

<論 文>

열 확산에 의한 미소입자의 부착현상에 관한
실험적 연구

김 상 수* · 장 혁 상**

(1985년 3월 13일 접수)

An Experimental Study of Thermal Diffusion Effects on the
Deposition of Small Particles

Sang Soo Kim and Hyuk Sang Chang

Key Words: Deposition(부착), Small Particle(작은입자), Thermal Diffusion(열확산),
Thermophoresis(열영동), Combustion(연소)

Abstract

Analysis of the deposition rate on the cooled and uncooled pt-target indicates that temperature difference between the cooled wall and the hot working gas significantly increases the deposited fraction of the solid material. Data have been obtained on the initial deposition rate of MgO particles ($d < 1.0 \mu m$) as a function of target temperature(ca. 980K~1480K) and mainstream gas temperature (ca. 1340 K~1420K) by using real time specular reflectance method. These data are used to:

- (1) Show the dominant role of thermophoresis(particles drift down under the influence of a thermal gradient in the continuum surrounding them) in the mechanism of deposition of submicron particles.
- (2) Compare with recently developed theoretical methods.
- (3) Show temperature ratio $T(\text{wall})$ to $T(\text{gas})$ can play as decisive role in determining mass transfer rates as the mainstream submicron dust loading itself, and
- (4) Assess the utility of specular reflectance method.

기 호 설 명

C_p : 정압비열
 D_i : Fick's 확산계수
 I_s : 초기 반사광 강도
 ΔI : 반사광의 감소율
 j_i : i종의 질량확산 유속벡터(diffusional mass flux vector)
 K : Thermophoretic 속도 상수

R : 백금판의 전기저항
 R_p : 입자반경
 T : 온 도
 Δt : 시간간격
 U_∞ : 자유 유선 속도
 u : 유 속
 V_T : Thermophoretic 속도
 x : 화염 축으로 부터의 반경거리
 y : 표적의 수직좌표
 z : 화염면의 수직좌표

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

**정회원, 주식회사 유공 기술개발실

- Le : Lewis 수($D/[\lambda/\rho C_p]$)
 Lc : Schmidt 수(V/D)
 St_h : 열전달 local Stanton 수($h/\rho C_p$)
 St_m : 물질전달 local Stanton 수($j/\rho C_p \omega$)

회합문자

- α_i : 열확산 계수
 ω : Mass fraction
 μ : 점성계수
 ν : 동점성 계수
 ρ : 유체밀도
 ρ_f : 입자밀도

첨 자

- g : 가스
 w : 벽면
 i : i-종(species)
 r : Reference 값
 th : Thermophoresis

1. 서 론

최근 유류가격의 상승으로 인하여 점차 저순도의 원유 및 석탄과 석탄관련 연료를 많이 사용하게 되었다. 이러한 저순도의 연료를 연소현상을 수반하는 열기관에 사용할 경우 재, 알칼리 금속염, 매연 등 원하지 않는 부산물들이 많이 생성하게 되었고 이러한 불순물들이 열기관 또는 닥트 표면에 부착 됨으로써 열역학적 효율을 저하시키고 부식(hot corrosion) 및 침식현상(erosion)등을 일으킨다.

온도구배가 존재할 때 정지된 미소입자들을 이 구배의 반대방향으로 입자를 둘러싸고 있는 유체에 대해 상대적인 속도를 갖게 되는데 이와 같은 현상을 thermophoresis라 한다. 이와 같은 현상은 저순도 연료를 사용하는 열기관의 경우 온도구배가 큰 부분에서 발생하는 미소입자의 부착에 지배적인 영향을 주고있는 것으로 알려지고 있다^(1-3,6). 특히 가스 터빈의 경우 이러한 연료의 사용으로 인한 효율의 저하를 극복하고 기관의 효율을 높이기 위해 점차로 터빈으로 들어가는 동작유체의 온도를 될 수 있는 한 높이고 있는데 이러한 시도는 재질의 내열성의 한계등으로 인해 냉각을 해야만 하는 blade와 동작유체 사이의 온도구배를 크게 만들게 됨으로써 thermophoresis의 영향으로 인한 입자의 부착이 더욱 증가되는 조건을 만들어 주고 있고 이로 인한 부착율의 증가는 침식 및 부식현상을 증가시키는 요인이 되고 있다. 이렇게 발생하는 문제들

