

## 광학적 방법에 의한 연소 개스에 포함된 알칼리 금속 염의 부착에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study of the Deposition of Inorganic Salts from Seeded Combustion Gases by Optical Methods.

김 상 수\* · 우 성 구\*\*  
Sang Soo Kim · Seong Gu Woo

#### Abstract

This study is focused on deposition process leading to inefficiency and hot corrosion in fossil-fuel-fired furnaces and engines. An improved understanding of the coupled thermodynamics, kinetics, and transport processes governing the deposition rate of inorganic oxides and salts from hot gases containing these compounds can suggest more efficient test strategies and control measures. Accordingly, an optical re-evaporation method for accurately measuring the growth rate of deposits under laboratory burner conditions has been developed.

To demonstrate the technique and provide data suitable for theoretical model development, a deliberately simple chemical system and target geometry are used. Potassium sulfate( $K_2SO_4$ ) is introduced into a premixed propane-air flat flame at atmospheric pressure. The growth rate of  $K_2SO_4$  on an electrically heated Pt ribbon is measured by re-evaporation technique.

기 호 설 명			
$C_{mh}$	: 가변 물성치 효과에 대한 상관계수	R	: 저항 혹은 연소기 노즐에 평행한 좌표축
$C_p$	: 정압비열	T	: 절대 온도
$D_i$	: 화학종 i의 Fick확산 계수	X	: 벽면에 평행한 좌표축
$F_i(\text{Soret})$	: 열 확산에 대한 보상계수	Y	: 벽면에 수직인 좌표축
$F_i(\text{ncp})$	: 비 일정 물성치에 대한 보상 계수	Z	: 연소기 노즐에 수직인 좌표축
$J_i'$	: 화학종 i의 질량 확산 속	그리이스 문자	
$Le_i$	: Lewis 수( $D_i/(\lambda/(\rho C_p))$ )	$\alpha_i$	: 열 확산 계수
$-\dot{M}_w'$	: 전체 부착 속	$\lambda$	: 혼합 가스의 열 전도 계수 또는 파장
$Nu_n$	: 열 전달에 대한 Nusselt 수	$\rho$	: 밀도
$Nu_m$	: 질량 전달에 대한 Nusselt (Sherwood) 수		

\*정회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*삼성정밀(주)

$\tau_i$  : thermophoretic 변수  
 $\omega_i$  : 화학종 i의 질량비

첨 자

cp : 일정 물성치  
 e : 경계층 외부  
 i : 화학종 i  
 R : 기준점  
 s : Shunt 저항  
 w : 가스와 응착물질의 경계에서 가스면

I. 서 론

저순도의 원유를 사용하여 연소불 행할 경우 원료에 포함된 무기불순물은 터어빈브레이드, 보일러 등의 표면에 무기염(inorganic salt), 재(ash) 등의 형태로 부착된다. 부착된 무기염, 재 등은 오염(fouling), 부식(corrosion) 등의 문제를 야기시킨다. 한 예로 액체연료가 황을 포함하고 흡입되는 공기중에 NaCl이 존재할 때 터어빈브레이드 표면에 형성된  $Na_2SO_4$ 에 의해 고온 부식 현상외에도 큰 입자의 부착을 촉진시키는 아교와 같은 역할을 한다.<sup>8)</sup> 이러한 문제의 해결방법으로 a) 연료의 사전처리(fuel pretreatment), b) 연료에 첨가물을 주입하는 방법(fuel additives), c) 부착조건을 변화시키거나, d) 부식에 강한 재료의 개발등을 고려할 수 있다. 그러나 근본적으로 문제를 해결하기 위하여는 무기염등의 형성, 부착(deposition)에 관한 주된 메카니즘에 대한 이해가 필요하다.

부착에 관한 종래의 연구는 Brown,<sup>(1)</sup> Durie,<sup>(2)</sup> Goren,<sup>(3)</sup> Hedley,<sup>(4)</sup> Kohl,<sup>(5)</sup> Rosner,<sup>(6-10)</sup> Vermes<sup>(12)</sup> 등에 의하여 행하여 졌으며 이들의 연구에 의하면 부착 메카니즘은 입자의 크기에 따라 Fick diffusion, 열확산, 와류확산, 관성충돌 등에 의한 것으로 알려져 있다. 증기 부착에 관한 이론 전개는 Rosner<sup>(8)</sup> Spalding<sup>(11)</sup> 등에 의하여 행하여 졌다. Rosner는 Fick diffusion과 열확산을 동시에 고려하여 질량 전달 경계층 내에서 화학반응을 무시하고 층류, 정상류인 경우 화학종의 벽면으로의 질량확산속(diffusive mass flux)  $j''_{i,w}$ 에 관한

