



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

열플라즈마를 이용한 나노 분말
합성에서 분말의 온도가 열전달
특성에 미치는 영향

Powder Temperature Effect on Heat
Transfer Property for Nano Powder
Synthesis Using Thermal Plasma

2012 년 8 월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

이진영

열플라즈마를 이용한 나노 분말
합성에서 분말의 온도가 열전달
특성에 미치는 영향

지도 교수 김 곤 호

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함
2012 년 8월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
이 진 영

이진영의 공학석사 학위논문을 인준함
2012 년 8월

위 원 장 _____ 황 용 석 _____ (인)

부위원장 _____ 김 곤 호 _____ (인)

위 원 _____ 박 동 화 _____ (인)

초 록

열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 간의 상호작용에 대한 연구는 1980년대에 간단한 전도 및 전하에 의한 구체의 가열에서부터 현재 난류 유동에 이르는 복잡한 현상까지 연구되어 왔다. 본 연구에서는 열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 사이의 열전달 과정을 해석하는데 있어 전하에 의한 가열이 중요시 되는 높은 누센 (Knudsen) 수의 조건에서 분말 표면의 전자 균형에 따른 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달 과정에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 선행 연구에서 주로 연구되었던 저압 스프레이 용사 공정이 아닌 나노 분말 합성 공정에서 분말 표면에서의 열전자 방출에 의한 분말 표면의 부유 전위 변화 및 열플라즈마와 에너지 전달 현상에 대해 연구하였다. 이를 위해 본 연구에서는 비이송식 열플라즈마 반응기를 이용해 나노 분말 합성 장치를 구성하였으며 합성 장치의 조건에 대해 선행 연구를 기반으로 열플라즈마 내 입사한 분말의 열적 특성 모사 코드를 작성하였다. 전산 모사 코드를 통해 운전 조건에 따라 모사된 분말의 온도 및 주변 열플라즈마 특성을 통해 분말의 열플라즈마 내 체류시간에 따른 분말 표면의 부유 전위 변화를 예측하였다. 운전 조건에 따른 분말 표면의 부유 전위 변화에서 선행 연구에서 고려되지 않았던 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달에 미치는 영향을 확인하였다. 전산 모사를 통해 공정 조건에 따라 분말 표면의 열전자 방출 효과를 고려하지 않을 경우 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달을 과대해석 할 개연성이 있음을 확인하였고 이를 검증하기 위해 나노 분말 합성 장치를 통해 열플라즈마 내 테스트 분말 주입 환경을 모사하였다. 실험에서 얻어진 결과와 전산 모사 결과의 비교 검증을 통해 작성된 전산 모사 코드의 신뢰성을 평가하였고 열플라즈마 - 분말

간 에너지 전달에 열전자 방출이 미치는 영향을 검증하였다. 본 연구를 통해 얻은 플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 내 부유 전위 변화와 이에 따른 열전달 해석은 열플라즈마 내 공정 중 분말 가열 효과 예측 및 저압 공정에서 생성된 더스트 거동 및 에너지 전달 연구에 기여할 것으로 예상된다.

주요어 : 열플라즈마, 나노 분말 합성, 분말 열적 특성 모사, 열전자 방출

학 번 : 2010 - 23342

목 차

제 1 장 서론	6
제 1 절 연구의 배경	6
제 2 장	8
제 1 절 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달의 선행 연구	8
제 2 절 전하에 의한 열플라즈마 내 입사 분말 가열 메커니즘	12
제 3 절 분말 표면 전하 균형 및 분말 표면 전위 형성 메커니즘	16
제 3 장	20
제 1 절 실험 장치 구성	20
제 2 절 열플라즈마 내 입사 분말 열적 특성 모사 코드	23
제 4 장	31
제 1 절 열플라즈마 내 체류 분말의 온도, 속도 분포 특성	31
제 2 절 분말 표면에서의 열전자 방출에 따른 열플라즈마 내 체류 분말의 부유 전위특성 변화	37
제 3 절 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달에 미치는 영향	41
제 4 절 분산된 크기의 분말에서 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달 특성	49
제 5 장	55
제 1 절 나노 분말 합성 시스템을 이용한 실리콘 나노 분말 합성 및 전산 모사를 이용한 분말 크기 분산 분석	55
제 6 장	64
제 1 절 결 론	64
참고문헌	66
Abstract	67

표 목차

[표 1]	15
[표 2]	22
[표 3]	26
[표 4]	48
[표 5]	52

그림 목차

[그림 1]	9
[그림 2]	10
[그림 3]	10
[그림 4]	12
[그림 5]	17
[그림 6]	19
[그림 7]	20
[그림 8]	21
[그림 9]	22
[그림 10]	26
[그림 11]	27
[그림 12]	28
[그림 13]	32
[그림 14]	33
[그림 15]	34
[그림 16]	35
[그림 17]	35
[그림 18]	38
[그림 19]	40
[그림 20]	42
[그림 21]	43
[그림 22]	45
[그림 23]	46
[그림 24]	47
[그림 25]	49
[그림 26]	50
[그림 27]	51
[그림 28]	53
[그림 29]	54
[그림 30]	55
[그림 31]	56
[그림 32]	57
[그림 33]	57
[그림 34]	58
[그림 35]	59
[그림 36]	60
[그림 37]	60

[그림 38]	61
[그림 39]	62
[그림 40]	63

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경

열플라즈마 토치가 산업체 공정에 적용된 이후로 열플라즈마 공정은 높은 온도, 에너지 밀도와 넓은 온도 영역을 갖는 장점으로 널리 사용되었다. 열플라즈마를 이용한 공정은 열플라즈마의 높은 온도 및 에너지 밀도를 이용해 높은 열 저항성을 갖는 물질의 코팅 또는 나노 분말화 등에 주로 사용되었다. 그러나 열플라즈마를 이용한 코팅 또는 나노 물질 합성 공정의 경우 매우 많은 공정 변수를 함유하며 이와 같은 공정 변수들은 열플라즈마 내로 주입된 분말에 비선형적인 영향을 미치게 되어 변수 조절을 통해 열플라즈마 공정의 최적화 달성에 어려움이 존재한다. 이에 대한 해석을 위해 열플라즈마 공정 중 여러 변수에 의한 복합적인 영향을 분석하기 위해 열플라즈마 공정 환경을 모사하는 전산 모사 코드에 대한 연구가 1990년대 말 ~ 2000년대 초반부터 시작되었다.[1] 이와 같은 전산 모사 코드 연구는 열플라즈마 제트와 열플라즈마 내로 주입된 원료 (기체, 액체, 고체 상의 원료 물질) 간의 운동량 및 에너지 전달에 따른 열플라즈마 내부에서 원료 물질의 상태 변화를 모사하였고 모사 결과는 공정 후 물질의 특성 예측 및 공정 조건 설정의 기반 자료로 활용되어왔다. 그러나 공정이 점차 발전해 나가면서 열플라즈마를 이용한 공정에서 요구되는 물질의 특성이 향상되었으며 저압 조건에서의 플라즈마 용사와 나노 크기 (~수십 nm) 분말의 합성이 요구되었고, 해당 공정에서는 분말 크기 대비 열플라즈마 기체 간 자유 행정거리가 증가되어 열플라즈마 제트를 연속체로 보는 가정이 성립하기 어려워졌다. 따라서 분말 표면으로 입사한 전하에 의한 추가적 가열이 연구되기 시작하였다.[2-3] 열플라즈마 내 입사한 분말의 전하에 의한 가열은 분말 표면의 부유 전위에 의한 함수로 분말 표면의 부유 전위 예측이 중요하게 되었다.

본 연구에서는 열플라즈마 내 체류중인 분말 표면의 전하 균형식을 통해 분말 표면의 부유 전위 변화를 예측해 보았고 이를 통해 기존 연구에서 분말 표면의 전하 균형식을 분말 표면에 입사하는 이온 전류와 전자 전류의 평형으로 해석한 관점의 한계에 대해 평가하였다. 이를 위해 본 연구에서는 80 kW급 비이송식

직류 열플라즈마 토치를 이용해 나노 분말 합성 시스템을 구성하였으며 해당 시스템 내 열플라즈마 - 주입 분말 간 상호작용 모사를 위해 선행 연구를 바탕으로 열플라즈마 내 주입 분말과 열플라즈마 간 에너지 및 운동량 전달 현상에 대한 전산 모사 코드를 작성하였다. 이 과정에서 선행 연구에서 고려되지 않았던 열플라즈마 내 입사한 분말의 전자 방출 특성을 반영하여 열전자 방출 특성이 열플라즈마와 분말 간 전위 형성에 미치는 영향 분말의 크기에 대해 평가하였다. 분말 크기에 대한 열플라즈마 내 입사 분말 표면 전위 변화 예측을 통해 분말 표면의 열전자 방출의 주요 고려 사항을 확인하였고 이를 통해 선행 연구의 결과를 설명할 수 있었다. 추후 본 연구에서 얻은 열플라즈마 내 입사 물체 표면에서의 이차 전자 방출에 의한 플라즈마 - 분말 간 상호작용은 전하에 의한 효과가 주요한 저온 플라즈마 내 생성되는 더스트 및 핵융합 플라즈마 대면재 근방에서 형성되는 더스트 해석에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

제 2 장 연 구 배 경

제 1 절 열플라즈마 - 분말 간 에너지전달의 선행 연구

열플라즈마 내 분말을 주입하여 처리하는 스프레이 공정이나 나노 분말 합성 공정에서 열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 간의 에너지 및 운동량 상호작용에 대한 이해는 열플라즈마 공정 설계 및 결과 예측에서 매우 중요하다. 열플라즈마 내 입사한 분말은 열플라즈마 공간 내에서 중성 기체와 전하에 의해 운동량 및 에너지를 전달받게 되며 주변 열플라즈마 특성에 따라 중성 기체와 전하에 의한 에너지 전달 효과가 결정된다. 중성 기체와 전하에 의한 열전달 현상에 관한 연구는 고온의 유체 환경과 저압 플라즈마 환경에서 각각 연구가 시작되었으며 중성 기체에 의한 에너지 전달에 관한 연구는 1983년 Bourdin에 수행되었으며 이온화된 기체에 의한 에너지 전달에 관한 연구는 1980년 Godard에 의해 수행되었다. 열플라즈마 환경에서는 1996년 Jog와 Huang에 의해 열플라즈마 내 입사한 분말이 매우 빠른 시간 (~nsec) 안에 부유 전위로 하전 됨이 확인된 이후로 이와 같은 중성 기체에 의한 가열과 이온화된 전하에 의한 가열 현상이 열플라즈마 환경에서도 함께 고려되기 시작하였다. 이 때 열플라즈마 내 존재하는 전하에 의한 가열 효과의 중요성은 누셴 수에 의해 정의되며 누셴 수는 식 1과 같이 정의된다. 식 1에서 λ 는 열플라즈마 내 전하의 자유 행정 거리, L 은 열플라즈마에 대한 해석 대상의 크기를 나타낸다.

$$Kn = \lambda / L \quad (\text{식 1})$$

전하의 자유 행정 거리와 해석 대상 물체의 크기의 비율로 존재하는 누셴 수의 의미는 그림 1을 통해 설명이 가능하다. 그림 1에서 해석 대상인 분말 주변의 기체는 분말 표면으로부터 수직 거리 (y)와 기체 분자의 자유 행정 거리(λ)에 따라 기체 분자 - 분말 간 충돌이 중요시되는 분말 표면의 영역과 기체 분자 - 기체 분자 간 충돌이 중요시되는 분말 표면에서 특정 거리 이상 떨어진 영역으로 구분할 수 있다. 이 때 두 영역을 구분하는 경계는 기체 분자의 자유 행정 거리이며, 기체 분자 - 분말 간 충돌이 중요시 되어 열플라즈마 내 전하가 전하를 잃지 않은 상태로 입사할 수

있는 자유 행정 거리 내에 속한 분말의 영역을 누센 층으로 정의한다.

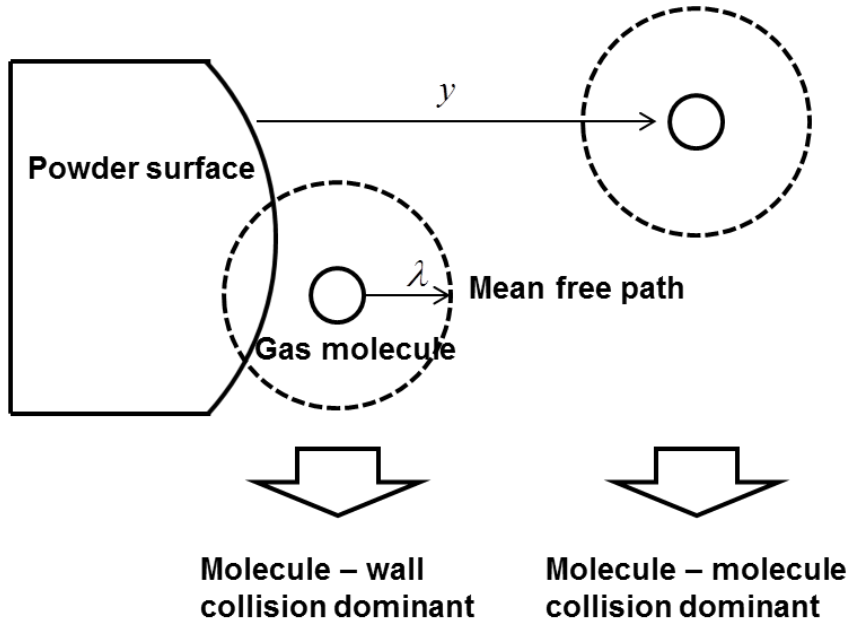


그림 1 분말 표면 근방 기체 분자 위치 및 자유 행정 거리에 따른 누센 층의 정의

누센 층을 정의하기 위해 분말 표면으로부터 수직 거리 y 만큼 떨어진 기체 분자의 자유 행정 거리를 정의하면 식 2^[1]와 같이 표현된다. 식 2[4] 에서 $\lambda(y)$ 는 분말 표면으로부터 수직 거리 y 만큼 떨어진 기체 분자의 자유 행정 거리를 의미하며 λ_0 는 주변의 자유 공간 내에서 기체 분자의 자유 행정 거리를 의미하며 $\gamma = y/L$ 는 분말 표면으로부터의 수직 거리 y 와 해석 대상의 길이 L 의 비율을 의미한다.

$$\lambda(y) = \lambda_0 \left[1 + (\gamma - 1) \exp(-\gamma) - \gamma^2 \int_{\gamma}^{\infty} t^{-1} \exp(-t) dt \right] \quad (\text{식 2})$$

식 2를 통해 그림 1에서 설명한 분말 표면으로부터 수직 거리에 따른 기체 분자의 충돌 경로를 정의할 수 있었다. 식 2에서 설명한 분말 표면으로부터 수직 거리에 따른 유효 자유 행정 거리를 도식화하면 그림 2와 같다. 일반적으로 유효 자유 행정 거리가 free space 상에서의 자유 행정 거리에 비해 짧은 ($\lambda/\lambda_0 < 0.98$) 영역을 누센 층이라고 정의하며 해당 공간 내의 열플라즈마 입자는 입자간 충돌에 비해 분말 표면과 직접 충돌할 확률이

높음을 의미한다. 따라서 이러한 누센 층 내에 존재하는 기체 분자들은 전하 유지한 채 분말 표면으로 입사할 확률이 높음을 의미하며 누센 층의 두께는 분말의 자유 공간 내의 기체 분자의 자유 행정 거리의 배수임을 알 수 있다.

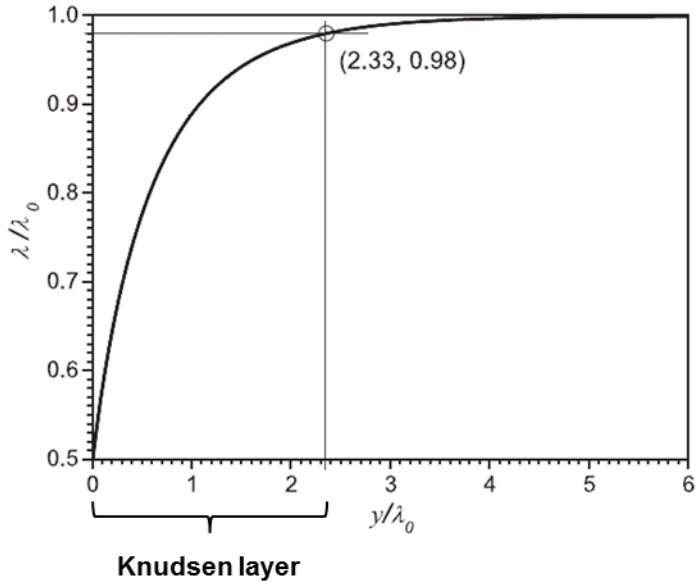


그림 2 분말 표면으로부터 수직 거리에 따른 기체 분자의 유효 자유 행정 거리[4]

그림 2에서 얻은 분말 표면과의 거리에 따른 유효 자유 행정 거리를 다른 누센 수에 대해 도식화하면 그림 3과 같다.

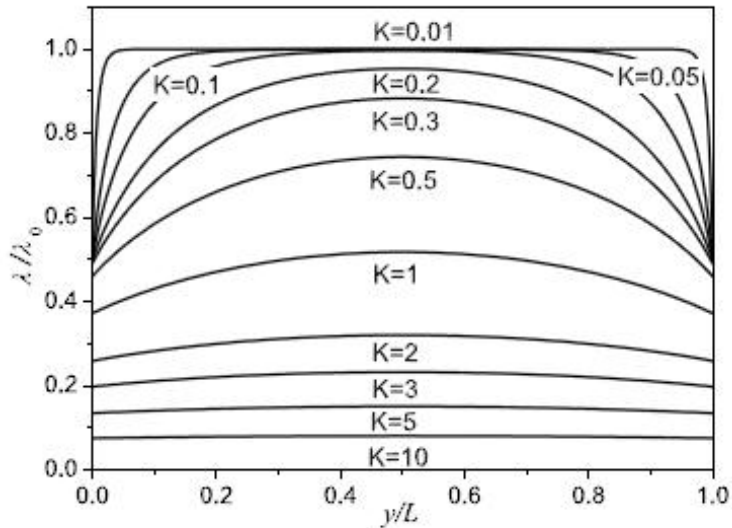


그림 3 누센 수에 따른 유효 자유 행정 거리[4]

그림 3에서 누셴 수의 증가는 λ_0 또는 γ 의 증가로 작용하며 누셴 수의 증가에 따라 누셴 층의 길이가 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 높은 누셴 수 조건에서는 더 많은 열플라즈마 내 전하가 분말 표면으로 입사하게 된다. 따라서 해석 대상의 크기가 작은 나노 분말 합성 공정과 기체 분자의 자유 행정 거리가 증가된 저압 스프레이 용사에서는 상압 용사 조건에 비해 높은 누셴 수를 갖게 되어 열플라즈마 내 입사한 분말의 열적 특성 변화를 모사함에 있어 전하에 의한 가열 해석이 중요하게 된다.

제 2 절 전하에 의한 열플라즈마 내 입사 분말 가열 메커니즘

본 연구의 목표인 나노 분말 합성 공정에서 열플라즈마 - 분말 간 열적 상호작용 평가에는 중성 기체에 의한 가열 효과 및 전하에 의한 가열 효과가 모두 고려되어야 한다. 이 때 열플라즈마 내 입사한 분말로의 에너지 전달 과정은 그림 4와 같다. 주 가열 메커니즘은 1) 중성 기체 입사에 의한 가열 2) 전자 입사에 의한 가열 3) 이온 입사에 의한 가열 4) 분말 표면에서의 중성화 반응에 의한 가열이 있다. 열플라즈마 내 입사한 분말은 전자와 이온의 속도 차이에 의해 열플라즈마 공간 대비 음의 표면 전위를 띠게 된다. 그림 4의 ϕ_g 는 열플라즈마 공간의 전위를 의미하며 ϕ_p 는 분말 표면의 전위를 의미한다. 따라서 분말의 부유 전위(V_f)는 식 3과 같다.

$$V_f = \phi_p - \phi_g < 0 \quad (\text{식 3})$$

분말 표면의 음전위는 가열 메커니즘 중 전하에 의한 가열인 2)-4)의 경우에 영향을 미치며 분말 주변의 열플라즈마 온도(T_g)와 분말의 온도(T_p)에 의해 중성기체에 의한 가열 효과가 결정된다.

