

## 수치 해법에 의한 분무 열분해 반응기의 모사(I)

—반응기내 에어로졸의 거동 연구—

김교선

강원대학교 공과대학 화학공학과  
(1991년 1월 3일 접수, 1991년 5월 13일 채택)

## Simulation of Spray Pyrolysis Reactor by Numerical Methods (I)

—On the Behavior of Aerosols inside the Reactor—

Kyo-Seon Kim

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Kangweon National University

(Received 3 January 1991; accepted 13 May 1991)

### 요 약

분무열분해 반응기에서 연속식, 모멘텀, 에너지, 물질 수지식을 고려하여 모델식을 세웠다. 모델식의 수치 적분에 의해 열분해 반응기내의 온도 분포, 기체 유속 분포, 에어로졸 농도 분포를 계산하였으며 에어로졸의 반응기내 궤적과 온도 경로를 나타냈다. 열분해 반응기에서 에어로졸은 thermophoresis에 의해 r방향을 따라서 반응기 중심쪽으로 이동하고 있으며 반응기 벽 근처에는 에어로졸이 존재하지 않고 있다. 기체의 r방향 유속은 기체가 급히 가열될 때  $r/R=0.5$  근처에서 빠르게 반응기 안쪽으로 흐르고 있다. 기체 유량이 증가함에 따라 에어로졸이 열분해 온도에 도달해 있는 시간이 감소하며 반응기내 초기 에어로졸 위치에 따른 온도 경로의 차이가 크게 나타나고 있다.

**Abstract**—A model has been developed for spray pyrolysis reactor, considering continuity, momentum, energy and mass balances in the reactor. By numerical integration of model equations, the profiles of gas temperature, gas stream velocity and aerosol concentration are shown inside the reactor and the paths and temperature histories of aerosols are described along the reactor. Aerosols are moving toward the center of spray pyrolysis reactor in the radial direction by thermophoresis and aerosols are not found in the region near the reactor wall. The radial gas stream velocity is significant around  $r/R=0.5$  and is in the direction toward the center of reactor when the gas flow is heated rapidly. As the gas flow rate increases, aerosols begin to have less residence time under pyrolysis temperature inside the reactor and the difference of temperature histories of aerosols increases depending on the initial locations of aerosols at the reactor inlet.

### 1. 서 론

산업 발달과 함께 고기능성 세라믹의 용도 및 수요가 급증하고 있으며 많은 과학 기술자들은 최소한의 결점을

갖는 최종 세라믹 제품을 제조하기 위하여 원료가 되는 세라믹 분말을 원하는 완전한 물성을 갖도록 제조하는 방법들을 찾고 있다. 바람직한 원료 분말은 고순도이고 화학양론적 배합, 원하는 세라믹 구조 등을 유지하고

있어야 하며 소결성이 좋고 충전 밀도가 높아야 하며 입도 분포가 비교적 균일한(상대 표준 편차 $<10\%$ ) 마이크로나 서브 마이크로의 입자들로 밀어지고 있다[1-3]. 이러한 세라믹 원료 분말을 제조하는 방법에는 고상법, 액상법, 기상법(에어로졸 공정) 등이 있으며 분무 열분해법은 앞의 분류 중 기상법에 속하고 있다[4].

일반적인 기상법에 의한 세라믹 분말의 제조시 반응물이 기체 상태로 반응기에 공급되어 반응에 의해 세라믹 분말을 형성하는데 비하여 분무 열분해법에서는 반응물을 적당한 용매에 용해시켜 액체 상태로 만들며 이를 기계적 방법에 의해 액적 상태의 에어로졸로 만들어 운반 기체와 함께 고온의 반응기에 공급한다. 고온의 반응기 벽으로부터 열전달에 의해 공급된 기체와 에어로졸 액적은 가열되며 액적 중의 용매는 증발되고 반응물은 열분해 반응에 의해 원하는 세라믹 분말로 생성된다. 기계적 에어로졸 발생 장치로는 jet atomizer나 ultrasonic vibrator가 주로 이용되고 있으며 반응기는 튜브형 가열로가 많이 이용된다[5-11].

분무 열분해법에 의해 단일 성분 또는 균일 조성을 갖는 다성분계의 분말을 제조할 수 있으며 최종 분말의 입도 분포와 구조의 조절이 용이하고 출발 용액 중의 불순물 외에는 합성 공정 중에 불순물이 혼입될 가능성이 적다. 또한 많은 종류의 반응물에 이용할 수 있으며 생산이 저렴하고 공정이 안전하며 대형화가 용이하다. 반면에 반응 시스템에 따라서 다결정이거나 다공성인 입자로 제조될 수 있으며 산화물 외에 질화물, 탄화물, 붕소화물 등의 제조에는 이용하기가 힘들며 액적 에어로졸의 제조 방법에 의해서 최종 입자 분포가 제약을 받는 단점을 가지고 있다[5-11].

