

산화 알루미늄 입자 첨가에 따른 동축류 예혼합 연소기의 연소 특성 기초연구

박승일* · 김고태* · 김남일**

Basic Study on Combustion Characteristics of Coaxial Premixed Burner with the Addition of Al_2O_3 Particles

Seung Il Park, Go Tae Kim and Nam Il Kim

ABSTRACT

Thermal spray technology has been used in many industrial application. Especially, thermal spray coating have been employed with the purposes of achieving better resistances in abrasion, heat and corrosion. In the previous studies on the thermal spray coating, thermal spray characteristics from the perspective of combustion engineering have not been investigated sufficiently, while the material characteristics of the coated substrates have been investigated widely. In this study, the effect of spray particles on the flame behavior was experimentally investigated. The amount of the injected particles was measured using the light scattering method and the temperature of the particles was estimated using a two-color method. Various flame-spray interactions were observed and it was found that the high temperature zone near the flame is elongated by particles density. Based on these results, the applicability of the light scattering method and the two-color method was discussed.

Key Words : Thermal spray coating, Flame stability, Luminous intensity, Coaxial diffusion flame, Modeling

기 호 설 명

Alphabets

Q_{in} : flow rate through the inner tube

V_m : averaged flow velocity

Le : Lewis number

d : inner tube diameter

Φ : equivalence ratio

h : height from the nozzle

1. 서론

용사(spray coating) 기술은 열원을 이용하여 입자를 용융시켜 모재 표면에 코팅층을 형성시키는 기술을 일컫는다. 이러한 용사 기술은 1917년 스위스의 공학자 Schoop[1]에 의해 개발된 열용사(thermal spray) 이후 현재까지 여러 산업현장에서 각각의 목적에 부합되는 다양한 형태로 발전되어 사용되고 있다. 최근 기계 기술의 발달에 따라 극한의 조건에서 작동하는 기계부품의 내마모성, 내열성, 내부식성 등을 향상시키기 위해 보다 진보된 기술이 개발 적용되고 있다[2]. 현재까지 개발된 대표적인 용사기술들은 아크(Electric arc), 플라즈마(Plasma)를 이용하

는 기술과 산소부화 조건에서 데토네이션을 이용하는 고속용사(High-velocity oxyfuel flame, HVOF) 등이 있다. 이처럼 용사기술을 이용한 기계부품의 성능향상에 대한 다양한 응용에도 불구하고 용사기술에 대한 공학적인 이해는 부족한 상태이다[3-5]. 기존 연구들의 주제는 주로 모재의 코팅 수준에 그 목적이 집중되어 있다. 반면, 용사기술의 핵심메커니즘인 입자의 종류, 크기, 분사량, 속도 등에 따른 화염의 안정화 및 화염의 거동에 관한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현재까지 개발되어 온 다양한 용사기술의 기초가 되는 화염용사 기법에 대한 기초 특성을 다루기로 한다. 그 중에서도 화염용사 기술의 초기 조건을 결정하는 용사 노즐에서의 현상 이해를 위해 보다 간단하고 해석이 용이하도록 입자 투입이 가능한 동축관 예혼합 연소기를 구현

* 중앙대학교 기계공학부

† 연락처, nikim@cau.ac.kr

하였다. 이를 이용하여 산화 알루미늄 입자 투입 시 화염의 안정화 특성 변화와 입자의 정보를 정량적으로 도출하는 실험적 기법에 대한 검토를 수행하고자 한다. 이러한 연구 결과는 실제 화염용사 시스템에서의 화염 및 입자거동 이해를 위한 기초모델이 될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략적인 구성을 Fig. 1에 제시하였다. 실험에 사용된 연소기는 동축류 구조를 가지도록 제작되었고 예혼합 화염을 형성시키고 내부관을 통해 입자를 투입하는 형태이다. 실제 현장에서 사용되는 화염 용사건 중 하나인 SULZER Metco사의 5P-II 제품을 예로 들면 중심노즐을 통해 입자가 투입될 수 있도록 제작되어 있으며, 그 주위에 예혼합 화염을 형성하기 위한 다수의 분사노즐이 환형으로 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 연소기는 일반적인 화염용사 건을 단순화한 형태에 해당한다고 볼 수 있다. 이러한 연소기 형상에서는 외부관에 의한 예혼합 화염이 형성되어있는 가운데 입자를 포함한 내부관의 예혼합기가 흘러나와 화염면을 지나 가게 된다.

사용된 입자는 산화알루미늄(Al_2O_3)이며, 입자 직경에 따른 영향을 파악하기 위하여 각각 외관의 내부단면적으로 나눈 평균 유속을 V_m 으로 나타내었다. 실험에 사용된 연료는 메탄(99.998%)이며, 공기는 압축기를 이용하여 수분제거필터(90% 이상의 수분제거)를 거친 공기를 사용하였다. 동축관의 내부관은 스테인레스 재질로 굽은관(내경 2.9 mm, 외경 4.0 mm)과 가는관(내경 0.4 mm, 외경 0.7 mm) 두 가지 관을 사용하였다. 외부관은 내부에서의 입자의 분포와 화염의 거동 관찰을 위하여 석영관을 사용했으며 그 크기는 내경 9 mm, 외경 13 mm이다.

