

<論 文>

고온의 기체-입자 유동으로부터 입자부착 현상에 관한  
실험적 연구

김 상 수\* · 김 용 진\*\*

(1987년 3월 14일 접수)

An Experimental Study of Particle Deposition from  
High Temperature Gas-Particle Flows

Sang Soo Kim\* and Yong Jin Kim\*\*

**Key Words:** Particle Deposition(입자부착), Thermophoresis(열확산), Inertial Impaction(관성충돌), LLRM(레이저 광반사법), Photograph of SEM(전자현미경 사진)

Abstract

Experimental studies of particle ( $TiO_2$ ) deposition from the laminar hot gas particle flow (about 1565K) onto the cold wall surface (about 1215K~1530K) were carried out by the 'real time' laser light reflectivity method(LLRM) and the photographs of scanning electron microscope(SEM). The LLRM was used for the measurement of thermophoretic deposition rates of small particles ( $d_p < 3\mu m$ ), and the photographs of SEM were used for determining what factors control the collection of particles having diameters ranging from 0.2 to 30 microns. Two phenomena are primarily responsible for transport of the particles across the laminar boundary layers and deposition: (1) particle thermophoresis (i.e. particles migration down a temperature gradient), and (2) particle inertial impaction, the former effect being especially larger factor of the particle deposition in its size over the range of 0.2 to 1 microns. And also, this study indicates that thermophoresis can be important for particles as large as 15 microns. Beyond  $d_p = 16\mu m$ , this effect diminishes and the inertial impaction is taken into account as a dominant mechanism of particle deposition. The results of present experiments found to be in close agreement with existing theories.

기 호 설 명

$D_p$  : 입자확산계수

$I$  : 반사광의 강도( $I_0$  초기값)

$j''$  : 입자의 질량확산 플럭스(flux)

$K$  : 열확산속도 상수

$k$  : 열전도계수

$Kn$  : 입자의 Knudsen 수( $=\lambda/R_p$ )

$Le$  : 입자의 Lewis 수

$R_p$  : 입자반경( $=d_p/2$ )

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

- $Sc$  : 입자의 Schmidt 수 ( $=\nu/D_p$ )  
 $St$  : Stanton 수 (열 또는 질량에 대한)  
 $Stk$  : Stokes 수 ( $=\tau\omega$ )  
 $T$  : 절대온도  
 $u$  :  $x$  방향 유체속도  
 $v$  :  $y$  방향 유체속도  
 $v_T$  : 열확산 속도  
 $x$  : 벽면의 평행방향거리  
 $y$  : 벽면의 수직방향거리

### 희랍문자

- $\alpha_T$  : 입자의 열확산계수  
 $\lambda$  : 평균자유경로  
 $\kappa$  : Boltzmann 상수  
 $\mu$  : 점성계수  
 $\nu$  : 동점성 계수  
 $\rho$  : 밀도  
 $\tau$  : 입자의 이완시간 ( $=m_p/6\pi\mu R_p$ )  
 $\omega$  : 입자의 질량비 (mass fraction)

### 첨 자

- $e$  : 경계층 바깥 주위에서 값  
 $h$  : 열전달  
 $g$  : 기체  
 $m$  : 물질전달  
 $o$  : 열확산 무시  
 $p$  : 입자  
 $w$  : 벽면

### 기 타

- $\underline{\omega}$  : 유체감속 주파수  
 $( )_{crit.}$  : ( )의 임계값

## 1. 서 론

입자를 수반하는 고온의 연소기체 유동으로부터 입자 부착 현상은 가스터빈 블레이드(blade) 내연기관의 벽등에서와 같은 연소기구 및 열교환기 등에서 화학적인 부식(fouling, corrosion)과 기계적인 침식(erosion)을 유발시키고, 기관의 열전달 및 열효율 문제에 심각한 영향을 끼친다. 불행히도 종래의 연구는 이때 발생하는 유기 또는 비유기 미소입자(예 : 그을음(soot), 플라이애쉬(fly ash), 알칼리 금속염 등)들의 생성 및 성장기구와 화학적 반응등에 의한 그들의 기체화(gasfication)

쪽으로만 주로 기울여졌을 뿐, 그들의 고체벽면으로의 부착현상을 포함한 열 및 물질전달을 지배하는 인자가 무엇인지에 관한 만족할만한 연구가 없어왔다. 그리고 이러한 연구들은 열시스템들의 설계 및 최적화 문제뿐만 아니라 공기 정화장치 등의 환경문제의 응용에서도 매우 중요하다. 이런 이유의 일부로 본 실험은, 이런 입자들의 이동과 부착기구들을 한층더 정량적으로 해석하기 위한 데이터를 얻는데 목적을 두고 있다.