문헌 조사에 의하면 분무 열분해법에 의한 미세 세라믹 분말의 제조에 관한 연구는 실험적으로 활발하게 진행되어 왔지만[5-11] 반응기의 모델에 의한 반응기의 예측에 관한 연구는 부족한 상태이다. 본 연구에서는 분무 열분해법에 의한 세라믹 분말 제조시 반응기내에서의 연속식, 열전달, 유체 역학, 에어로졸 전달식을 고려한 모델식을 수치 모사하여 열분해 반응기내의 온도 분포, 기체 유속 분포, 에어로졸 농도 분포 등을 구하였다. 공정 변수로써 기체 유량을 변화시키면서 에어로졸의 궤적 및 온도 경로를 계산하였고 분무 열분해 온도에 머무르는 체류 시간을 분석하였다.

## 2. 반응기 수치 모사를 위한 기본식

모델식을 세우기 위해 분무 열분해 반응기 장치로써 박[12]의 실험장치와 공정 조건을 이용하였다. 실험에 이용된 분무 열분해 반응기는 석영관으로 만들어져 있

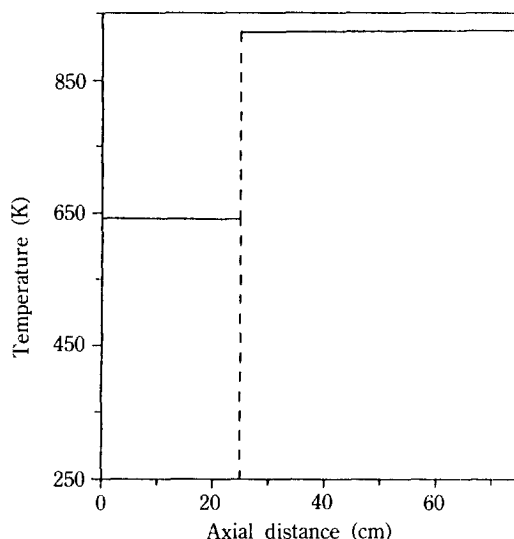


Fig. 1. Temperature profiles of reactor wall.

Table 1. Simulation conditions for spray pyrolysis reactor

$C_{p0}, C_{p1}, C_{p2}$	7.16, $1.0 \times 10^{-3}$ , $-0.4 \times 10^5$
K	0.54
$k_0, k_1, k_2$	$1.08 \times 10^{-5}$ , $1.82 \times 10^{-7}$ , $-2.34 \times 10^{-11}$
$P_0$	1 atm
Q	1 lpm, 2 lpm, 3 lpm
R	1.65 cm
$T_0, T_E, T_P$	293 K, 643 K, 923 K
$z_E, z_P$	25 cm, 75 cm
$v_0$	$1.39 \times 10^{-5}$
$N_{Re}, N_{Pe}, N_{Pr}$	57.1, 10.3, 0.18, $2.07 \times 10^5$
$N_{Gr}(Q=2 \text{ lpm})$	

으며 반응 기체와 에어로졸이 직접 열원과 접촉하지 않고 열전달에 의해 간접적으로 가열되고 있다[12]. 반응기는 두 구역으로 나누어져 있으며 제 1구역에서는 에어로졸 용매의 증발을 위해 반응기 벽온도가 비교적 낮은 온도( $T_E$ )로 유지되고 있으며 제 2구역에서는 열분해 반응을 위한 고온의 반응기 벽온도( $T_P$ )로 유지되고 있다(Fig. 1).

Table 1은 수치 모사에 이용된 공정 조건을 보여 주고 있으며 이 조건에서의 Reynolds( $N_{Re}$ ), Prandtl( $N_{Pr}$ ), Grashof( $N_{Gr}$ ), Peclet number( $N_{Pe}$ ) 등에 의하면 축방향의 열전달, 물질 전달과 자연 대류의 영향을 무시할 수 있다[13, 14]. 기체 중의 에어로졸의 loading이 크지 않아서 유체 전달 현상이나 열전달 속도에 에어로졸의 영향이 없다고 가정하였으며[15, 16] 또한 낮은 초기 에어로졸 농도로 에어로졸의 증발이나 기체와의 반응에

의한 에너지의 발생 및 손실을 무시하여고 공정 중의 기체의 전체 몰수는 변화하지 않는다고 가정하였다. 또한 초기 에어로졸 농도가 낮아서 에어로졸의 충돌에 의한 에어로졸의 소멸이나 생성을 무시할 수 있고 에어로졸 입자의 크기가 충분히 커서 에어로졸 확산의 영향은 무시할 만하고 thermophoresis와 기체의 흐름에 의해 에어로졸이 전달된다고 가정하였다[15, 16]. 위의 가정에 기초를 두고 분무 열분해 반응기에서 기체상의 연속식은 식 (1)과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial}{\partial z}(Cu) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(Crv) = 0 \quad (1)$$

축방향(z) 및 반경방향(r)의 모멘텀 수지식은 Walker 등[17]이 이용한 차원 분석 방법에 본 수치 모사에 이용한 공정 조건을 대입하면 식 (2), (3)과 같이 간략화될 수 있다[15-17].

$$Cu \frac{\partial u}{\partial z} + Cv \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{M} \frac{dP}{dz} + \frac{1}{Mr} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

