

<論 文>

비등온 이상유동에서 원통벽면으로의 미소입자 부착에 관한 연구

정 상 현\* · 김 용 진\*\* · 김 상 수\*\*\*

(1987년 7월 6일 접수)

A Study of Submicron Particle Deposition onto Cylinder Surface in Nonisothermal Two-Phase Flow

Sang Hyeon Jeong, Yong Jin Kim and Sang Soo Kim

Key Words: Particle Transport(입자전달), Thermophoresis(열확산), Cylindrical Two-Phase Flow(원통형 이상유동), Deposition(부착), Centrifugal Effect(원심효과)

Abstract

The inclusion of thermophoresis in particle deposition studies has often been treated separately from deposition due to flow characteristics. Also previously reported experimental results on thermophoresis have been studied in the regions of relatively small temperature gradients. In this study, using real-time laser light reflectivity method, we measured the angular dependence of the deposition rates of particles to the cylindrical collector surface, which immersed in laminar flow of a hot gas suspension of small particles. And we extended the previous narrow-band results of thermophoretic deposition rates to the regions of large temperature gradients between the hot gas stream and the collector surface. Based on the obtained data, the cylinder's forward stagnation-point region is considerably enriched in particle 'phase' density owing to the compressibility effect, which leads to locally enhanced deposition while the downstream region from the stagnation point inertial force acts in the opposite direction, which tends to centrifuge particles away from the wall, thus the local deposition rates by thermophoresis are reduced.

기 호 설 명

$d_p$  : 입자직경 ( $=2R_p$ )

$D$  : 실린더 직경 ( $=2R$ )

$D_p$  : 입자확산계수

$I$  : 레이저 반사광의 강도 ( $I_0$ : 초기값)

$j''$  : 입자의 질량확산 플럭스(flux)

$m_p$  : 입자의 질량

$Le$  : Lewis 수 ( $=D_p/\alpha$ )

$Pe$  : Peclet 수 ( $=U_\infty D/D_p$ )

$Re$  : Reynolds 수 ( $=U_\infty D/\nu$ )

$Sc$  : 입자의 Schmidt 수 ( $=\nu/D_p$ )

$St$  : 물질전달에 대한 Stanton 수 ( $=-j''/(\omega_{p,\infty} U_\infty)$ )

$Stk$  : Stokes 수 ( $=2\rho_p d_p^3 U_\infty / 9\mu D$ )

\* 한국기계연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

$T$	: 절대온도
$u$	: 속도성분
$V$	: 유체 속도장
$V_s$	: 입자 속도장
$V_T$	: 열확산 속도장
$\alpha_T$	: 입자의 열확산 계수
$\kappa$	: 볼츠만(Boltzmann) 상수
$\mu$	: 점성계수
$\nu$	: 동점성계수
$\rho$	: 밀도
$\tau$	: 입자의 이완시간(= $m_p/6\pi\mu R_p$ )
$\omega$	: 입자상의 밀도(particle phase density)
$I$	: 단위 텐서(unit tensor)

### 하첨자

$g$	: 기체
$p$	: 입자
$r$	: 실린더 반경방향 성분
$w$	: 벽면
$\theta$	: 실린더 원주방향 성분

## 1. 서 론

고온의 기체-입자 유동시스템에서 미소입자의 전달 현상에 관한 연구는 연소 시스템에서의 부식과 침식(corrosion, fouling), 기체 정화장치, 그리고 광섬유 또는 반도체 재료제작 등의 광범위한 산업분야에서 뿐만 아니라, 대기오염 등의 환경문제 등에서 많이 요구되어진다<sup>(1,2)</sup>.

입자의 전달과 부착현상에 관한 종래의 연구에서는 물질전달 경계층(mass transfer boundary layer) 내에서의 입자농도의 구배에 의하여 입자가 이동된다는 농도확산(Fick diffusion) 효과에 주로 기인 된다고 하였다. 그러나 최근의 연구<sup>(3-5)</sup>에 의하면, 온도의 비균일성이 존재하는 일반적인 열 시스템에서 기체유동 속에 포함된 미소입자들(0.1~1 $\mu$ m)을 벽면으로의 부착을 일으키게 하는 결정적인 물질전달 메커니즘(mechanism)은 열확산 현상(thermophoresis: 즉, 극소 온도구배의 역방향으로 입자가 끌리는 현상)임이 실험 및 이론에 의하여 입증되고 있다. 그리고 열확산 효과는 유동 입자의 크기가 직경 15 $\mu$ m 이상까지도 현저히 작용될 수 있으며<sup>(6)</sup>, 유동조건 및 경계면의 기하학적 형상에 따라 상대적인 변화가 있다는 것을 알았다.