내부관과 외부관에 흐르는 전체 예혼합기의 유량은 질량유량계(Mass flow meter, MFC)를 이용하여 제어하였으며, 전체유량을 외관의 내부단면적으로 나눈 평균 유속(V_m)으로 나타내었다. 내부관과 외부관의 예혼합기 유량의 비율은 볼류량계(ball flow meter)를 이용하여 조절하였으며 내부 유량 Q_m 으로 나타내었다. 또한, 내부관으로 투입되는 예혼합기의 경로는 두 가지로 나뉘어져 있다. 내부관에 직접 연결되는 경로와 입자투입기(feeder)를 거쳐 산화알루미늄 입자를 내부관에 투입할 수 있게 설계하였다. 입자투입기는 역방향의 원뿔대의 공간 내부에 담겨져 있던 알루미늄 입자들이 그 내부에 형성된 선회류(swirl)에 의해 내부관으로 투입될 수 있게 제작되었다.

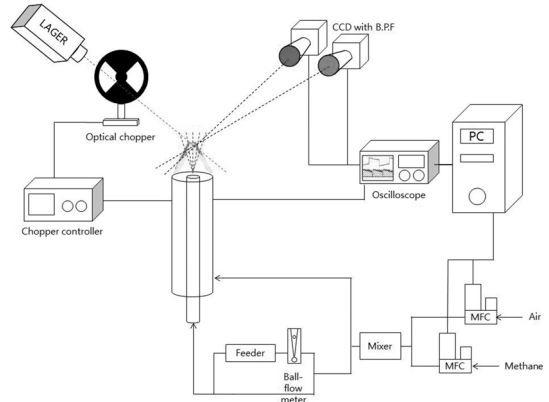


Fig. 1. Experimental setup.

입자량 측정을 위하여 본 연구에서는 광산란법(Light Scattering Method)를 사용하였다. 광산란법은 광계측법의 일종으로 레이저로부터 입자에 의해 레이저광이 산란되고 그 산란광 신호를 CCD로 받아들여 입자의 양을 측정하는 방법이다[6]. 사용된 레이저는 532 nm DPSS Green Laser, 1,000 mW, Beam diameter 3.0 mm의 사양이다. 이 때 광차단장치(optical chopper)를 이용하여 매 순간 산란신호와 배경신호를 보정함으로써 입자의 분사량 변화로 야기되는 산란신호의 오차를 최소화 시켰다. 광차단장치는 2-blade를 설치하였고, CCD의 촬영속도인 30 frame/sec와 일치시키기 위해 30 Hz로 동기시켰으며 오실로스코프를 이용하여 동기화를 확인하였다. CCD로부터 받아들인 레이저 산란강도를 Matlab을 이용하여 계산하였다. 산란강도 도출을 위해서는 정량 투입된 입자의 분출 초기로부터 입자의 최종 분출까지의 모든 이미지의 강도를 적분한 결과를 사용하였으므로 매 순간 입자 분출량의 변화에 둔감하여, 투입된 입자량과 직접 비교가 가능하였다.

입자의 온도를 측정하기 위하여 알루미늄 입자를 대상으로 하여 입자의 파장별 복사강도로부터 입자의 온도를 측정하는 이색법(two-color method)을 응용하였다[7,8]. 알루미늄 입자가 고온의 화염으로부터 열전달을 받아 복사광을 방출하고 이를 두 가지 색으로 받아들이기 위해 R(750±10 nm)과 G(55010 nm)의 band-pass 필터를 사용하였다. 입자의 분사에 의한 비정상적인 효과를 최소화시키기 위하여 두 대의 CCD를 설치하였다. 두 개의 카메라에서 획득된 신호의 비교를 위해 입자가 없는 동일한 화염에 대한 영상 신호 강도를 비교하고 이를 보정하는 과정을 거쳤다. 이후 서로 다른 필터를 통과한 영상 신호를 Matlab을 이용하여 입자의 온도를 예측하였다. 또한, 열전대(K-type, 0.5 mm)를 통하여 입자주위의 가스온도를 직접 측정하여 이색법으로 측정된 입자온도의 값과 비교하였다[9].

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 당량비 변화에 따른 화염의 안정화

입자투입에 따른 화염 특성을 고찰하기에 앞서 연소기 자체의 화염 안정화 특성을 살펴보기 위해 당량비와 평균속도의 변화에 따른 가연한계를 실험하였고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 연소기의 화염 안정화 영역은 당량비와 평균유속에 따라 크게 4가지 영역으로 구분지을 수 있다.