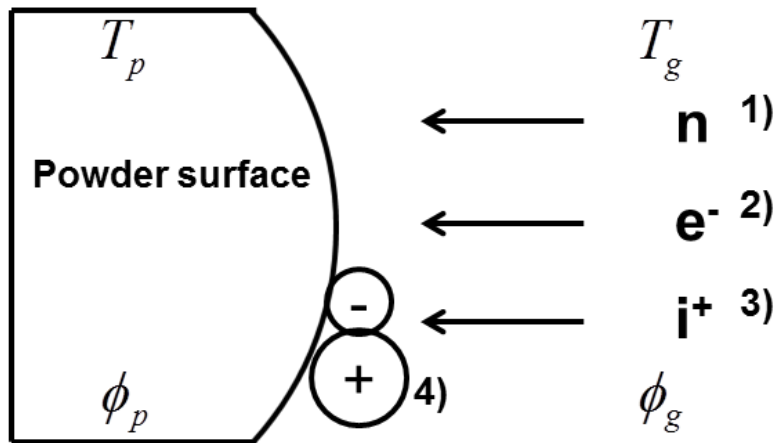


그림 4 열플라즈마 공간 내 입사한 분말과 열플라즈마 간 에너지 전달 메커니즘

열플라즈마 내 입사한 분말은 그림 4와 같이 분말 표면으로 입사하는 중성기체, 전자, 이온에 의해 가열된다. 이 때 분말의 전위는 입사하는 전자와 이온의 균형에 의해 생기며 이 때 분말 표면으로 입사하는 전자와 이온의 양의 균형을 이루며 분말 표면과 열플라즈마 공간 내 전위가 형성된다. 이 때 분말 표면의 전위를 결정하기 위해 분말 표면에서의 전하 균형식을 쓰면 식 4와 같다. 식 4에서 좌변 항은 분말 표면에 형성된 전위에 의해 분말

표면으로 입사하는 이온 전류를 의미하며 우변 항은 분말 표면으로 입사하는 전자 전류를 의미한다.

$$I_{i\text{-incident}} = I_{e\text{-incident}} \quad (\text{식 4})$$

식 4에서 분말 표면으로 입사하는 전자, 이온 전류를 결정하는 인자는 열플라즈마 내 전하의 밀도가 된다. 열플라즈마 내 전하의 밀도는 국부적인 열적 평형 상태를 가정하였을 때 사하(Saha) 방정식에서 기체 온도의 함수로 표현된다. 이 때 국부적인 열적 평형 상태는 높은 전자 밀도에 의해 달성될 수 있으며 국부적인 열적 평형 상태를 도달하기 위한 제한 조건은 그리엄 조건으로 표현된다.[5] 열플라즈마 내 입사 분말 가열에 있어 그리엄 조건을 만족하지 못하는 상대적인 저온 영역 (~ 6000 K 이하)에서는 중성 기체에 의한 가열에 비해 전하에 의한 가열이 크게 영향을 미치지 못함으로 전 영역에서 국부적인 열적 평형 상태를 가정하여도 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달 해석에 큰 영향을 주지 않게 된다. 따라서 일반적으로 열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 간 에너지 전달 해석에 있어 열플라즈마는 국부적인 열적 평형 상태를 가정할 수 있다. 열플라즈마를 국부적인 열적 평형 상태로 가정하게 되면 공간 내 전하는 볼츠만 관계를 만족하게 되며 분말 표면 내로 입사하는 전자와 이온의 양은 볼츠만 관계식을 통해 식 5와 같이 나타낼 수 있다. 식 5에서 $n_i, n_e, T_i, T_e, m_i, m_e$ 는 각각 이온과 전자의 밀도, 온도, 질량을 의미한다. k_B 는 볼츠만 상수를 의미하며, $\Delta\phi$ 는 분말 표면과 열플라즈마 공간 내 전위 차이를 의미한다.

$$n_i \exp\left(-\frac{e\Delta\phi}{k_B T_i}\right) \left(\frac{k_B T_i}{2\pi m_i}\right) = n_e \exp\left(-\frac{e\Delta\phi}{k_B T_e}\right) \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}\right) \quad (\text{식 5})$$

식 5에서 국부적인 열적 평형 상태를 가정하면 $n_i = n_e$, $T_i = T_e = T_g$ 를 만족하며 식 5는 식 6과 같이 정리된다. 식 6에서 X_p 는 볼츠만 인자를 의미하며 T_g 는 주변 기체의 온도를 의미한다.

$$X_p = \frac{e\Delta\phi}{k_B T_g} = \frac{1}{4} \ln\left(\frac{m_e}{m_i}\right) \quad (\text{식 6})$$

식 6에서 분말이 열플라즈마 내를 비행하는 동안 주변 기체 온도 변화에 따른 되는 표면 전위 변화의 예측이 가능하며 이를 통해

전하에 의한 분말 가열 효과의 평가가 가능하다. 식 6에서 정의된 분말 표면의 부위 전위를 통해 열플라즈마 내 입사한 분말로의 중성기체와 전하에 의한 가열 효과를 나타내면 식 7-10과 같다. 식 7-10은 각각 중성 기체 입사에 의한 가열, 전자 입사에 의한 가열, 이온 입사에 의한 가열, 분말 표면에서의 중성화 반응에 의한 가열을 의미한다. 식 7-10에서 n_a 는 중성 기체의 온도를 의미하며 E_i 는 이온화 에너지를 의미한다.

$$Q_{neutral} = n_a \left(\frac{k_B T_g}{2\pi m_a} \right)^{1/2} (2k_B T_g) \quad (\text{식 7})$$

$$Q_e = n_e \exp(X_p) \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} (2k_B T_e) \quad (\text{식 8})$$

$$Q_i = n_i \exp(-X_p) \left(\frac{k_B T_i}{2\pi m_i} \right)^{1/2} (2k_B T_i + e|\Delta\phi|) \quad (\text{식 9})$$

$$Q_{recob} = n_i \exp(-X_p) \left(\frac{k_B T_i}{2\pi m_i} \right)^{1/2} (E_i) \quad (\text{식 10})$$

식 7-10의 가열 효과에 대해 분말의 부유전위에 영향을 받지 않는 중성 기체에 의한 가열 항과 영향을 받는 전하에 의한 가열 항으로 나누어 일반적인 열플라즈마 환경 (기체 온도 < 10000 K) 조건에서 중성 기체에 의한 가열 대비 전하에 의한 가열 효과에 대한 기여도를 나타내면 표 1과 같다. 각 열전달 방식에 대한 기여도 평가는 10000 K 국부적인 열적 평형상태를 가정한 아르곤 기체에 대해 나타내었다. 표 1에서 중성 기체에 의한 가열 효과는 기체의 온도 및 밀도에 의해 결정되며 전하에 의한 가열 효과는 기체의 온도와 플라즈마 밀도 및 분말 표면의 부유 전위에 의해 결정됨을 확인할 수 있었다.

열전달 방식	에너지 전달 기여도 (중성 기체 기준)	주요 변수
중성기체 충돌	100	Gas temperature Gas density
전자 충돌	< 10	Gas temperature Plasma density
이온 충돌	< 10	
표면 중성화 반응	< 100	Floating potential

표 1 열플라즈마 공간 내 입사한 분말과의 에너지 전달 메커니즘에 따른 에너지 전달 기여도 및 주요 변수

제 3 절 분말 표면 전하 균형 및 분말 표면 전위 형성 메커니즘

분말 가열은 열플라즈마 공간과 분말 간 전위 차이에 의해 결정된다. 이 때 분말 표면의 부유 전위는 분말 표면에서의 전하 균형식에 의해 결정되며 선행 연구에서는 분말 표면으로 입사하는 전자 전류와 이온 전류의 균형으로 분말 표면의 부유 전위를 결정하였다. 그러나 최근 연구에서 열플라즈마 내 입사 분말의 전자 방출체로서의 특성이 연구되고 있어[6] 본 연구에서는 분말 표면에서의 열전자 방출 특성에 따른 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달 연구에 초점을 맞춰 연구를 진행하였다. 분말 표면에서의 열전자 방출 특성에 따른 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달 특성 평가를 위해 선행 연구에서 가정하였던 분말로 입사하는 전자 전류와 이온 전류의 평형식으로 구성된 전하 균형식에 분말 표면에서의 열전자 방출에 의한 효과를 추가하여 분말 표면에서의 전하 균형식을 구성하였다. 분말 표면에서의 열전자 방출이 고려된 전하 균형식은 식 11과 같다. 식 11에서 \hbar 는 플랑크 상수, W 는 일함수를 의미한다.

$$n_i \exp\left(-\frac{e\Delta\phi}{k_B T_i}\right) \left(\frac{k_B T_i}{2\pi m_i}\right) = n_e \exp\left(-\frac{e\Delta\phi}{k_B T_e}\right) \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}\right) - \frac{4\pi e m_e}{\hbar^3} T_p^2 \exp\left(-\frac{W}{T_p}\right) \quad (\text{식 11})$$

식 11에서 분말 표면에서의 열전자 방출에 의한 전류는 분말 온도에 비례하고 분말 표면으로 입사하는 전자, 이온 전류는 열플라즈마의 밀도 및 온도에 비례한다. 여기서 국부적인 열적 평형상태를 가정하면 열플라즈마 내 전하의 밀도는 사하 방정식을 만족하며 열플라즈마의 온도의 함수로 표현된다. 열전자 방출이 추가된 전하 균형식에서 분말 표면에서의 열전자 방출이 분말의 표면 전위에 미치는 영향을 평가하기 위해 일반적인 열플라즈마 공정 조건의 분말 온도 및 열플라즈마 온도 하에서 분말 표면의 부유 전위를 식 12를 통해 예측하였다. 가정한 열플라즈마 내 분말이 체류할 것으로 예상되는 열플라즈마의 온도 영역 ($\leq 8000K$)과 이 때 분말 온도 ($\leq 3538K$ (실리콘의 기화점)) 영역에서 기체 온도 및 분말 온도에 따른 분말 표면의 부위전위를 계산하면 그림 5와 같다.

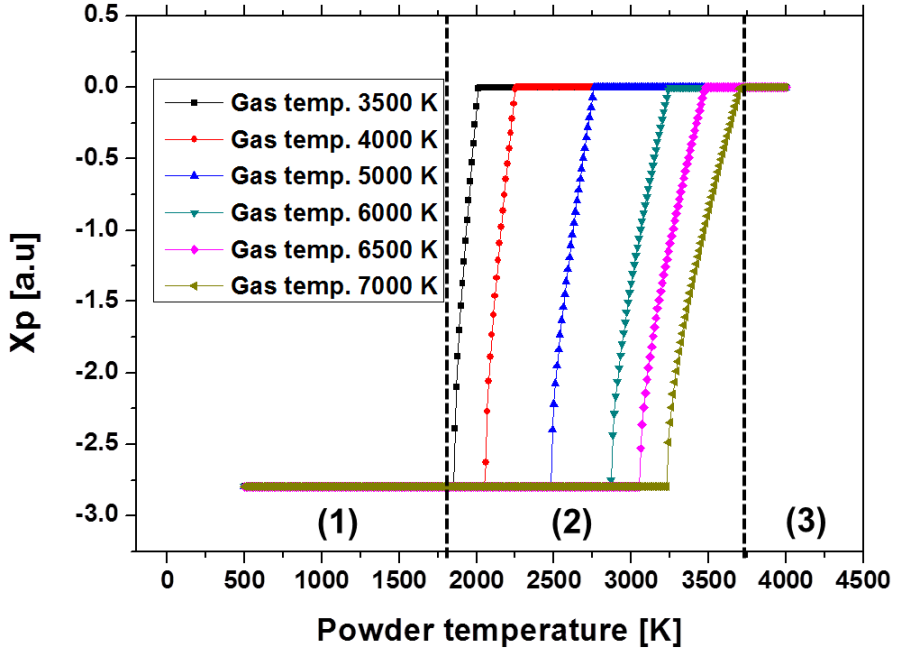


그림 5 열플라즈마 온도 및 분말 온도에 따른 분말 주변 볼츠만 인자 변화 : 아르곤 플라즈마 3500 ~ 7000 K, 500 ~ 3500 K
실리콘 분말 조건

그림 5에서 기체 온도 - 분말 온도에 따른 부유 전위는 3개의 영역으로 구분할 수 있다. 첫 번째 영역은 분말의 온도가 낮아 분말 표면에서의 열전자 방출을 무시할 수 있는 영역으로 ($I_{e\text{-collection}} \gg I_{e\text{-emission}}$), 전자 방출에 의한 영향이 무시되어 식 3과 같은 전하 균형식을 나타낸다. 이 경우 식 6과 같이 볼츠만 인자는 방전 기체 질량에 의한 함수로 나타나며 아르곤 방전에서 볼츠만 인자는 약 -2.8의 일정한 값을 갖는다. 두 번째 영역은 분말 표면에서 방출되는 전자의 양이 입사하는 전자의 양에 비해 무시할 수 없는 영역을 의미하며 식 11의 전하 균형식은 볼츠만 인자에 대한 2차 방정식이기 때문에 근의 공식을 이용하여 해를 구하면 분말 표면의 볼츠만 인자 값은 식 12와 같다. 식 12에서 각 항의 계수는 다음과 같이 정의하였다.

$$C_1(t) = n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2}, \quad C_2(t) = \frac{4\pi e m_e}{\hbar^3} T_p^2 \exp\left(-\frac{W}{T_p}\right), \quad C_3(t) = n_i \left(\frac{k_B T_i}{2\pi m_i} \right)^{1/2}$$

$$X_p = \ln \left(\frac{C_2(t) \pm \sqrt{C_2^2(t) - 4C_1(t)C_3(t)}}{2C_1(t)} \right) \quad (\text{식 12})$$

식 12에서 분말 표면에서의 열전자 방출이 무시될 경우 ($C_2(t) \approx 0$) 볼츠만 인자는 식 6과 같아지는 것을 확인할 수 있으며 영역 2에서 식 12를 풀면 근호 앞 기호에 의해 이중 근이 나오나, 근호 앞에 음의 부호가 붙은 근의 경우 열전자 방출이 증가할수록 ($C_2(t) \uparrow$) 분말 표면의 볼츠만 인자 값이 감소하는 경향을 보여 열전자 방출이 증가할수록 분말 표면이 음전위화 되는 결과를 의미하며 물리적으로 모순이 된다. 따라서 본 연구에서는 식 12에서 근호 앞에 양의 부호가 붙은 값을 해로 선정하였다. 세 번째 영역에서는 식 11에서 분말 표면으로 입사하는 전자 전류 대비 분말 표면에서의 열전자 방출에 의한 효과가 증가하여 $\Delta\phi > 0$ 인 값을 띄게 된다. 영역 3의 해석을 위해 해석 대상 물체 표면에서의 과도한 전자 방출이 일어나는 경우에 대한 참고문헌[7]을 참고하면 그림 6과 같다.

그림 6은 저압 유전체 표면에서 일어나는 이차 전자 방출에 의한 공간 전위 변화 모사한 선행 연구의 결과이다. 그림 6 (a)는 참고 문헌 [7]에서 가정한 유전체 내 방전의 구조이며 (b), (c)는 유전체 표면에서의 이차 전자 방출을 고려하지 않은 경우 (Sim. A)와 유전체 표면에서 이차 전자 방출을 고려한 경우(Sim. B)의 공간 내 전위 분포를 모사한 경우이다. (d)와 (e)는 이차 전자 방출을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대한 공간 내 이온, 전자의 밀도 분포 모사 결과이다. 선행 연구에 따르면 이차 전자 방출에 의해 상승된 해석 대상 물체 표면의 전자 밀도는 추가적인 이차 전자 방출을 억제하기 되고 결국 (e)의 결과와 같이 분말 표면의 이온 - 전자 밀도가 같은 상황으로 수렴하게 되며 (c)의 결과와 같이 해석 대상 물체 표면의 이차 전자 방출이 고려될 경우 부유 전위가 0으로 수렴하는 결과를 예상해 볼 수 있었다. 참고문헌 [7]의 상황과 유사하게 본 연구에서 해석하고자 하는 열플라즈마 내 입사한 분말은 열플라즈마 내에서 부유된 상황의 고온의 분말이므로 열전자 방출에 의해 유사한 현상을 예측해 볼 수 있다. 또한 열전자 방출에 의한 대상 물체 표면의 부유 전위 변화는 전자 방출 탐침의 해석 원리와 유사함으로 타당한 결론이라고 생각되어

영역 3의 부유 전위는 0 V로 수립하도록 제한 조건을 설정하였다.

Sim. A : no e-emission
Sim. B : e-emission

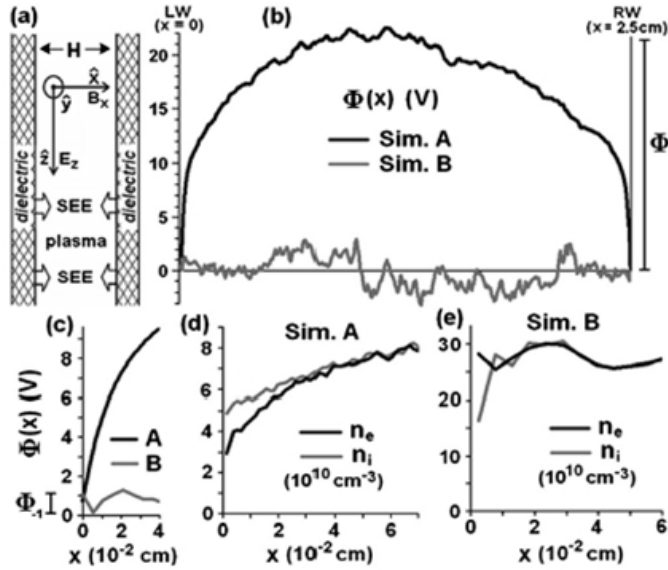


그림 6 이차 전자 방출에 의한 공간 전하 제한 조건[7]

그림 5의 결과에서 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려할 경우 분말의 온도 변화 및 열플라즈마 내 분말 진행 궤적에 따른 주변 열플라즈마 온도에 따라 볼츠만 인자 값이 변화할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 열플라즈마 내 입사한 분말의 열적 특성 변화 모사와 실험을 통해 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마 - 분말 간 상호작용에 미치는 영향을 평가하였다.

제 3장 실험 조건

제 1 절 실험 장치 구성

본 연구에서는 나노 분말 합성 공정 중에서 2장에서 설명한 열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 간 열전달 특성에 대해 연구하기 위해 그림 7과 같은 열플라즈마를 이용한 나노 분말 합성 장치를 구성하였다. 장치 구성은 열플라즈마 발생을 위해 서울대학교에서 기존 개발된 80 kW 급 비이송식 직류 열플라즈마 토치를 열플라즈마 발생원으로 사용하였다. 또한 일정한 분말 주입량을 유지시켜주기 위해 Schultzer Metco 사의 분말 공급기를 반응기 상단에 장착하였으며 열플라즈마 토치와 분말 공급 포트의 개형은 그림 8과 같다.