그런데 지금까지 열확산에 대하여 행하여진 실험적인 연구에서는 평균 정제유동의 단순한 유동조건에서, 고온가스와 고체 벽면과의 온도 차이가 최대 약 300°K 정도로써 낮은 온도구배의 영역에서의 열확산 효과에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 실제의 공학적인 문제에서 고체벽면의 기하학적 특성에 따른 유동장의 변화와 부착특성에 관한 연구, 그리고 특히 높은 온도구배에서의 열확산에 관한 연구들이 광섬유(optical fiber, optical wave guide)제작 문제에서 요구되어진다. 이런 이유로, 본 실험에서는 유동장과 입자의 부착율과의 관계에 대해 고찰하기 위하여 부착되는 고체벽면의 형상을 원통형으로 하여 비등온 유동에서 열확산에 의한 미소입자의 원주방향으로의 부착율을 측정하고, 원통 내부의 냉각장치를 이용하여 벽면과 고온가스와의 온도 차이를 크게하여(약 400~700°K), 높은 온도구배 영역에서의 열확산 효과에 대해 실험적인 연구를 확장시킴으로써 폭넓은 온도구배 영역에서의 열확산 이론의 타당성을 검토한다. 그리고 이러한 실험 결과들은, 원통주위의 미소입자 전달에 관한 종래의 Levich 등의 해와 입자의 미소한 관성의 영향을 동시에 고려한 Fernandez de la Mora<sup>(7,8)</sup> 등의 점근적인(asymptotic)이론과 비교될 것이다.

## 2. 이론적 배경

원통 주위의 층류유동에서 입자부착에 관한 종래의 이론적인 연구로는 입자의 관성을 무시할 때 Levich의 해가, 그리고 입자의 확산현상들을 무시할 수 있는 큰 입자의 경우 Langmuir 등의 해가 있다. 그러나 Peclet 수가 매우 크고 비교적 낮은 Reynolds 수의 유동에서 확산과 관성이 함께 고려되어야 한다. 입자의 농도확산과 관성의 상호 영향에 관한 이론적인 연구가 Fernandez de la Mora<sup>(8)</sup> 등과 Gupta 등<sup>(9)</sup>에 의해 행하여졌다. 이러한 이론들을 열확산을 고려한 비등온 기체유동으로 확장시킬 때 정상상태에서 입자에 대한 보존 방정식은 다음과 같게 된다.

$$\nabla \cdot (\omega_p V_p) = 0 \quad (1)$$

$$(V_p \cdot \nabla) V_p = -\frac{1}{\omega_p} \nabla \cdot P_p + \frac{V - V_p + V_T}{\tau} \quad (2)$$

여기서 입자의 분압 텐서(tensor),  $P_p \approx I\omega_p \kappa T/m_p$  이다. 식 (2)에서 Einstein 관계식( $D_p = \kappa T \tau / m_p$ )을 이용하면 입자의 속도장,  $V_p$ 는

$$V_p = V + V_T - D_p (\nabla \ln \omega_p) - \tau (V \cdot \nabla) V \quad (3)$$

가 된다. 그런데 낮은 Reynolds 수의 실린더 유동에서

실린더 표면 근처의 고온 유체의 속도장,  $V$  은

$$\frac{u_r}{U_\infty} = -\frac{1}{2} \eta^2 A \cos \theta \quad (4)$$

$$\frac{u_\theta}{U_\infty} = \eta A \sin \theta \quad (5)$$

로 주어진다. 여기서  $\eta \equiv \frac{r}{R} - 1$  이며  $A$  는 유동의 Reynolds 수의 값에 따라 정해지는 상수이다. 따라서 식 (4), (5)를 식 (3)에 대입하여  $\theta$  에 관한 고차항과  $\theta$  방향으로의 열확산 항을 무시할 때,  $r$  및  $\theta$  방향의 각각의 속도 성분을 연속방정식 (1)에 넣어 전개하면

$$\begin{aligned} (APe)^{-1} \frac{\partial^2 \omega_r}{\partial \eta^2} + \alpha_r \omega_r (APe)^{-1} \frac{\partial^2 \ln T}{\partial \eta^2} \\ + \left[ \eta^2 \left( \frac{1}{2} \cos \theta - \sin^2 \theta Stk \right) - \alpha_r (APe)^{-1} \right. \\ \left. \frac{\partial \ln T}{\partial \eta} \right] \frac{\partial \omega_r}{\partial \eta} - \eta \sin \theta \frac{\partial \omega_r}{\partial \theta} - \omega_r \alpha_r (AU_\infty Pe)^{-1} \\ \frac{\partial \ln T}{\partial \eta} = 2\omega_r Stk \eta \sin^2 \theta \quad (6) \end{aligned}$$

이 된다. 위의 식 (6)으로부터 원통벽면 주위에서 입자의 농도(수밀도)분포를 계산할 수 있다. 여기서 온도구배가 없는 경우, 그리고 입자의  $Pe \gg 1$  이므로 분자확산항도 무시할 경우 식 (6)은 일차 편미분 방정식으로 되기 때문에 해석적으로 풀 수 있다. 구형(spherical) 좌표계에서, Fernandez de la Mora 등<sup>(1)</sup>에 의해서 풀 과정을 원통형(cylindrical) 좌표계에 적용시켜 풀린 원통 벽면에서의 입자의 농도 구배는

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = (APe)^{1/3} \frac{\omega_{r,0} g^{-1/3}}{\Gamma(4/3)} \psi(Stk, \theta) \quad (7)$$

가 된다. 여기서 함수  $\psi(Stk, \theta)$  는

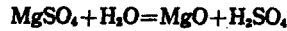
$$\begin{aligned} \psi(Stk, \theta) \equiv \sin^{1/2} \theta \exp(3 Stk \cos \theta) \\ \left[ \int_0^\theta \sin^{1/2} \theta' \exp(3 Stk \cos \theta') d\theta' \right]^{-1/3} \quad (8) \end{aligned}$$

로 된다. 식 (7)과 (8)은  $Stk$  와 값이 영인 경우 Levich 의 해와 일치된다. 이러한 근사해는  $Stk < 0.04$  인 경우 완전해와 잘 일치한다.