첫 번째 영역인 화염날림(Blow out) 영역은 연소기 내부에 투입되는 예혼합기의 낮은 당량비로 인하여 화염이 존재하지 못하는 영역을 나타낸다. 화염날림의 경계는 예혼합기의 평균유속이 증가됨에 따라 당량비가 더 높아져야만 화염이 존재할 수 있음을 보인다. 이는 평균유속과 화염의 전파속도에 의한 상관관계에 따른 것으로 판단된다. 평균속도에 따라 약간의 차이를 보이지만 본 연구에서는 당량비 0.8을 희박한계(lean limit)로 간주하였다. 역화(flash back) 영역은 내부관 유량이 없을 때 화염의 전파속도보다 낮은 예혼합기의 평균 유속으로 인하여 화염이 역화되면서 꺼지는 조건을 의미한다. 따라서 역화 경계조건 상부에 해당하는 조건에서 화염이 안정화됨을 알 수 있다. 또한 당량비에 따라서 역화 경계의 평균유속 값이 증가되다가 당량비 1.1을 기준으로 하여 감소함을 확인할 수 있다. 이는 당량비가 증가됨에 따라 예혼합비 근처에서 화염의 전파속도가 빨라지게 되고, 이에 따라 역화 방지를 위한 평균유속도 증가되어야 함을 의미한다. 세 번째는 평균유속이 충분히 높아서 화염이 안정적으로

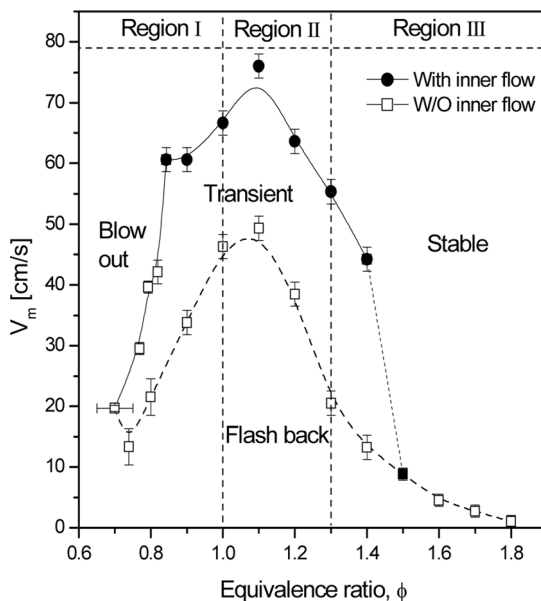


Fig. 2. Flame stabilization diagram($d=2.9$ mm, $\Phi=1.24$).

존재하지만 내부관을 통한 유량 투입으로 인하여 화염이 꺼지게 되는 Transient 영역이다. 동일한 평균 유속 조건에서 내부관 유량투입(평균유속의 9%)으로 인하여 주위류 평균유속이 상대적으로 감소하게 되는데, 이와 연계하여 화염이 역화되어 꺼지게 된다. 마지막으로 안정(stable) 영역은 내부관의 유량 증가가 발생해도 화염이 안정적으로 존재 가능한 조건을 의미한다.

본 연구에서는 내부관 유량 변화에 무관하게 화염이 안정적으로 존재하는 안정화 영역에서 실험을 수행하였다. 이 때 안정화 구간에서 당량비 변화에 따라 화염의 형상 구조가 확연히 변화하는 것을 관찰하였다. 이를 바탕으로 화염 안정화 조건을 다시 3가지 영역으로 추가 구분하였으며, 각각을 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 영역(region) I, II, III로 구분하였다.

각 영역에서의 대표적인 화염의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 그 중에서 Fig. 3(a)는 일반적인 분젠화염과는 다른 형태를 나타내고 있다. 이 조건은 당량비가 0.9인 연료 희박 조건이고 그에 따라 $Le < 1$ 인 경우이다. 이러한 조건에서는 화염의 세포(cell) 구조가 쉽게 발생하며 유동 교란에 의하여 화염의 곡률변화가 용이한 것으로 알려져 있다. 따라서 내부관으로 인한 국부적인 유속감소가 화염의 형상에 직접적인 영향을 미치게 되고 화염의 일부가 관에 부착된 것으로 생각된다. 이에 반해 Fig. 3(b)와 (c)는 당량비가 각각 1.24, 1.6인 조건이며 화염이 내부관에 부착되지 않아 보다 분젠화염에 가까운 형태이다. 그러나 내부관에 의해 중심부와 외부관의 속도 차가 여전히 존재하므로 국부적인 화염 굴곡이 형

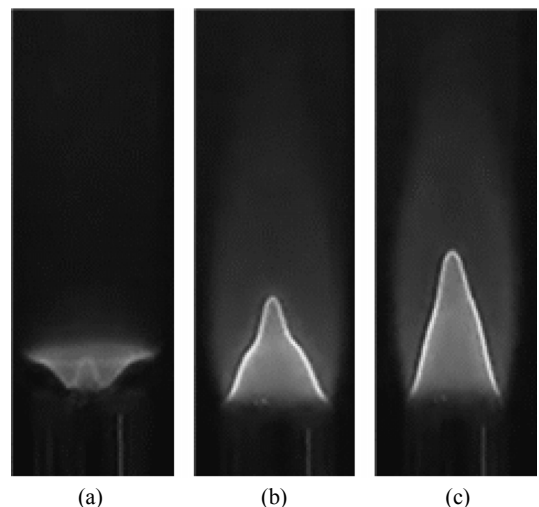


Fig. 3. Representative flame shapes in the region I, II and III. $Q_m=300$ cm³/min, $V_m=89$ cm/s (a) region I $\Phi=0.9$, (b) region II $\Phi=1.24$, (c) region III $\Phi=1.6$.