을 해결하기 위해서는 온도구배에 따른 입자의 유동에 관한 연구가 필요하게 되었고 실제로 온도구배가 크게 존재하는 가스 터빈 blade 및 보일러의 수관에서 온도구배에 따른 입자의 부착율의 변화를 설명하기 위하여 thermophoresis에 의한 입자의 유동을 이론적으로 수식화하려는 시도가 Rosner⁽¹⁻⁵⁾, Vermes⁽⁶⁾, Goren⁽⁷⁾ 등에 의해 행해졌다. Vermes, Goren 등은 입자가 가지는 thermophoretic velocity를 유체역학의 지배방정식들과 연계시켜 입자의 유동을 설명하였는데 특히 Goren은 평판의 위를 흐르는 층류의 온도 T_w 에 대한 평판의 온도 T_∞ 의 비가 1이 될 때를 전후하여 입자의 전달율이 크게 변하여 층류의 온도가 일정할 경우 평판의 온도가 증가함에 따라 평판방향으로의 입자전달율이 급격히 감소됨을 보였다⁽⁷⁾. 이와 함께 Rosner 등은 Boltzmann의 분자운동론으로부터 체적력(body force)과 압력구배에 의한 영향을 무시할 수 있는 경우에 대하여 Fick의 확산 방정식과 경계층 주위에서 화학반응에 의한 질량의 생성 및 소멸이 없다는 가정인 CFBL(Chemically Frozen Boundary Layer)의 개념을 도입하여 벽면부근에서 질량확산에 관한 관계식을 최종적으로 얻었다⁽¹⁾. 결론적으로 이들 이론의 결과는 다른 열역학적 성질이 변하지 않을 경우 온도구배와 물질전달을 사이에는 일정한 비례관계가 성립함을 보여주고 있는데 이와 관련하여 Rosner 등은 부착물질이 산화탄소인 경우에 대해 부착율과 온도와의 관계를 측정하여 온도구배에 대해 부착율이 선형적인 비례관계를 이루며 증가함을 보였다⁽²⁾. 그러나 이러한 실험결과는 이론적인 결과와 비교하기에는 부족한 상태에 머물고 있어 다른 실험조건하에서 보다 많은 실험결과가 필요하게 되었다.

이런 필요성을 기반으로 본 연구에서는 가스 및 벽면의 온도를 변수로 두고 이 변수와 미소입자의 유체 내에서의 전달현상의 관계를 실험적으로 결정하며 이러한 전달현상에 의한 입자의 부착율의 측정은 최근 개발되고 있는 광학적 측정방법의 일종인 광반사법(specular reflectance method)을 이용한다⁽¹⁰⁾. 본 연구에서는 부차적으로 이와 같은 광반사법의 유용성을 개발, 평가하고자 한다. 또 실험에서 벽면에 부착되는 입자는 기하학적 형상에 따라 입자주위의 유체흐름에 지배적인 영향을 받게 되므로 실험을 통하여 입자의 기하학적 형상에 따라 변화되는 열확산 효과의 상대적인 영향을 평가한다.

2. 이 론

Goren⁽⁷⁾, Vermes⁽⁶⁾, Rosner⁽¹⁾ 등은 Thermophoresis

의 영향으로 미소입자가 가지는 속도를

$$V_T = -K \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \frac{\Delta T}{T}$$

로 나타내었고 이 속도에 관한 관계식을 이용하여 Rosner 는 입자의 주위를 싸고있는 유체들에 의해 (1) 농도구배에 의한 질량확산이 없고, (2) 압력구배에 의한 질량확산이 없으며, (3) 체적력의 영향이 없다는 가정을 설정하고 입자의 크기가 충분히 작아 관성의 영향을 거의 받지않고 유선과 같이 흘러 간다고 할때 앞의 Thermophoresis 에 의한 속도를 도입하여

$$\begin{aligned} (-j_{i,z})_{zh} &\cong \rho_w \omega_{i,w} [-V_{T,w}] \\ &= \rho_w \omega_{i,w} \left[- \frac{(\alpha_i D_i)_w}{T_w} \left(\frac{\partial T}{\partial T} \right)_w \right] \end{aligned}$$

의 관계식을 얻고 이것을 벽 근처에서의 열전달 관계식

$$\lambda_w \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w = \rho_w U_w St_h \bar{C}_p (T_w - T_w)$$