식을 유도하였다. 이 이론을 일명 Chemically Frozen Boundary Layer Theory라고도 한다(그림 1). 그림 1의 표면에서 화학종의 전체 질량속  $M''_{i,w}$ 는 확산항과 대류항의 합이나 Rosner는 확산항이 대류항에 비해 상당히 크므로 확산항만을 고려하였다.

$$-j''_{i,w} = \frac{(D_i \rho)_e}{L} \cdot F_i(\text{Soret}) \cdot Nu_m \cdot [(\omega_{i,e} - \omega_{i,w}) + \tau_i \cdot \frac{F(\text{ncp})}{F_i(\text{Soret})} \cdot \omega_{i,w}]$$

$$\tau_i = \alpha_{i,w} \cdot (Le_{i,w})^{0.4} \cdot \left( \frac{T_e - T_w}{T_w} \right)$$

$$Le_i = D_i / \{ \lambda / (\rho C_p) \}$$

$$F(\text{ncp}) = \left( \frac{Le_{i,w}}{Le_{i,e}} \right)^{0.6} \cdot \frac{C_{p,e}}{C_{p,w}} \cdot \frac{1}{C_{m,h,i}}$$

$$C_{m,h,i} = \frac{(Nu_m / Nu_{m,cp})_i}{(Nu_h / Nu_{h,cp})}$$

부착과정에서 그 이상의 온도에서는 부착이 일어나지 않는 온도분 노점(dew point)이라 정의한다. Rosner의 방정식을 고려하면 노점에서 화학종의 경계층 외부와 부착면에서의 질량비는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\omega_{i,w}}{\omega_{i,e}} = \frac{1}{1 - F_i(\text{ncp}) \cdot \frac{\tau_i}{F_i(\text{Soret})}}$$

즉, 노점은 Fick diffusion과 열확산이 평형을 이루는 점이 된다.

부착에 관한 실험은 Hedley, Brown, Rosner 등에 의하여 행하여 졌다.<sup>4,9,10)</sup> Hedley, Brown 등이 사용한 실험방법은 gravimetric 방법으로, 금속 표면을 연소가스 내에 장시간(약 10시간) 노출시킨 후 금속표면의 무게를 측정함으로써 부착율을 계산하였다. 이 방법은 장시간 측정에 의한 실험조건의 불안정성 때문에 정확한 자료를 얻기 힘들었고, 신속하게 자료를 구할 수 없었다. 최근에 Rosner에 의해 광학적 방법을 이용하여 부착율을 측정하는 몇가지 방법이 개발되었다.<sup>7)</sup> 본 연구는 이 방법중의 하나인 재 증발법(re-evaporation method)을 사용하여 금속표면으로 증기가 부착되는 경우에 Fick diffusion과 열

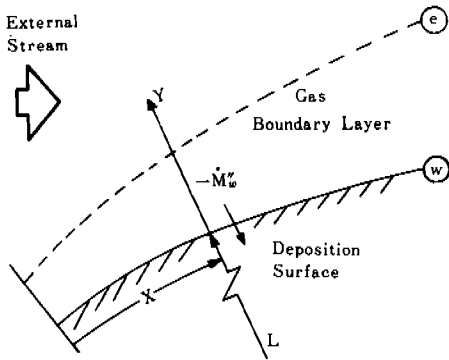


Fig. 1 Diffusion Boundary Layer

확산이 부착에 미치는 영향을 실험적으로 평가하였다. 이를 위하여 외류 확산과 관성층물에 의한 금속표면(이하 표적이라고 한다)으로의 부착을 피할 수 있는 모델을 선정하여 실험을 행하였다.

## 2. 실험

### 2-1 실험 변수

본 실험의 실험 변수는 연무체 상태로 연소기로 주입되는  $K_2SO_4$  수용액(100% 포화용액과 50% 포화용액)의 연소기 내에서의 밀도, 표적 주위의 개스온도, 표적온도, 표적에서 부착물 제거시 발생하는 emission line의 강도 등이다.