일반적으로, 고온의 기체-입자 유동으로부터 입자의 이동과 부착을 일으키게 하는 주된 물질전달 메커니즘은 농도확산(Fick or Brownian diffusion), 열확산(Soret diffusion: thermophoresis 즉, 극소온도 구배의 역방향으로 입자가 전달되는 현상), 와류효과(turbulent eddy impaction), 관성충돌효과(inertial impaction) 등이 있는데, 입자에 대한 농도확산계수( $D_p$ )는 질량, 모멘텀, 열에 대한 기체확산계수 보다 훨씬 작으므로 상대적으로 입자의 농도확산 효과는 무시할 수 있다. 한 예로, 1500K, 1atm. 프로판-공기 화염 중에서  $0.2\sim 1.0\mu m$ 의 구형입자에 대하여  $D_p$ 는 Einstein 공식

$$D_p = \frac{\kappa T}{3\pi\mu d_p} \quad (1)$$

으로부터  $10^{-6}\sim 10^{-7}$  단위이며, 그리고 이때 입자확산에 대한 기체분자 확산의 비를 나타내는 입자의 Schmidt 수

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_p} \quad (2)$$

는  $10^6$  단위이다.

그리고 가스 터어빈이나 추진기관 등의 실제 문제에서, 열효율 향상 때문에 기관으로 들어가는 입자가스의 온도를 높여야 되며, 이와 반대로 재료의 열적 한계성으로 기관의 벽면을 냉각해야 하기 때문에, 유동가스와 고체벽면사이에 심한 온도구배가 발생된다. 이런 경우에서의 입자부착 현상에 관한 최근의 연구<sup>(1)</sup>에 의하면, 열확산 효과가 미소입자의 전달과 부착에 지배적인 역할을 한다는 것을 보이고 있다. 최근 여기에 대한 결정적인 효과에 관하여 직경 약  $0.4\mu m$ 의 구형 MgO 입자에 대하여 Rosner & Kim 등의 광산사법을 이용한 실험과<sup>(2,3)</sup>, 그리고 실제 연소가스 속에서의 그을음(soot) 입자의 부착현상에 대하여 Eisner & Rosner<sup>(4,5)</sup>의 열전대 응답법 및 광단절법을 이용한 부착을 측정실험에 의하여 입증되었다.

그러나 입자가 어느 정도 이상으로 큰 경우, 입자의 이완시간(relaxation time,  $\tau$ )의 수송유체의 주거시간

(residence time,  $\omega^{-1}$ )에 대한 비를 나타내는 Stoke 수

$$Stk = \tau \omega \quad (3)$$

의 값이 어느정도 이상으로 크게 되면, 자유분자운동 영역(free molecular region)에서의 기체분자운동과 같이 입자는 유체의 유선으로부터 벗어나서 자체의 운동량만에 의해서 고체벽면에 도달할 수 있다. 입자의 관성 충돌효과에 관한 이론적 연구로서, Fernandez de la Mora & Rosner 등은<sup>(6,7)</sup> 기체운동속에서 입자의 거동에 대하여 개개의 단일입자에 대한 Newton 법칙을 적용시키는 종래의 Lagrangian 접근법에서 연속체(continuum) 보존방정식을 적용시키는 Eulerian 접근법에 의하여, 확산(농도확산, 열확산)과 관성충돌효과를 동일한 지배방정식에서 동시에 고려함으로써 그들의 상호관계를 얻었는데, 여기서 입자의 관성효과는 압축효과와 증가 등에 기인함으로써 확산에 의한 입자부착을 훨씬 증가시킬 수 있다는 것을 보였다. 이상으로부터, 종류 유동에서 입자 부착의 주된 기구는 열확산과 관성충돌 효과인데, 이들의 상대적인 효과는 입자의 크기에 의해서 좌우된다.

본 실험에서는 입자발생 장치를 유동층(fluidized bed)을 이용하여 만들었고 이것에 의해서 고온의 연소 가스속으로 입자가 공급되므로, 종래의 초음파입자 발생기나 오리피스진동입자 발생기등에서 일어나는 화학 반응 및 입자상호간의 응집(coagulation)현상등을 되도록 없게 하여 순수한 구형입자에 대한 입자부착 효과를 볼 수 있게 함으로써, 부착기구의 이해와 해석등을 한층 유리하게 한다. 그리고 공급되는 입자의 크기의 범위를 직경  $0.2\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$  정도로 광범위하게 다루어 비교적 간단하고 잘 정의된 종류 유동에서, (1) 미세 입자의 경우 실시간(real time) 레이저 광판사법에 의한 입자부착물의 온도구배 및 농도에 대한 효과를 실험하고, (2) 입자의 Counting/Sizing 법에 의하여 입자크기에 따른 열확산 효과 및 관성충돌 효과 등을 볼 수 있게 한다.