### 3. 실험

원통형 표적에 대하여 열확산에 의한 입자부착율의 변화를 광학적으로 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 1에서와 같다. 일반적으로 입자부착율의 측정방법으로는 무게측정법(gravimetric method), 광반사법(light reflectivity method), 열전대 응답법(thermocouple response technique) 등이 있는데, 본 실험에서는 실시간(real time)으로 부착율을 측정할 수 있는 방법인

레이저 광반사법을 사용하여 입자의 초기부착율(initial deposition rates)에 대해 고찰한다. 고온의 연소기체를 수직 방향으로 공급하는 버어너는 고온에서 견딜수 있도록 두랄루민을 사용하여 제작 하였으며, 직경 30 mm 판에 직경 1.8mm, 길이 20mm 의 스테인레스 튜우브를 채워 버어너 상단에서 흐름이 층류(laminar flow)인 평면화염(flat flame)을 만들어, 화염면의 중심부에서 반경 방향으로의 온도분포가 일정하게 하였다. 본 실험에서 사용되는 미소입자는 산화 마그네슘(MgO)인데, 이것은 고농도의 황산 마그네슘(MgSO<sub>4</sub>) 용액을 초음파 입자 발생기(ultrasonic nebulizer)에 넣고 R.F. Generator로부터 전기적진호(1.7MHz, A.C. 24V 20w max)를 황산마그네슘 용액과 접촉하고 있는 수정진동자에 공급하여 초음파 진동으로 미소한 황산 마그네슘(MgSO<sub>4</sub>) 분말액적을 발생시킨뒤, 질소가스에 의하여 버어너로 공급된다. 이때 미소 액적들은 고온의 화염대를 통과 하면서 화학반응



에 의하여 산화 마그네슘(MgO)의 미소한 고체입자가 발생한다. 산화 마그네슘(MgO) 입자를 사용한 이유는 응용온도가 높아 본 실험영역의 온도범위에서 고체상태의 입자로 존재할수 있어 광반사 특성을 일정하게 하며, 또한 보일러 등에서 다른 물질에 의한 부식을 막기 위한 첨가제로 실제 연소가스 속에서 최종적으로 기관의 표면에 부착되는 물질의 일종이기 때문이다.

연소가스 속에 포함된 미소입자가 부착될 표적은 길이 300mm, 직경 15.8mm 의 스테인리스 판(stainless tube)으로 만들어 졌다. 표적의 온도조절을 위하여 표

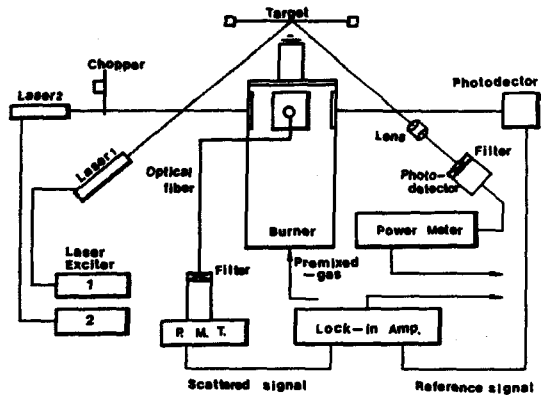


Fig. 1 Experimental arrangement(schematic) for laboratory studies of particle deposition rate processes using the laser-light reflectivity method

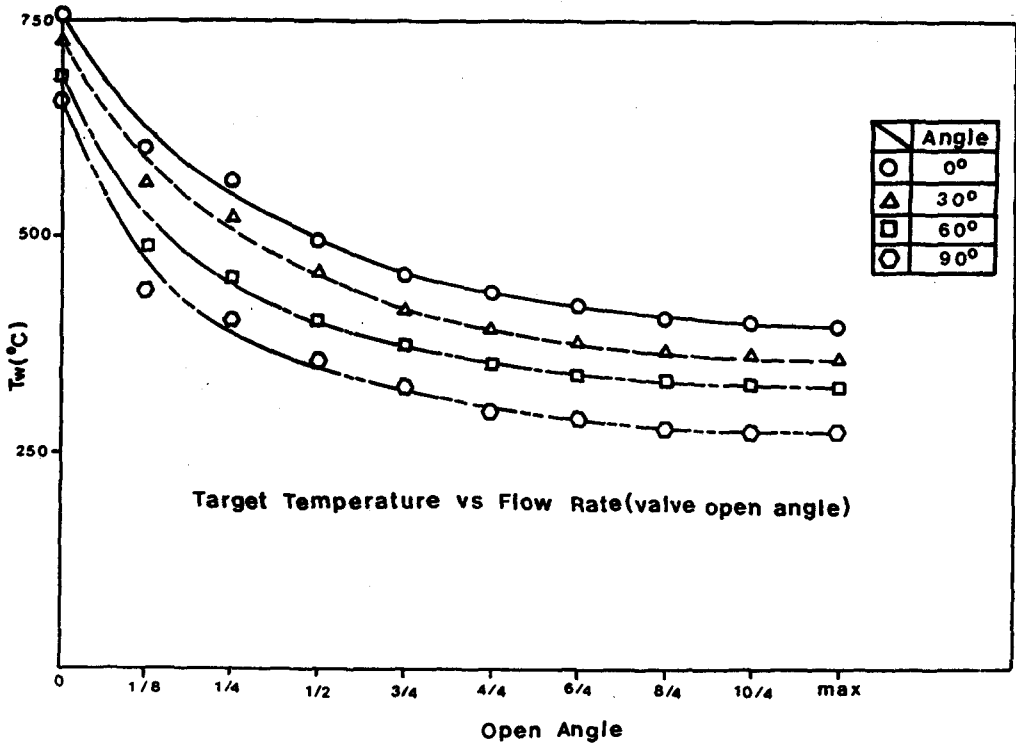


Fig. 2 Distribution of target wall temperature as a function of opening angle of valve (flow rate of cooling air, 0; closed, max; full opened) for various angular positions of the target