그림 2는 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 실험시  $K_2SO_4$  수용액의 농도를 선택하고 프로판, 산소, 질소가스의 유량, 가스온도,

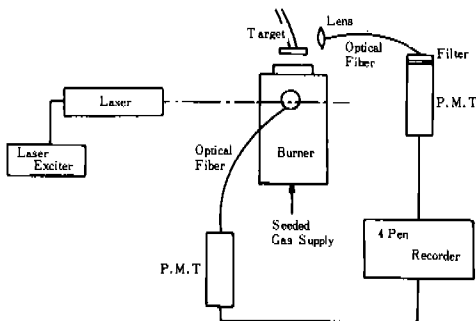


Fig. 2 Schematic of Experimental Arrangement

연무체 발생장치의 출력을 일정하게 유지하면서, 표적 주위에서 정상류, 층류조건을 만들어 표적 온도 변화에 따른 부착물의 변화를 재 증발법으로 측정하였다.

### 2.2 연소기와 가스 공급장치

그림 3은 연소기의 단면도이다. 연소기의 노즐은 내경 18mm인 실린더 내에 외경 1mm, 내경 8mm인 스테인레스 튜브를 사용하여 honey comb과 같은 형태로 제작하였다. 연소기로 주입되는 연무체의 농도를 광산란 방법으로 측정하기 위해 연소기 상단에 90° 간격으로 직경 4.7mm인 4개의 구멍을 만들어 이들 중 동일 직선상에 있는 2개의 창으로 레이저 광선을 통과시키고 나머지 구멍은 광섬유 튜브를 끼웠다. 연소기로 주입되는 가스 공급장치는 그림 4에 나타나 있다. 연소기로 주입되는 가스는 프로판, 산소, 질소의 혼합가스이며, 공급되는 가스는 압력조절기, 유량계를 거쳐 혼합기에서 혼합되어 연소기로 보내어진다. 화염의 형성은 그림 4의 프로판, 산소, 질소(1), 질소(2) 유량계를 조절하여 평판화염을 형성시켰으며 luminous zone과 노즐 상단의 거리는 약 1mm 정도이다. 이때 질소(3)은 연무체

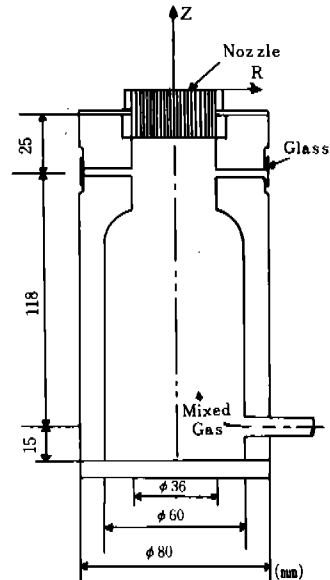


Fig. 3 Cross-Section(Side View) of Burner

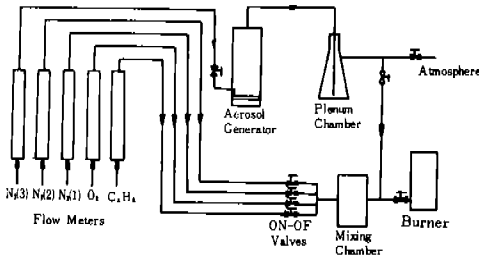


Fig. 4 Schematic of Gas and Aerosol System to Burner

발생장치로 보내어져 연무체 운반기체의 역할을 한다. 실험 수행시 화염을 안정시키기 위하여 질소(2)와 질소(3)의 유량을 같게하여 측정을 전후하여 3-way valve를 통하여 질소(2)와 질소(3)을 교대로 사용한다. 실험시 프로판의 유량은 240 cc/min, 산소의 유량은 1650cc/min, 질소(1)의 유량은 3000cc/min, 질소(2), 질소(3)의 유량은 1820cc/min으로 하였다.