성되었음을 확인할 수 있다. 당량비를 계속 증가시킬 경우 화염은 부분예혼합화염 혹은 확산화염에 가깝게 된다. 메탄의 이론적인 과농 가연한계 당량비인 1.6 조건에서 수행한 실험인 Fig. 3(c)는 화염이 분제화염에서 부분예혼합화염으로 천이되는 조건이다. 본 실험에서는 당량비 1.8을 실험의 최대 과농당량비로 설정하였다.

3.2. 동축류 내부관의 직경 변화

내부관 유량이 동일할 때 유속에 따른 화염의 거동 특성을 보기 위해서 내부관의 직경을 변화시키고 그 차이를 살펴보았다. 대표적인 화염의 형상을 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4에서의 조건은 메탄 연료 유량이 392 cm³/min, 공기유량이 3,000 cm³/min이며, 당량비는 1.24이다. 내부관에 투입되는 유량은 전체 유량 중 9%에 해당하는 300 cm³/min이다. Fig. 4(a)와 (b)는 내부관의 직경이 0.4 mm의 작은 조건으로, 노즐 출구에서의 화염이 내부관의 영향이 적어서 일반적인 분제화염의 형태를 보인다. 입자가 분사됨에 따라 화염의 길이가 신장되고 끝단에서 강한 휘염이 발생함을 볼 수 있다. 이는 내부관에 투입된 유량에 의해 분사된 입자가 화염으로부터 열전달을 받아 고온이 되어 가시광선을 방사하여 나타난 결과라고 생각된다.

반면, 내부관 직경이 2.9 mm으로 상대적으로 큰 조건인 Fig. 4(c)와 (d)에서는 내부관 직경증가로 인하여 관의 유속이 낮아지게 되고 이에 따라 화염의 길이가 신장이 감소함을 확인할 수 있다. 이와 같은 조건에서는 내부관 유속이 감소함에 따라 화염면에 입자가 낮은 속도로 통과하게 되고 입자의 거동 관찰이 더욱 용이해진다. 또한, 내부관 유량투입 및 입자의 투입에 따른 화염의 형상변화도 적다. 따라

서 본 실험에서는 내부관의 직경이 큰 조건을 기준으로 실험을 수행하였다.

3.3. 입자 투입 유량에 따른 화염구조의 변화

앞에서 언급한 바와 같이 당량비 1.24, 내부관 직경 2.9 mm의 내부관 조건에서 내부관에 투입되는 유량의 변화에 따른 변화를 살펴보기 위해 내부관 유량이 각각 100, 300, 500 cm³/min인 조건에서 실험을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 내부관의 투입유량이 증가됨에 따라 입자의 투입량도 증가하게 된다. 입자의 투입유량이 증가됨에 따라 고온이 된 입자에 의한 가시광선 방출로 인하여 이미지의 강도가 증가하게 된다. 또한, 입자의 분사량이 증가함에 따라 화염의 길이(노즐 입구에서 내부 청염의 끝단)가 신장되었다.

그러나 앞의 실험은 내부관 유량증가로 인한 화염의 길이신장 효과와 입자의 투입에 의한 화염의 길이신장 효과가 중첩되어 있다. 내부관 유량증가에 따라 화염의 길이 신장은 일반적인 결과이므로 입자투입에 의한 화염의 길이신장 효과를 구분해서 살펴보고자 한다. 이를 위해 내부관 투입유량은 유지하고 내부관에 입자의 추가 유무에 따른 화염의 길이신장에 대한 실험을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 6에 도시화하였다. 그 결과 화염의 길이 신장은 평균유속에 무관하게 입자에 의하여 2 mm 정도임을 확인할 수 있다. 이는 입자 투입에 의하여 입자의 체적에 해당하는 만큼의 평균 유속의 증가 효과가 발생한 결과일 수 있으며, 또한 입자의 열 수송 효과로 인해 화염의 고온영역이 확장된 결과일 수도 있다고 판단된다.

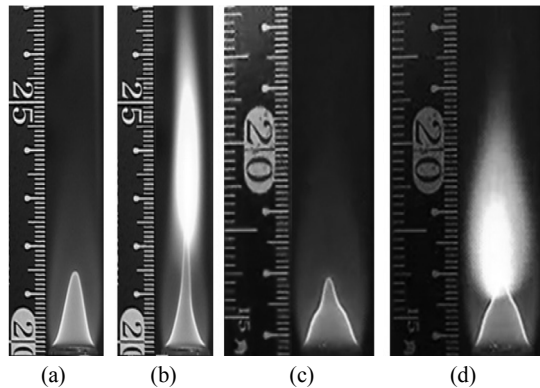


Fig. 4. Photos with and without particles for the variation of the inner tube size($\Phi=1.24$, $V_m=89$ cm/s, $Q_{in}=300$ cm³/min) (a, b) $d=0.4$ mm, (c, d) $d=2.9$ mm.