적내부로 압축공기를 불어넣어 이 압축공기의 유량에 대한 각각의 표적 온도를 측정하여 표적의 온도와 압축공기의 유량과의 관계를 보정하였다. 또한 여기서 압축공기의 유량은 압축공기가 나오는 유량밸브(3/8 inch, needle valve)의 개폐 각도로 나타내어 결국 표적의 온도는 밸브 개폐각도에 의해 나타내어진다. 표적의 온도와 밸브 개폐 각도와의 관계가 Fig. 2에 나타내어져 있다. 이 그림에서 밸브의 개폐각이 0인 경우는 밸브를 완전히 닫았을 때를 의미하고, max인 경우는 완전히 열려있을 때를 의미한다.

실험중에 측정하여야 할 온도는 표적의 벽면온도와 표적 주위의 가스온도이다. 연소가스의 온도는 Pt-Pt/13Rh의 열전대와 이것으로부터 발생하는 기전력(e.m.f.)을 보정해 주는 회로가 내장된 디지털 온도계(YEW, Type 2575)를 사용하여 측정하였고, 표적의 온도는 정체점(stagnation point)으로부터 원주방향으로 30° 간격으로 Chromel-Alumel 열전대(K-type)를 용접시켜 측정하였다.

연소가스속에 포함된 입자의 수밀도(number density)

변화율은 레이저 광산란법에 의하여 기록하였으며, 그리고 원통의 각 벽면에서의 입자부착율은 레이저 광반사법에 의하여 측정하였다. 측정되어진 광산란량에 의한 입자의 밀도 변화율과 광반사량에 의한 부착율은 4-Pen Strip Chart Recorder에 의해 동시에 기록되어진다.

#### 4. 실험결과 및 이론적 고찰

##### 4.1 높은 온도구배에서 열확산 실험

실험결과는 앞의 실험방법에 따라 변수로 작용되는 연소가스의 온도( $T_s$ ) 및 표적의 벽면온도( $T_w$ )로 나타내어지는 광반사율의 변화 및 입자밀도의 변화로부터 얻어지는 부착율의 변화로 나타내어진다. 입자부착 실험의 결과, 온도구배와 입자부착율( $-[dI/dt]/I_0$ )과의 관계가 Fig. 3에 나타내어져 있다. 그림에서 보는 바와같이 입자부착율과 무차원 온도구배인자( $(T_s - T_w)/T_s$ )와의 관계가 원주주위 0°, 30°, 60°, 90°의 4위

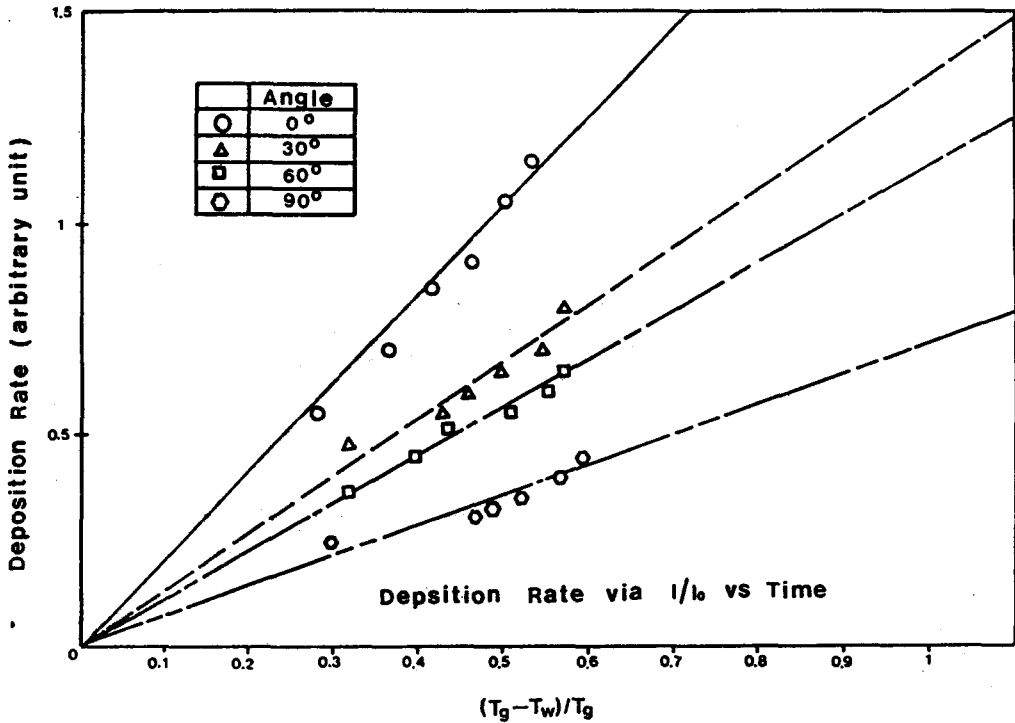


Fig. 3 Experimental and predicted deposition rate of submicron particle for various angular positions of the target

치에서 모두 선형적임을 알 수 있고, 결국 매우 큰 온도차( $T_g - T_w$ )가 존재하는 영역에서도 입자의 부착율은 벽면온도와 가스온도 사이의 온도구배에 비해한다는 열확산 부착이론을 확인할 수 있다.