## 2. 이 론

### 2.1 열확산의 입자크기 의존성

비등온(nonisothermal) 기체유동에서 미소입자들은 온도가 감소하는 방향으로 이동한다. 만일 입자의 반경이 기체의 평균자유경로(mean free path)  $\lambda$ 에 비해서 작은 경우( $Kn \gg 1$ ), 이때 유동장은 자유분자운동 영역에 근거를 두고, Einstein(1924) 이후 Waldmann 등에 의하여, 열적인 힘(thermal force)은 온도구배에

비례한다는 것이 유도되었다. 입자가  $\lambda$ 에 비해 큰 경우( $Kn \ll 1$ ), 유동장은 연속체로 취급될 수 있으며, 유체역학(hydrodynamics)과 확산이론을 적용시킬 수 있다. 이때도 Epstein(1929)이 입자표면에 대한 Maxwell의 thermal creep과 Navier-Stokes 유동방정식 및 Fourier 열전달 방정식에 의하여 다시 열적인 힘은 온도구배에 비례한다는 것을 유도했으며, 그이후, Brock, Derjaguin 등이 슬립효과와 비가역 열역학에 Onsager's 상반정리를 적용시켜 실험과 더욱 잘 일치하는 식을 유도하였다. 그리고 자유 분자운동 영역과 연속체의 천이영역(transitional regime)에서( $Kn \sim 0(1)$ )의 유동장은 Boltzmann 방정식과 기체분자운동론이 함께 사용되어져야 되므로 취급하기가 매우 어렵다. Grad의 13 모우멘트이론에서, 구형입자인 경우 이 영역에서도 열적인 힘은 온도구배에 비례한다는 것을 보였다.

이상에서 입자는 Knudsen 수에 무관하게 극소 온도구배에 비례해서 열적인 힘을 받으며, 실제 공학문제에서 중요한 입자의 열확산 속도  $V_T$ 는 입자의 이동가능성(mobility)을 고려하여 다음과 같이 표현된다.

$$V_T = -K \frac{\nu}{T} \nabla T \quad (4)$$

여기서 열확산 계수  $K$ 만이 기체와 입자의 상태량(property)들과 Knudsen 수에 의존된다. 그런데 위에서 언급된 이론들은 비교적 제한된 Knudsen 수의 영역에서만 성립되었는데 최근 Talbot 등<sup>(8)</sup>이 가열된 평판 위의 기체-입자 유동에서 입자가 없는 영역(particle-free region)을 LDV를 이용하여 측정하고 위의 식들과 비교함으로써 계수  $K$ 를,

$$K = 2.294 \frac{(SCF)(k_s/k_p + 2.2Kn)}{(1 + 3.438Kn)(1 + 2k_s/k_p + 4.4Kn)} \quad (5)$$

로 구했는데, 여기서 SCF는 Stokes-Cunningham 계수로서

$$SCF = 1 + Kn(1.2 + 0.41e^{-0.88/Kn}) \quad (6)$$

으로 나타난다. 위의 식(5)는 광범위한  $Kn$  영역의 구형입자에 대해서 실험 결과들과 비교적 잘 일치된다.

### 2.2 종류 경계층에서 열확산에 의한 미소입자의 부착이론

속도와 온도장이 잘 정의된 평판종류 유동에서, 미소 입자의 열확산적인 부착에 관한 이론이 Gökçöglü 등<sup>(9)</sup>, Batchelor 등<sup>(10)</sup>에 의하여 전개되었다. Gökçöglü와 Rosner의 이론에 따르면, 열확산 효과를 고려하는 경우 벽면으로의 질량플럭스는,

$$j_w'' = -\rho_w D_{p,w} \alpha_{T,w} \left( \frac{\partial \ln T}{\partial y} \right) \omega_w \quad (7a)$$

$$= \rho_w u_w (\alpha_T Le)_w St_{h,w} \left( \frac{T_s - T_w}{T_w} \right) \omega_w \quad (7b)$$

로 된다. 여기서 열확산 효과에 의한 입자의 부착효율 (collection efficiency)을 나타내는 물질 전달에 대한 무차원 그룹인 Stanton 수  $St_{h,w}$ 은

$$St_{h,w} = -j_w'' / \rho_w u_w \omega_w \\ = (\alpha_T Le)_w \cdot St_{h,w} \cdot \frac{T_s - T_w}{T_w} \cdot \frac{\omega_w}{\omega_s} \quad (8)$$

여기서 두개의 무차원 그룹인  $(T_s - T_w)/T_w$ 와  $\omega_w/\omega_s$ 는 물질전달 방정식에서의 열확산 항에 의해서 기인되는 흡입 (suction) 항과 외부싱크 (outer sink) 항에 비례한다.

그리고 Batchelor 등은 식 (4), (5)의 열확산 속도와 열 및 물질전달에 관한 경계층 이론에서의 지배 방정식들을 Blasius 급수를 사용하여 완전해를 유도하였다.

