탄환의 결합력에 따른 운동에너지 전달률 변화

탄환입자와 오염입자 사이의 에너지 전달은 탄환이 부서지는 과정 중 초반의 짧은 시간 내에 일어나기 때문에, 탄환의 단단한 정도는 오염입자에 대한 에너지 전달에 영향을 줄 수 있다. 이러한 가능성을 검증하기 위해 이산화탄소 탄환을 이용하여 서로 다른 두 탄환온도 $T_b^* = 0.3(36\text{ K})$ 와 $0.9(108\text{ K})$ 조건에서 계산해보았다. 동일한 조건하에서 탄환온도가 낮은 경우엔 높은 경우보다 전달되는 오염입자의 최대 운동에너지 양은 훨씬 증가하는 것을 볼 수 있다(Fig. 4). 탄환의 온도가 높은 경우 ($T_b^* = 0.9$)에서의 F_k 는 작은 탄환($D_b^*=10$)의 경우엔 약 0.057, 큰 탄환($D_b^*=16$)의 경우엔 약 0.062 를 나타내었으며, 이 값들은 탄환의 온도가 낮은 ($T_b^*=0.3$) 조건에서의 F_k 에 비해 약 절반의 수준이다. 또한 탄환의 온도가 $T_b^*=0.9$ 인 경우에도 앞의 $T_b^*=0.3$ 의 경우와 마찬가지로 탄환의 크기 및 속도에 따른 전달률의 변화는 거의 나타나지 않았다.

탄환 온도의 변화에 따른 오염입자의 속도 변화가 다르게 나타나는 이유는 탄환의 온도가 높은 경우가 탄환의 온도가 낮은 경우에 비해 평판에 충돌 하는 순간 상대적으로 더 빠르게 부서지며, 같은 시간 동안 평판에 남아있는 탄환의 분자

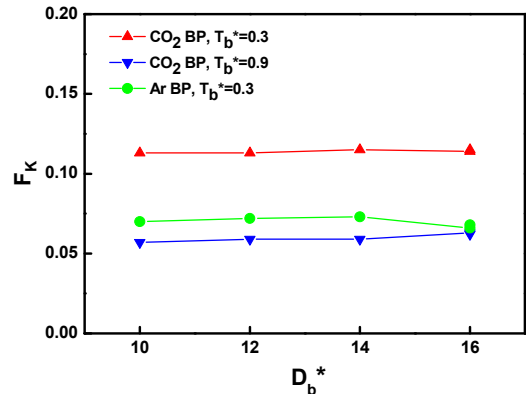


Fig 5 Transfer fraction of the x-directional kinetic energy for BPs made of two different gas (Ar, CO_2) molecules to various sizes

개수들이 상대적으로 줄어들기 때문에 전체적인 인력의 양이 줄어들어, 오염입자의 가속 및 감속 구간이 크게 줄어들기 때문이다. 즉 충돌 시 높은 온도를 가진 탄환은 낮은 온도를 가진 탄환에 비해 훨씬 빠르게 부서지고 충돌순간 오염입자에 전달되는 힘의 방향을 쉽게 잃어버리기 때문에 F_k 가 훨씬 낮아진다고 볼 수 있다.

3.4 서로 다른 가스 분자들로 만들어진 탄환에 따른 효과 비교 : 아르곤, 이산화탄소

이산화탄소 탄환입자에 대한 본 연구의 결과를 기존의 아르곤 탄환을 이용한 Choi 등⁽¹²⁾의 연구결과와 비교해 보았다. 아르곤 탄환은 높은 온도에서는 생성하기 어렵기 때문에 실험이나 해석에서 36K ($T_b^*=0.3$)를 표준조건으로 사용하고 있으므로, 이 조건에 대해 얻어진 Choi 등⁽¹²⁾의 F_k 를 본 연구에서 얻어진 이산화탄소 결과와 함께 Fig. 5 에 종합하였다.

아르곤과 이산화탄소의 F_k 를 비교해보면 모두 탄환의 크기와 속도에 관계없이 각 기체마다 거의 일정한 값을 나타낸다(Fig. 5). 아르곤 탄환입자를 이용했을 시의 F_k 는 약 0.066~0.073 으로서, 이산화탄소 탄환 108K 의 조건보다는 약간 낮은 값을 나타내었고, 같은 온도인 36K 조건에서의 이산화탄소 탄환의 전달률과 비교한 경우엔 약 60% 정도의 값을 나타내었다.

이 결과로부터 이산화탄소 탄환의 에너지 전달 효율이 상대적으로 높다는 것이 아직까지 아르곤 탄환으로는 10nm 오염입자 제거가 성공적이지 않고 이산화탄소 탄환으로만 성공적이었음에 대한 부분적인 이유로 볼 수 있으며, 따라서 본 연구에서 두 가지 다른 탄환의 각기 다른 세정효율특성

에 대한 최초의 단서를 파악한 것이 된다.