본 실험에서 부착되어진 MgO 입자들의 크기분포는 S.E.M. 전자 현미경에 의해서 5,000배로 확대해서 관찰한 결과, 평균 직경이 약  $0.5\mu\text{m}$ , 최대 직경  $1.2\mu\text{m}$ 을 가지는 구형(spherical) 입자들이었다. 일반적으로 기체 유동속의 입자전달 문제에서 중요시되고 있는 무차원 그룹으로 Reynold 수, Peclet 수, Schmidt 수, Stoke 수 등이 있다. 본 실험조건에서  $Pe$ 와  $Sc$ 의 값은  $10^7$ ,  $10^6$  정도로 Brownian 확산은 무시될 수 있으며,  $Stk$ 의 값은 0.004의 값을 가지는데, 이는 원통 주위에서 관성 자체만의 효과에 의한 입자부착을 나타내는  $Stk$ 의 임계값인 0.25 보다 훨씬 이하의 값이다. 따라서 온도구배가 존재하지 않을 경우 벽면으로의 입자 전달은 거의 없을 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 본 실험 영역에서 입자부착율의 데이터를 외삽(extrapolation)시킨 결과, 온도구배가 존재하지 않을 경우 입자 부착율은 영(zero)으로 수렴한다.

#### 4.2 원주방향에 따른 열 및 입자 전달특성

유동장에 의한 입자전달 효과를 알아보기 위하여, 벽면의 정제점( $\theta=0^\circ$ )으로부터 원주방향으로의 거리에 따른 입자부착율의 관계가 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내어져 있다. 이 그림에 의하면 입자의 부착율은 원통의 정제점으로부터 원주방향으로 멀어질수록 감소되고 있다. 순수한 분자 확산만을 고려한( $Stk=0$ ) 경우 Levich의 해에 의하면 입자부착율은 정제점으로부터 원주방향의 증가에 따라 위로 볼록한 곡선으로 서서히 감소된다. 이 분포곡선은 열전달에 대하여 본 실험 조건과 같이 원통을 지나는 낮은 Reynolds 수의 유동에서 E. R.G. Eckert 등<sup>(12)</sup>에 의해서 연구되어진 원통벽면 주위의 국부(local) Nusselt 수의 분포와 일치하게 되는데, 본 실험조건에서 국부 온도분포는 국부 열전달과 비례하므로 Fig. 6의 온도 분포 곡선은 위의 결과와 잘 일치한다. 따라서 관성이 거의 없는( $Stk=0$ ) 물질 전달일 경우 열 및 물질 전달에 관한 종래의 레이놀즈 유사(analogy)가 성립된다. 그러나 Fig. 4와 Fig. 5에서 보는바와 같이 입자전달에 대한 실험결과, 입자전

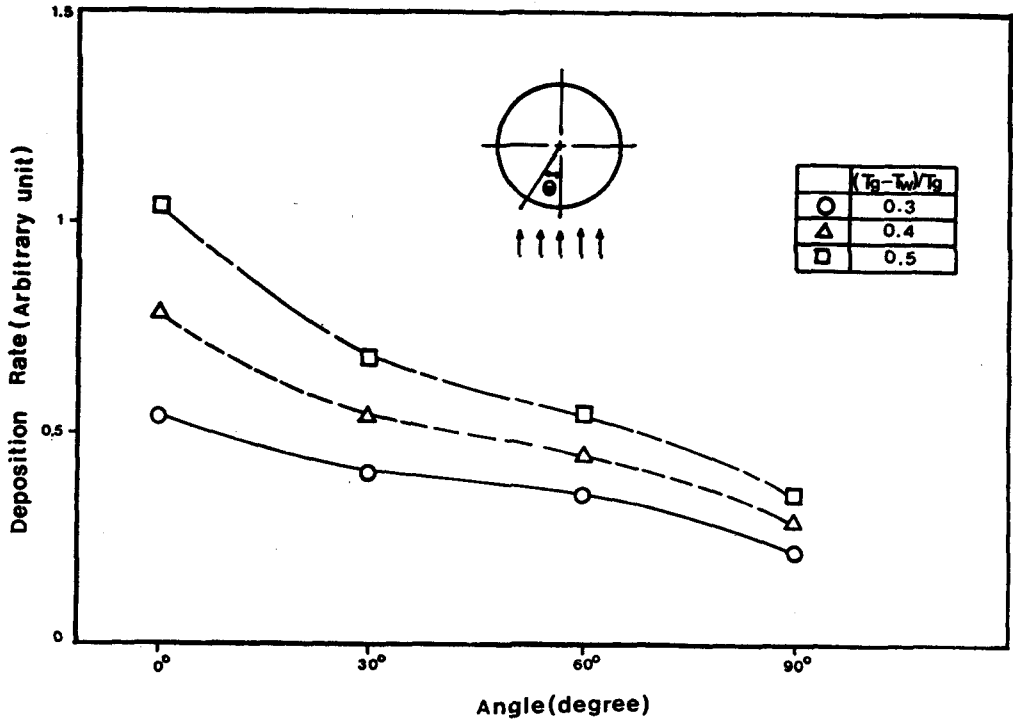


Fig. 4 Effect of temperature gradient on particle deposition to a cylinder. Local deposition rates vs angle from stagnation point