와 Brownian convective diffusion 에 의한 관계식

$$\begin{aligned} (-j_{i,w})_{\text{Brownian}} &= \rho_w U_w St_{i,w} (\omega_{i,g} - \omega_{i,w}) \\ &\cong \rho_w U_w St_{i,w} \omega_{i,g} \end{aligned}$$

와 조합하여

$$\begin{aligned} (-j_{i,z})_{zh} &= (-j_{i,w})_{\text{Brownian}} \cdot \left\{ \frac{\bar{C}_p}{C_{p,w}} (\alpha_i Le_i)_w \right. \\ &\quad \left. \frac{St_h}{St_w} \cdot \frac{T_w - T_w}{T_w} \right\} \left(\frac{\omega_{i,w}}{\omega_{i,g}} \right) \end{aligned}$$

의 결과를 얻었다. 여기서 $\frac{\omega_{i,w}}{\omega_{i,g}}$ 는 보정계수로서 최근의 연구에 의하면 이 무차원 변수는

$$\frac{\omega_{i,w}}{\omega_{i,g}} \cong \text{EXP} \left[(-\alpha_i Le_i)_w \frac{T_w - T_w}{T_w} \right]$$

로 표현된다. 본 연구에는 앞의 가정에 따라 실험환경을 조성하고 이론적 결과를 평가하게 된다.

3. 실험

3.1. 실험장치

실험장치는 Fig. 1에서와 같이 thermophoresis 의 영향에 의한 입자의 부착율의 변화를 광학적인 방법으로 측정하기 위하여 연소가스 속에 포함된 미소입자가 벽면에 부착되는 것을 모델화(modeling)한 Merker 형 버너, 백금표지, 연소가스 속에 미소입자를 넣기 위한 입자발생장치와 입자의 부착율 및 연소가스 속에 주입되는 입자의 밀도변화를 측정할 광학적 측정장치, 그리고 온도 측정장치로 구성된다. 버너는 고온에서 견딜 수 있도록 두랄루민을 사용하여 Fig. 3에서와 같은 형태로 제작되었다. 버너의 상부에는 90°의 간격으로 직경 6 mm 의 구멍을 4 개 뚫었는데 직선상에

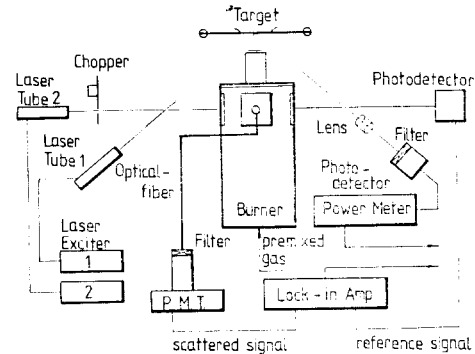


Fig. 1 Schematic diagram of optical measurement system

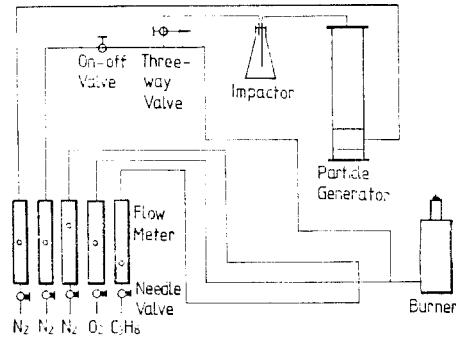


Fig. 2 Schematic diagram of gas and particle supply system

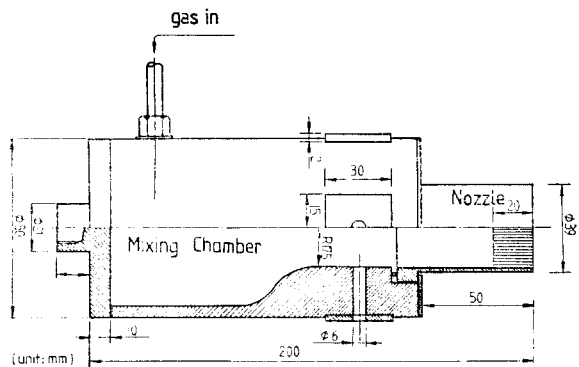


Fig. 3 Section view of Merker type burner

위치한 2개의 구멍은 유리로 막아 레이저광선이 통과할 수 있는 창(창)의 역할을 하게 하였고 또 다른 2개의 구멍에는 광섬유(optical fiber)를 부착하여 입자에 의한 광산란 신호를 받을 수 있도록 하였다. 버너의