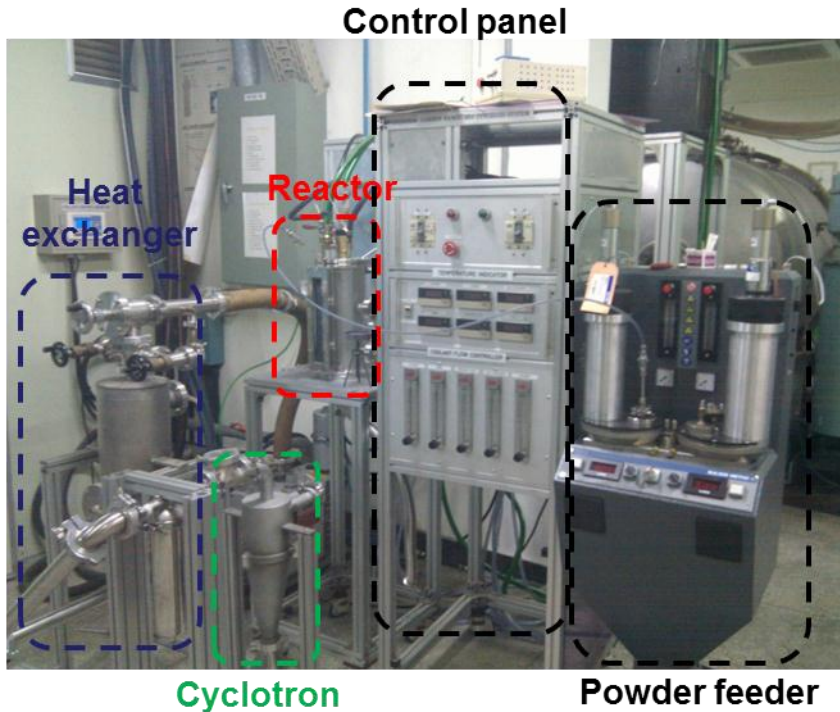


그림 7 열플라즈마를 이용한 나노 분말 합성 장치 구성 : 80 kW 급 비이송식 직류 토치, 반응기, 열교환기, 분말 포집기, 분말 공급기, 조작 패널로 구성

그림 8에서 반응기 상단에 80 kW 급 비이송식 직류 열플라즈마 토치가 중력 방향으로 장착되어 있으며 토치 출구 방향에 수직한 방향으로 분말 공급기가 위치한다.

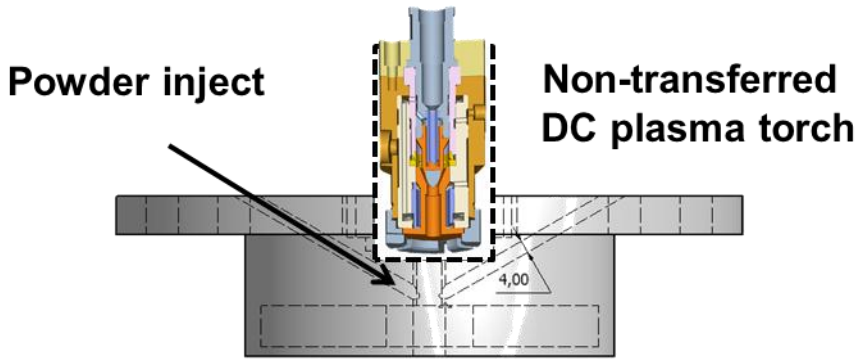


그림 8 비이송식 직류 열플라즈마 토치 및 분말 주입 포트 설계도 :
80 kW 급 비이송식 직류 토치, 분말 주입 포트 구성

그림 7의 시스템을 통해 실리콘 나노 분말 합성 실험을 수행하였으며 합성 결과를 토대로 중성 기체와 전하에 의한 에너지 전달 과정을 연구하였다. 이 때 2장에서 고려하지 않은 외부 화학반응을 통한 에너지 전달을 억제하기 위해 진공 시스템 구성을 통해 외부 기체 혼입을 막았고 비활성 기체인 아르곤을 열플라즈마 발생 및 분말 이송에 사용하여 열플라즈마 - 분말 간의 화학적 반응을 억제하였다. 운전 압력은 위에서 사용한 상압 조건의 기체 물성치와 유사한 결과를 얻기 위해 560 Torr로 일정하게 유지시켰다. 분말 주입에 따른 열플라즈마 특성의 왜곡을 막기 위해 분말 공급량을 0.4 g/min[8], 분말 이송 기체 유량을 3 lpm[9]으로 고정시켰다. 위 조건에서 열플라즈마 특성에 따른 열전달 현상에 관해 추가적으로 살펴보기 위해 열플라즈마 토치 출력을 8, 16 kW로 바꿔가며 실험을 수행했다. 분말 크기에 따른 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달 과정을 이해하기 위해 크기 분산이 존재하는 평균 크기 3.6 μm 의 실리콘 분말을 사용하였으며 원료 분말의 크기 분산은 그림 9와 같다. 위 조건에서 합성된 분말은 냉각이 되고 있는 반응기 하단 및 벽에 응축이 되며 합성 실험이 끝난 이후 분말을 포집하여 주사 방출 현미경 (SEM)과 전기 영동 광산란법 (Light scattering method)를 통해 운전 특성에 따른 분말 크기 변화를 측정하였다. 실험 조건을 정리하면 표 2와 같다.

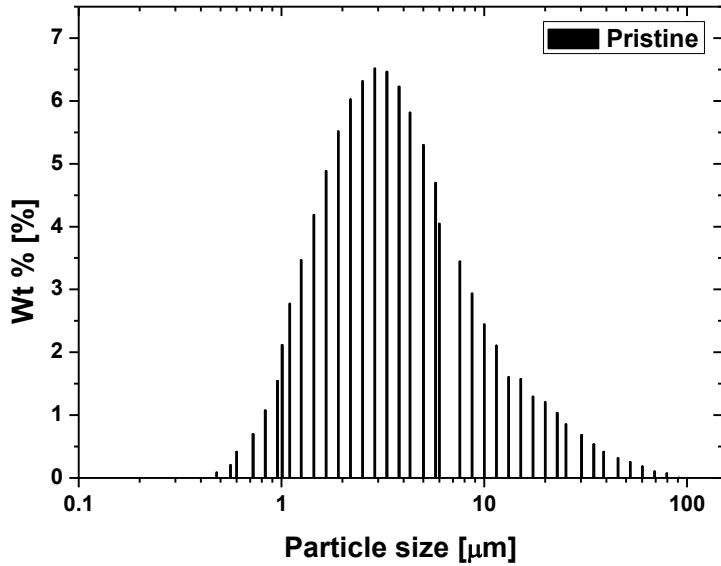


그림 9 평균 크기 3.6 μm 실리콘 원료 분말 크기 분산 성분표

고정 변수	운전 변수
반응기 조건	560 Torr, 반응기 직경 :
분말 포집 조건	토치 - 포집 위치 거리 : 430 mm
분말 주입 조건	원료 분말 : avg. 3.6 μm 실리콘 분말 분말 주입 속도 : 0.4 g/min
조절 변수	운전 변수
토치 출력	Ar 30 lpm 250 A = 8 kW Ar 35 lpm 400 A = 16 kW

표 2 나노 분말 합성 실험 조건

제 2 절 열플라즈마 내 입사 분말 열적 특성 모사 코드

나노 분말 합성 시스템에서 주입된 분말과 열플라즈마 사이의 상호작용에 대한 연구를 위해 참고 문헌[2-4]를 기반으로 열플라즈마 내 입사 분말의 열적 특성을 모사하는 전산 모사 코드를 작성하였다. 본 연구에서는 분말과 열플라즈마 간 열전달 상호작용을 해석함에 있어 선행 연구와 마찬가지로 중성기체에 의한 가열효과와 전하에 의한 가열 효과로 나누어 분석하였고, 식 11에 의해 열플라즈마 내를 진행하는 분말 표면의 부유 전위를 계산하는 알고리즘을 추가하였다. 이를 통해 열플라즈마 내 입사한 분말 표면의 부유 전위 변화를 열플라즈마 특성 및 공정 조건에 따라 예측해보았고, 선행 연구에서 간과된 변화된 부유 전위 변화에 따른 열플라즈마 - 분말 간 열전달 현상에 대한 연구를 수행하였다. 본 전산 모사 코드에서는 모사 환경을 간단히 하기 위해 다음과 같은 가정을 포함한다.

i) 열플라즈마 특성은 2차원 축 대칭의 특성을 갖고 분말은 열플라즈마의 중심부를 지나간다.

실제 분말의 경우 열플라즈마와 3차원적인 거동을 보이며 진행해 나가게 된다. 그러나 본 연구에서는 계산을 간단히 하기 위해 열플라즈마는 축 대칭의 특성을 갖고 평균적인 분말은 열플라즈마의 중심축을 지나는 $r-z$ 평면을 지난다고 가정하였다. 이는 5장의 실험 결과와 비교 분석하는 부분에서 가정의 타당성을 추가 검증하였다.

ii) 분말 궤적에 존재하는 열플라즈마는 국부적인 열적 평형 상태를 만족한다. [7]

본 전산 모사에서는 본 연구의 목적인 분말 표면에서의 열전자 방출이 전하에 의한 가열량에 미치는 영향 평가를 위해 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달을 중성 기체에 의한 가열과 전하에 의한 가열로 나누어 비교하고자 한다. 이 때 전하에 의한 가열이 중요해지는 고온부의 영역은 그리엄 조건에 의해 국부적인 열적 평형 상태를 만족한다고 가정할 수 있으며 그 이외의 조건에서는

국부적인 열적 평형 상태에서 멀어지나 사하 방정식에서 전하의 밀도 역시 감소하여 중성 기체 대비 가열량에 있어 무시가 가능함으로 전 영역에서 국부적인 열적 평형상태의 가정을 사용하였다. 열플라즈마의 국부적인 열적 평형 상태의 가정을 통해 열플라즈마 공간 내 모든 물성은 공간 내 기체의 온도의 함수로 결정되며 이를 통해 공간 내 온도 분포 정보를 통해 열플라즈마 - 분말 간 상호작용을 예측해 볼 수 있다.

iii) 열플라즈마 내 주입된 분말은 열플라즈마에 영향을 미치지 않는다. [8,9]

열플라즈마 내 분말을 주입하게 되면 주입에 사용된 이송 가스와의 분말에 의해 열플라즈마 특성이 변화하게 된다. 따라서 정확한 계산을 위해서는 분말 주입에 따라 열플라즈마 특성을 다시 계산해주어야 하지만 선행 연구에서 존재하는 제한 조건 1) 전체 토치 전력 중 분말이 흡수한 에너지가 1% 미만($\frac{P_{absorb}}{P_{torch}} < 0.01$) 2) 방전 기체 유량 대비 분말 이송 가스 유량이 10 % 미만일 경우($\frac{Q_{carrier}}{Q_{discharge}} < 0.1$) 분말 주입에 따른 열플라즈마 왜곡은 무시된다는 가정을 통해 모사 상황을 제한하여 계산을 간단히 하였다. (본 연구에서는 분말 주입 속도 0.4 g/min, 분말 이송 기체 유량 3 lpm 방전 기체 유량 30 lpm으로 제한하였다.)

iv) 주입된 분말의 내부 열분포는 균일하다. [10]

선행 연구에서 분말 내 온도 균일도는 비오투 (Biot) 수에 의해 결정된다. 비오투 수는 식 13과 같이 분말에 에너지를 전달하는 열플라즈마의 열전도 계수와 분말 내 열전도 계수의 비율로 이루어져 있다. 식 13에서 h 는 열전도 계수, d_p 는 분말의 직경, Nu 는 누셀 (Nusselt) 수, K_g 는 기체의 열전도 계수, K_p 는 분말의 열전도 계수를 의미한다.

$$Bi = \frac{hd_p}{K_p} = \frac{Nu \cdot K_g}{K_p} \quad (\text{식 13})$$

즉 분말 크기가 작을수록, 기체의 열전도도가 낮을 수록, 분말의

열전도도가 높을수록 낮은 비오트 수를 갖게 되며, 선행 연구에서 $Bi < 0.1$ 일 경우 분말 내 온도 분포를 균일하다고 가정하였다.[3] 구형 분말의 경우 약 2의 누셀 수를 갖게 되며 본 연구에서 사용한 실리콘 분말의 경우 149 W/m K의 열전도도를 갖고 방전에 사용한 < 10000 K 이하의 열플라즈마는 약 8 W/m K의 열전도도를 갖게 된다. 위 조건에서는 $Bi \ll 0.1$ 인 조건을 충분히 만족하므로 본 연구의 열플라즈마 내 입사한 분말의 열적 특성 변화를 모사함에 있어 분말 내 열전도 현상을 무시한 채 균일한 분말 내부 온도 분포를 가정하였다.

i - iv)의 가정을 통해 열플라즈마 - 분말 간 상호작용 해석을 간략화 시킬 수 있었다. i - iv)의 가정하에서 나노 분말 합성 공정을 모사하기 위해 반응기 내부 열플라즈마의 온도 및 속도와 관련된 열플라즈마 특성, 방전 기체의 온도에 따른 밀도, 엔탈피, 비열, 점성도, 열전도도 등의 방전 기체 특성 및 분말의 밀도, 비열 등 화학적 특성과 주입 속도 위치 조건을 통해 열플라즈마 내 입사 분말의 특성을 모사하였다. 플라즈마의 특성은 실험실 자체 코드인 DCPTUN [11] 에서 계산된 값을 사용하였으며 이 값에는 반응기 내 온도, 속도 분포가 포함된다. 방전 기체 특성은 참고문헌 [12] 에서 제공하는 각 기체의 온도에 따른 기체 밀도, 엔탈피, 비열, 점성도, 열전도도 값을 사용하였다. 입사 분말의 특성은 실험에서 사용한 분말의 특성 (크기 분포, 비열, 상 변이 온도, 잠열) 및 주입 조건 (주입 위치, 주입 속도, 초기 온도)을 사용하였으며 이를 정리하면 표 3과 같다. 표 3의 입력 조건에서 열플라즈마 내 입사 분말과 열플라즈마 간 운동량, 에너지 전달 및 분말의 상변화를 모사하기 위해 그림 10과 같은 알고리즘을 통해 열플라즈마 - 분말 간 상호작용을 모사하였다. 그림 10의 알고리즘에서 표3의 입력 조건을 받은 후 해당 조건에서 열플라즈마와 분말 간 운동량과 에너지 전달에 관한 방정식을 풀게 된다. 이를 통해 Δt 이후의 분말의 위치와 열적 특성을 예측할 수 있고 이를 바탕으로 분말의 상변화, 크기 변화를 예측할 수 있다.

모사 조건	
플라즈마 특성	- 반응기 내부 열플라즈마 온도, 속도 분포
방전 기체 특성	- 기체 밀도, 엔탈피, 비열, 점성도, 열전도도
입사 분말 특성	- 분말 밀도, 비열, 주입 속도, 주입 위치

표 3 열플라즈마 내 입사 분말 열적 특성 모사 코드 입력 조건

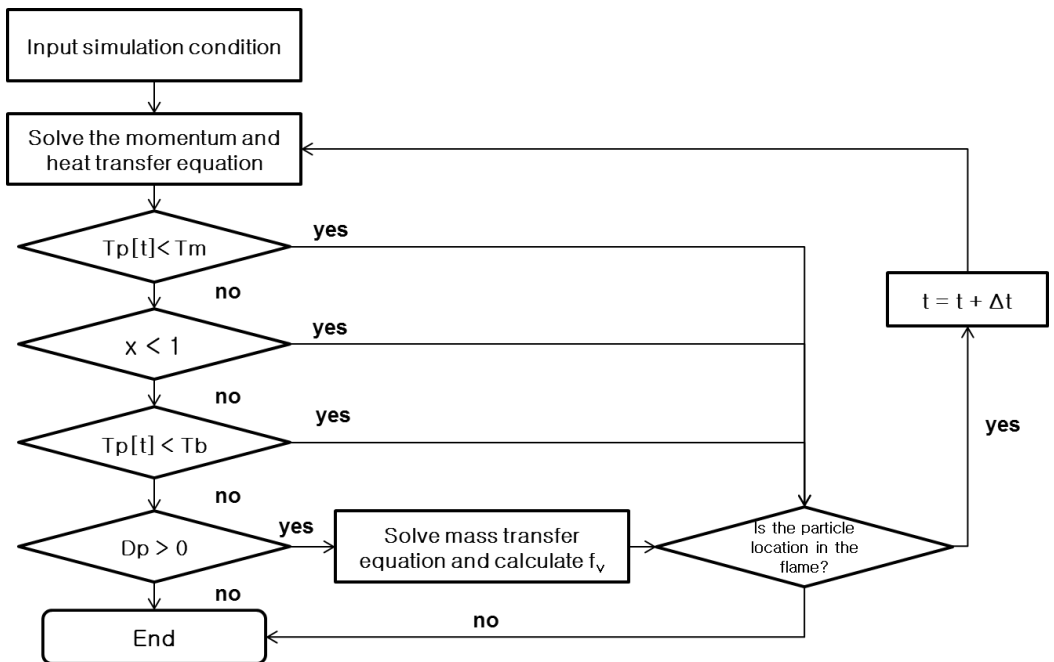


그림 10 열플라즈마 내 입사 분말 열적 특성 모사 코드 알고리즘

그림 10의 알고리즘에서 사용한 열플라즈마-분말 간 상호작용에 관한 지배 방정식은 운동량 전달 방정식, 에너지 전달 방정식, 질량 전달 방정식, 분말의 전하 균형 방정식으로 나뉜다. 이 중 열플라즈마 - 분말 간 운동량 전달은 그림 11과 같다. 열플라즈마 내 입사한 분말은 주입 초기 속도에 의한 관성 운동량에 중력가속도와 열플라즈마에 의한 끌림힘에 의해 가속된다.

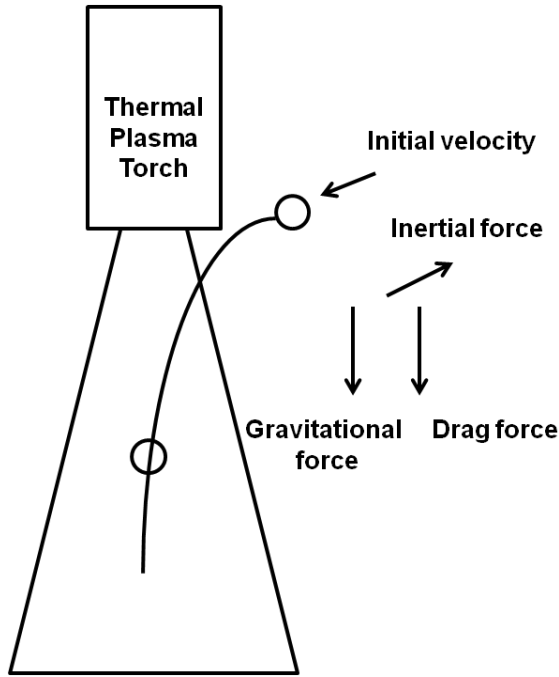


그림 11 열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 간 운동량 전달 과정 : 입사 분말의 초기 운동량, 중력, 열플라즈마에 의한 끌림힘의 평형으로 구성

그림 11의 열플라즈마 - 분말 간 운동량 전달 과정을 식으로 표현하면 식 14와 같다. 식 14에서 분말에 가해지는 힘의 총합은 분말의 초기 운동량, 열플라즈마에 의한 끌림 힘, 중력의 총 합에 의해 결정되며 F_i 은 초기 값으로 주어지는 분말의 운동량, F_D 는 열플라즈마로부터 운동량 전달에 따른 끌림 힘, F_g 는 중력가속도를 의미한다.

$$\sum F = F_i + F_D + F_g \quad (\text{식 14})$$

식 13에서 우변의 각 항은 식 15-17과 같다. 식 15-17에서 C_D , ρ , ρ_p , U_R , U , g 는 각각 열플라즈마 제트의 점성 계수, 열플라즈마 제트의 밀도, 분말의 밀도 분말 - 열플라즈마의 상대속도, 분말의 속도, 중력 가속도를 의미한다.

$$F_i = \frac{\pi d_p^3}{4} \rho_p \frac{dU_p}{dt} \quad (\text{식 15})$$

$$F_D = \frac{\pi d_p^3}{4} C_D \frac{1}{2} \rho U_R^2 \quad (\text{식 16})$$

$$F_g = \frac{\pi d_p^3}{4} \rho_p g \quad (\text{식 17})$$

열플라즈마와 운동량 전달에 의해 Δt 시간 이후의 위치가 결정된 분말은 해당 위치에서 정의된 분말의 온도 및 열플라즈마의 온도를 통해 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달이 해석 가능하다. 이 경우 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달은 그림 12와 같이 나타낼 수 있다. 그림 12에서 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달은 중성 기체에 의한 열전달, 전하에 의한 열전달, 자외선에 의한 열전달로 구성되며 이를 식으로 표면하면 식 18과 같다.