2.3 연무체 발생장치

그림 5는 초음파 연무체 발생장치 (ultrasonic nebulizer)의 개략도이다. 초음파 연무체 발생장치는 내경 41mm, 길이 360mm인 유리실린더 부분과, 압전기 효과 (piezoelectric phenomena)를 이

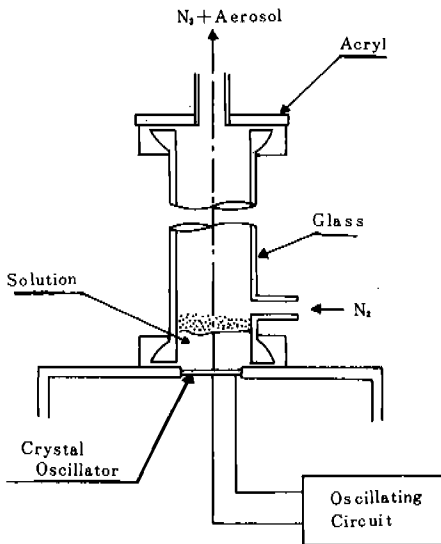


Fig. 5 Aerosol Generator

용하여 수정 진동자를 발진시키는 수정 발진 회로로 구성되어 있다. 수정 진동자의 공진주파수는 1.7 MHz이다. 실험시 연무체 발생장치에서 발생한 연무체는 유입된 질소에 의해 plenum chamber로 보내어 진다. Plenum chamber에서 상대적으로 큰 입자는 바닥에 남게되고, 작은 입자만이 질소에 실려 프로판, 산소, 질소와 함께 연소기로 공급된다.

2.4 금속표적과 온도 측정장치

금속 표면으로 사용되는 금속은 얇은 백금판 (넓이 5mm, 길이 18mm, 두께 0.127mm)이다. 그림 6에 나타나 있는 바와 같이 표적은 관성충돌에 의한 부착을 피할 수 있도록 연소가스 흐름에 평행으로 위치하였다. 표적 지지대에 부착된 스프링은 표적에 적절한 장력을 주어 고온에서 표적이 항상 평면을 유지하도록 하였다. 표적 상단의 중심점을 기준으로 4mm 간격으로 두가닥의 백금선(지름 0.127mm)을 접용접 하여 두 점사이의 전위차를 측정함으로써 일정한 전류가 흐를 때의 저항을 계산하여 온도를 구하는 저항 온도 측정법으로 표적온도를 구하였다. 저항 온도 측정법은 그림 7과 같은 회로를 이용하였다. 연소가스 온도는 Pt-Pt 13%Rh 열 전대 온도측정기를 이용하여 측정하였으며, 이송장치는 cathetometer를 이용하였는데 0.01mm간격까지 이송할 수 있다.

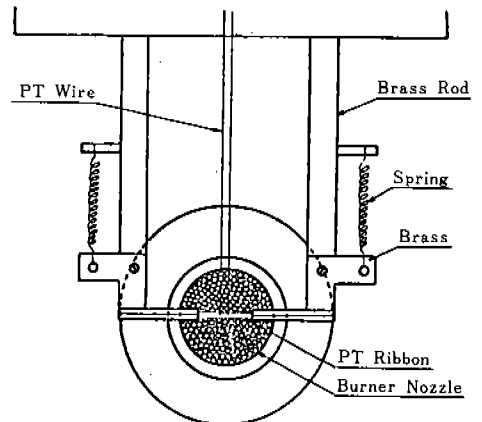


Fig. 6 Burner and Target (Top View)

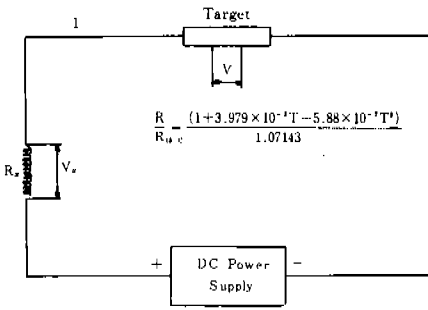


Fig. 7 Resistance-Temperature Measurement System

2.5 광학 장치와 신호 처리 장치

연소기로 주입되는 연무체의 농도를 광산란 방법으로 측정하기 위해 선형 편광된 헬륨-네온 레이저 (5mW, λ=632.8nm, Spectra Physics # 105-1)를 사용하였다. 광신호를 전기적인 신호로 바꿔주기 위해 2개의 광전자 증배관(PMT, RCA #8852)을 사용하였다. 감지된 광 신호를 광전자 증배관으로 보내기 위해 직경이 3.2mm인 2개의 광섬유 튜브를 사용하였다. 실험시 렌즈에 집광된 emission line의 noise를 제거하기 위해 narrow band 간섭 필터(λ=765±10.7nm)를 사용하였고, 2개의 광전자 증배관에서 발생한 전기적인 신호를 시간의 함수로 기록하기 위해 flat-bed 기록계를 사용하였다.