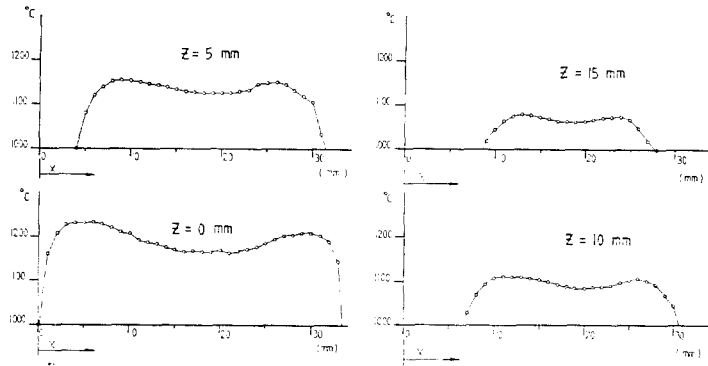


Fig. 4 Temperature distribution of flame

상단에 부착된 노즐은 직경 1.5 mm, 길이 20 mm의 스테인레스 튜브로 채워 노즐 상단에서의 연소가스의 흐름이 층류(laminar flow)가 되도록 하였다. 노즐의 상단에 존재하는 화염은 평면화염(flat flame)인데 이런 형태의 화염대는 화염온도분포를 Fig. 4와 같은 분포를 이루게 하여 연소가스의 중심부에서 반경방향으로의 온도를 일정하게 하며 Z방향으로 일차원적인 온도구배를 주게 된다. 버어너의 하단부로 공급되는 예혼합가스는 질소, 산소, 프로판으로 구성되며 이러한 가스들은 Fig. 2에서와 같이 각각의 공급원으로 부터 압력조절기와 유량계를 거쳐 버어너에 공급된다. 연소가스 속에 포함된 미소 입자가 부착되는 표적은 길이 50 mm, 폭 5 mm, 두께 0.127 mm의 백금판으로 만들어졌는데 이 백금판은 Fig. 5에서와 같이 고전류를 낼 수 있는 직류전원장치(50 A, 15 V)로 가열된다. 특히 표적의 편평도의 변화는 표적의 표면에 부착되는 입자의 부착율과는 관계없이 레이저광의 반사율을 급격히 변화시키기 때문에 변화가 없도록 하는 것이 중요하다. 측정하게 될 입자는 초음파 진동장치(nebulizer)를 사용하여 연소가스 속에 주입하게 되는데 이 장치는 수정진동자와 R.F. Generator로 구성된다. 이 장치는 R.F. Generator로 부터 전기적 신호(1.7MHz, A.C. 24 V, 20 W Max)를 황산마그네슘(MgSO₄)용액과 접촉하고 있는 수정진동자(piezoelectric crystal)에 공급하여 초음파 진동으로 용액을 연무체(aerosol)로 만들어 이것을 유리관을 통과하는 질소 가스에 실어 보낸다. 이렇게하여 질소 가스 속에 포함된 여러 크기의 입자들은 질소 가스와 함께 충돌장치로 사용되는 용적 2000 ml의 삼각 플라스크를 통과하면서 큰 입자들은 플라스크의 바닥에 가라앉게 되며 최종적으로 가스와 함께 흘러가는 입자는 작은 입자만으로 이루어진다. 연소가스 속에 포함된 입자밀도의 변화율은 입자의