### 3. 실험

고온의 기체-고체입자 유동으로부터 입자부착 현상을 비교적 안정된 조건하에서 단순화시키기 위하여 2차원 평판정체 층류유동으로 모델화한 실험장치는 Fig. 1에서와 같다. 버어너는 Fig. 2에서와 같이 유동조건이 일정하도록 하기 위하여 예혼합 평면층류화염 버어너를 사용했으며, 가열에 의한 역화현상을 방지하기 위하

여 상단부에 물 자켓을 설치했다. 입자는  $TiO_2$  분말가루를 버어너로 공급된 질소와 산소의 혼합기체로 유동화시켜 버어너로 공급하게 되는데, 동일한 범위의 입자를 일정하게 공급하기 위해서 입자발생기상부에 플리넨 챔버 (plenum chamber) 또는 관성충돌장치 및 팽창기 등을 연결시켰다. 따라서 연소기체로부터의  $TiO_2$  입자들은 버어너 상단에 설치된 폭 5mm, 두께 0.127mm의 백금시편에 부착되게 된다. 입자부착율은 Fig. 1의 레이저 1을 사용하여 측정하게 되는데 초기에 표적위로 입사한 광반사량의 강도의 입자부착이 증대됨에 따라 나타나는 감소율을 이용하여 측정하며, 기체중의 입자농도는 레이저 2를 사용하여  $90^\circ$  광산란법에 의하여 측정한다 (자세한 실험장치 및 실험 과정들은 참고문헌 (3, 11) 참조). 연소기체 온도는 열전대에 의해서 측정되는데, 본 실험에서 백금표적으로부터 법선방향의 온도분포가 Fig. 3에서와 같은데, 표적위 약 3mm되는 점에서의 온도가 표적온도에 무관하게 약 1565K로 일정하므로, 이 부분에서의 온도가 열경계층 (thermal boundary layer)의 온도로 취급될 수 있다. 그리고 백금표적의 온도는 전기적인 가열로 조절될 수 있으므로 일정한 연소기체 온도에 대하여 적당한 온도구배를 줄 수 있다. 본 실험에서는 백금표적의 온도를 약 1200K~1530K의 범위에서 변화시켜 열 경계층내의 평균온도 구배가  $900 \sim 40K/cm$  되는 범위에서 부착현상을 실험

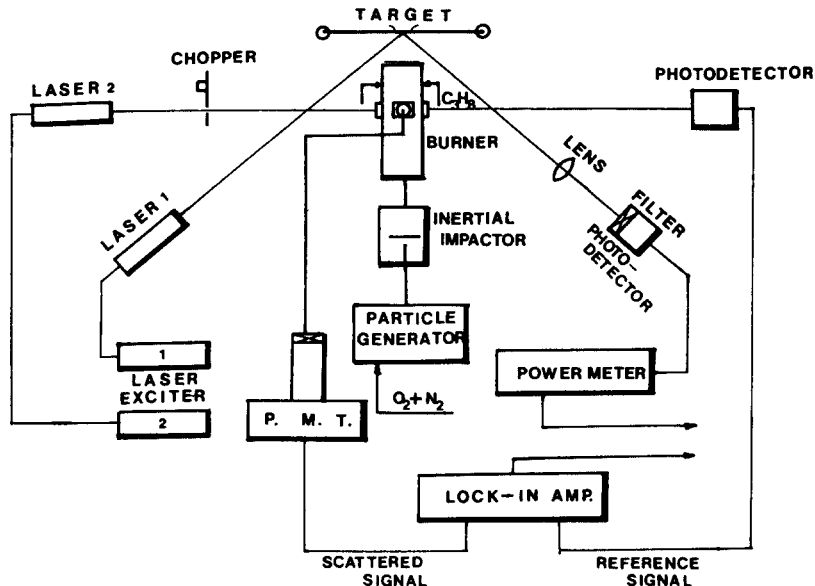


Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement for optical measurements of submicron particle deposition rates from a seeded flat flame

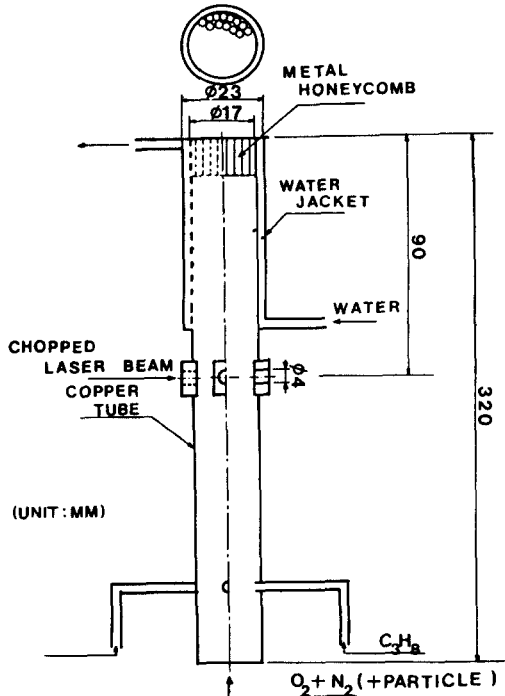


Fig. 2 Cross-section of flat flame water-cooled premixed gas burner with provision for 90° light scattering from a seed particles suspended in the precombustion gases