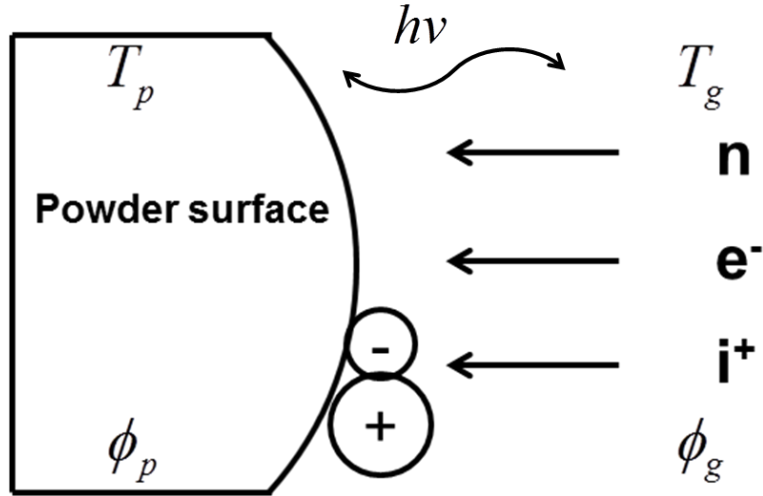


그림 12 열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 간 에너지 전달 과정

식 18에서 좌변항은 에너지 전달에 따른 분말의 온도 변화와 상변화를 의미하며 이러한 변화는 우변의 분말 가열항에 의해 결정된다. Q_{charge} 는 전하에 의한 가열을 의미하며 2장의 식 8-10의 항이 포함된다. $h_g(T_g - T_p)$ 는 중성 기체의 대류에 의한 에너지 전달을 의미하며 $\epsilon\sigma(T_g^4 - T_p^4)$ 는 열자외선에 의한 가열을 의미한다. 식 18에서 C 는 분말의 비열, H_{phase} 는 상변화에 따른 잠열, h_g 는 열전달 상수, T_g 는 분말 궤적 위치의 기체 온도, T_p 는 분말 온도, ϵ 은 열복사선 방출도, σ 는 슈테판 - 볼츠만 상수를 의미한다.

$$\frac{4}{3}\pi d_p^3 \rho \left[C \frac{dT_p}{dt} + H_{phase} \right] = 4\pi d_p^2 \left[Q_{charge} + h_g (T_g - T_p) + \epsilon \sigma (T_g^4 - T_p^4) \right] \quad (\text{식 18})$$

식 18에서 전하에 의한 가열항 Q_{charge} 를 정의하기 위해서는 2장에서 설명한 것과 같이 분말 표면과 열플라즈마 사이의 전위가 정의되어야 한다. 본 전산 모사 코드에서는 2장에서 설명한 열전자 방출이 열플라즈마를 비행하는 분말 가열에 미치는 영향을 평가하기 위해 열전자 방출이 고려되지 않은 전하 균형식인 식 19와 열전자 방출이 고려된 전하 균형식 식 20를 통해 열플라즈마 내 입사한 분말의 부유 전위 변화를 예측해보았고 부유 전위 변화가 열전달에 미치는 영향을 평가해보았다.

$$n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp(X_p) = n_i \left(\frac{k_B T_i}{2\pi m_i} \right)^{1/2} \exp(-X_p) \quad (\text{식 19})$$

$$n_e \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \exp(X_p) - n_i \left(\frac{k_B T_i}{2\pi m_i} \right)^{1/2} \exp(-X_p) = \frac{4\pi e m_e}{\hbar^3} T_p^2 \exp\left(-\frac{W}{T_p}\right) \quad (\text{식 20})$$

식 19-20의 분말 표면에서의 전하 균형식을 풀기 위해 분말 주변 열플라즈마의 밀도 값이 요구되며 본 연구에서는 국부적인 열적 평형상태를 가정하여 열플라즈마의 전하 밀도를 식 21과 같이 사하 방정식의 형태로 가정하였다. 식 21에서 n_e 는 플라즈마 밀도, n_a 는 중성 기체의 밀도, g_{ion}, g_0 는 방전 기체의 중성 및 이온화 상태에서 계수를 의미한다.

$$\frac{n_e n_i}{n_a} = 2 \frac{g_{ion}}{g_0} \left(\frac{2\pi m_e k_B T}{\hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_i/k_B T} \quad (\text{식 21})$$

그림 10의 알고리즘 내에서 식 14, 18-20의 열플라즈마 - 분말 간 운동량, 에너지, 전하 균형식을 계산하였으며 이를 토대로 분말의 온도 변화 및 상태 변화를 예측할 수 있다. 그림 10의 알고리즘을 내에서 열플라즈마 내 입사한 분말은 열플라즈마와 상호작용에 의해 얻은 에너지를 통해 온도 및 상변화가 예측되며 기화점에 도달했을 경우 식 22과 같이 기화에 의해 분말의 크기가 줄어들게 된다. 식 22에서 q_{net} 는 분말이 기화점 도달 이후 얻은 에너지, E_{evap} 는 기화에 필요한 잠열을 의미한다. 따라서 열플라즈마

내 입사한 분말의 질량 감소는 기화점 도달 이후 얻은 에너지를 단위 질량 기화에 필요한 잠열로 나눈 값으로 표현된다. 이 때 기화되어 날아간 분말은 분말의 최외각에서 날아갔다고 가정하여 잔류 분말의 크기가 결정된다. 또한 날아간 분말은 계산영역에서 제외되며 기화하고 남은 잔류 분말에 대해서만 해석이 진행된다.

$$\dot{m} = q_{net} / E_{evap} \quad (\text{식 22})$$

따라서 기화점에 도달한 분말은 식 22의 기화에 의한 분말의 질량 감소가 모사가 되며 그림 11의 알고리즘에 따라 Δt 시간 이후의 분말의 온도, 상태, 크기 변화가 분말의 계산 영역 체류시간 동안 같은 과정의 반복을 통해 계산된다. 이와 같은 알고리즘은 분말이 i) 완전 기화되어 사라질 경우 ii) 분말이 계산 영역을 벗어날 경우까지 반복되며 본 전산 모사의 목적은 열플라즈마에 의한 분말 가열 효과 평가에 있으므로 계산 영역은 분말이 지나는 열플라즈마의 온도가 분말의 온도보다 높은 영역 ($T_{gas} > T_p$)까지로 한정된다. 이와 같은 전산 모사 코드를 통해 앞에서 설명한 운동량, 에너지, 질량 전달 방정식과 전하 균형식을 통해 열플라즈마의 특성을 해석할 수 있었다.

제 4 장 결 과

제 1 절 열플라즈마 내 체류분말의 온도, 속도 분포 특성

본 연구의 목표인 나노 분말 합성 공정에서 분말 온도에 따른 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달에 미치는 영향을 확인하기 위해 3장 2절에서 설명한 열플라즈마 내 입사 분말 열적 특성 변화 모사를 수행하였다. 이를 위해 3장 1절의 실험 조건을 전산 모사의 입력 조건으로 주었으며 실험에 사용한 실리콘 분말에 대해 크기에 따른 열플라즈마와 - 분말 간 에너지 전달에 대해 평가해보았다. 실험 값과의 비교를 위해 3장의 실험 조건에서 전산 모사를 수행하였고 이 때 얻어진 열플라즈마 내부 입사 분말의 특성 변화를 통해 열전자 방출에 의한 효과를 평가하였다. 분말 크기에 따른 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달의 모사에 있어 크기가 다른 분말은 정해진 분말 주입포트에서 충분히 긴 거리를 이송가스에 의해 비행함으로써 같은 위치 같은 속도로 열플라즈마에 주입된다고 가정하였다. 따라서 분말의 크기는 분말 입사 초기 관성력을 결정하게 되어 열플라즈마 - 분말 간 운동량 전달에 영향을 미치게 된다.

분말 크기에 따른 열플라즈마 내 분말의 거동을 예측해보기 위해 동일한 토치 출력 8 kW의 동일한 조건에서 3.6 μm , 10 μm 분말에 대해 열플라즈마의 반경 방향과 축 방향에 대해 분말의 속도 변화를 모사하였다. 열플라즈마 내 입사한 분말은 열플라즈마의 반경 방향 및 축방향 유동에 의해 열플라즈마 내를 진행하며 속도의 변화를 겪게 되며 그림 13, 14는 각각 열플라즈마 내 입사한 분말의 초기 크기에 따른 분말의 반경 방향 및 축 방향 속도 변화를 모사한 결과이다.

그림 13, 14에서 검은 실선은 3.6 μm 분말의 속도 변화를 모사한 결과이며 붉은 점선은 10 μm 분말의 속도 변화를 모사한 결과이다. 그림 13, 14에서 분말은 열플라즈마 중심 방향으로 -5 m/sec, 축 방향으로 2 m/sec의 동일한 속도로 주입됨을 가정하였으며 입사한 분말은 반경 방향의 속도는 열플라즈마의 유동과 반대 방향이므로 시간이 지남에 따라 감소하며 축 방향 속도는 열플라즈마의 유동과 같은 방향이므로 증가하게 된다. 이 때

분말의 크기는 식 14에서 입사 분말의 관성력에 영향을 미쳐 느린 반경 방향의 속도 변화에 따라 분말의 궤적이 열플라즈마의 중심으로 더욱 진행하게 되며 느린 축 방향 속도 변화에 따라 보다 장시간의 열플라즈마 내 체류 시간을 겪게 된다.

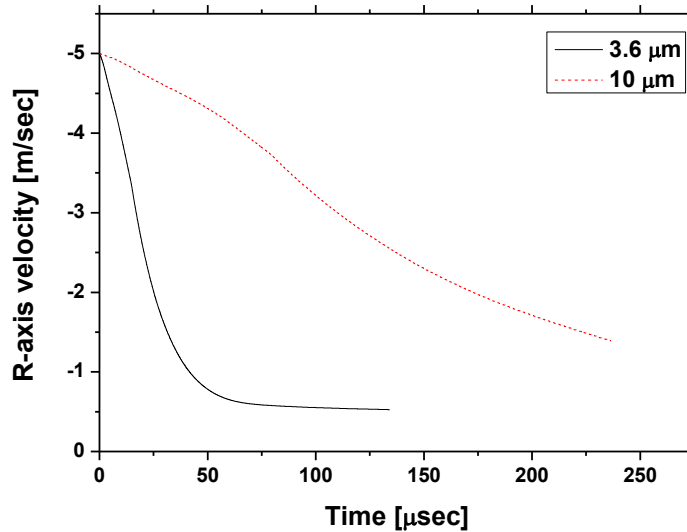


그림 13 열플라즈마 내 입사한 분말 크기에 따른 분말의 반경방향 속도 변화 : 토치 출력 8 kW, 3.6 μm 분말 모사 결과, 붉은 점선 : 10 μm 분말 모사 결과

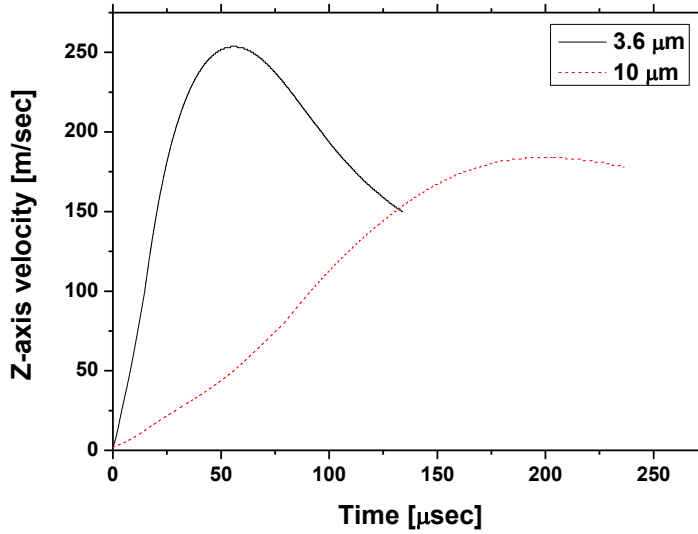


그림 14 열플라즈마 내 입사한 분말 크기에 따른 분말의 축방향 속도 변화 : 토치 출력 8 kW 검은 실선 : 3.6 μm 분말 모사 결과, 붉은 점선 : 10 μm 분말 모사 결과

토치 출력 8 kW 조건에서 초기 분말 크기 3.6 μm , 10 μm 분말에 대해 열플라즈마 내 분말의 궤적을 모사하면 그림 15와 같다.

그림 15에서 검은 실선은 3.6 μm 크기 분말의 궤적을 나타내며 붉은 점선은 10 μm 크기 분말의 궤적을 나타낸다. 그림 16에서 초기 분말 크기 증가에 따라 분말의 궤적이 열플라즈마의 중심 방향으로 접근함을 예측해볼 수 있었다. 이와 같은 결과는 그림 14-15에서 크기가 큰 분말의 경우 반경 방향과 축 방향 속도 변화가 느려 분말이 축 방향으로 가속되어 열플라즈마 영역을 벗어나기까지 반경 방향으로 이동한 거리의 차이에 의한 결과이다.

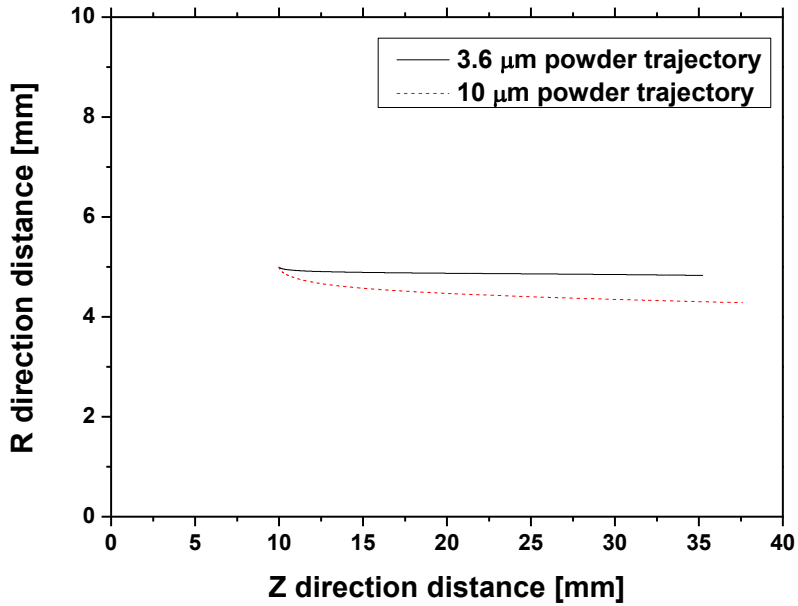


그림 15 열플라즈마 내 입사한 분말 크기에 따른 분말의 궤적 :
 토치 출력 8 kW 조건, 3.6 μm 분말 모사 결과, 붉은 점선 :
 10 μm 분말 모사 결과

그림 15에서 얻은 단위 시간(Δt)에 따른 열플라즈마 내 분말의 궤적에 따라 열플라즈마와의 에너지, 질량 전달 및 분말 표면의 전하 균형식이 계산이 된다. 이 때 분말 크기 3.6 μm , 10 μm 조건에 대해 열적 특성 변화를 모사하면 각각 그림 16,17과 같다.

그림 16,17에서 검은 실선은 열플라즈마 내 입사한 분말의 온도 변화를 의미하며 붉은 점선은 분말이 지나가는 영역의 열플라즈마의 온도 변화를 의미한다.

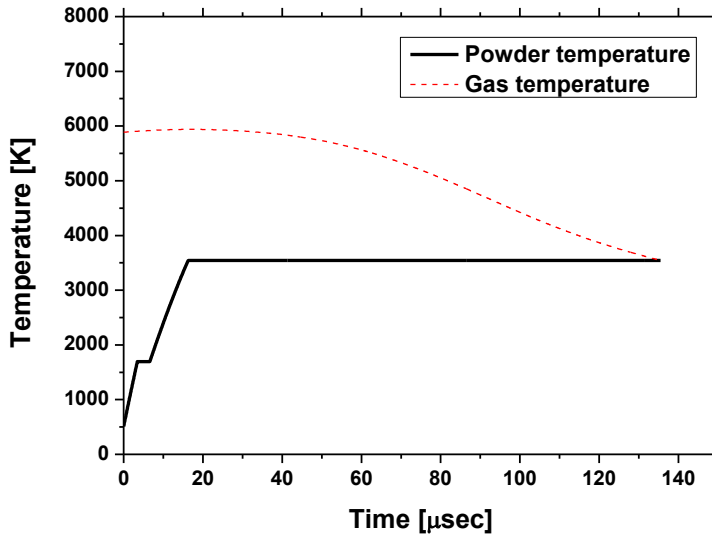


그림 16 열플라즈마 내 입사한 분말 크기에 따른 분말의 열적 특성 변화 : 토치 출력 8 kW, 3.6 μm 분말 모사 결과

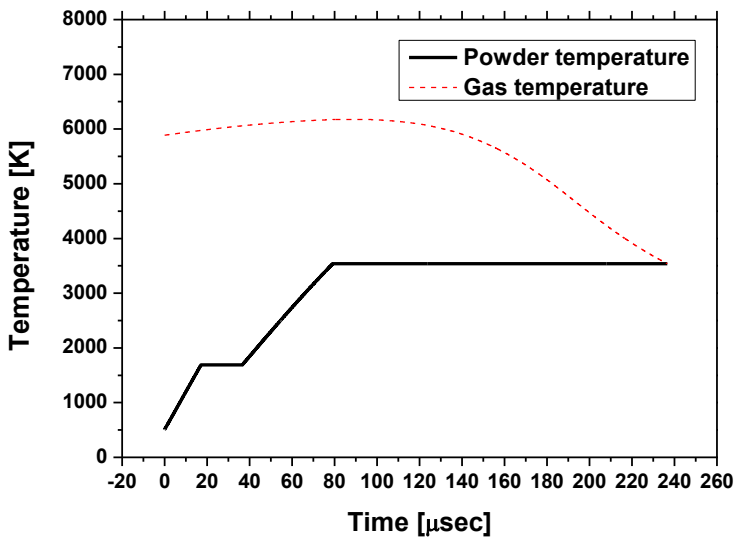


그림 17 열플라즈마 내 입사한 분말 크기에 따른 분말의 열적 특성 변화 : 토치 출력 8 kW, 10 μm 분말 모사 결과

그림 16,17에서 분말의 온도 및 체류하는 열플라즈마의 온도 변화는 그림 15의 분말 궤적상에서 식 18의 열플라즈마 - 분말 간

에너지 전달 균형식에 의해 결정된다. 그림 16-17의 결과를 통해 분말 크기의 증가에 따라 분말의 온도 및 상변화가 느리게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 그림 16-17을 통해 열플라즈마 내를 진행하는 분말의 체류 시간에 따른 분말의 온도 및 체류하는 열플라즈마의 온도 값을 얻을 수 있었다.

제 2 절 열전자 방출에 따른 열플라즈마 내 체류 분말의 부유 전위 특성 변화

전산 모사를 통해 모사된 체류 시간에 따른 분말의 온도 및 체류 열플라즈마의 온도를 통해 열전자 방출에 의한 분말 표면의 부유 전위 변화를 분말의 체류 시간에 대해 평가하였다. 열전자 방출이 분말 표면 부위전위에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험에서 사용한 분말의 평균 크기인 $3.6 \mu\text{m}$ 분말에 대해 그림 16의 결과를 토대로 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대해 부유 전위 변화를 예측해 보았다. 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않은 경우 분말의 부유 전위는 분말이 위치한 열플라즈마 공간 내 온도의 함수로 정의되며 식 3으로부터 정리하면 식 23과 같이 나타난다.

$$X_p = \frac{e\Delta\phi}{k_B T_g} = \frac{1}{4} \ln \left(\frac{m_e T_i}{m_i T_e} \right) \quad (\text{식 23})$$

식 23에서 국부적인 열적 평형 상태를 가정하게 되면 분말이 지나가는 열플라즈마 온도의 함수로 분말의 부유 전위가 결정되며 이를 열플라즈마 내 체류 시간에 대해 변화 추이를 그리면 그림 18과 같다.

그림 18에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 열플라즈마 내 입사한 분말이 지나가는 열플라즈마의 온도를 의미하며 속이 찬 파란 원형 심볼 실선은 체류 시간에 따라 변하는 분말 표면의 부유 전위를 의미한다.