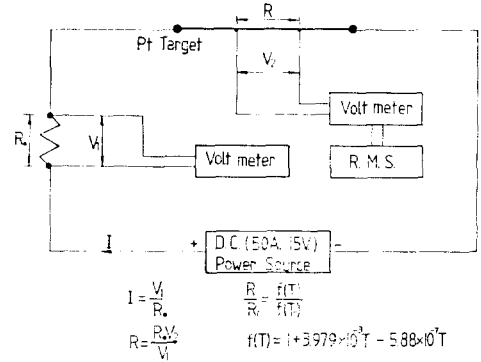


Fig. 5 Temperature measurement circuit for pt target

부착율에 직접적인 영향을 주므로 정확한 입자밀도의 측정이 필수적이다. 입자밀도의 측정은 출력 5 mW의 헬륨-네온 레이저 #2, Lock-in-Amp, 광소자(photodiode), 광산란(light scattering)에 의한 수신호를 받기 위한 광섬유, 광간섭 필터(interference filter type 63 28 A, HBW 100 A) 그리고 PMT(photomultiplier tube) 등으로 구성된 측정장치로 하게된다. 입자의 부착율의 측정은 부착된 입자의 영향으로 광반사율이 변하는 것을 측정함으로써 알 수 있다. 부착율 측정장치로는 출력 2 mW의 헬륨-네온 레이저 #1, 백금표적으로부터 반사되어 나온 빛을 모으기 위한 집광렌즈, 광간섭 필터, 그리고 광량 측정장치로 구성된다. 실험중에 측정 해야할 온도는 백금표적의 온도와 표적주위의 가스 온도이며 연소가스온도는 Pt-Pt/13 Rh의 열전대와 연결된 digital thermometer(YEW type 2575)를 사용하여 측정한다. 백금표적의 온도는 Fig. 5와 같은 저항온도

측정회로를 구성하여 측정한다.

3. 2. 실험방법

실험은 실험결과와 신뢰도를 높이기위해 우선 두 대의 레이저와 입자 발생기를 일정 시간동안 미리 작동시켜 기기의 불안정에 의한 영향을 피한다. 버어너 속에 공급되는 가스는 프로판은 240~250 cc/min, 산소는 1400~1500 cc/min 이고 질소는 직접 버어너로 들어가는 것은 3000~3100 cc/min 이며 입자발생기를 통과하는 질소는 1200~1300 cc/min 의 범위에서 공급한다. 가스의 혼합비는 완전연소비 보다 조금 크게 하였다. 이것은 화학반응이 화염면 부근에서 완전히 일어나도록하며 확산화염의 발생으로 인한 반경방향으로의 온도구배를 방지하기 위함이다. 예혼합화염의 위에 장치되는 백금표적은 약 1500 K 까지 올렸다가 냉각하며 이러한 가열과 냉각은 여러번 반복하는데 이러한 작업은 백금판에 붙어 있는 불순물을 제거시키는 한편 백금판의 편평도를 개선시켜 레이저광에 의한 초기 반사율을 일정하게 해준다. 이렇게 한 다음 혼합가스에 불을 붙혀 화염을 만들고 백금판의 온도를 실험조건의 온도에 둔다. 다음으로 혼합가스에 황산마그네슘의 연무체를 실어 보내는데 이것은 Fig. 2에서와 같은 three-way 밸브를 사용하여 개폐 밸브를 통과하는 유량을 가지는 연무체를 포함한 질소를 넣어 줌으로써 화염의 상태를 변하지 않도록 한다. 일단 입자가 가스 속에 포함되면 그때 부터 입자 밀도의 변화율과 부착율의 변화가 기록된다. 가스의 온도를 측정하는 열전대는 레이저광이 투사되는 표적의 점에서 화염면 쪽으로 5 mm 상방 위치인 $Z=20$ mm 에 위치시키는데 측정 결과에 의하면 연소가스의 중심부에서 $Z=20$ mm 와 $Z=25$ mm 인 점의 온도 변화는 약 5 K 이다. 따라서 열전대로부터 측정되는 온도를 판주위를 흐르는 유체의 경계층면에서의 온도로 들 수 있다. 표적의 위치는 $Z=25$ mm 에 두는데 이렇게 표적을 높이 하는 이유는 레이저 광과 백금판이 이루는 각을 실험 조건이 허용하는 범위내에서 최대로 두어 초기 광반사율을 최대로 하고자 하는 데 있다. 이 측정결과에 의하면 이 높이에서 가스중심부에서 반경 5 mm 이내에서는 온도변화가 +5 K 이어서 이 반경 안에 들어가는 표적에서의 측정부는 일정한 온도구배의 영향을 받는다. 실험 중에는 가스의 온도는 일정하게 두고 표적의 온도를 변화 시킴으로써 온도구배를 주게 되는데 연소가스의 온도는 1345 K 및 1420 K 부근에 두고 표적의 온도는 980 K~1480 K 의 범위에 두고 실험한다.