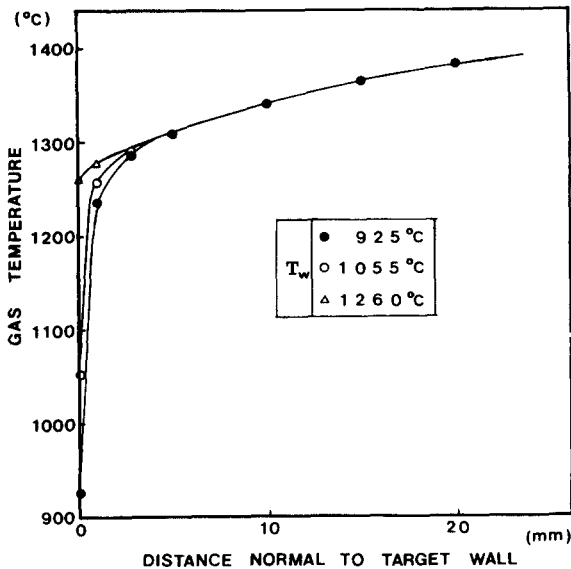


Fig. 3 Gas temperature distributions along a distance normal to target wall

하며, 위의 몇가지 다른 표적온도에 대하여 부착된 시편들을 SEM 전자현미경 확대사진으로 입자의 크기 분

포를 조사하여, 열확산의 입자크기에 대한 의존성과 광성층들에 의한 입자부착효과 등을 실험한다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 광 반사법을 이용한 미소입자 부착의 열확산효과 실험

미소입자( $3\mu\text{m}$  이하)의 경우 백금표적의 온도변화에 대하여 입자의 부착에 의한 광반사량의 시간에 따른 변화를 기록하고, 초기 단위시간당 반사광량의 초기값( $I_0$ )에 대한 감소변화율  $[-\Delta I/I_0 \Delta t]$ 을 구함으로써, 광단절(light extinction)이론의 Beer-Lambert 법칙<sup>(12)</sup>

$$\frac{\Delta I}{I} = -b_{\text{ext.}} \Delta X \quad (9)$$

과 Rosner & Kim<sup>(2)</sup>의 실험으로부터, 입자의 초기 부착률을 실시간으로 측정할 수 있다.

두 가지의 다른 공급입자의 농도 [(a), (b)]에 대하여 부착률의 온도구배에 따른 변화가 Fig. 4에 나타나 있는데, 이 결과 입자 부착률은 온도구배와 공급입자의 농도에 따라 크게 증가한다는 것을 보여주고 있다.

증기부착(vapor deposition)의 경우, 증기확산에 대한 Schmidt 수는 0~(1)이므로 부착의 주된 메커니즘은 Fick 확산이며, 열확산은 상대적으로 무시된다. 그러므로 각각의 농도가 다른 경우 표적온도의 감소에 따른 증기 부착률은, 기울기에는 거의 변화없이 농도의 증가에 대하여 부착률은 증가된다. 그러나 농도가 너무 많거나 표적온도가 일정온도 이상으로 내려갈 때는, 열경계층 내에서의 핵생성 등의 영향으로 부착률이 감소되므로<sup>(13)</sup>, 오히려 농도의 증가는 부착률의 평균기울기를 감소시킬 수도 있다. 그러나 입자부착(particle deposition)의 경우, 본 실험의 조건에서 입경  $3\mu\text{m}$  입자에 대한 Stoke 수의 값이 약 0.0048의 값을 가지며 이는 평판 리본의 정체 유동에 대한 입계 Stoke 수  $[(Stk)_{\text{crit.}}]$ 의 값인 0.125에 훨씬 못 미친다. 따라서 이때의 입자들은 관성의 영향을 상대적으로 무시할 수 있으므로, 미소입자에 대한 주된 부착 메커니즘은 확산효과이다. 그런데 앞에서 보인 바와 같이 입자의 분자확산에 대한 Schmidt 수의 값이  $10^6$  단위이고 Fig. 4의 실험결과에서 미소입자 부착률은 온도구배에 강한 의존성을 나타낸다는 것을 보여주고 있다. 만일 Fick 확산이 입자부착의 주된 메커니즘이라면 입자 부착률은 온도구배 인자  $(T_r - T_w)/T_w$ 에 거의 무관할 것이다.