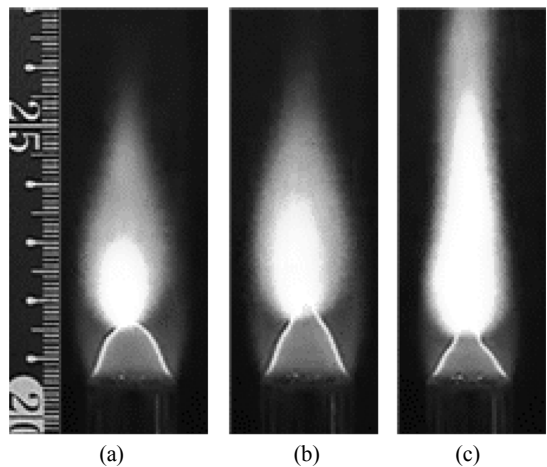


Fig. 5. Direct photos with the particle injection rate($\Phi=1.24$, $V_m=89$ cm/s, (a) $Q_{in}=100$, (b) $Q_{in}=300$, (c) $Q_{in}=500$ cm³/min).

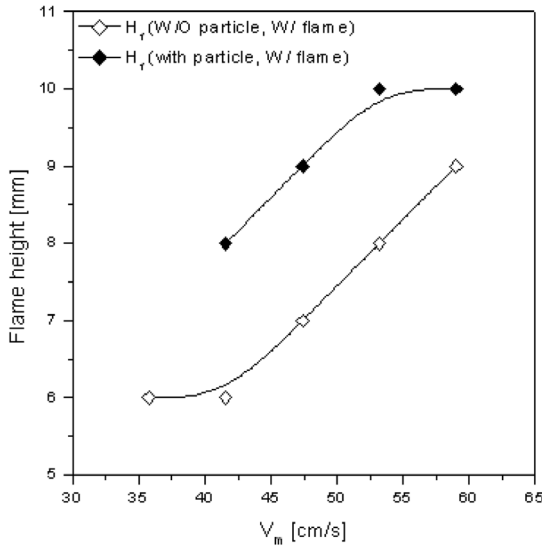
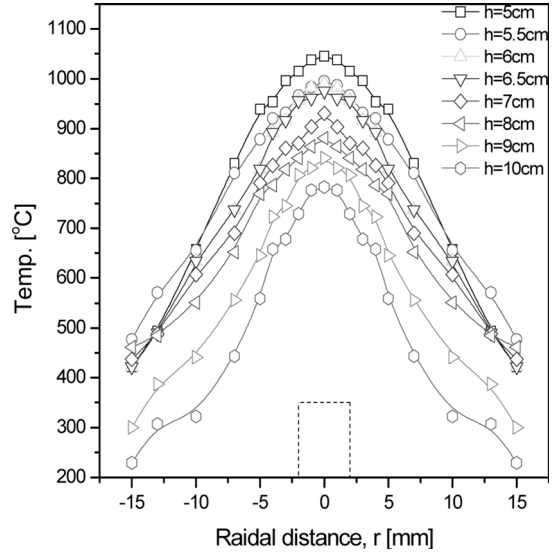


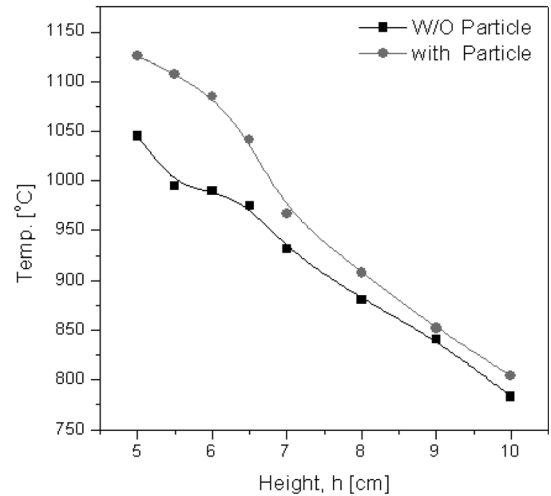
Fig. 6. Flame length depending on particle flow rate ($\Phi=1.24$, $V_m=89$ cm/s, $Q_m=300$ cm³/min, $d=1\mu$ m).

입자의 열적 기여를 확인하기 위해 입자의 분사 유무에 따른 화염주위의 온도 변화를 열전대를 이용하여 측정한 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 실험은 입자 투입에 따른 화염 안정성이 확보되는 평균유속 $V_m=89$ cm/s, 내부관 투입 유량 300 cm³/min인 조건에서 수행하였다. Fig. 7(a)는 입자의 투입이 없는 조건에서 화염 후류의 온도 분포이다. 측정범위는 높이방향을 기준으로 하여 노즐의 출구로부터 5 cm 이상의 지점에서 10 cm 지점까지이며, 반경방향 온도 측정을 통해 최고온도 지점을 중심으로 대칭적으로 도시화한 결과이다. 전체적인 경향은 노즐의 출구로부터 멀어질수록 온도가 감소하는 것을 확인되고, 반경방향으로 멀어질수록 주위부분에서 온도가 감소되는 일반적인 경향을 보인다.