2.6 재증발법

재증발법은 먼저 2-2에서 설명한 바와같이 측정코자 하는 물질을 표적에 부착시킨 후 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 수용액 연무체의 연소기 주입을 막아 최초의 평판 화염상태로 회복시킨다. 그후 표적온도를 순간적으로 노점 이상(제거온도, 실험시 약 1240℃)으로 올려 부착물의 알칼리 원자 K(g)에서 발생하는 emission line을 측정한다. 감지된 빛은 광섬유 튜브, 간섭 필터, 광전자 증배관을 거쳐 기록기에 기록된다. 백금판에서도 파장이766.4nm 부근인 emission을 상당량 발생시키는데, 이를 보상해 주기 위해 표적온도를 부착 실험을 행하였던 온도로 내린 후 다시 제거온도를 상승시켜 순수 백금판에서 발생하는 766.4nm 부근의

emission을 기록기에 기록한다.

그림 8은 기록된 emission line의 신호이다. 노점 이하에서 부착실험을 행할 경우 발생하는 emission line의 신호는 impulse와 같은 형태로 나타나며(그림 8-A), 표적온도가 노점에 접근할수록 impulse의 크기는 점점 작아지며, 표적온도가 노점 이상일때는 백금판에서 발생하는 emission line의 신호만 나타났(그림 8-B).

부착되었던 물질의 양은 그림 8-A의 두 곡선을 시간으로 적분하여 적분 면적의 차를 뺀으로써 계산하였다. 부착물의 계산은 임의의 표적온도에 대한 적분 면적용 기준으로 적분 면적비를 구함으로써 상대적인 부착율을 계산하였다.

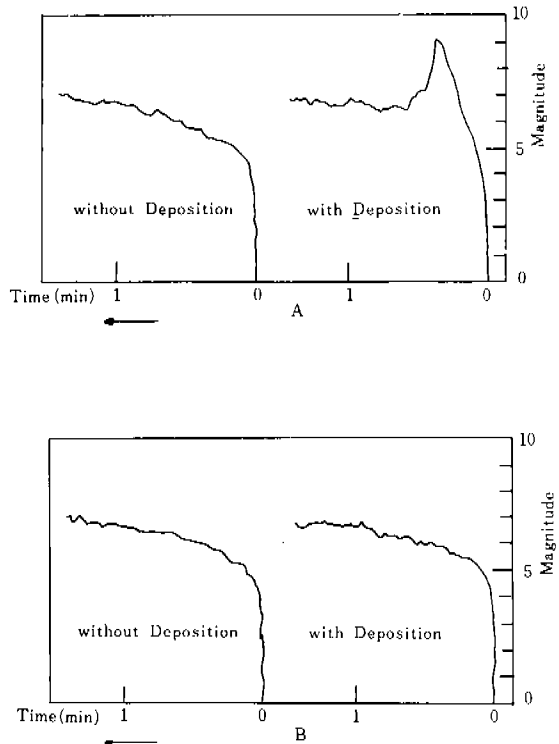


Fig. 8 Profile of Emission Line Signal From Deposit

- A : At Wall Temperature Below Dew Point
- B : At Wall Temperature Above Dew Point

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 연무체 발생

그림 9는 연소기 내로 주입된  $K_2SO_4$  수용액 연무체의 레이저에 의한 광산란 강도이다. 연무체 발생장치의 스위치를 켜후 약 10분 후에 연무체 발생율은 일정해지고, 100% 포화용액과 광산란 강도의 비는 약 1 : 0.54임을 알 수 있고 이때의 수용액 농도는 물 농도이다. 광산란 강도와 연무체의 밀도는 선형비례 관계이므로,<sup>(7)</sup> 100% 포화용액과 50% 포화용액의 연소직전 혼합 기체내의 연무체 밀도비는 약 1 : 0.54이다. 연무체 발생장치에서 발생하여 plenum chamber로 유입되는 연무체 중 상대적으로 큰 연무체는 방울의 형태로 plenum chamber에 남게 되고, 조그만 입자만이 질소와 함께 연소기로 보내어져 어 느 정도 입자 크기를 일정하게 유지한다.