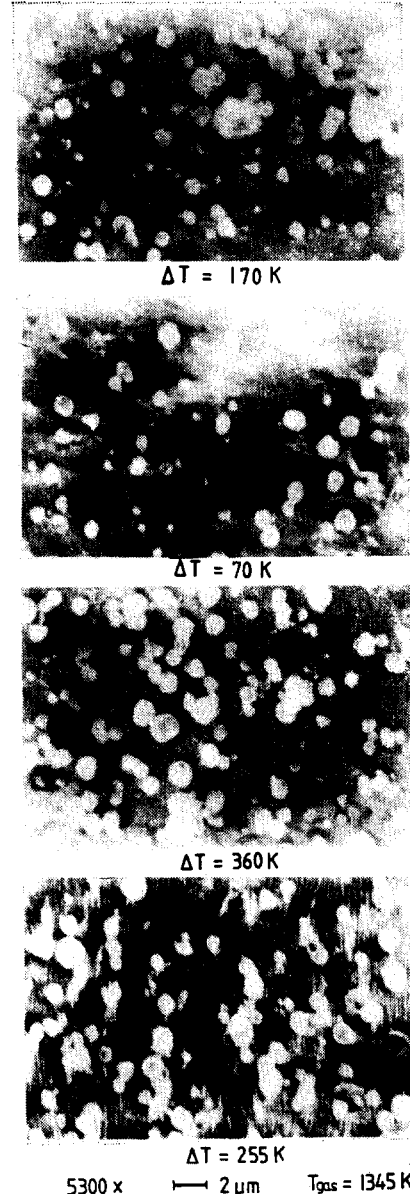


Fig. 6 SEM photographs of deposited particles

4. 결과 및 검토

실험결과와 앞의 실험방법에 따라 변수로 작용하는 연소가스의 온도 및 백금판의 온도로 나타내지는 온도구배에 대한 광반사율의 변화 및 입자밀도의 변화로부터 얻어지는 부착율의 변화로 나타내진다. 기록장치에 기록되는 것은 광반사율의 변화와 연소기 내로 주

입된 입자밀도의 변화율인데 입자의 부착에 의한 반사광량의 변화는 주입된 입자밀도의 변화에 비례적인 관계를 가지므로 단위시간당 반사광의 초기치에 대한 상대적인 변화인 $\frac{1}{I_0} \frac{dI}{dt}$ 의 값에 단위 시간당 입자밀도의 변화율을 나눠 입자 밀도의 변화에 의한 오차를 보정한다. 반사광의 초기치를 나누어주는 이유는 반사광이 렌즈와 간섭필터를 통과하면서 발생하는 입사각이 달라짐으로 인한 광량의 변화를 보정해주기 위함이다. Rosner 와 Kim 은 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 광반사량의 감소율과 입자의 표면 부착율의 관계는 깨끗한 표면일 경우 표면적의 25%가 입자로 덮힐때까지 선형비례 Fig. 8 관계임을 보여 주었다.⁽¹⁰⁾ 온도 구배에 대한 변화율은 최종적으로 Fig. 8과 Fig. 9에 나타나져 있는데 이 결과는 입자의 부착율이 온도구배에 따라 크게 영향을 받고 있음을 보여주고 있다. 온도측정시 발생하는 오차로 인한 측정결과의 불확실성을 피하기 위하여 표적의 온도를 약 50 K 단위로 변화시키면서 온도구배를 주었다.

Thermophoresis 를 받는 입자들의 형상은 각각 다른 온도구배 하에서 표적에 부착된 입자의 부착상태를 SEM (scanning electron microscope)으로 촬영한 사진인 Fig. 6에 나타난 것처럼 대부분 구형을 이룬다. 그리고 이 입자들의 크기는 Fig. 7에 나타난 입자크기 분포도에서와 같이 대부분 입경이 1.0 μm 이하이며 1.4 μm 이상의 크기를 가지는 입자는 나타나지 않는다. Goren 에 의하면 평판의 위를 흐르는 유체속에 포함된 입경이 1.0 μm 인 입자는 유동 내에서 입자자체의 감속시간(relaxation time of particle or stopping time)과 유동의 속도 변화에 의한 유동특성시간(time characteristic of a change in the gas)의 관계값인 Stoke 의 수

$$\frac{2}{9} \left(\frac{R_p}{x_s} \right) \left(\frac{\rho_p}{\rho_g} \right) \left(\frac{x_s U_w}{\nu_g} \right)$$