입자의 투입 유무에 따른 온도분포의 차이를 비교하기 위해 중심축의 최고온도 변화를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 전체적인 온도 감소 경향은 유사하지만 노즐에서부터 높이가 7 cm보다 노즐에 가까운 부분에서는 입자가 존재하는 조건에서 100°C 정도의 온도 상승이 관찰된 반면 노즐에서부터 7 cm보다 높은 위치에서는 높이가 증가됨에 따라 온도차이가 25°C 정도로 감소하는 경향을 보인다. 이처럼 입자가 투입된 조건에서 화염에 가까운 고온 영역에서의 확인한 온도 증가는 화염을 통과하는 입자가 적열된 상태로 화염 하류에 방출되면서 입자의 열용량에 의해 축 방향 온도 감소가 지연된 결과일 수 있으며, 부수적으로 적열상태가 된 입자들이 열전대로 복사열을 추가적으로 전달한 효과가 내재되어 있다고 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 7. Temperature variation depending on particle injection ($\Phi=1.24$, $V_m=89$ cm/s, $Q_m=300$ cm³/min, $d=1\mu$ m), (a) spatial temperature distribution ($h=5\sim 10$ cm), (b) temperature variation in axial direction (W/O particle, With particle).

3.4. 입자량 측정을 위한 광산란법

분사되는 입자의 양을 측정하기 위해 광산란법을 사용하였고 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 입자량의 정량적 비교를 위하여 10, 30, 50 mg의 세 가지 입자량에 대하여 입자의 방출이 이루어지는 기간 동안 전체 광산란 신호의 적분값을 측정하였다. 또한, 화염으로부터의 거리에 따라서 변하는 산란강도를 측정하기 위해 연소기로부터 각각 1, 2, 4 cm 떨어진 높이에서 실험을 수행하였다. 측정된 산란강도는 화염이 없는 조건에서 1 μ m 입자를 10 mg 분

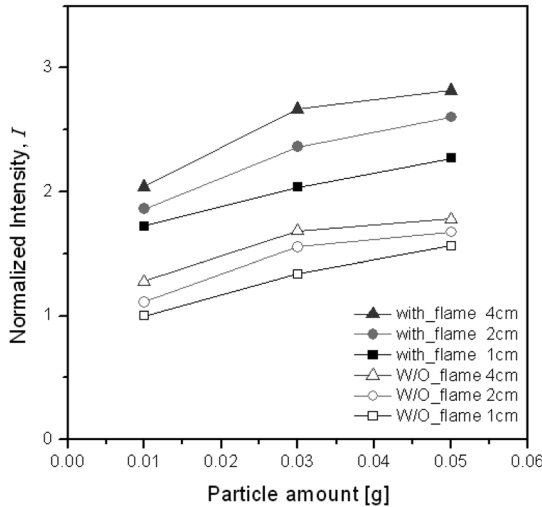


Fig. 8. Variation of the normalized scattered intensity depending on the existence of flames and particle injection rates ($\Phi=1.24$, $V_m=89$ cm/s, $Q_m=300$ cm³/min).

사하였을 때의 연소기로부터의 거리가 1 cm인 위치에서의 레이저 산란강도를 기준으로 상대적인 크기를 나타내었다. 산란강도는 입자의 분사량이 증가됨에 따라서 증가되는 경향을 보였지만 증가비는 투입 입자의 양에 완전히 비례하지는 않았다. 한편, 측정높이의 증가에 따라 산란강도의 값이 증가하는 반면 높이 증가에 따라 입자량에 따른 산란강도의 증가 추세는 서서히 완화되는 것을 알 수 있다.

일반적으로 레이저 투사 공간은 측정높이가 증가에 따라 유동 공간 내에 차지하는 영역이 감소한다. 그에 따라 산란강도가 감소되리라 예상되지만 실험 결과에서는 이와는 반대 경향을 보인다. 이에 대해 입자의 과도한 공간 밀도와 레이저 투사 공간 내에서의 입자의 체류 시간의 효과를 고려할 수 있다. 입자의 공간 밀도가 낮을 때는 산란 신호가 입자의 밀도에 비례하지만 공간 밀도가 높아지면서 산란광의 일부가 주위의 입자에 의해 재산란 되는 효과로 인해 노즐 근처에서 취득된 산란강도가 오히려 감소하는 결과가 도출될 수 있다. 측정높이 증가에 따라서 유속이 감소하고, 레이저투사 공간 내에서의 입자의 체류시간이 증가되고 산란강도 값의 증가를 유발할 수 있다. 이러한 효과는 실제 용사 시스템에서도 발생할 수 있어서 실제 시스템의 입자 분포의 광학적 측정을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