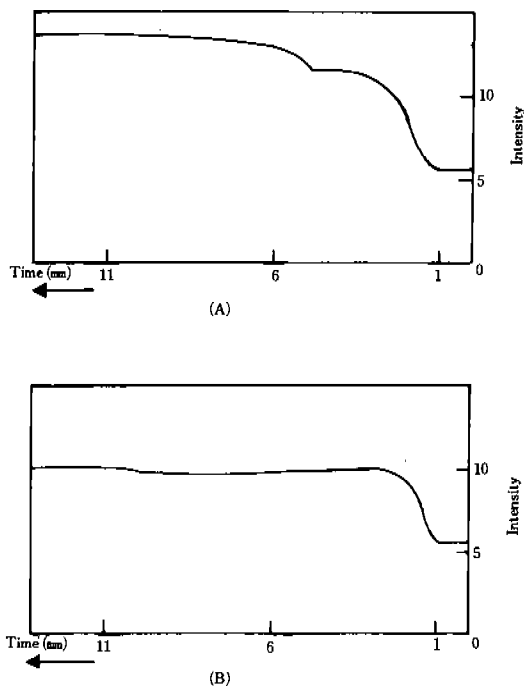


Fig. 9 Profile of Light Scattering Signal from Aerosol Suspended in Precombustion Gases  
 A : 100% Saturated  $K_2SO_4$  Aerosol  
 B : 50% Saturated  $K_2SO_4$  Aerosol

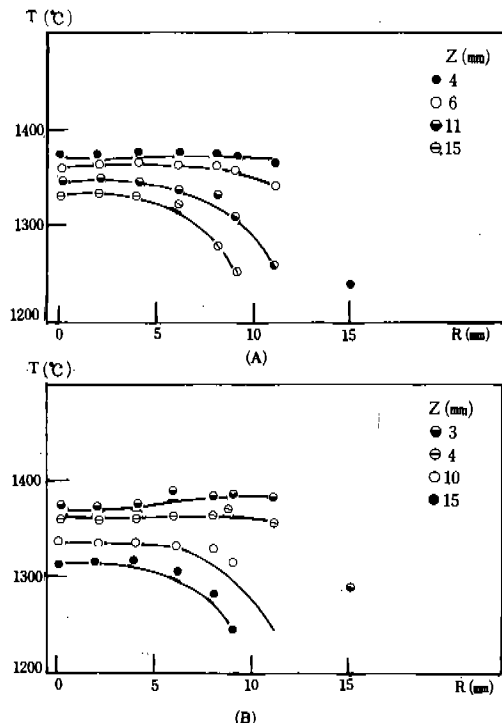


Fig. 10 Profile of Temperature without Target  
 A : Flame Doped with 100% Saturated  $K_2SO_4$  Aerosol  
 B : Flame Doped with 50% Saturated  $K_2SO_4$  Aerosol

#### 3.2 온도 측정 결과

화염의 온도는 Pt-Pt 13%Rh 열전대 온도 측정기에 의하여 측정되었고 실험오차를 줄이기 위하여 열전대의 굵기는 직경 0.127mm로 하였다. 그림 10은 연무체 주입시 표적을 제거한 상태에서 측정된 R방향의 온도 분포이다. 100%포화용액 연무체 주입시 Z=4mm인 점에서는 R=11mm인 점까지는 온도가 온도 변동없이 거의 일정하나 R=15mm인 점에서는 온도 변동의 폭이 커졌다. 이러한 현상은 Z가 증가함에 따라 심하게 나타났는데(그림 10-A), 50% 포화용액의 연무체 주입시도 비슷한 결과를 얻었다(그림 10-B). 표적위치는 온도분포가 거의 일정한 구역을 선택하였다.

부착 실험시 부착물 제거 온도는 약 1240°C로 하였고, 이때 표적 지지대 부근의 표적온도는 제

거온도 이하이므로 이 부근의 부착물은 제거되지 않고 그대로 남아있게 된다(이러한 현상은 실험시 관측되었다). 따라서 표적지시대 부근에 부착된 부착물은 부착물에 거의 영향을 주지 못한다. 표적온도는 부착을 행하는 동안(5분) 매 1분 마다 온도를 구하여, 그 평균 값을 표적 온도로 하였다. 이때 온도차는  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  이내 였다. 실험시 가스 온도는 표적하단에서 R방향으로 2mm 인 점의 온도를 열전대 온도 측정기로 측정하여 사용하였다. 이 점은 열 경계층 외부에 있으며 표적 온도 증감에 거의 영향을 받지 않았다.