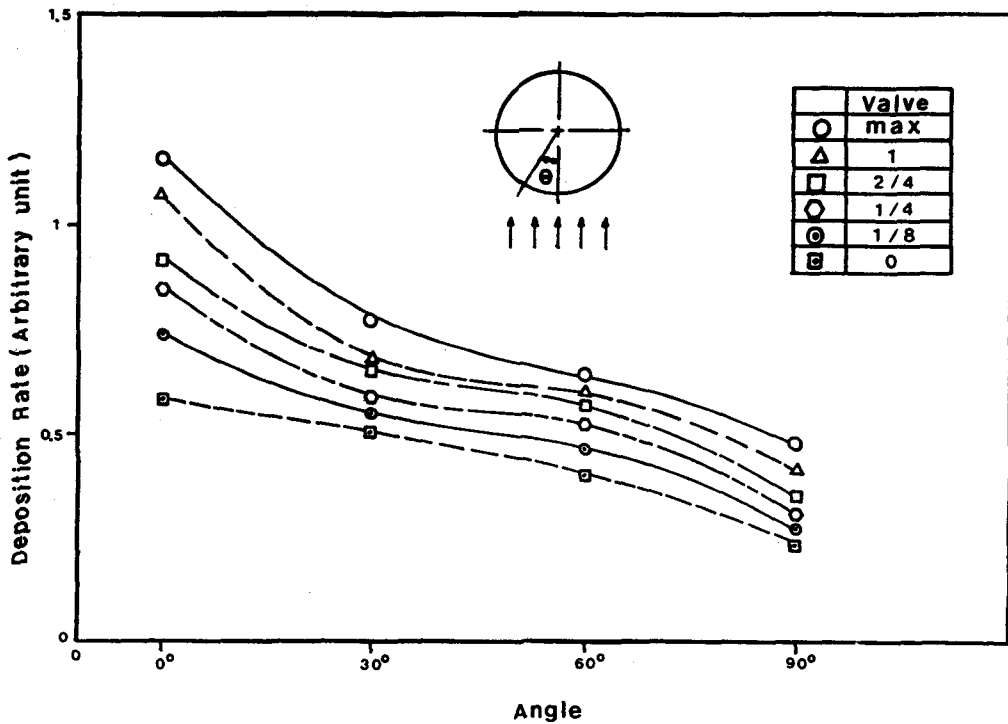


Fig. 5 Angular deposition rates for various opening angles of valve (flow rates of cooling air)

달을은 정체점 부근에서 매우 증가 되었으며, 이는 열 및 물질전달에 관한 일반적인 상사법칙에서 벗어난다. 여기에 관한 이유는, 열전달의 경우 전달의 주된 메커니즘이 분자확산에 의해서 기인되지만 입자전달인 경우 입자의 크기가 분자의 크기보다 약 1,000 배 이상으로 크기 때문에 분자운동에 의한 물질전달 보다 열확산에 의해서 주로 전달되기 때문이라고 생각된다.

2장에서 이론적인 결과, 먼저 온도구배가 없는 경우, 입자의 미소한 편성의 영향을 고려한 근사해에서 원통 벽면 주위의 입자의 농도 분포는 식 (7)과 (8)로부터 함수  $\phi(Stk, \theta)$ 에 의해서 결정된다. 구(sphere) 표면에서  $\theta$ 의 변화에 대한  $\phi(Stk, \theta)$ 의 그래프에서  $Stk$  값이 클수록 정체점 부근에서의  $\phi(Stk, \theta)$ 의 값은 다른 부분에 비해서 큰 값을 가진다. 따라서 원통형 유동장에서도 입자의 농도 구배는 편성이 클수록 정체점 부근에서 증가될 것이다. 여기서 벽면온도가 유동 기체의 온도보다 낮은 비등은 입자유동인 경우 (식 (6)의 전체해 (full solution)) 입자의 농도는 열확산 효과에 의해 벽면 근처에서 더욱 조밀하게 될 것이라고 사료된다. 따라서, 본 실험의 조건에서 입자의 편성이 입계값에 비해서 비록 작다 ( $Stk \sim 10^{-3}$  단위)고 해도

정체점 부근에서의 입자의 농도구배는 매우 증가되며 원주방향으로 갈수록 서서히 감소될 것이다. 이때, 벽면주위에서 급격한 온도 구배가 존재하므로 열확산에 의하여 입자는 벽면으로 끌리게 되며, 동일한 온도구배를 가질 경우, 입자의 농도가 매우 조밀한 정체점 부근에서 입자부착율은 상대적으로 증가된다.