다음으로 동일한 높이에서 화염이 존재할 때 산란강도가 그렇지 않을 때보다 50~100% 정도 높은 것을 알 수 있다. 이는 화염으로부터 열을 받은 고온 입자들이 추가적으로 방사하는 빛의 강도 증가가 원

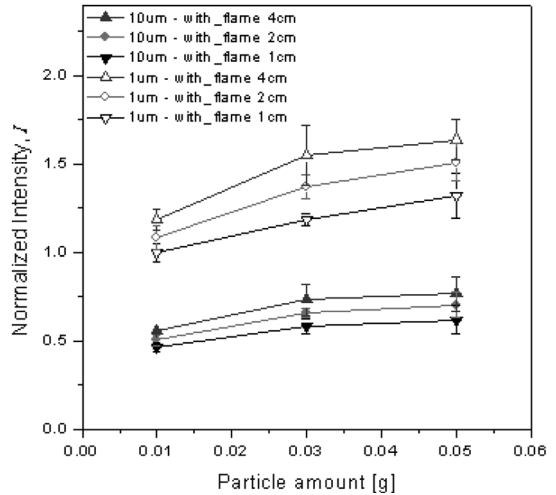


Fig. 9. Variation of the normalized scattered intensity depending on particle size and particle injection rates ($\Phi=1.24$, $V_m=89$ cm/s, $Q_m=300$ cm³/min).

인으로 생각된다.

입자 밀도의 효과를 비교하기 위해 직경이 다른 입자를 이용하여 실험한 결과가 Fig. 9이다. 직경 1 μ m 입자와 10 μ m 입자를 투입하였을 때 레이저 산란강도를 동일한 질량유량을 기준으로 비교하였다. 비교의 편의를 위해 화염이 있는 조건에서 1 μ m 입자 10 mg 투입 조건을 기준으로 하여 상대적인 산란강도를 표시하였다. 일반적으로 동일한 입자 질량유량이 투입될 때 입자의 직경 증가는 입자의 밀도 감소를 일으킨다. 동일 질량에서 입자크기가 10배 증가하면 수밀도는 0.001로 감소하고 개별 입자의 단면적은 100배 증가한다. 따라서 충분히 낮은 공간밀도 조건에서 입자의 산란강도는 약 1/10 정도로 감소할 것으로 예상되는데, 실험 결과는 약 1/2 정도의 감소만을 보여주고 있다. 이는 입자 크기 증가로 인한 밀도 감소 효과가 산란 신호의 재산란 효과를 일부 완화한 결과로 판단된다. 그 외에도 입자의 직경이 증가됨에 따라 체류효과에도 변화를 주어 산란강도에 영향을 주었을 것으로 예상되며, 레이저의 파장과 입자의 크기간의 관계 역시 일부 영향을 주었을 것으로 판단된다. 실제 용사 시스템에 적용하기 위해서는 이러한 다양한 효과들에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

3.5. 이색법을 이용한 입자의 온도측정

입자의 온도를 측정하기 위해 이색법을 사용하였고 그 결과를 앞서 보인 열전대로 측정된 결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 입자의 직경이 1 마이크로미터인 조건일 때의 결과를 열전대로 측정된 결과와 비교해보았다. 측정높이가 연소기의 출구로부

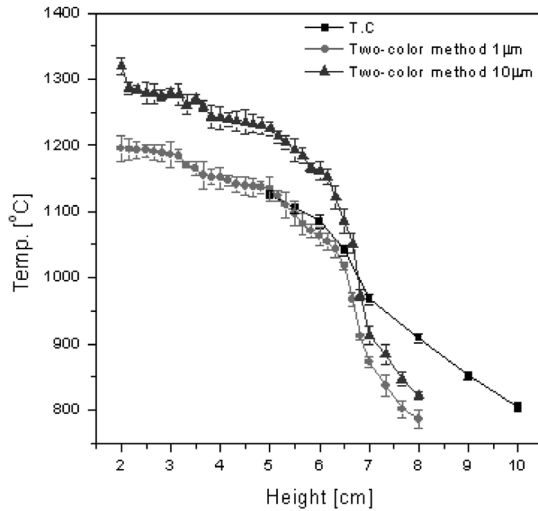


Fig. 10. Comparison of temperature measurement($\Phi=1.24$, $V_m=89$ cm/s, $Q_m=300$ cm³/min, $d=1$ μ m, 10 μ m).