### 3.3 부착물 측정 결과

그림 11은 표적에 부착된 부착물의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 부착물은 침상 결정(crystalline needle)임을 알 수 있었다. 그림12는 부착물을 EDAX Spectra로 정성 분석한 결과이다. 그림에서 가로 축은 각 금속원소의 X-ray emission line energy (KeV)를 나타내고 세로 축은 강도를 나타낸다. 그림으로부터 이 침상 결정은  $\text{K}_2\text{SO}_4$ 를 나타내는 포타슘과 황으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

그림13은 100% 포화용액과 50% 포화용액의 연무체를 연소기로 주입하였을 때 재 증발법으로 측정한 표적온도에 대한 상대적인 부착물이다. 표적온도는 가스온도로 나누어 무차원화 하



Fig. 11 SEM Micrograph of Deposit Collected from Flame Doped with 100% Saturated  $\text{K}_2\text{SO}_4$  Aerosol

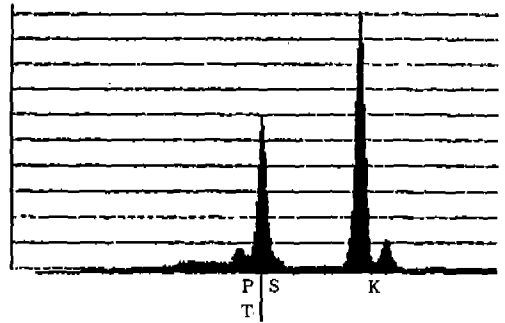


Fig. 12 EDAX Representation of Deposit

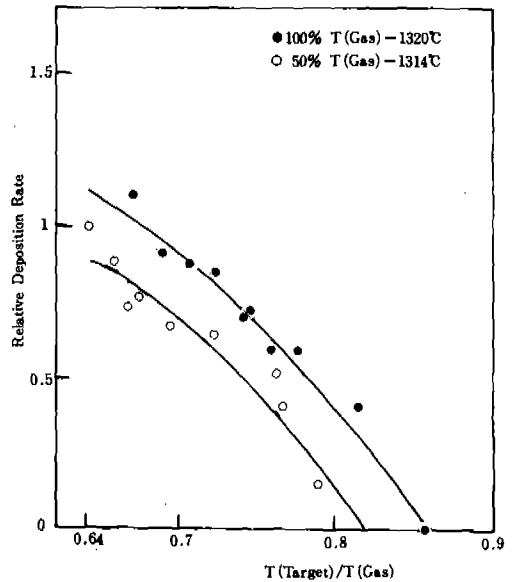


Fig. 13  $\text{K}_2\text{SO}_4$  Deposition Rate as Function of  $T(\text{Target})/T(\text{Gas})$

였다. 100% 포화용액의 연무체를 주입시 가스 온도는 약  $1320^{\circ}\text{C}$  였으며, 표적 온도 범위는  $848 \sim 1130^{\circ}\text{C}$  였다. 50% 포화용액의 연무체 주입시 가스온도는 약  $1314^{\circ}\text{C}$  였고, 표적온도 범위는  $844 \sim 1034^{\circ}\text{C}$  였다. 부착물의 무차원화는 50% 포화용액의 연무체 주입시  $T(\text{target})/T(\text{gas})$ 가 0.641 인 점을 기준으로 행하였다. 그림13에서 곡선은 실험자료를 최소사승법에 의해 구한 것이다. 그림13에서 알 수 있듯이 연소기로 주입되는 연무체의 농도가 동일할때, 가스온도와 표적온도의 차가 커짐에 따라 부착물은 증가하였다. 연소기

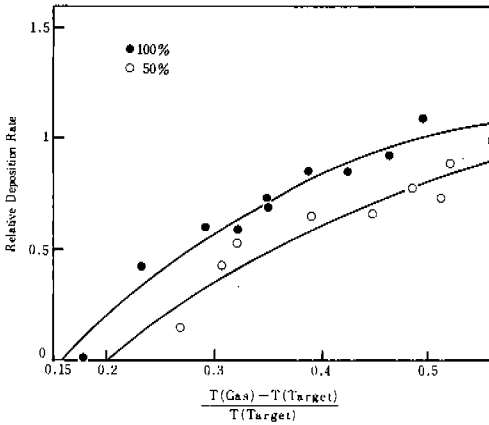


Fig. 14  $K_2SO_4$  Deposition Rate as Function of  $(T(\text{Gas}) - T(\text{Target}))/T(\text{Target})$

로 주입되는 연무체의 농도를 증가시킴에 따라 일정한 표적 온도에서 부착율은 증가 하였으며, 노점 역시 증가 함을 알 수 있었다.