의 값이 레이놀즈 수 $\left[= \frac{x_s U_w}{\nu_g} \right]$ 가 10⁵인 경우 특징길이 1 cm 에 대해 0.2의 값을 가지는데 이것은 레이놀즈 수가 아주 작은 종류에서는 이 입자 크기에서 판성의 영향을 무시할 수 있음을 보여준다. 이러한 결과는 본 실험조건에서 입자의 부착이 판성충돌보다는 thermophoresis 효과에 의해 지배적인 영향을 받음이 예측 해주는데 실험결과에 의해 증명되고있다. Rosner 등은 Sc ≫ 1 인 흐름에 대해 입자의 부착율이 thermophoresis 와 Brownian diffusion 과 관련하여 어떤 관계를 이룰 것인가를 앞의 이론식으로 수식화하여 보였는데 실험 결과에서는 Fig. 8에 나타난 것처럼 입자의 유동이 실

선으로 나타나는 보정치에 더 접근하고있다. Fig. 8의 세로좌표축은 입자의 부착율을 나타내는 것으로 T_w/T_g 의 값이 0.7인 경우의 값을 1로 두고 각각의 온도비

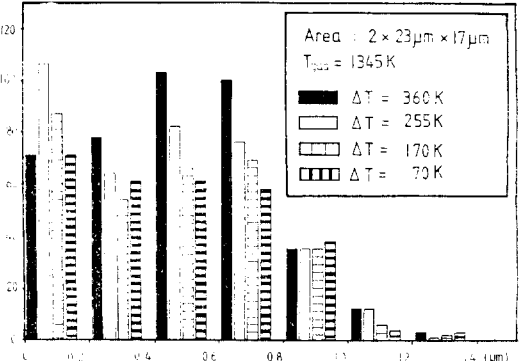


Fig. 7 Particle size distribution diagram

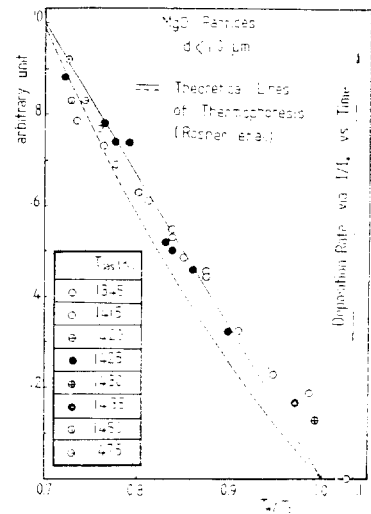


Fig. 8 Data results of the experiment

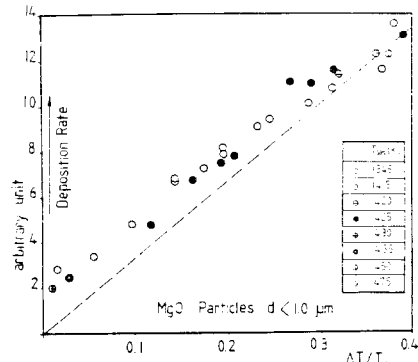


Fig. 9 Data results of the experiment

에 대해 상대적인 부착율을 나타낸 것으로 부착율의 최대치는 약 $0.01 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{min}$ 의 값을 갖는다. 부착율의 변화율을 나타내는 점들을 잇는 직선의 기울기는 Fig. 8과 9에서 나타나 있는 바와 같이 T_w/T_s 의 값이 0.85 부근에서 변화를 일으켜 온도구배가 감소됨에 따라 직선의 기울기가 완만해 지는데 이것은 입자의 부착에 주는 열확산의 상대적인 감소를 보여주고 있다. 이러한 실험결과는 온도 구배가 크게 존재하는 유동에 접하고 있는 벽면에 대한 미소입자의 부착은 Brownian diffusion으로 다룰 경우보다 뚜렷한 증가를 보이고 있고 이것은 thermophoresis에 기인함을 보여주고 있다. 이런 실험결과와 아울러 실험중에 사용된 광반사법은 결과적으로 신뢰할 수 있는 측정결과를 제시하였는데 이 방법은 표적의 표면에 부착되는 물질이 산화마그네슘같이 용융점이 높아 실험온도의 영역에서 입자가 부착상태에서 고체형상을 변하지 않는 경우는 사용할 수 있으나 부착되는 물질이 용융 및 증발을 일으키는 경우에는 이 방법을 사용할 수 없게 된다. 그리고 이 광학적인 방법은 초기 입자 부착율을 측정하는 경우는 신뢰할 수 있는 결과를 보여주는 반면 입자가 점차로 부착됨에 따라 미리 부착된 입자들의 영향으로 부착율의 변화에 대해 선형적인 광반사 신호를 나타내 주지 못하는 약점을 가진다.