터 떨어진 거리가 6 cm를 기준으로 차이를 보인다. 측정높이가 6 cm 이하의 조건에서는 열전대와의 결과가 유사한 경향을 보인다. 반면, 측정높이가 6 cm 이상에서는 열전대와의 결과에 비해 이색법의 온도가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 입자가 화염영역을 지나 열을 손실하게 되고 그로 인해 복사광이 감소하여 복사강도가 감소한 결과로 생각된다. 따라서 이색법을 이용하여 입자의 온도를 측정하는 것은 측정범위에 따라 측정값의 신뢰도에 차이를 보일 것으로 예상된다. 직경이 10 μ m인 입자에 대한 이색법 온도 측정 결과 역시 비슷한 경향을 보이고 있는데, 측정된 온도는 1 μ m 조건에 비해 약 100°C 정도 높은 것을 알 수 있다. 입자의 직경이 증가되면 열용량이 커지고 그 결과 온도 감소가 느리게 진행된 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 용사시스템의 화염거동과 안정화 및 입자의 분사량과 온도측정을 위한 기초연구를 수행하였다. 이는 용사기술에서 입자의 분사인자 외에도 용사코팅 수준을 결정짓는 인자이다. 화염거동 및 안정화에 대하여 연구함으로써 보다 폭넓은 용사시스템의 운전조건에 기여될 것이며, 입자의 온도 및 분사량은 모재의 코팅수준에 직접적인 영향을 끼친다. 이를 위하여 입자의 분사가 가능한 층류 동축류 예혼합 연소기를 설계하였다. 시험 연소기의 노즐 직경의 변화 및 입자 투입 유량의 변화에 따른 화염의 거동 특성 및 안정화 영역을 살펴보았으며 노즐의 직경 및 유량에 따른 화염의 거동이 안정적

인 조건에서 실험을 수행하였다.

입자 투입에 따라 화염의 높이가 2 mm 정도 신장되었음을 확인할 수 있었다. 입자에 의해 화염의 길이가 신장된 이유는 입자 투입에 의한 유량의 상대적 증가와 입자의 열전달 효과로 인해 고온영역이 확장되었기 때문이라 판단된다.

입자량 측정을 위해 광산란법을 적용하였고 그 결과 입자의 분사량과 산란강도의 상관관계를 확인하였다. 높이방향에 따라 산란강도 값의 증가를 살펴보았으며 이를 입자의 중첩효과와 체류시간 관점에서 논의하였다. 또한, 입자의 직경변화를 주어 중첩효과에 영향을 더욱 확인하였다. 입자의 직경증가로 인하여 중첩효과가 지배적이됨에 따라 산란강도의 감소가 이루어짐을 확인할 수 있었다. 후에 보다 더 입자의 직경을 다양한 조건에서 실험하여 중첩효과와 산란강도의 상호관계에 대하여 연구를 수행할 예정이다.

대표적인 조건에 대하여 화염하류의 반경방향의 온도분포와 입자의 유무에 따라 높이방향의 온도분포를 비교하였다. 높이방향의 온도분포는 입자의 영향으로 인해 더 높게 측정된 것을 확인하였다. 또한, 입자의 온도측정을 이색법을 이용하여 측정하고 비교하였다. 입자의 직경이 증가하면 화염 후류의 입자의 온도가 높아지는 것을 확인하였다. 더 다양한 입자의 직경 및 종류의 추가연구를 통하여 열용량과 이색법을 이용한 온도측정값의 상관관계에 대하여 연구가 필요할 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 교육과학기술부 기초연구과제인 “화염 스프레이를 이용한 나노입자코팅기술의 핵심 메커니즘 연구”의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] L. Pawlowski, “The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings,” 2nd Edition, WILEY, 2008, pp. 69-70
- [2] P. Fauchais, A. Vardelle, B. Dussoubs, “Quo Vadis Thermal Spraying?,” Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 44-66
- [3] K.A. Khor, P. Cheangd, “Characterization of Thermally Sprayed Hydroxyapatite Powders and Coatings,” Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 45-50
- [4] C.W. Lee, I.H. Oh, H.K. Lee, B.T. Lee, “플라즈마 용사법에 의한 Hydroxyapatite 코팅층의 제

- 조와 미세구조,” *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol. 41, No. 3, pp. 259-265
- [5] G.B. Kwon, D.H. Cho, Y.K. Chang, Y.N. Paik, “HVOF를 이용한 Fe-Cr-Ni-Mo-Si-B계 고성능 합금 용사층의 특성에 미치는 용사조건의 영향,” *한국표면공학회지*, Vol. 35, No. 1, pp. 5-10
- [6] J.W. Chung, W. Lee, Y. T. Han, B.S. Kim, C. B. Lee, D.J. Kim, K.H. Lee, “LII/LIS 기법을 이용한 층류확산화염 매연입자의 정량화,” *한국연소학회지*, pp. 1-8
- [7] Y.T Han, J.Y. Lee, J.W. Lim, K. Min, “광계측 기법을 이용한 층류 및 난류 확산 화염에서의 매연 측정에 관한 연구,” *Transactions of KSAE*, Vol 17, No. 6, 2009, pp. 8-17
- [8] Fan Jiang, Shi Liu, Shiqiang Liang, Zhihong Li, Xueyao Wang, Gang Lu, “Visual Flame Monitoring System Based on Two-Color Method,” *Journal of Thermal Science*, Vol. 18, No. 3, 2009, pp. 284-288
- [9] Y.W. Nam, W. Lee, “Modulated LII 신호와 이색법을 이용한 매연입자 온도 계측,” *KOSCO SYMPOSIUM*, Vol. 33, pp. 110-116.

접수일 : 2011. 01. 23
심사완료일 : 2011. 02. 18