그림14는 열 확산의 중요 변수인 가스온도와 표적온도의 차와 표적온도의 비에 대한 상대적인 부착율이다. 부착율은  $(T(\text{gas}) - T(\text{target}))/T(\text{target})$ 가 증가함에 따라 증가한다. 노점 부근의 온도에서는 벽면에서의 화학종 질량비가 경계층 외부의 화학종 질량비에 접근함에 따라 열 확산이 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다. 그리고 노점 보다 상당히 낮은 온도에서의 부착 메카니즘은 Fick diffusion과 열 확산의 영향을 함께 받는 것으로 생각되며, 벽면에서의 화학종 질량비의 값을 정확히 예측할 수 없기 때문에 부착 메카니즘에 대한 정확한 예측은 할 수 없었다.

결 론

- (1)  $K_2SO_4$  수용액의 연무체를 주입하여 부착시켰을 때 부착된  $K_2SO_4$ 가 고체인 경우 그 형상은 침상 결정이다.
- (2) 부착율은 가스 온도와 표적 온도차가 커짐에 따라 증가한다. 즉 부착률에 대한 온도구배의 영향은 무시할 수 없고 이 결과는 CFBL 이론과 일치함을 알 수 있다. 표적 온도가 일정할 때 주입되는 연무체의 농도를 증가시킴에 따라 부착율도 증가하였다. 또한 주입되는 연무체의 농도를 증가함에 따라 노점 역시

증가한다.

- (3) 본 실험에서 사용한 재 증발법은 종래의 방법 (gravimetric technique)에 비해 실험시간을 상당히 단축시키고, 효율적인 실험자료를 제공하였다.

참 고 문 헌

1. Brown, T. D., "The Deposition of Sodium Sulphate from Combustion Gases," J. Inst. Fuel, Vol. 39, pp. 378 - 385 (1966)
2. Durie, R. A., Milne, J. W. and Smith, M. Y., "The Deposition of Salts from Hydrocarbon Flames Containing Sodium and Sulphur Species," Combustion and Flame, Vol.130, pp. 221 - 230 (1977)
3. Goren, S. L., "Thermophoresis of Aerosol Particles in the Laminar Boundary Layer on a Flat Plate," J. Colloid and Interface Science, Vol. 61, No. 1, pp. 77 - 85 (1975)
4. Hedley, A. B., Brown, T. D. and Shuttleworth, A., "Vanadium Pentoxide Deposition from Combustion Gases," ASME Trans.-J. Engineering for Power, Vol. 188, pp. 173 - 178 (1966)
5. Kohl, F. J., Santoro, G. J., Stearns, C. A. and Fryburg, G. C., "Theoretical and Experimental Studies of the Deposition of  $Na_2SO_4$  from Seeded Combustion Gases," J. Electrochem. Soc, Vol. 126, No. 6, pp. 1054 - 1061 (1979)
6. Rosner, D. E., "Thermal (Soret) Diffusion Effects on Interfacial Mass Transport Rate," Physicochemical Hydrodynamics, Vol. 1, pp. 159 - 185 (1979)
7. Rosner, D. E. and Atkins, R. M., "Experimental Studies of Salt/Ash Deposition Rates from Combustion Products using Optical Techniques," Proc. Engrg. Foundation Int. Conf. on Experimental Research into Fouling and Slagging Due to Impurities in Combustion Gases (R. Bryers, Ed.) (1983)



8. Rosner, D. E., Chen, B. K., Fryburg, G. C. and Kohl, F. J., "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)
9. Rosner, D. E. and Kim, S. S., "Optical Experiments on Thermophoretically Augmented Submicron Particle Deposition from Dusty High Temperature Gas Flows," in press the *Chemical Engineering J.* (Elsevier), (1985)
10. Rosner, D. E. and Seshadri, K., "Experimental and Theoretical Studies of the Law Governing Condensate Deposition from Combustion Gases," 18th Int. Symposium on Combustion, the Combustion Inst. pp. 1385 - 1394 (1981)
11. Spalding, D. B., "Convective Mass Transfer - an Introduction," McGraw-Hill, New York (1963)
12. Vermes, G., "Thermophoresis-Enhanced Deposition Rates in Combustion Turbine Blade Passages," *ASME Trans.-J. Engineering for Power* Vol. 101, pp. 542 - 548 (1979)