그리고 Fig. 4에서 입자 농도의 증가는 부착률의 기

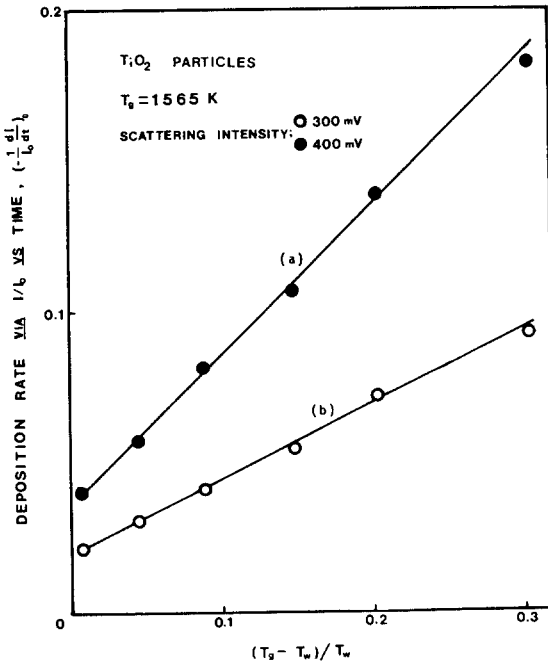


Fig. 4 Reflectivity-inferred relative deposition rates of small  $\text{TiO}_2$  particles ( $0.2 \sim 3 \mu\text{m}$  in dia.) from a seeded propane-air flame as a function of target temperature. Light scattering intensity (particle feeding rate); (a) 400mW, (b) 300mW

울기를 증가시키므로, 표적온도가 낮을수록 입자농도의 증가로 인한 입자부착률은 더욱 증가된다. 이런 결과들은 입자의 열확산 효과에 대한 Rosner 등의 이론<sup>(9)</sup>에서, 입자부착률을 나타내는 무차원 질량 전달 계수인 Stanton 수(식(8))의 값이 입자농도의 증가와 표적온도의 감소로 더욱 증가된다는 부착이론(thermophoretically-augmented submicron particle deposition theory)과 일치하며, 그리고 Fig. 4에서와 같이 부착물의 온도 구배에 대한 선형적인 비례를 보이는 실험결과와는 또한 식(8)의 이론과 잘 일치한다.

#### 4.2 부착현상의 입자크기 의존성

미소한 입자( $3 \mu\text{m}$  이하)와 큰 입자( $3 \sim 30 \mu\text{m}$ )에 대하여 표적온도를 변화시켜 가면서 입자를 부착시킨 각각의 표적들에 대한 SEM 사진으로 입자의 크기와 갯수를 구하고 몇번의 반복실험에 대한 평균입자 갯수를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각의 벽면온도에서 입자크기에 대하여 나타냈다. 그리고 Fig. 7은, Fig. 5와 Fig. 6

에서, 가스온도와 표적온도와의 최대 온도구배가 존재할 때, 즉 최저 표적온도에서 부착된 입자의 갯수를 기준치로 하고, 표적온도를 점점 증가시켜 온도구배를 줄여감에 따라 나타나는 기준치에 대한 부착량의 감소비 (particle reduction ratio)를 각각의 입자크기에 대하여 나타내었는데, 결과적으로 입자 감소비는 입자부착의 열확산 효과를 나타내므로, 이 그림은 열확산 효과의 입자크기 의존성을 보여준다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이, 약  $0.2 \sim 1 \mu\text{m}$ 의 입자인 경우 부착효과는 온도구배에 매우 민감하며, 동일한 온도구배인 경우 입자크기에 강한 의존성을 나타낸다. 이런 결과는 최근 Talbot 등의 LDV를 이용한 광범위한 입자크기에 대한 열확산 효과의 실험 및 이론적인 결과와 같은 경향을 나타낸다. 그리고 Fig. 7에서, 직경 약  $15 \mu\text{m}$  까지도 열확산 효과가 존재한다는 것을 볼 수 있는데, 본 실험조건에서  $15 \mu\text{m}$   $\text{TiO}_2$  입자인 경우  $Stk$ 의 값이 약 0.116인데 이는  $(Stk)_{crit}$  값인 0.125 근처의 값이다. 이때 입자의 열확산과 관성 충돌의 동시 효과에 관한 최근의 Eulerian 접근법 이론<sup>(6)</sup>에서, 정상상태에 대한 보존방정식은,

$$(V_p \cdot \nabla) V_p = \frac{V - V_p + V_T}{\tau} \quad (10a)$$

$$u_p \frac{\partial \omega_p}{\partial x} + \omega_p \text{div}(V_p) = 0 \quad (10b)$$

이다. 그런데, 일반적인 입제이하 Stoke 수의 영역의 입자전달 문제에서,  $-\text{div}(V_p) \geq 0$  이므로 식(10b)에서  $\frac{\partial \omega_p}{\partial x} \geq 0$  이 된다.