5. 결 론

(1) 실험적으로 측정된 결과는 최근에 thermophoresis와 관련하여 Rosner, Goren 등에 의해 개발된 물질 전달에 관한 이론과 접근하며 특히 Rosner의 이론에 의한 보정치에 접근한다.

(2) 온도구배에 의한 입자의 부착율은 본 실험의 영역에서는 연소가스의 온도와 표적의 온도의 비 T_w/T_s 에 대해 선형적인 감소를 하며 이 온도비의 값이 1에 접근해 갈수록 이론치로부터 전이를 일으키는데 이것은 thermophoresis 효과의 상대적인 감소에 기인한다.

(3) 온도구배가 큰 경우 미소입자의 부착율에서 관성 충돌 효과가 차지하는 부분은 입경이 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자인 경우 무시할 수 있다.

(4) Real time으로 입자의 부착율을 측정하는 광반사법은 실험중 형상이 변하지 않는 입자의 초기부착율에 대해 신뢰할 수 있는 측정법이다.

실험의 결과는 벽면에 부착되는 미소입자가 thermophoresis의 영향에 지배적인 영향을 받고 있음을 보여 주고 있는데 이것은 관성충돌을 일으키지 않고 유체와 함께 흘러가는 미소입자가 온도구배 하에 놓일 때는 입

자의 운동을 thermophoresis와 관련하여 연구하여야 함을 보여준다. 고온가스와 접촉하고 있는 열기관외 표면에 부착되는 미소입자들은 그 자체가 일으키는 문제가 되지만 이것들이 부착됨으로 인해 다른 바람직하지 못한 물질의 부착이 더욱 가속시키는 결과를 낳게 되므로 이런 미소입자의 부착이 중요한 의미를 가진다.

후 기

본 연구는 1984년도 한국과학재단의 연구 지원으로 수행되었으며 이에 감사하는 바입니다.

References

- (1) Rosner, D.E., Chen, B.K., Fryburg, G.C. and Kohl, J.K., Chemically Frozen Multicomponent Boundary Layer Theory of Salt and/or Ash Deposition Rates from Combustion Gases, Combustion Science and Technology, Vol. 20, pp. 87~106, 1979
- (2) Rosner, D.E. and Seshadri, K., Experimental and Theoretical Studies of the Laws Governing Condensate Deposition from Combustion Gases, Eighteenth Symposium(International) on Combustion, pp. 1385~1394, 1981
- (3) Rosner, D.E., Thermal(Soret) Diffusion Effects on Interfacial Mass Transport Rates, Physicochemical Hydrodynamics, Vol. 1, pp. 159~185, 1980
- (4) Rosner, D.E. and Fernandez de la Mora, J., Small Particle Transport Across Turbulent Nonisothermal Boundary Layers, Transactions of A.S.M.E., Journal of Engineering for Power, Vol. 104, pp. 885~894, 1982
- (5) Rosner, D.E. and Gokoglu, S.A., Correlation of Thermophoretically Modified Small Particle Diffusional Deposition Rates in Forced Convection Systems with Variable Properties, Transpiration Cooling and/or Viscous Dissipation, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, No. 5, pp. 639~646, 1984
- (6) Vermes, G., Thermophoresis-Enhanced Deposition Rates in Combustion Turbine Blade Passages, Transactions of A.S.M.E., Journal of Engineering for Power, Vol. 101, pp. 542~548, 1979

- (7) Goren, S.L., Thermophoresis of Aerosol Particles in the Laminar Boundary on a Flat Plate, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 61, No. 1, pp. 77~85, 1977
- (8) Hirschfelder, J.O., Curtiss, C.F. and Bird, R.B., *The Molecular Theory of Gases and Liquids*, John Wiley & Sons, New York, 1954
- (9) Levich, V.G., *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice-Hall, 1962
- (10) Rosner, D.E. and Kim, S.S., Optical Experiments on Thermophoretically Augmented Submicron Particle Deposition from "Dusty" High Temperature Gas Flows, in press in *Chemical Engineering Journal*, 1985