4. 결론

분자동역학 방법을 이용하여 부서지기 쉬운 이산화탄소 탄환입자와 평판 위에 붙어있는 단단한 오염입자 사이에 정면충돌하는 동안의 운동에너지 전달과정을 전산 모사하였다. 운동에너지 전달률은 탄환속도나 크기에 따른 변화는 거의 없었지만 오직 탄환입자의 온도에 따라서는 큰 차이를 보였는데, 이는 온도에 따른 탄환입자의 결합력의 변화 때문이다. 아르곤 탄환과 비교하여 동일온도 조건에서 이산화탄소 탄환의 에너지 전달효율은 약 2 배 정도이며, 여기에서 이산화탄소 탄환의 높은 세정능이 비롯됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 Korean government (MOE)에서 후원하는 한국연구재단 KRF(No.2013R-1A1A-2057752) 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) International Technology Roadmap for Semiconductors: 2011 Yield Enhancement Report and Ttable, SEMATECH (2011) Austin, TX [<http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm>]
- (2) Bakhtari, K., Guldiken, R. O., Makaram, P., Busnaina, A. A. and Park, J. G., 2006, "Experimental and Numerical Investigation of Nanoparticle Removal Using Acoustic Streaming and the Effect of Time," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 153, No. 9, pp. G846~G850.
- (3) Lim, H., Jang, D., Kim, D., Lee, J. W. and Lee, J.-M., 2005, "Correlation Between Particle Removal and Shock-Wave Dynamics in the Laser Shock Cleaning Process," *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, No. 5, pp. 054903~054908.
- (4) Lin, H., Chioujones, K., Lauerhaas, J., Freebern, T. and Yu, C., 2007, "Damage-Free Cryogenic Aerosol Clean Processes," *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, Vol. 20, No. 2, pp. 101~106.
- (5) Rimai, D.S and Quesnel, D. J., 2001, *Fundamentals of Particle Adhesion*, Global Press.
- (6) Sherman, R., 2007, "Carbon Dioxide Snow Cleaning," *Particulate Science and Technology*, Vol. 25, No. 1, pp. 37~57.
- (7) Bae, H., Kim, I., Kim, E. and Lee, J. W., 2010, "Generation of Nano-Sized Ar-N₂ Compound Particles by Homogeneous Nucleation and Heterogeneous Growth in a Supersonic Expansion," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 41, No. 3, pp. 243~256.
- (8) Choi, M. S., Yi, M. Y., Lee, K. H. and Lee, J. W., 2012, "Molecular-Dynamics Simulations of Thermal Accommodation of Helium Gas on a Nanoparticle," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 44, No. pp. 62~70.
- (9) Yang, H.-J., Lee, K.-H., Choi, M. S., Yi, M. Y. and Lee, J. W., 2009, "Effective Condensation Coefficient on a Nanoparticle," *Applied Physics Letters*, Vol. 95, No. 22, pp. 223109~223109-3.
- (10) Hwang, K. S., Lee, K. H., Kim, I. H. and Lee, J. W., 2011, "Removal of 10-nm Contaminant Particles from Si Wafers Using Argon Bullet Particles," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, No. 10, pp. 4979~4986.
- (11) Kim, I. and Lee, J., 2013, "The Removal of 10 nm Contaminant Particles from Micron-Scale Trenches Using CO₂ Nano Bullets," *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 15, No. 4, pp. 1~13.
- (12) Choi, M. S., Yi, M. Y. and Lee, J. W., 2013, "Criteria for Removal of Nanoparticles Adhered to a Substrate by Bombardment with Nano-Sized Bullets," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 63, pp. 38~47.
- (13) Yi, M. Y., Kim, D. S., Lee, J. W. and Koplik, J., 2005, "Molecular Dynamics (MD) Simulation on the Collision of a Nano-Sized Particle onto Another Nano-sized Particle Adhered on a Flat Substrate," *Journal of Aerosol Science*, Vol. 36, No. 12, pp. 1427~1443.
- (14) Allen, M. P. and Tildesley, D. J., 1989, *Computer simulation of liquids*, Oxford university press.
- (15) Chen, L., Shibuta, Y., Kambara, M. and Yoshida, T., 2013, "Molecular Dynamics Simulation of the Role of Hydrogenated Si Clusters for Fast Rate Mesoplasma Epitaxy," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 46, No. 42, p. 425302.
- (16) Wilhelm, E. and Battino, R., 1971, "Estimation of Lennard-Jones (6, 12) Pair Potential Parameters from Gas Solubility Data," *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 55, p. 4012.
- (17) Hockney, R. W., 1970, "Potential Calculation and some Applications," *Methods of Computation Physics* Vol. 9, pp. 135~211.
- (18) Dahneke B., 1972, "The Influence of Flattening on the Adhesion of Particles," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 40, pp. 1~13.