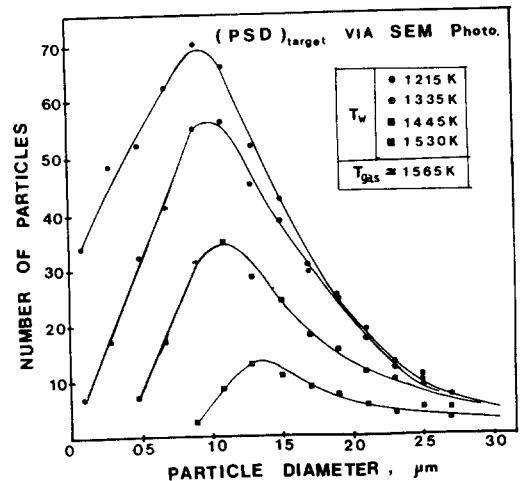


Fig. 5  $\text{TiO}_2$  particle (fine) size distribution (obtained by scanning electron microscope) of the deposited particles from 1565K, 1atm. flame gas

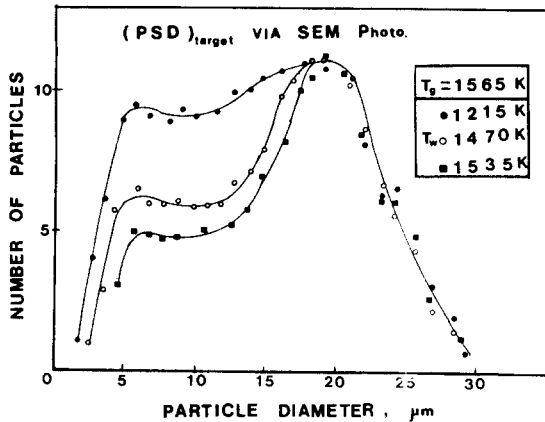


Fig. 6 TiO<sub>2</sub> particle (coarse) size distribution (obtained by scanning electron microscope) of the deposited particles from 1565K, 1atm. flame gas

즉, 입자의 농도는 체적을 따라 증가한다. 그러므로 물질전달 경계층은 압축효과를 받게되며, 경계층내에서 입자의 농도구배가 증가된다. 그러나 이 경우의 입자들은 입자 자체의 관성력만에 의해서는 벽면에 도달할 수 없는 영역이다. 그러나 경계층내의 온도구배로 열확산효과가 존재할 때, 관성충돌효과는 식 (8)에서의 inertial-thermophoretic "enrichment factor"  $\omega_w/\omega_s$ 를 증가시키므로, 결과적으로 열확산 효과에 의한 입자부착을 더욱 증가시킨다.

16 $\mu$ m 이상의 입자인 경우 열확산 효과는 서서히 멀어지며 부착물은 온도구배에 무관하다. 그리고 이때의 입자들의 Stoke 수는 임계값 이상이므로, 이 영역에서

의 입자전달과 부착기구는 관성충돌 효과가 지배적인 인자라고 생각할 수 있다.

### 5. 결 론

미소입자에 대하여 광반사법에 의한 입자부착률의 측정과 전자현미경 사진법에 의한 열확산의 입자크기 효과의 실험결과 다음의 중요한 결론을 얻을 수 있다.

(1) 온도구배에 대한 입자부착률은 온도구배 인자  $(T_s - T_w)/T_w$ 의 값에 따라 본 실험의 영역에서 선형적인 증가를 하며, 이 결과는 최근 열확산과 관련된 Rosner와 Batchelor 등<sup>(9,10)</sup>의 부착이론과 일치한다.

(2) 특히 열확산 효과는 입경 0.2~1 $\mu$ m 입자의 경우에서 입자부착에 지배적인 역할을 하며, 이 범위에서의 입자부착률은 입자의 크기에 따라서도 매우 강한 의존성을 나타낸다.

(3) 낮은 Reynold 수의 흐름인 경우 입경 15 $\mu$ m 입자까지도 열확산에 의한 부착이 중요한 인자가 될 수 있다. 그리고 입경 20 $\mu$ m 이상의 입자인 경우 부착현상의 주된 기구는 관성충돌 효과로 생각된다.

여기서, 입자부착은 입자의 직경뿐만 아니라 유동속도와 입자의 물성치를 함께 고려한 Stoke 수와 Reynold 수 등에 의해서 좌우된다는 것을 알 수 있다. 앞으로, 임계 Stoke 수 이상의 매우 큰 입자부착에 대하여 열확산 효과와 관성충돌 효과에 대한 연구와, 아울러 그해의 유동조건에 따른 입자의 re-entrainment, rebound 효과등을 고려한 부착 계수(sticking coefficient)등에 관한 연구가 요구되어진다.