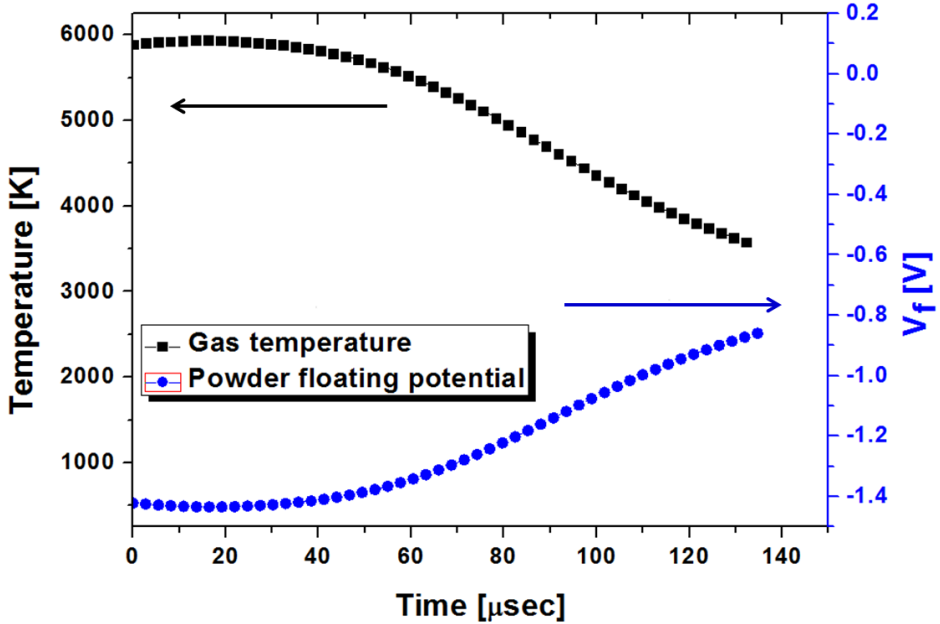


그림 18 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 부위 전위 변화 : 토치 출력 8 kW, 분말 크기 3.6 μm, 분말 표면에서의 열전자 방출 미고려 시 모사 결과

분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않은 조건에서 분말 표면의 볼츠만 인자는 식 23과 같이 나타나며 이를 분말의 부유 전위에 대해 정리하면 식 24와 같다.

$$\Delta\phi_p = \frac{k_B T_g}{e} \frac{1}{4} \ln\left(\frac{m_e}{m_i}\right) \quad (\text{식 24})$$

식 24에서 분말 표면의 부유 전위는 분말이 지나는 열플라즈마의 온도 영역에 비례하게 되어 절대값이 증가하였다 작아지는 방향으로 부유 전위가 변화하게 된다.

그림 18의 결과에 추가적으로 분말 표면에서의 열전자 방출에 의한 효과를 고려하게 되면 분말 표면의 부유 전위는 분말이 지나는 열플라즈마의 온도 영역과 분말 온도의 함수로 주어진다. 그림 16의 3.6 μm 분말이 지나는 열플라즈마의 온도 영역 및 분말의 온도에 따라 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 전하 균형식을 풀면 열플라즈마 내 분말의 열적 상태 변화에 따라 그림 19와 같이 나타낼 수 있다.

그림 19에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 토치 출력 8 kW 조건에 입사한 3.6 μm 분말의 온도 변화를 의미하며 속이 찬 붉은

원형 심볼 실선은 분말이 지나가는 영역의 열플라즈마의 온도를 의미한다. 속이 빈 파란 사각형 심볼 실선은 분말의 부유 전위를 의미한다. 그림 19에서 분말의 표면 전위는 2장 3절에서 설명한 분말의 온도 및 분말이 지나가는 영역의 열플라즈마 온도에 의해 결정된다. 열플라즈마 내 입사한 분말은 열플라즈마에 의해 분말의 온도가 증가하며 축 방향 속도 증가에 따라 통과하는 열플라즈마의 온도 영역은 낮아지게 된다. 이러한 열플라즈마 내 분말의 열적 특성의 시 변화에 따라 분말 표면의 부유 전위 변화 특성은 세 영역으로 나눌 수 있다. 분말의 입사 초기 영역 (영역 1)에서는 분말 온도가 낮아 열전자 방출에 의한 영향이 작을 것으로 예상되며 이 경우 분말 표면에서 전하 균형식은 식 5와 같이 나타난다. 영역 1 이후 체류 시간이 증가함에 따라 분말 온도가 증가하게 되며 분말 표면의 열전자 방출이 급격히 증가하게 되는 영역 2에 도달하게 된다. 영역 2에서 분말의 표면 전위는 분말 온도 상승에 따른 열전자 방출 증가에 의해 감소한다. 이후 추가적인 분말 표면에서의 열전자 방출은 표면 근방의 전자 밀도를 높이게 되고 결국 분말 근방의 전자 밀도가 이온 밀도와 같아지면서 표면의 전자 방출을 억제하게 되는 공간 전하 제한 조건에 다다르게 되며 이 경우 분말의 표면 전위는 공간 내 열플라즈마와 등 전위를 띄게 된다. (영역 3)

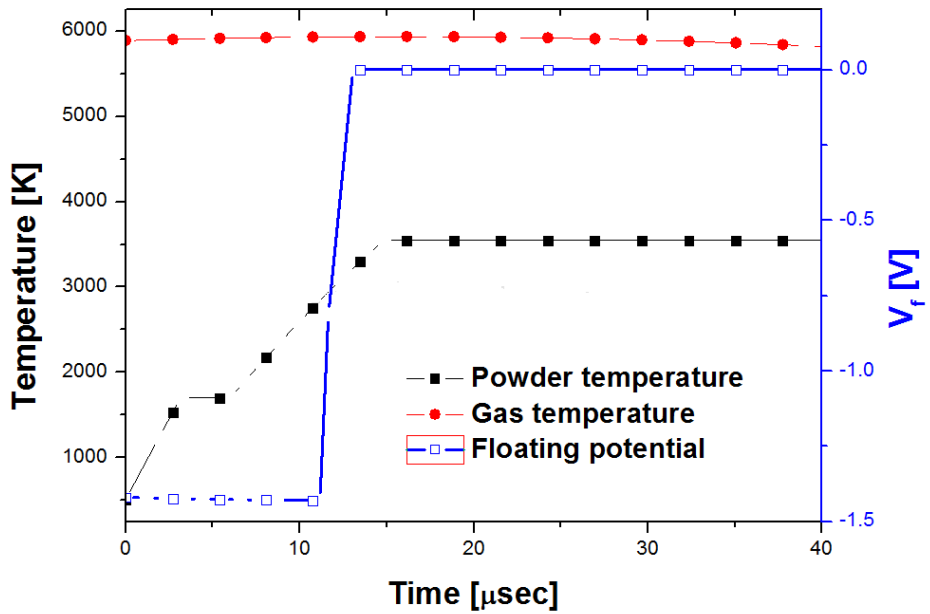


그림 19 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 부위 전위 변화 : 토치 출력 8 kW, 분말 크기 3.6 μm , 분말 표면에서의 열전자 방출 고려 시 모사 결과

제 3 절 분말의 체류 시간 중 분말 표면의 열전자 방출이 열플라즈마-분말 간 에너지 전달에 미치는 영향

열플라즈마 내 입사한 분말의 전하에 의한 가열은 전자 충돌에 의한 가열, 이온 충돌에 의한 가열 분말 표면에서의 중성화 반응에 의한 가열로 구분되며 가열량은 부유 전위에 따른 볼츠만 인자에 의해 결정된다. 그림 18,19에서 체류시간에 따른 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마를 진행하는 분말 표면의 볼츠만 인자 값에 미치는 영향은 그림 20과 같다.

그림 20에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 토치 출력 8 kW 조건에 입사한 $3.6 \mu\text{m}$ 분말의 온도 변화를 의미하며 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 분말이 지나가는 영역의 열플라즈마의 온도를 의미한다. 속이 빈 파란 사각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않은 경우의 분말 표면에서의 볼츠만 인자 값의 변화를 의미하며 녹색 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 분말 표면에서의 볼츠만 인자 값의 변화를 나타낸다. 그림 20에서 열전자 방출을 고려하지 않은 경우의 볼츠만 인자 값은 식 5와 같이 방전 기체의 질량에 비례하기 때문에 아르곤 플라즈마의 경우 $X_p = -2.79$ 의 일정한 값을 나타낸다. 반면 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 입사 초기에는 열전자 방출을 고려하지 않은 경우와 마찬가지로 $X_p = -2.79$ 을 띄며 분말 온도가 증가함에 따라 $X_p = 0$ 으로 수렴하게 된다.

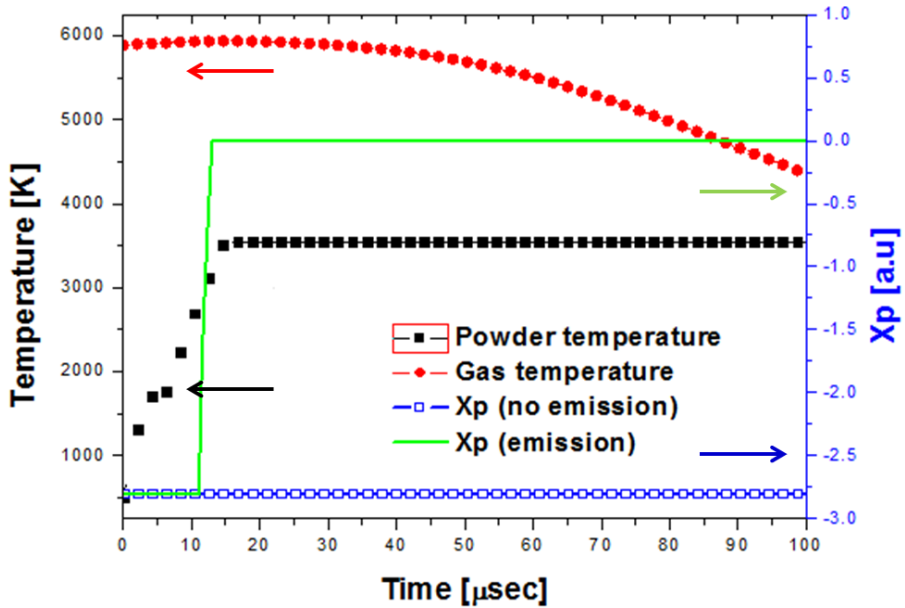


그림 20 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 볼츠만 인자 변화 : 토치 출력 8 kW, 3.6 μm 분말 모사 결과

그림 20의 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간에 따른 분말 표면에서의 볼츠만 인자 값을 통해 체류 시간에 따른 전하에 의한 분말 가열 효과를 평가하면 그림 21과 같다.

그림 21에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 전자 충돌에 의한 가열량을 의미하고 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 이온 충돌에 의한 가열량을 의미하며 속이 찬 파란 삼각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 중성화 반응에 의한 가열량을 의미한다. 그림 21에서 각 가열 메커니즘에 따라 전자는 열평형 상태의 전자의 열에너지 ($2k_B T_e$)를 가지고 분말로 입사하고 이온은 열평형 상태의 이온의 열에너지와 분말 표면의 부유 전위에 의해 가속된 만큼의 에너지 ($2k_B T_i + e|\Delta\phi|$)를 가지고 분말로 입사하며 분말 표면의 중성화 반응에 의한 에너지 전달은 방전 기체의 이온화 전위 만큼의 에너지 (E_i)를 가지고 입사하게 된다. 따라서 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 전하에 의한 각 가열 메커니즘 별 가열 효과는 전자 충돌에 의한 가열 효과는 체류 시간 전 구간 내에서 열에너지만큼을 전달하며 이온 충돌에 의한 가열 효과는 분말 입사 초기에는 분말 표면에 형성된 쉬스에 의해

가속된 에너지 만큼을 열에너지에 추가적으로 가지고 입사하게 되며 이후 열전자 방출에 의한 쉬스 소실에 의해 열에너지만을 가지고 입사하게 된다. 분말 표면에서의 중성화 반응에 의한 에너지 전달은 분말 표면에서의 이온 - 전자에 의한 화학반응과 유사하므로 체류 시간에 따른 부유 전위 변화에 관계없이 이온화 전위만큼을 전달하게 된다.

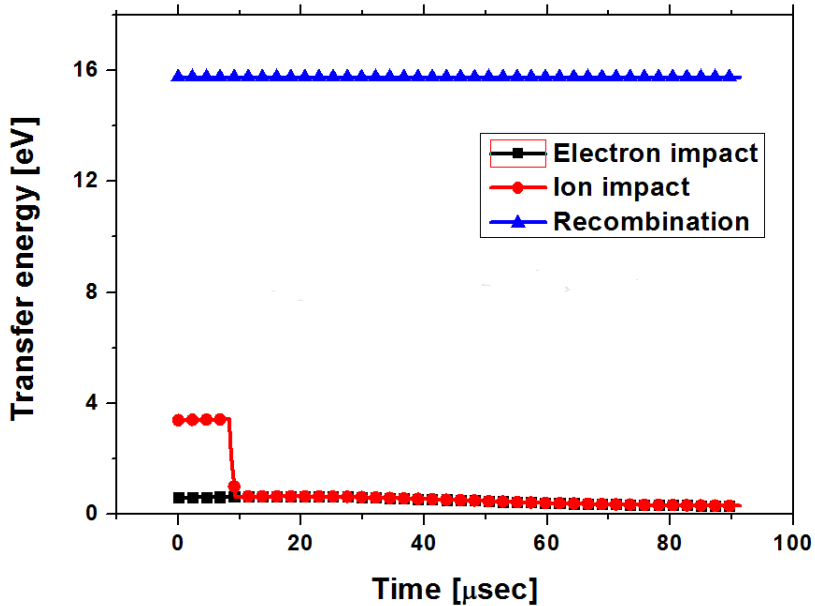


그림 21 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 전하에 의한 가열 메커니즘 별 에너지 전달량 변화 : 토치 출력 8 kW, 분말 크기 3.6 μm, 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려 시
모사 결과

그림 21의 체류 시간에 따른 전하의 각 가열 메커니즘에 따른 에너지 전달량 모사 결과에서, 전하에 의한 에너지 전달이 일어날 것으로 예상되는 분말 입사 초기 (열전자 방출이 일어나기 이전) 영역에서는 전하에 의한 가열 중 분말 표면의 중성화 반응에 의해 약 80 % 이상 전달됨을 확인할 수 있었다. 그림 21의 결과를 통해 열플라즈마 내 입사한 분말의 전하에 의한 가열량은 식 25와 같이 분말 표면에서의 중성화 반응에 의한 에너지 전달량으로 표현할 수 있다.

$$Q_{charge} \approx Q_{recob} \propto n_i \exp(-X_p) \quad (\text{식 25})$$

식 25에서 열플라즈마 내 입사한 분말의 가열 중 전하에 의한 가열은 분말의 볼츠만 인자의 지수승에 비례함을 알 수 있다.

식 25를 통해 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간에 따른 전체 가열량 대비 전하에 의한 가열량의 중요도를 평가하기 위해 전하에 의한 가열량 대비 중성 기체에 의한 가열량을 모사하였다. 식 25에서 전하에 의한 가열량은 분말 표면에서의 재결합에 의한 에너지 전달로 표현됨으로 중성자에 의한 가열 대비 전하에 의한 가열량은 식 26와 같다.

$$\frac{Q_{charge}}{Q_{neutral}} \approx \frac{Q_{recomb}}{Q_{neutral}} = \frac{n_i \exp(-X_p)}{n_a} \frac{E_i}{2k_B(T_g - T_p)} \quad (\text{식 26})$$

식 26에서 열플라즈마 내 입사한 분말의 전하에 의한 가열량 대비 중성 기체에 의한 가열량은 열플라즈마의 이온화율 $\left(\frac{n_i}{n_a}\right)$, 볼츠만 인자 $\left(\exp(-X_p)\right)$, 열플라즈마와 분말의 온도차이의 함수임을 알 수 있다. 식 26을 토치 출력 8 kW, 3.6 μm 실리콘 분말 조건에 대해 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우와 하지 않은 경우에 대해 모사한 결과는 그림 22와 같다.

그림 22에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않은 경우의 체류 시간에 따른 전하에 의한 가열량 대비 중성 기체에 의한 가열량을 의미하며 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우의 체류 시간에 따른 전하에 의한 가열량 대비 중성 기체에 의한 가열량을 의미한다. 속이 찬 파란 삼각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 분말 표면에서의 볼츠만 인자 값의 변화를 나타낸다.

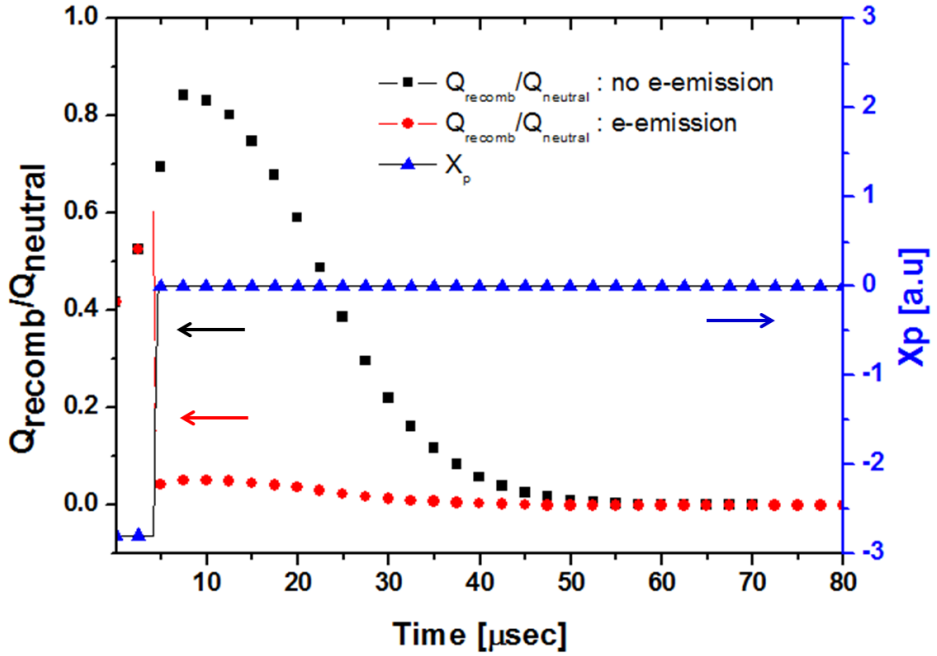


그림 22 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 볼츠만 인자 값 변화 및 분말 표면에서의 열전자 방출에 따른 전하에 의한 가열 효과 : 토치 출력 8 kW, 3.6 μm 분말 모사 결과

그림 22에서 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않은 조건인 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선의 경우 볼츠만 인자 값이 일정함으로 전하에 의한 분말 가열 효과는 분말이 지나가는 열플라즈마의 온도 영역에 따른 열플라즈마 내 전하의 밀도와 열플라즈마와 분말의 온도차이에 의해 결정된다. 분말의 열플라즈마 입사 초기 분말이 가열됨에 따라 열플라즈마-분말 간 온도차이의 감소로 $Q_{recomb}/Q_{neutral}$ 값은 상승하며 이후 분말이 체류하는 열플라즈마 온도 영역이 감소함에 따라 사하 방정식을 통해 계산된 열플라즈마의 밀도 감소로 인해 $Q_{recomb}/Q_{neutral}$ 값이 지속적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 분말 표면에서의 열전자 방출이 고려되지 않은 조건에 추가적인 열전자 방출에 따른 분말의 부유 전위 변화에 의한 효과를 대입할 경우 전하에 의한 분말 가열항에 볼츠만 인자값의 변화가 추가적으로 적용되며 이를 체류 시간에 따라 변동하는 분말의 열적 특성에 대해 해석하면 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려할 경우 분말 온도 상승에 따라 감소한 분말 표면의 부유 전위에 의해 볼츠만 인자 값이 감소하게 되며 전하에

의한 분말 효과가 지수적으로 감소하게 된다. 그림 22에서 모사한 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안 전하에 의한 에너지 전달이 분말 가열에 미치는 영향을 평가하기 위해 토치 출력 8 kW, 분말 크기 $3.6 \mu\text{m}$ 조건에서 중성기체에 의한 가열 효과만을 고려한 경우, 전하에 의한 가열을 추가적으로 고려한 경우, 전하에 의한 가열 효과에 추가적인 분말 표면에서의 열전자 방출 효과를 고려한 경우에 대해 열플라즈마 내 분말 입사 후 시간에 따른 열적 특성 변화를 예측해보았다.