열확산 이론에서, 열확산에 의한 원통주위 벽면으로의 입자의 Mass Flux,  $j_{p,w}$ 는

$$-j_{p,w} = \omega_{p,w} (\alpha r D_p)_w (\partial \ln T / \partial r)_{r=0} \quad (9)$$

로 표현되며, Prandtl 수가 약 0.71 일때 입자전달에 대한 무차원 극부 Stanton 수,  $St_w$ 는

$$St_w = -j_{p,w} / (\omega_{p,w} U_w) = -0.705 (\alpha r Le)_w \quad (10)$$

$$Re^{-1/2} \left( \frac{T_w}{T_\infty} - 1 \right) \cdot \frac{\omega_{p,w}}{\omega_{p,\infty}}$$

로 된다. 여기서,  $\omega_{p,w}$ 는 Brownian Sublayer Edge에서의 입자농도이며, 식 (7)로부터 이값은 정체점 부근에서 최대값을 가지게 된다. 그리고 원주방향으로 감에 따라 원심력이 입자에 작용되어 입자의 Brownian Sublayer가 밖으로 밀려나고 결과적으로 입자 부착율은 점점 감소된다. 그러나 Fig. 6에서 보는바와 같이 온도구배가 낮은 경우(냉각공기의 유량밸브를 닫았을

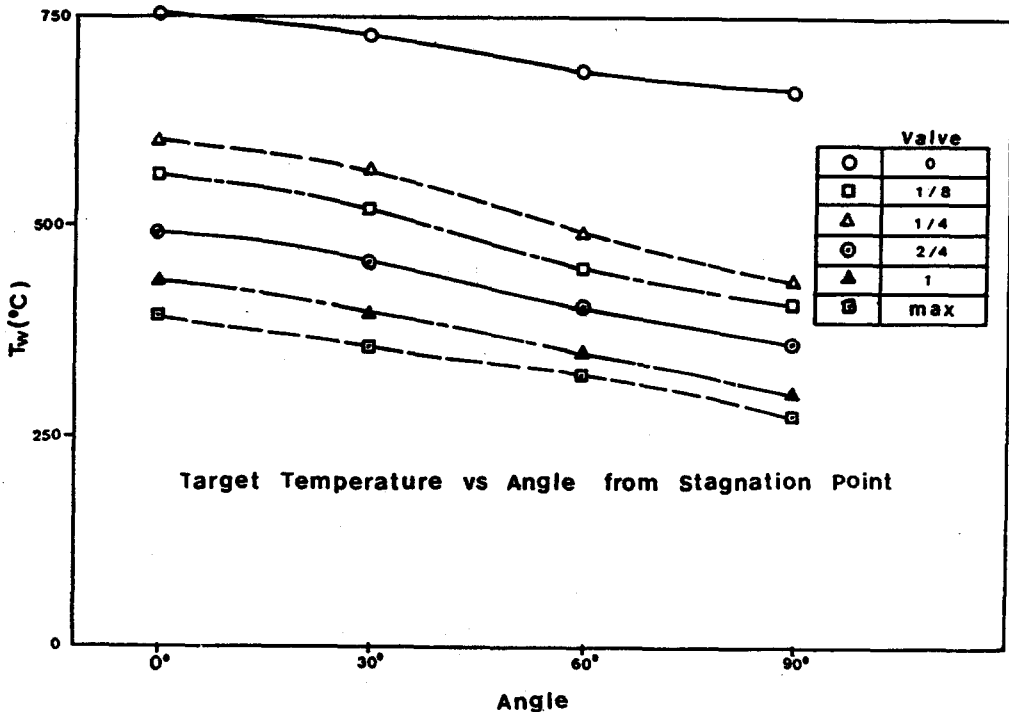


Fig. 6 Local heat transfer rates to a cylinder in cross flow. Local temperature vs angle from stagnation point

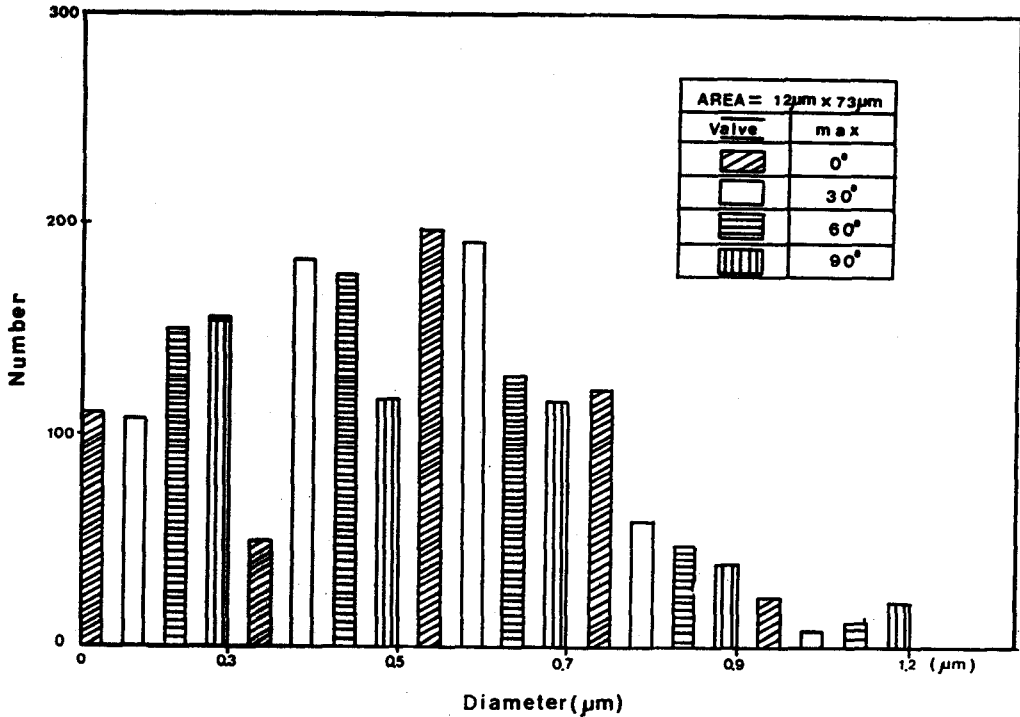


Fig. 7 Number distribution of the deposited MgO particles for various angular positions

경우), 원주방향으로의 농도차이가 존재 하더라도 열확산력(thermal force)이 미소하기 때문에 입자부착률의 원주방향으로의 변화가 거의 없다.