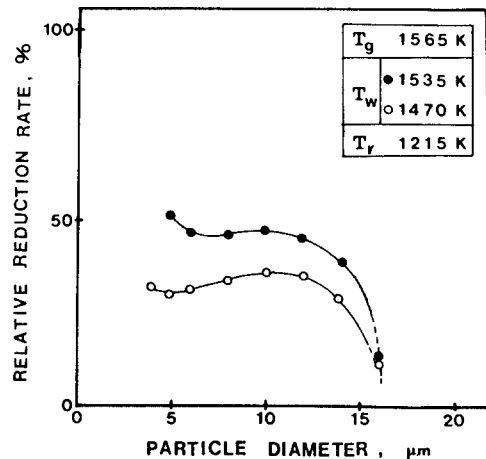
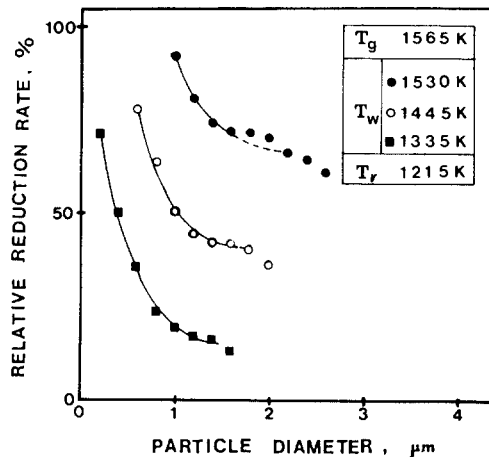


Fig. 7 Particle size dependence of thermophoretic deposition effects (Relative reduction rate). Mainstream flame gas temperature ( $T_s$ )=1565K, reference target temperature ( $T_r$ )=1215K

## 참 고 문 헌

- (1) Vermes, G., 1979, "Thermophoresis-Enhanced Deposition Rates in Combustion Turbine Blade Passages", *Trans. of the ASME J. of Eng. for Power*, Vol. 101, pp. 542~548.
- (2) Rosner, D.E. and Kim, S.S., 1984, "Optical Experiments on the Thermophoretically Augmented Submicron Particle Deposition from "Dusty" High Temperature Gas Flows", *The Chem. Engr. J.*, Vol. 29, pp. 147~157.
- (3) 김상수, 장혁상, 1985, "열 확산에 의한 미소입자의 부착현상에 관한 실험적 연구", *대한기계학회논문집*, 제 9권, 제 3호, pp. 379~386.
- (4) Eisner, A.D. and Rosner, D.E., 1985, "Experimental Studies of Soot Particle Thermophoresis in Nonisothermal Combustion Gases Using Thermocouple Response Techniques", *Comb. & Flame*, Vol. 61, pp. 153~166.
- (5) Eisner, A.D. and Rosner, D.E., 1984, "Experimental and Theoretical Studies of Submicron Particle Thermophoresis in Combustion Gases", Presented at the Fifth Intl. (Levich-) Symp. on Physico-Chemical Hydrodynamics, Tel-Aviv, Israel.
- (6) Fernandez de la Mora, J. and Rosner, D.E., 1983, "Inertial Deposition of Particles: Eulerian Approach to a Traditionally Lagrangian Problem", *J. Physico-Chemical Hydrodynamics*, Vol. 2, pp. 1~21.
- (7) Fernandez de la Mora, J. and Rosner, D.E., 1982, "Effect of Inertia on the Diffusional Deposition of Small Particles to Spheres and Cylinders at Low Reynolds Numbers", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 125, pp. 379~395.
- (8) Talbot, L., Cheng, R.K., Sheffer, R.W., and Willis, D.R., 1980, "Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 101~4, pp. 737~758.
- (9) Gökoğlu, S.A. and Rosner, D.E., 1984, "Correlation of Thermophoretically-Modified Small Particle Diffusional Deposition Rates in Forced Convection Systems with Variable Properties, Transpiration Cooling and/or Viscous Dissipation", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 2, pp. 639~645.
- (10) Batchelor, G.K. and Shen, C., 1985, "Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold Surfaces", *J. Colloid and Interface Science*, Vol. 107-1, pp. 21~37.
- (11) 김용진, 1986, Thesis for M.S. Degree, KAIST.
- (12) Davies, C.N., 1966, *Aerosol Science*, Academic Press, New York.
- (13) Castillo, J.L. and Rosner, D.E., 1986, "Theory of Surface Deposition from a Binary Dilute Vapor-Containing Stream, Allowing for Equilibrium Condensation within The Laminar Boundary Layer", *Int. J. Multiphase Flow* (submitted).