그림 23에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 중성 기체에 의한 분말 가열만을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안의 온도 변화를 의미하고 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 전하에 의한 추가 가열을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안의 온도 변화를 의미하며 속이 찬 파란 삼각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안의 온도 변화를 의미한다.

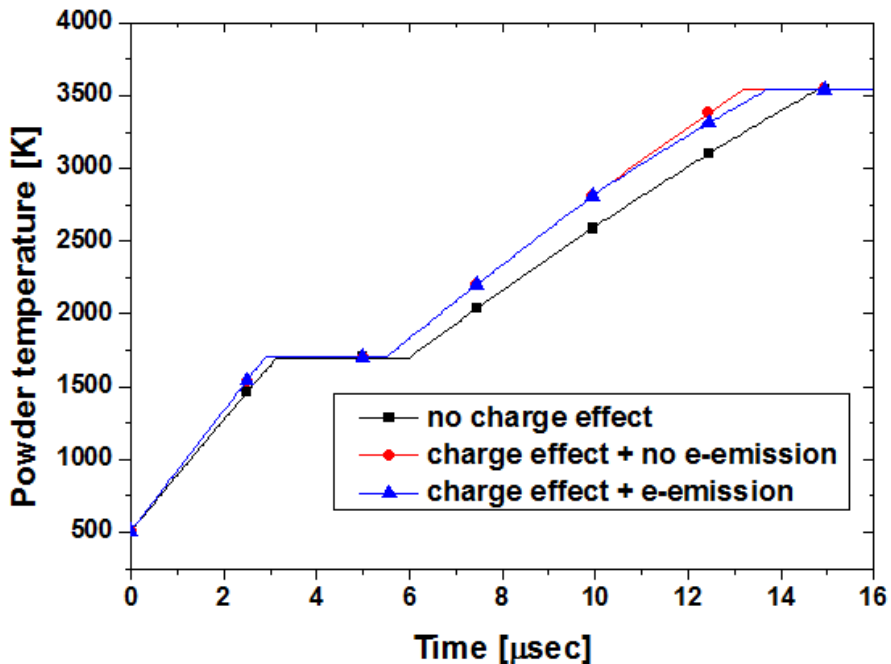


그림 23 분말 가열 해석 조건에 따른 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안 분말 온도 변화 모사 결과: 토치 출력 8 kW, $3.6 \mu\text{m}$ 분말 모사 결과

그림 23에서 볼츠만 인자 값이 증가하는 약 $10 \mu\text{sec}$ 를 기준으로 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 볼츠만 인자값의 감소로 인해 전하에 의한 가열 효과가 사라져 분말의 온도 증가율이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 23의 결과를 분말 크기 변화측면에서 확인해보면 그림 24와 같다.

그림 24에서 에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 중성 기체에 의한 분말 가열만을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안의 크기 변화를 의미하고 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 전하에 의한 추가 가열을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안의 크기 변화를 의미하며 속이 찬 파란 삼각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안의 크기 변화를 의미한다.

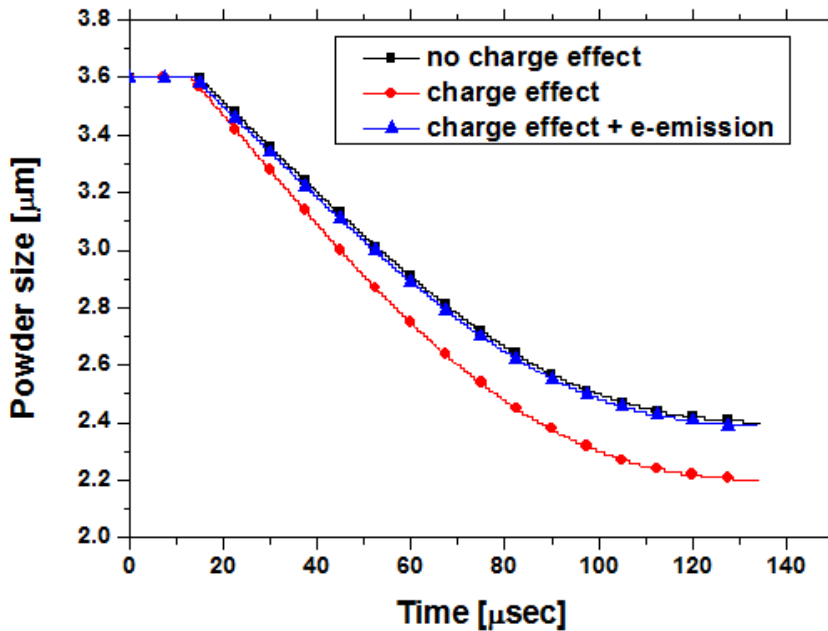


그림 24 분말 가열 해석 조건에 따른 열플라즈마 내 입사 분말의 체류 시간 동안 분말 크기 변화 모사 결과: 토치 출력 8 kW, 3.6 μm 분말 모사 결과

그림 24에서 분말의 크기 변화는 분말의 온도가 기화점에 도달한 상황에서 일어나며 이 경우 분말 표면에서의 열전자 방출의 중요성을 예상해 볼 수 있다. 그림 24에서 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려할 경우, 열전자 방출에 의한 입사 전하량 감소로

계산된 결과는 전하에 의한 가열 효과를 고려하지 않은 결과와 유사한 결과를 보인다. 표 4는 열플라즈마 내 입사한 분말 모사에 대해 전하에 의한 가열 모사 조건 (전하 효과 미고려, 전하 효과 고려, 전하 효과 + 분말 표면에서의 열전자 방출 고려)에 따른 계산된 분말의 최종 잔류 크기이다.

모사 조건	잔류 분말 크기	기화한 부피
전하 효과 x	2.4 μm	17.18208 μm^3
전하 효과 o	2.2 μm	18.84419 μm^3
전하 효과 o + 전자 방출 효과 o	2.39 μm	17.27214 μm^3

표 4 열플라즈마 내 분말 입사 시 전하에 의한 가열 해석 조건에 따른 분말 기화 모사 결과: 토치 출력 8 kW, 분말 크기 3.6 μm 분말 모사 결과

표 4에서 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우는 전하에 의한 가열 효과를 고려하지 않은 결과와 유사한 값을 내며 이와 같은 결과는 그림 22에서 분말이 기화점에 도달한 이후 분말은 0의 볼츠만 인자 값을 갖게 되고 분말 표면의 쉬스가 사라져 전하에 의한 가열 효과가 무시 될 것으로 예상한 결과와 같다. 따라서 그림 22, 표 4의 결과에서 분말 표면의 전자 방출에 의한 분말 표면 전위 변화를 고려하지 않은 경우, 분말의 온도가 높은 (열전자 방출이 분말 표면에 입사하는 전자 전류에 비해 중요한 경우) 경우 분말의 기화 정도를 과대 해석할 수 있음을 확인하였다.

제 4 절 분산된 크기의 분말에서 열플라즈마 - 분말간 열전달 특성

본 절에서는 다양한 크기의 분말에 대해 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달에 미치는 영향을 확인하였고 얻어진 결과를 토대로 저압 용사 공정에서 연구되었던 선행연구와의 상관관계에 대해서 논의하였다. 그림 25는 본 연구에서 사용한 평균 크기 $3.6 \mu\text{m}$ 의 실리콘 분말의 크기 분산과 각 공정에 따른 일반적인 분말 크기 분포 영역을 나타낸다. 분말의 완전 기화를 통한 나노 분말 합성이 목적인 나노 분말 합성 공정에서는 일반적으로 수 μm 이하의 분말이 사용되며 분말의 액화를 통한 표면 코팅이 목적인 플라즈마 스프레이 공정에서는 비교적 큰 수십 ~ 수백 μm 의 분말이 사용된다. 본 절에서는 선행 연구에서 연구되었던 스프레이 공정의 수십 ~ 수백 μm 의 분말에 대해 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마-분말 간 열전달에 미치는 영향을 평가하였다.

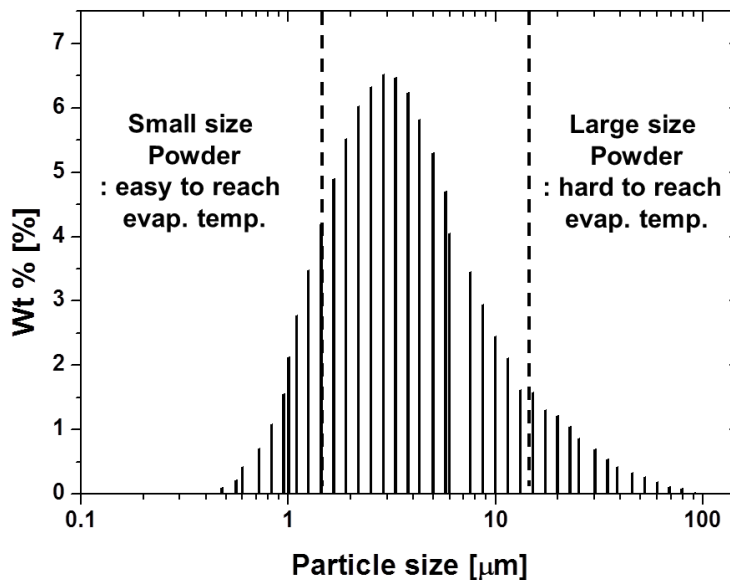


그림 25 평균 크기 $3.6 \mu\text{m}$ 실리콘 분말 크기 분산 및 공정 목적에 따른 분말 분포 군 분류

그림 26은 토치 출력 8 kW 조건에서 $10 \mu\text{m}$ 분말의 열플라즈마 내 체류 시간 동안 열적 특성 변화 및 볼츠만 인자

값의 모사 결과이다. 그림 26에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 토치 출력 8 kW 조건에 입사한 10 μm 분말의 온도 변화를 의미하며 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 분말이 지나가는 영역의 열플라즈마의 온도를 의미한다. 속이 찬 파란 삼각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 분말 표면에서의 볼츠만 인자 값의 변화를 나타낸다. 그림 26에서 입사한 분말은 열플라즈마 내 입사 후 약 64 μsec 이후 볼츠만 인자 값의 절대값이 감소하게 된다.

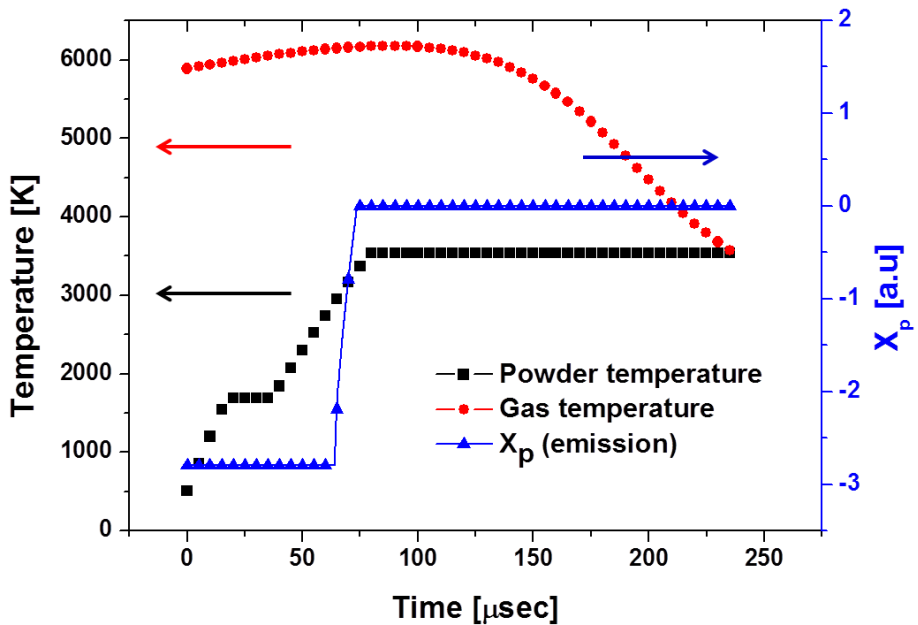


그림 26 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 부위 전위 변화 : 토치 출력 8 kW, 분말 크기 10 μm , 분말 표면에서의 열전자 방출 고려 시 모사 결과

그림 27은 토치 출력 8 kW 조건에서 45 μm 분말의 열플라즈마 내 체류 시간 동안 열적 특성 변화 및 볼츠만 인자 값의 모사 결과이다. 그림 27에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 토치 출력 8 kW 조건에 입사한 45 μm 분말의 온도 변화를 의미하며 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 분말이 지나가는 영역의 열플라즈마의 온도를 의미한다. 속이 찬 파란 삼각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 분말 표면에서의 볼츠만 인자 값의 변화를 나타낸다. 그림 27에서

입사한 분말은 열플라즈마 내 입사 후 약 497 μsec 이후 볼츠만 인자 값의 절대값이 감소하게 된다.

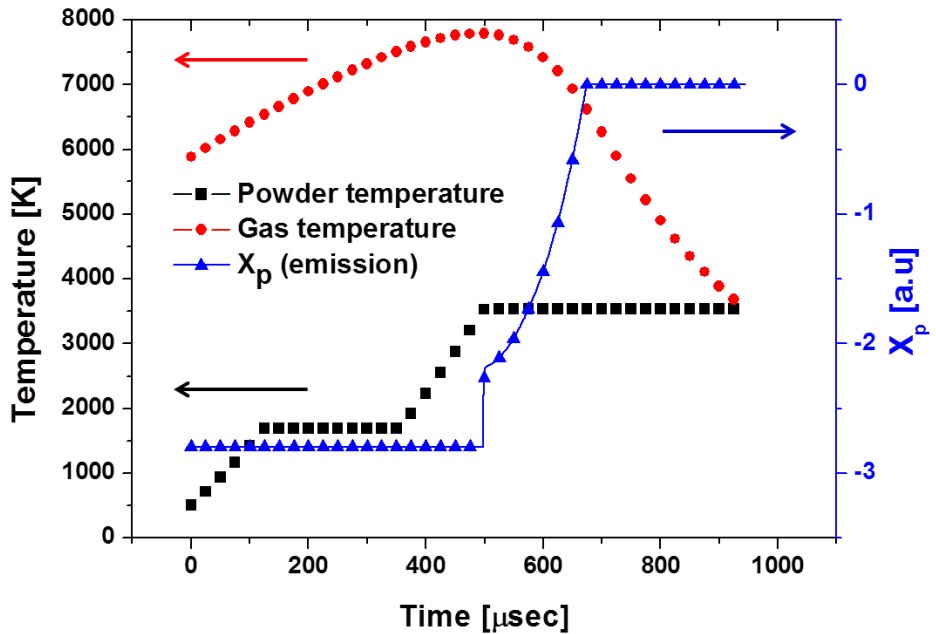


그림 27 열플라즈마 내 입사한 분말의 열플라즈마 내 체류 시간에 따른 부위 전위 변화 : 토치 출력 8 kW, 분말 크기 45 μm , 분말 표면에서의 열전자 방출 고려 시 모사 결과

분말 크기에 따른 분말 표면의 볼츠만 인자 값의 변화를 모사한 그림 20, 26, 27에서 열플라즈마 내 입사한 3.6 μm , 10 μm , 45 μm 의 분말은 식 11의 분말 표면에서의 전하 균형식에 의해 분말 온도 및 분말이 지나가는 열플라즈마의 주변 온도에 따라 볼츠만 인자값이 계산된다. 그림 20, 26, 27에서 전체 분말 가열 시간 대비 전하에 의한 가열 효과가 존재하는 $X_p = -2.79$ 인 조건을 만족하는 특성 시간 값의 비율을 나타내면 표 5와 같다. 표 5에서 $\tau_{critical}$ 은 분말이 열플라즈마 내 입사 후 가열에 의해 분말 표면의 볼츠만 인자 값이 변화하기 시작하는 영역까지의 시간이며 τ_{total} 은 분말이 총 가열되는 시간을 의미한다.

주입 분말 크기	$\tau_{critical} / \tau_{total}$
3.6 μm	7 %
10 μm	27.265 %
45 μm	52.662 %

표 5 분말 크기에 따른 분말 표면에서의 열전자 방출 효과 무시 가능 구간 대비 전체 가열 시간 비율: 토치 출력 8 kW 조건

표 5에서 분말 크기 증가에 따른 분말의 온도가 낮아 열전자 방출의 효과가 낮은 구간의 대비 전체 가열 가능 시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 열플라즈마 - 분말 간 열전달과 열전달에 의한 분말 열적 특성 변화식에서 분말 크기항에 의한 영향으로 해석된다. 식 18의 열플라즈마 - 분말 간 에너지 균형식에서 좌변의 항은 분말의 부피(분말 크기의 3제곱)에 비례하는 분말의 열적 특성 변화항이며 우변의 항은 분말의 표면적(분말 크기의 제곱)에 비례하는 열플라즈마-분말 간 열전달항이다. 식 18에서 분말의 크기가 증가할수록 분말의 온도 및 상변화가 천천히 일어남을 예상할 수 있고 분말 온도의 느린 상승으로 인해 분말의 열플라즈마 내 전체 체류시간 중 열전자 방출에 의한 영향이 감소했다고 판단할 수 있다. 따라서 분말 크기에 따라 열전자 방출의 효과가 낮은 구간($\tau_{critical}$) 대비 전체 분말 가열 시간(τ_{total})의 비율을 그리면 그림 28과 같다.

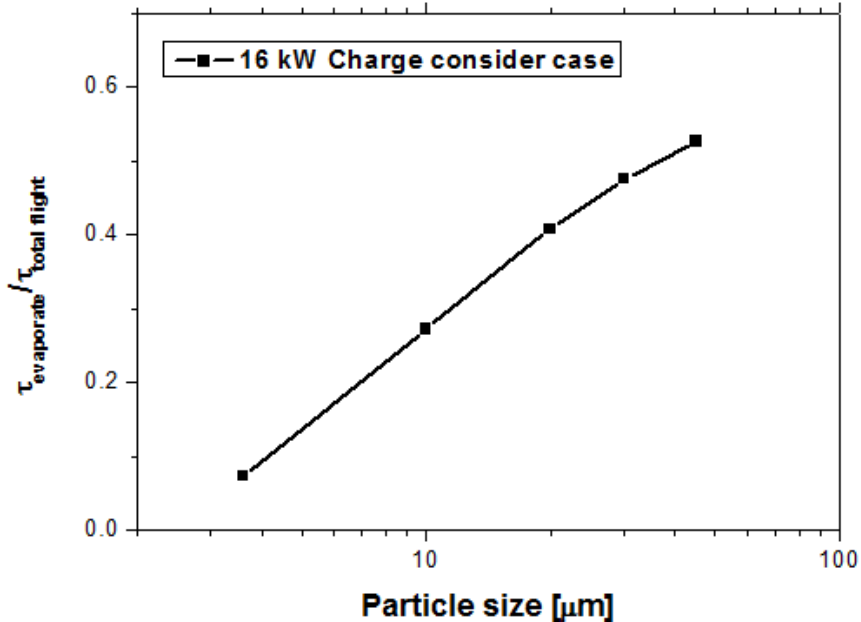


그림 28 분말 크기에 따른 분말 표면에서의 열전자 방출 효과 무시 가능 구간 대비 전체 가열 시간 비율: 토치 출력 8 kW 조건

그림 28에서 분말 크기가 증가함에 따라 열플라즈마 - 분말 간 열전달을 해석함에 있어 열전자 방출이 중요해지는 영역이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 나노 분말 합성 대비 큰 분말을 사용하는 저압 스프레이 공정에서 주로 연구되었던 선행 연구들에서 열전자의 효과를 고려하지 않은 경우의 결과가 비교적 잘 맞았던 경향이 설명되며 분말의 크기가 작은 나노 분말 합성 공정 또는 분말의 온도가 급격히 상승하는 공정에서는 열전자 방출에 의한 효과가 중요해짐을 예상할 수 있다. 유사한 결과로 3장에서 설명한 나노 분말 합성 공정에서 분말 크기에 따른 기화율을 계산하면 그림 29와 같다.