그리고 Fig. 7의 부착된 입자의 크기 분포도에서 보면, 정체점 부근에서 부착된 입자들의 크기가 다른 부분의 입자들에 비하여 상대적으로 크다. 이상의 실험적 자료로부터, 입자의 관성과 유동장의 특성은 미소한 입자인 경우에도 입자부착에 밀접한 관계에 있다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

비등은 원통형 유동장에서의 미소입자에 대하여 광반사법에 의한 입자부착률의 실험결과, 다음의 결론을 얻을 수 있다.

(1) 종래의 낮은 온도구배 영역에서의 실험을 본 실험에서의 높은 온도구배영역으로 확장시킨 결과, 열확산에 의한 미소입자의 부착율은 온도구배인자에 대하여 선형적인 비례 관계를 가지며, 고온기체의 유동에서 벽면으로의 미소입자의 주된 부착기구는 열확산 효과임을 알 수 있다. 이런 결과는 최근 Rosner, Batch-

elor<sup>(10,11)</sup> 등에 의해서 유도된 이론적인 결과와 일치함을 보인다.

(2) 정체점 부근의 유동장에서 입자의 관성은 질량경계층 주위에 입자의 농도를 증가시키는 압축(compressibility) 효과에 기인하여 열확산에 의한 입자부착률을 더욱 증가시키게 되며, 이와 반대로 외곡면을 가지는 벽면주위의 유동장에서는 유선의 곡률의 영향으로 입자의 원심력이 작용하여 벽면으로부터 멀어지게 하는 "Centrifugal Blowing Effect"로 되어 입자의 부착율을 감소시킨다.

이와 같이 경계면의 기하학적인 형상은 유동장에 영향을 미치게 되고 이로 인해 벽면으로의 입자의 부착율은 크게 영향을 받게 된다. 따라서 열확산에 의한 입자부착율은 주변의 수송기체의 유동장과 Stokes 수를 변화시키는 입자의 크기에 따라 밀접한 관계가 있다. 앞으로 열확산과 유동장의 상호작용에 대해 더욱 발전된 데이터를 얻기 위해서는 여러가지 기하학적인 형상과 유동장(난류효과, 벽면의 separation 등)을 고려하고, 그리고 입자가 어느정도 큰 경우(super critical Stokes 수 영역)에서 열확산 현상과 다른 부착 메커니즘(inertial impaction 등)과의 상호 관련성 등에 대해 더욱 연구가 요구되어 진다.



## 참고 문헌

- (1) Moore, M.J. and Crane, R.I., 1973, "Aerodynamic Aspects of Gas Turbine Blade Corrosion", *Deposition and Corrosion in Gas Turbines*, edited by Hart, A.B. and Cutler, A.J.B., Ch. 4, John Wiley & Sons.
- (2) Walker, K.L., Harvey, J.W. Geyling, F.T. and Nagel, S.R., 1980, "Consolidation of Particulate Layers in the Fabrication of Optical Fiber Preforms", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 63, No. 1~2, pp. 96~102.
- (3) Roener, D.E. and Kim, S.S., 1984, "Optical Experiments on the Thermophoretically Augmented Submicron Particle Deposition from 'Dusty' High Temperature Gas Flows", *The Chem. Engn. J.*, Vol. 29, pp. 147~157.
- (4) 김상수·장혁상, 1985, "열 확산에 의한 미소입자의 부착현상에 관한 실험적 연구", *대한기계학회논문집*, 제 9권, 제 3호, pp. 379~386.
- (5) 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.
- (6) Kim, S.S. and Kim, Y.J., 1986, "Experimental Studies of Particle Deposition by Thermophoresis and Inertial Impaction from Particulate High Temperature Gas Flow", Presented at the 4th Miami Int. Symposium on Multiphase Transport, Dec. 15~17.
- (7) 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
- (8) Fernandez de la Mora, J. and Rosner, D.E., 1982, "Effect of Inertia on the Diffusional Deposition of Small Particles to Spheres and Cylinders Low Reynolds Numbers", *J. Fluid Mechanics*, Vol. 125, pp. 379~395.
- (9) Gupta, D. and Peters, M.H., 1986, "On the Angular Dependence of Aerosol Deposition onto Spheres", *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 110, No. 1, pp. 286~291.
- (10) Gököglu, 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.
- (11) Batchelor, G.K. and Shen, C., 1985, "Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold Surfaces", *J. Colloid and Interface Science*, Vol. 107, No. 1, pp. 21~37.
- (12) Eckert, E.R.G. and Soehngen, E., 1952, "Heat Transfer in Laminar Region of Air Flow around Cylinders of Arbitrary Cross Section", *Trans. A.S.M.E.*, Vol. 74, p. 34.