그림 29에서 속이 찬 검은 사각형 심볼 실선은 중성 기체에 의한 분말 가열만을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사한 분말의 초기 크기에 대한 기화율을 의미하고 속이 찬 붉은 원형 심볼 실선은 전하에 의한 추가 가열을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사한 분말의 초기 크기에 대한 기화율을 의미하며 속이 찬 파란 삼각형 심볼 실선은 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우의 열플라즈마 내 입사한 분말의 초기 크기에 대한 기화율을 의미한다. 그림 29에서 분말 크기가 작은, 영역 1의 경우 열전자 방출에 의한

효과가 중요하여 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 전하에 의한 가열 효과를 고려하지 않은 결과와 유사한 경향을 띠게 된다. 그러나 분말의 크기가 추가적으로 증가한 경우 열전자 방출이 중요한 영역의 시간이 감소함에 따라 전하에 의한 가열 효과가 증가하게 된다. 따라서 분말 표면에서의 열전자 방출에 의한 영향은 분말의 크기 증가에 따른 온도 변화율 감소에 의해 중요도 평가가 가능함을 확인하였다.

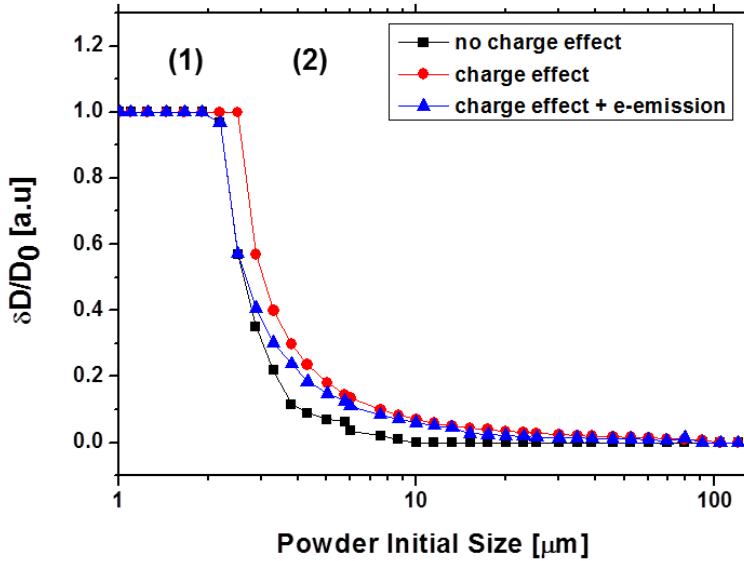


그림 29 분말 가열 해석 조건에 따른 열플라즈마 내 입사 분말의 초기 크기에 따른 기화율: 토치 출력 8 kW 조건 모사 결과

제 5 장 실험 결과

제 1 절 나노 분말 합성 시스템을 이용한 실리콘 나노 분말 합성 및 전산 모사를 이용한 분말 크기 분산 분석

본 장에서는 3장에서 설명한 나노 분말 합성 시스템을 이용해 나노 분말 합성 실험을 수행하였으며 이를 4장에서 설명한 전산 모사의 해석 결과를 토대로 교차 검증을 수행하였다. 이 과정에서 분말의 궤적이 열플라즈마 중심부를 지난다고 가정한 전산 모사 코드의 가정 i)의 타당성에 대해 확인해보았으며 합성 분말의 크기 분산 계형 및 합성된 나노 분말의 나노 분말 비율을 평가해보았다. 그림 30은 실험에 사용한 평균 크기 $3.6 \mu\text{m}$ 의 실리콘 원료 분말의 SEM 이미지이며 그림 31은 나노 분말 합성 시스템을 통해 토치 출력 8 kW 조건에서 처리한 실리콘 분말의 SEM 이미지이다. 그림 30에서 열플라즈마 처리 전 원료 분말은 평균 수 μm 의 각진 형태를 보이며 열플라즈마 처리를 한 그림 31의 분말의 경우 수십 ~ 수백 nm 크기의 구형 분말임을 확인할 수 있다.

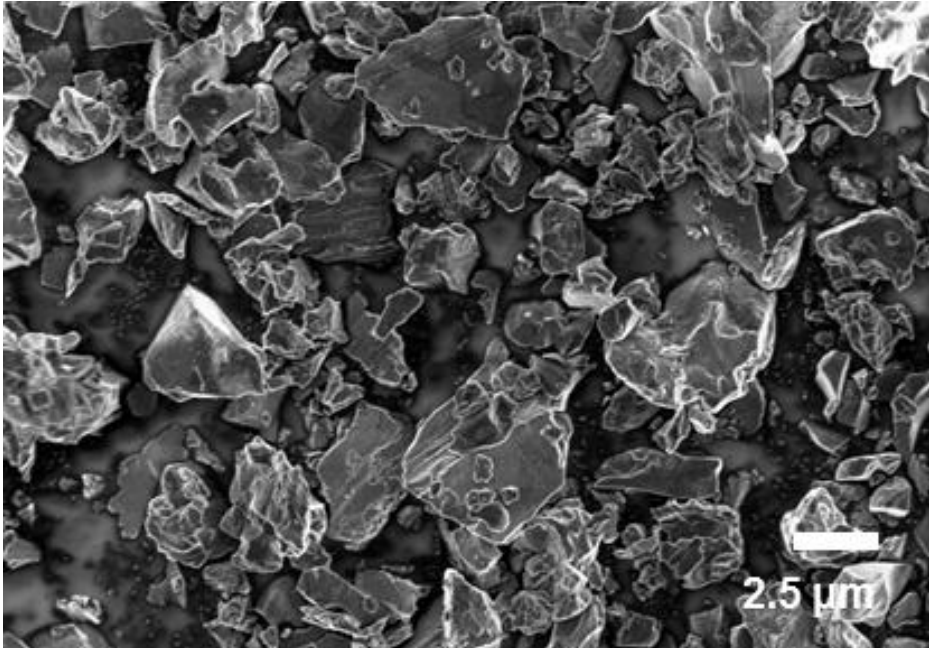


그림 30 평균 크기 $3.6 \mu\text{m}$ 실리콘 원료 분말의 SEM 이미지

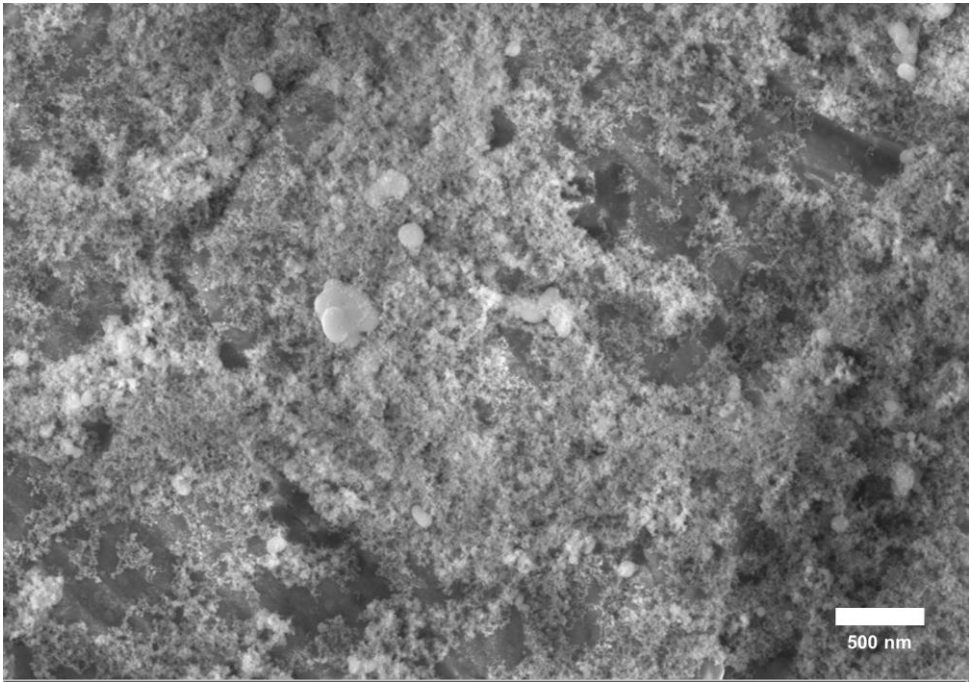


그림 31 토치 출력 8 kW 조건에서 합성된 실리콘 분말의 SEM 이미지

그림 30,31의 열플라즈마 처리 전 후의 분말의 SEM이미지에서 열플라즈마 내 주입된 실리콘 나노 분말이 열플라즈마 내 환경에서 기화하였음을 확인할 수 있었고, 따라서 열플라즈마 내에서 분말이 기화점 (3538 K)에 도달하였을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 4장에서 설명한 분말 표면에서의 열전자 방출이 열플라즈마 - 분말 간 열전달 현상해석에 영향을 미칠 것으로 예상이 되며 전하에 의한 분말 가열의 영향을 평가하기 위해 실험을 통해 얻은 분말의 크기 분산 변화를 전산 모사를 통해 얻은 분말 크기 분산 변화와 비교하였다. 실험을 통해 얻은 분말의 크기 분산은 전기 영동 광산란법을 통해 측정하였다. 그림 32-33은 토치 출력 8 kW, 16 kW 조건에 따른 합성된 분말의 크기 분산을 측정한 결과이다. 그림 32, 33에서 막대 그래프는 막대 그래프가 위치한 x 축 위치에서 y 축 값 만큼의 질량 분율을 갖음을 의미한다.

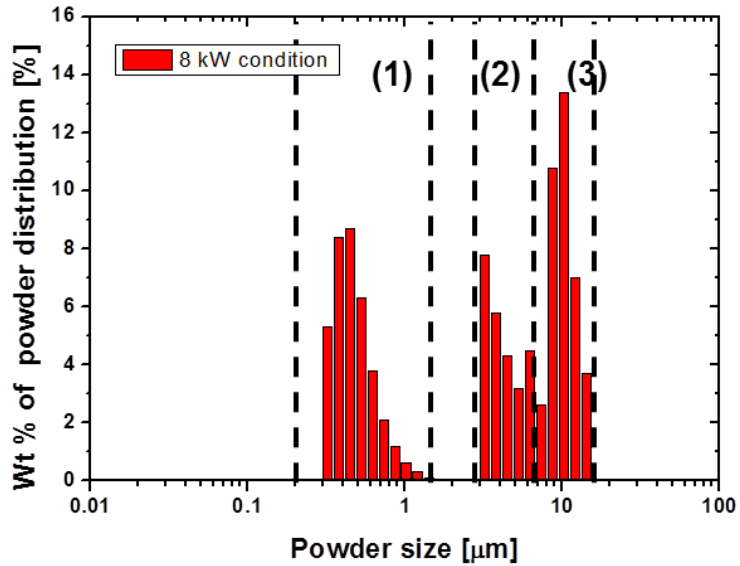


그림 32 합성된 실리콘 분말의 크기 분산 측정 결과 : 토치 출력 8 kW, 분말 주입 포트 직경 5 mm 조건

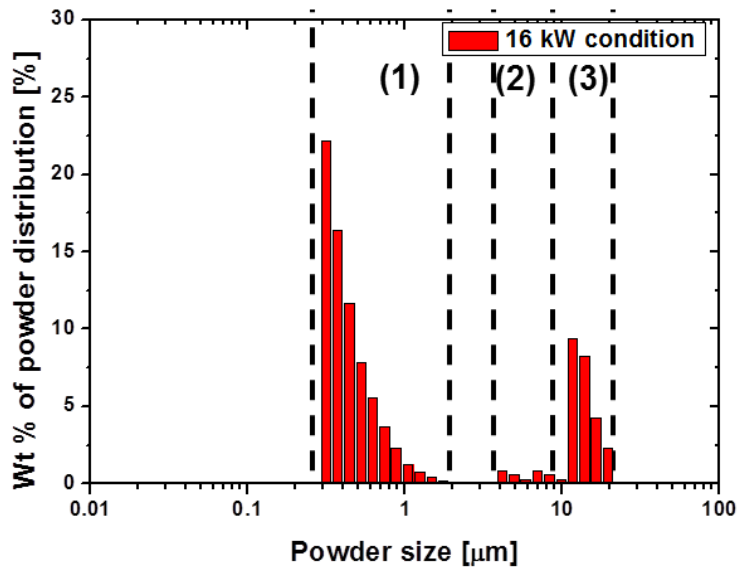


그림 33 합성된 실리콘 분말의 크기 분산 측정 결과 : 토치 출력 16 kW, 분말 주입 포트 직경 5 mm 조건

그림 32,33에서 합성된 분말의 크기 분산은 3 개의 영역으로 구분할 수 있었다. 참고 문헌 [13]을 참고하여 각 영역의 분말 군은 다음과 같이 구분할 수 있다. 영역 1의 경우 1 μm 이하의

크기 영역에 분포하며 초기 원료 분말 중 약 6 %의 질량 분율을 차지했으나 합성된 분말의 경우 40 ~ 60 % 정도로 증가하였음을 확인할 수 있다. 따라서 영역 1의 분말은 열플라즈마 내에서 기화된 분말이 응축된 것으로 판단된다. 출력에 따른 영역 1의 분말의 크기 분산은 그림 34와 같다.

그림 34에서 최대의 질량 분율을 갖는 분말의 크기가 8 kW 조건 445 nm에서 16 kW 조건 306 nm로 감소하였다. 이는 고출력 조건에서 분말로의 열전달 증가에 의한 영향으로 평가할 수 있다.

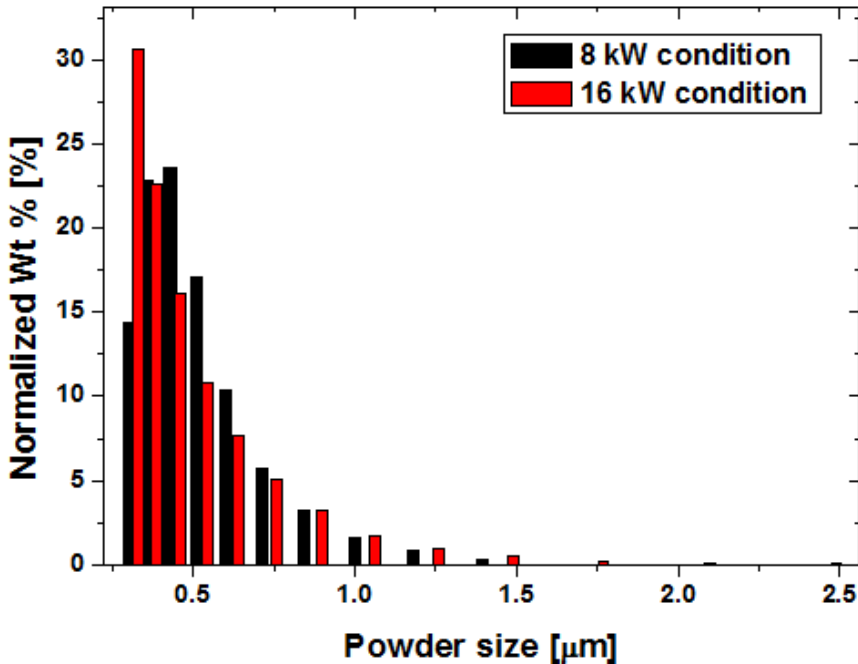


그림 34 토치 출력에 따른 합성된 나노 분말의 크기 분산

영역 2의 경우 1 ~ 10 μm 크기 영역에 속하며 이는 전산 모사 상에서 계산된 열플라즈마를 통과한 후 잔류한 분말 영역으로 판단된다. 영역 2의 결과를 설명하기 위해 전산 모사를 통해 그림 25와 같은 분산을 갖는 분말의 열플라즈마 주입 후 잔류 분말의 크기 분산 변화를 토치 출력 16 kW, 48 kW 조건에 대해 모사하면 그림 35,36과 같다. 본 연구에서 사용된 코드는 기화된 분말의 응축은 고려하지 않고 고체 분말의 크기 감소만 고려하기 때문에 분말의 크기 감소는 막대 그래프 위치의 이동, 완전 기화에 의한 소실은 그래프의 소실로 나타난다. 그림 35,36에서 초기 원료 분말에 비해 1 ~ 10 μm 구간에 촘촘히 존재하면 분말 군들이

기화되어 사라졌음을 확인할 수 있고, 출력이 증가함에 따라 분말들의 분산이 크기가 작아지는 왼쪽으로 이동함을 확인할 수 있다. 이와 같은 경향은 그림 29에서 설명한 것과 같이 작은 크기의 분말에 대해 급격히 나타나며 기화된 분말은 그림 32,33에서 볼 수 있듯이 $1\ \mu\text{m}$ 이하의 나노 분말화 되었을 것으로 예상할 수 있다. 반면 크기가 큰 분말의 경우 그림 29의 설명과 마찬가지로 크기 변화가 작아 대체로 원래 크기를 유지하며 잔류하는 경향이 그림 35,36을 통해 확인할 수 있었다. 이를 통해 열플라즈마에 입사한 뒤 기화를 겪고 잔류한 분말의 크기 분산은 초기 원료 분말의 가우시안(Gaussian) 분포 형태의 크기 분포에서 그림 35,36의 결과와 같은 대수 정규 분포(Log normal) 형태의 크기 분포로 이동함을 예상할 수 있었다.

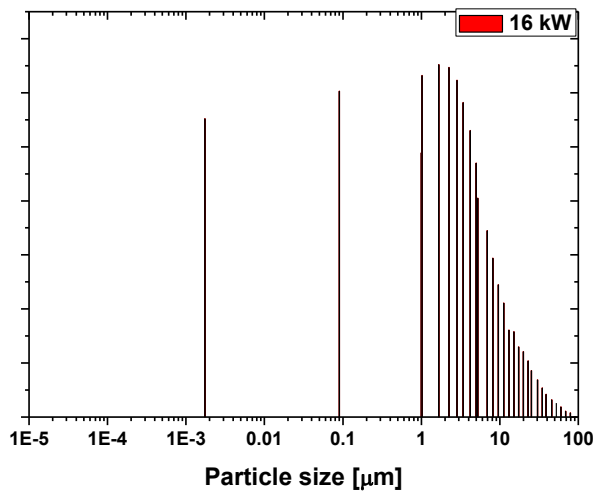


그림 35 토치 출력에 따른 열플라즈마 처리 후 잔류 분말 크기 분포 모사 결과 : 토치 출력 16 kW 조건

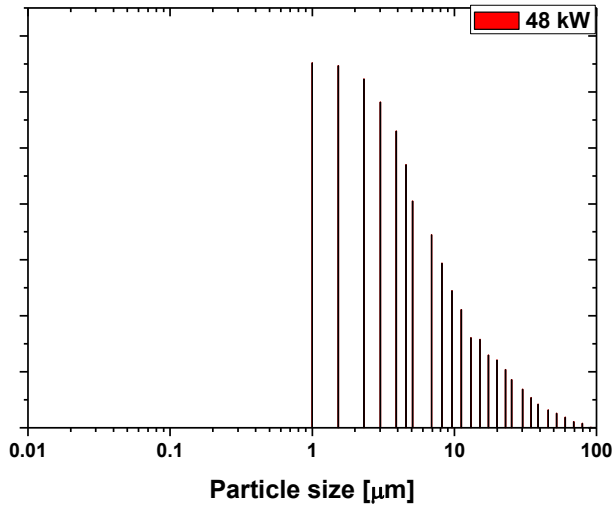


그림 36 토치 출력에 따른 열플라즈마 처리 후 잔류 분말 크기

분포 모사 결과 : 토치 출력 48 kW 조건

영역 3의 경우 10 ~ 수십 μm 크기 영역에 속하며 이는 선행 연구를 통해 분말의 가장 자리를 통과하는 분말로 판단된다.[13] 실제 열플라즈마 공정에서 분말 주입 포트는 한 점으로 국한될 수 없기 때문에 그림 37과 같이 열플라즈마 중심부를 지나지 않는 분말 군이 존재하게 되며, 중심부를 지나지 않는 분말 군에 의한 효과를 바이패싱(bypassing)의 효과로 정의한다.[13]

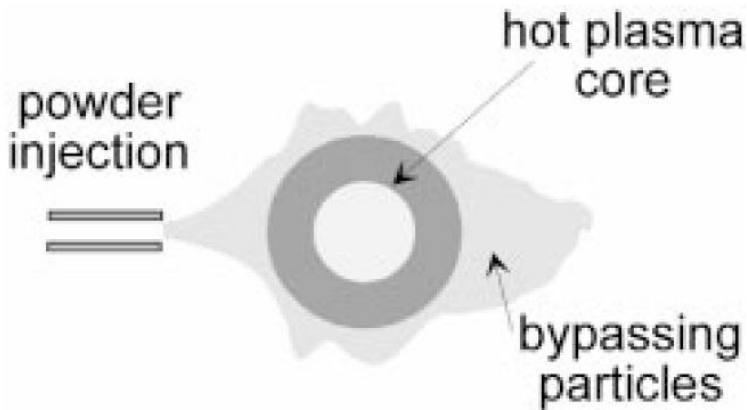


그림 37 분말 주입 시 바이패싱 분말 개략도 [13]

그림 32,33의 실험 조건에서 분말 주입 구조에 따르면 열플라즈마 토치 출구직경이 10 mm인 것에 비해 분말 주입 포트 직경이 5 mm로 분말 주입구가 전체 열플라즈마 직경의 약 50 % 정도

영역을 차지하여 열플라즈마 중심부를 지나지 않는 분말을 다량 예상할 수 있다. 그림 32,33의 실제 실험 결과에서도 10 μm 이상의 분말균이 높은 비율로 나타났다. 이러한 열플라즈마 내 주입된 분말의 바이패싱 효과는 본 연구에서 사용된 전산모사의 가정 i)에 위배되는 조건이며 이 효과에 대한 검증을 위해 분말 주입 포트 직경을 2 mm로 변경하여 추가 실험을 수행하였다. 그림 38은 토치 출력 8 kW 조건에서 분말 주입 포트의 직경을 2 mm로 조절한 결과이다.

그림 38에서 합성된 분말은 100 nm ~ 1 μm 크기 영역과 1 ~ 10 μm 영역, 2개의 군으로 구분되며 그림 32,33의 결과와 비교하였을 때 바이패싱에 의한 분말 균이 제어된 결과를 보여준다. 그림 38에서 그림 32,38의 결과를 통해 바이패싱 효과에 대한 합성 분말의 크기 분산 의존도에 대해 확인할 수 있었다.

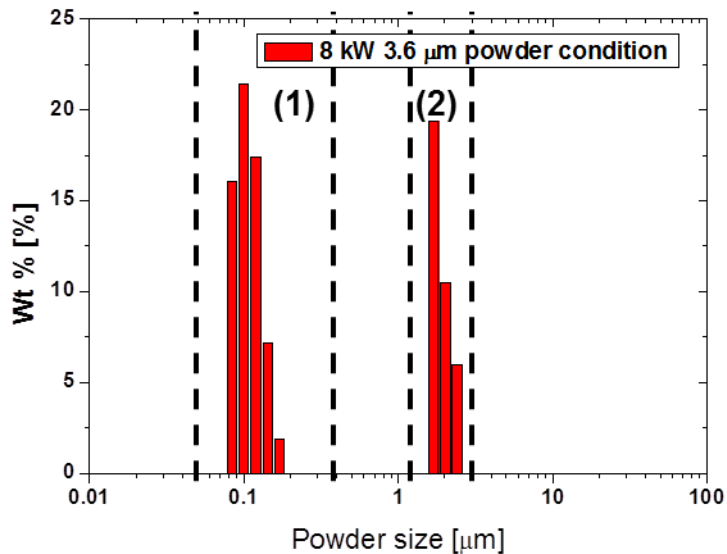


그림 38 합성된 실리콘 분말의 크기 분산 측정 결과 : 토치 출력 8 kW, 분말 주입 포트 직경 2 mm 조건

분말 주입 포트 직경 5 mm, 2 mm 조건에 대해 얻어진 결과를 토대로 전체 분말 중 기화에 의해 합성되었을 것으로 예상되는 1 μm 이하 분말의 질량 분율을 비교하면 그림 39와 같다. 그림 39에서 검은 막대 그래프는 분말 주입 포트 직경 5 mm 실험에서 전체 분말 중 기화에 의해 형성 되었을 것으로 예상되는 1 μm 이하의 분말 균의 질량 분율을 의미하며 붉은 막대 그래프는 분말

주입 포트 직경 2 mm 실험에서 전체 분말 중 기화에 의해 형성 되었을 것으로 예상되는 1 μm 이하의 분말 군의 질량 분율을 의미한다.

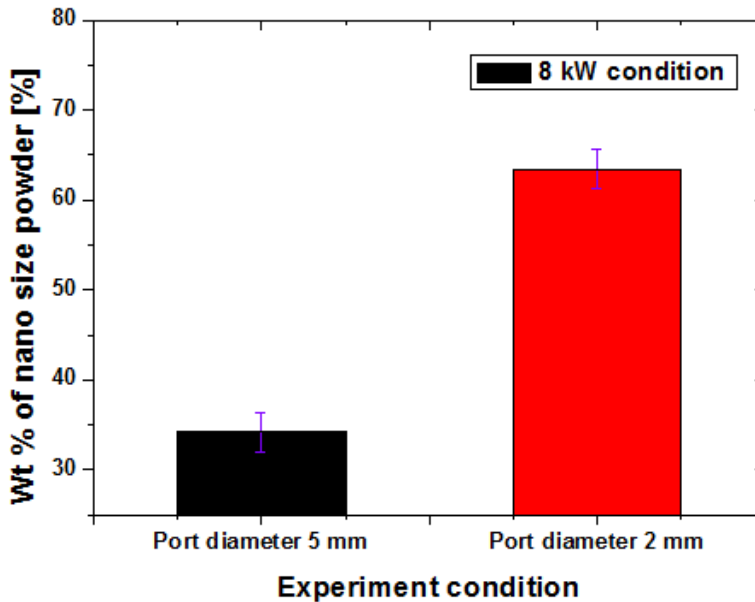


그림 39 분말 포트 직경에 따른 합성 된 나노 분말 중 1 μm 이하 분말의 질량 분율: 토치 출력 8 kW 조건

그림 39에서 분말 포트 직경 감소에 따른 바이패싱 효과의 억제에 따라 기화된 분말의 분율이 약 29.2 % 가량 증가되었음을 확인하였다. 본 실험에서는 그림 32,38의 결과를 토대로 분말 포트 직경 2 mm인 경우 바이패싱에 의한 효과가 거의 없다고 판단하였다. 따라서 분말 포트 직경 2 mm의 경우는 본 연구에서 사용한 전산모사의 가정 i) 분말은 열플라즈마의 중심부를 지나간다고 만족한다고 판단하여 전산 모사 결과와 비교 검증을 통해 4장에서 설명한 열플라즈마 내 입사 분말과 열플라즈마 간 에너지 전달 해석에 있어 분말 표면의 열전자 방출에 의한 부유 전위 변화 해석의 중요성을 평가해보았다. 실험 결과와 전산 모사 결과의 비교를 위해 분말 포트 직경 2 mm의 실험 조건에서 얻어진 전체 분말 중 1 μm 이하 분말의 질량 분율과 전하에 의한 가열 효과 고려 조건 (분말 표면에서의 열전자 방출 효과 고려/ 미고려)에 따른 1 μm 이하 분말의 질량 분율을 비교하면 그림 40과 같다. 그림 40에서 검은색 막대 그래프는 실험에서 합성된 분말 중

1 μm 이하 분말의 질량 분율을 의미하고 붉은색 막대 그래프는 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우의 1 μm 이하 분말을 모사한 결과이며 녹색 막대 그래프는 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않은 경우의 1 μm 이하 분말을 모사한 결과이다.

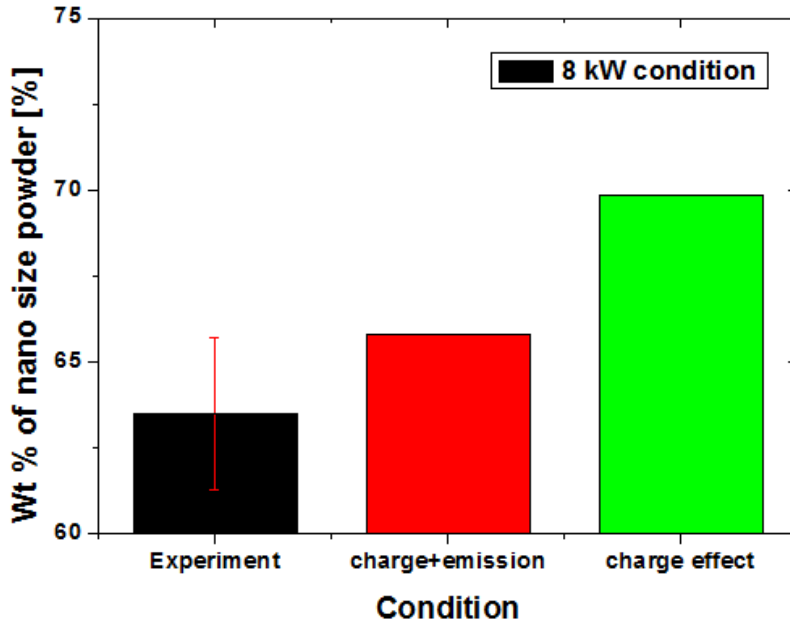


그림 40 합성 된 나노 분말 중 1 μm 이하 분말의 질량 분율 측정값 및 전산 모사 조건에 따른 1 μm 이하 분말의 질량 분율 예측값

그림 40 에서 토치 출력 8 kW, 분말 주입 포트 직경 2 mm 조건에서 합성된 분말의 1 μm 이하 분말의 질량 분율은 3번의 반복실험에서 각각 64 %, 64.7 %, 61.7 %으로 평균 63.4 %의 재현성 있는 결과를 보여준다. 이와 같은 실험 결과를 전산 모사 결과와 비교해 보았을 때 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 경우 1 μm 이하 분말의 질량 분율 예상값은 약 65.7 %이며 열전자 방출을 고려하지 않은 경우는 약 69.83 %로, 열전자 방출 효과를 고려하지 않은 경우 약 6 % 가량 합성된 분말의 1 μm 이하 분말의 분율을 과대 해석하는 경향을 보여주었고, 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려한 결과에서는 실험 값의 오차 범위 내에 들어가는 비교적 유사한 값을 나타내었다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 열플라즈마 내 입사한 분말과 열플라즈마 간 에너지 전달 과정을 해석함에 있어 선행 연구에서 간과되었던 열플라즈마 내 입사한 분말의 열전자 방출 매개체로서의 특성이 열플라즈마 - 분말 간 에너지 전달에 미치는 영향을 평가하는 것이 목적이었다. 분말의 열전자 방출 매개체의 특성을 평가하기 위해 분말 표면에서의 열전자 방출이 고려된 전하 균형식이 포함된 열플라즈마 내 입사 분말의 열적 특성 모사 코드를 작성하였다. 작성된 코드를 통해 열플라즈마 내 입사한 분말의 체류 시간에 따른 열적 특성 모사와 이를 통한 분말 표면의 전위 변화를 예측해보았다. 열전자 방출을 고려하지 않은 선행 연구 결과에서 일정한 볼츠만 인자 값을 전하에 의한 가열량 평가에 사용했던 것과 다르게 분말 표면에서의 열전자 방출에 의한 효과를 고려할 경우 분말 온도 상승에 따라 변하는 볼츠만 인자 값을 추적할 수 있었다. 위 결과를 통해 열플라즈마 내 입사한 분말의 열적 특성을 예측함에 있어 열전자 방출 효과가 영향을 미치는 영역을 평가할 수 있었으며 분말 크기에 따른 분말 표면에서의 열전자 방출이 미치는 효과에 대한 예측을 통해 비교적 분말 크기가 큰 저압 스프레이 공정에서 수행된 선행 연구의 결과가 분말 표면에서의 열전자 방출을 고려하지 않음에도 불구하고 해석이 가능한 이유를 설명할 수 있었다. 추가로 분말 표면에서의 열전자 방출이 고려된 열플라즈마 내 입사 분말 모사 코드를 통해 나노 분말 합성 장치를 통해 합성된 분말의 크기 분산 개형을 예측해볼 수 있었고, 실험 결과와 전산 모사 결과에서 $1 \mu\text{m}$ 이하 분말의 질량 분율 변화 비교를 통해 분말 표면에서의 열전자 방출의 고려 필요성에 대해 예측해 볼 수 있었다. 그러나 본 실험의 목적인 분말 표면의 열전자 방출이 플라즈마 내 입사한 분말과의 에너지 전달에 미치는 영향을 직접적으로 평가하기에는 전하에 의한 가열 외에 중성 기체나 자외선에 의한 가열이 추가적으로 적용되는 열플라즈마 공정은 한계가 있음을 확인하였으며 추후 전하에 의한 가열이 주요 가열 경로인 비평형 플라즈마에서의 실험을 통해 추가 검증하고자 한다.

본 실험에서 얻은 결과를 통해 열플라즈마 내 입사 분말과 열플라즈마 간 에너지 전달 과정을 해석함에 있어 열플라즈마 및

공정 조건에 따라 분말 표면의 부유 전위가 영향을 정의할 수 있었다는데 의의가 있다고 판단된다.

참고 문헌

- [1] D. W. STOPS, Master's thesis, 1969
- [2] Vignesh Rajamani, Doctoral thesis, Birla Institute of Technology and Science, 2005
- [3] Y. C. Lee, et. al., Plasma Chem. Plasma Proc. 5,4,1985.
- [4] G. H. Tang, et. al., EPL, 83, 40008, 2008.
- [5] A. A. Ovsyannikov, Plasma Diagnostics, Cambridge International Science publish, England, 2000.
- [6] Vladimir I. Vshnyakov, Physical Review E 85, 026402, 2012.
- [7] M. D. Campanell, et. al., PRL 108, 255001, 2012.
- [8] M. M. Hossain, et. al., MST, 2007.
- [9] Hong-Bing Xiong et. al., Int. J. Heat and Mass Trans. 47. 5189. 2004.
- [10] E. Bourdin, et. al., Int. 3. Heat Mass Transfer 26, 567 1983.
- [11] M. Hur, et. al., J. Phys. D: Appl. Phys. 35, 1946, 2002
- [12] M. I. Boulos, et. al., Thermal Plasmas, Vol. 1, Prenum press, New York, 1994.
- [13] M. Vardelle, et. al., J. Thermal Spray Tech. 10. 267, 2001.

Abstract

Powder Temperature Effect on Heat Transfer Property for Nano Powder Synthesis Using Thermal Plasma

Lee Jin Young

Energy System Engineering

Seoul National University

Researches on an interaction between thermal plasma and immersed powder has been studied from the early 1980s. In the early 1980s, they dealt with simple heat conduction model on spherical conductor inside hot gases, but in current state, they dealt with complex physical phenomena like turbulence effect on thermal plasma - powder interaction.

For the study of thermal plasma - immersed powder energy transfer mechanism in high Knudsen number condition, in which is the effect of charged particle heating on immersed powder is the dominant case, the evaluation of charge balance on powder surface is essential. The researches on high Knudsen number condition has been intensively studied in low pressure plasma spray process, however this dissertation studied nano powder synthesis process and consider thermionic emission on the powder surface to evaluate the charge balance model and energy transfer properties on powder surface during the powder inflight time, which was not considered in previous

researches.

DC plasma torch and immersed powder simulation code was equipped to evaluate the effect of thermionic emission on the powder surface to powder surface charge balance model and energy transfer properties.

Use of the immersed powder simulation code regarding thermionic powder emissions confirmed the possibility of overestimating the thermal plasma - powder energy transfer

To confirm simulation results, modified test particle experiment condition was used on nano powder synthesis system. Comparative studies of experimental results and simulation results support the reliability of simulation code and confirm the thermionic electron emission effect on thermal plasma - powder energy transfer properties

Results of this dissertation about thermal plasma - immersed powder energy transfer during the inflight time will contribute toward to evaluation powder heat transfer in thermal plasma process and predict the dust behavior in low pressure process

Keywords : Thermal plasma, Nano powder synthesis, Powder thermal history simulation, Thermionic emission
Student Number : 2010 – 23342

감사의 글

석사 학위 논문을 마무리 지으면서 저에 대해 많이 돌아볼 수 있는 기회를 주시고, 부족했던 제게 아낌없는 열정으로 바르게 지도해주신 김곤호 교수님께 먼저 감사를 드립니다. 부족한 제 졸업 논문과 앞으로의 학위 과정에 대해 많은 조언을 주신 황용석 교수님과 먼 거리에서도 항상 반갑게 맞아주시며 연구와 관련 된 많은 조언을 해주신 박동화 교수님께 고개 숙여 감사 드립니다.

학위 논문을 작성하면서 석사 과정 동안 있었던 일에 대한 많은 아쉬움과 후회들이 있지만, 후회되었던 많은 일들이 먼 훗날 뒤돌아보았을 때 앞으로 나아가는데 필요했던 가치 있는 일이라고 느껴질 수 있게 석사 과정의 기억들을 바탕으로 앞으로는 좀 더 노력하며 살 것을 다짐해 봅니다.

이번 기회를 빌어 제가 석사 과정을 수행하는데 있어 굉장히 많은 도움을 주시고 제가 걱정도 끼쳤던 플라즈마 응용 연구실 구성원 분들께 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 언제나 쿨한 모습으로 후배들을 걱정해주시는 재명형, 항상 묵묵히 후배들을 걱정해주시고 조언해주시는 석환형, 이번에 너무 많이 폐를 끼쳐 항상 죄송한 현수형, 바쁘신 와중에도 방장의 업무와 더불어 후배들에게 많은 애정을 주시는 명선형, 힘든 일이 생겼을 때 많이 위로해주신 성렬형 (행복한 결혼 되세요), 바탕화면 정리 같은 작은 일에도 세심하게 신경을 써주신 설혜누나, 옆자리에 앉아 제가 자주 귀찮게 했지만 여러 가지로 답변해주시느라 고생하신 선택형, 고민이 생겼을 때 술도 같이 많이 마셔주고 상담해주셔서 감사한 성영형, 실험이나 졸업 논문 작성에 대해 많이 도움을 청해 귀찮았을 텐데 많이 도와줘 고마운 영길, 항상 밝게 위로 해주신 현준형, 밤 늦게 남아있을 때 위로도 해주고 고마운 남균, 들어 온지 얼마 안되었지만 열심히 살고 있는 모습이 멋진 수정, 나름 고등학교 선배라 잘 해주고 싶은데 잘 챙겨주지 못해 미안한 윤창에게 감사의 인사를 하고 싶고 썩스럽지만 사랑한다고 말하고 싶네요.

다음으로는 연구실 생활을 하며 힘들 때 옆에서 서로 위로가 되었던 친구들에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 학부 때부터 오랜 기간 이야기를 나누었던, 효성, 윤석, 세영, 범우, 영진에게 감사의 인사를 전합니다. 나름 오랫동안 보고 있는 원혁 계모임 친구들,

창현, 민호, 재영, 정원에게 앞으로도 자주 보았으면 좋겠다는 이야기를 전하고 싶습니다. 같이 등산 자주 가기로 해놓고 자주 못 가고 있는 민섭, 진형에게도 언젠가 다시 떠날 수 있기를 바라며, 다른 연구실이지만 종종 보며 이야기 나누었던 창현, 희정에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

또한 연구를 진행함에 있어 많은 도움을 주셨던 플라즈마 그룹 연구실 분들과 연구를 진행함에 있어 행정적인 일 처리에 많은 도움을 주신 학과 사무실 분들과 핵융합 센터 분들, 항상 급하게 뛰어가도 흔쾌히 일을 처리해 주셨던 창우진공 사장님께도 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

마지막으로 힘들 때 찾아가면 항상 위안이 되는 우리 가족에게 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 요즘 자주 찾아 뵙지 못하고 심려를 끼쳐드려 죄송하지만 점점 나아지는 모습을 보여드리고자 합니다. 석사 학위 과정을 겪으면서 저에 대해 돌아볼 시간도 많았고 굉장히 많은 분들이 도움을 주셔서 참 행복했습니다. 앞으로도 여러분들과 함께 했으면 좋겠네요. 다들 좋은 하루 되세요

서기 2012년 8월

이진영