반응기내에서의 에너지 수지식과 에어로졸 수지식은 각각 식 (4), (5)와 같이 나타난다.

$$Cu \frac{\partial}{\partial z}(C_p T) + Cv \frac{\partial}{\partial r}(C_p T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

$$Cu \frac{\partial n}{\partial z} + Cv \frac{\partial n}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (CKvnr \frac{\partial \ln T}{\partial r}) \quad (5)$$

식 (5)에서 왼쪽의 항들은 z방향 및 r방향 기체 흐름에 의한 에어로졸의 전달 속도를 각각 나타내며 오른쪽 항은 thermophoresis에 의한 에어로졸의 r방향 전달 속도를 나타낸다. 생성된 에어로졸의 크기는 대개 2 μm 정도으로써[12] 에어로졸의 확산 속도를 무시할 수 있으며 K(thermophoretic coefficient)는 에어로졸 크기에 무관하게 0.54 정도의 값을 갖는다[15].

위의 편미분 방정식을 풀기 위한 초기 및 경계 조건은 다음과 같다.

$$z=0 \text{에서} \\ T=T_0, v=0, n=n_0, P=P_0 \quad \text{for all } r \quad (6)$$

$$u=2U\{1-(r/R)^2\} \quad (7)$$

$$r=0 \text{에서} \\ \partial T / \partial r = v = \partial u / \partial r = \partial n / \partial r = 0 \quad \text{for all } z \quad (8)$$

$$r=R \text{에서}$$

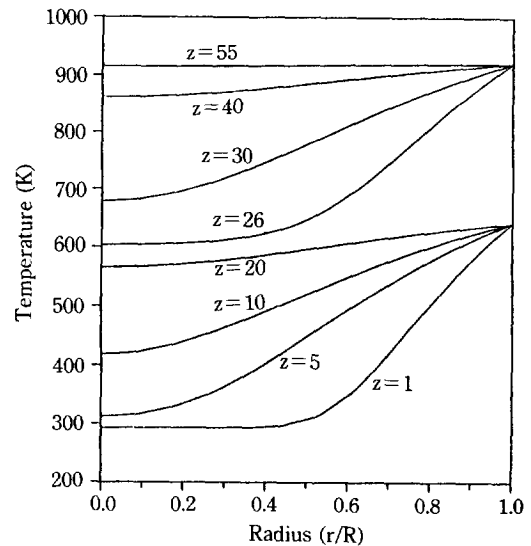


Fig. 2. Profiles of gas temperature inside the reactor(Q=2 lpm).

$$v=u=n=0 \quad \text{for all } z \quad (9)$$

$$T=T_E \quad 0 \leq z \leq z_E \quad (10)$$

$$T=T_P \quad z_E < z \leq z_P \quad (11)$$

기체의 C, T, P와의 관계는 이상기체식을 이용하였으며 운반기체로 산소를 가정하여 다음의 식에 의해 기체의 물성을 구하였다.

$$C=P/R_g T \quad (12)$$

$$\mu/MC=v=v_0 T^{1.65} \quad (13)$$

$$C_p=C_{p0}+C_{p1}T-C_{p2}/T^2 \quad (14)$$

$$k=k_0+k_1 T+k_2 T^2 \quad (15)$$

z방향의 모멘텀 수지식, 에너지 수지식, 에어로졸 수지식은 유한 차분법을 적용하여 풀었으며 계산을 효율적으로 하기 위하여 편미분 방정식[식 (2), (4), (5)]을 r방향 미분식에만 유한차분법을 적용하여 z에 대한 상미분 방정식화 하였으며 DGEAR subroutine(IMSL library)을 이용하여 적분하였다. dp/dz는 z방향으로의 매 적분 구간마다 연속식과 z방향 모멘텀 수지식, v의 r=0과 r=R에서의 경계 조건을 이용하여 시행 착오 방법으로 계산하였다[16-19].

### 3. 수치 모사 결과 및 분석

Fig. 2는 반응기내의 축거리(z)에 따른 온도 분포를

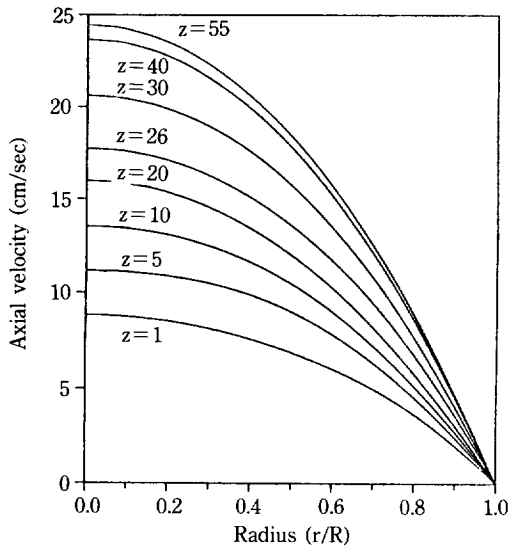


Fig. 3. Profiles of axial velocity inside the reactor ( $Q=2$  lpm).

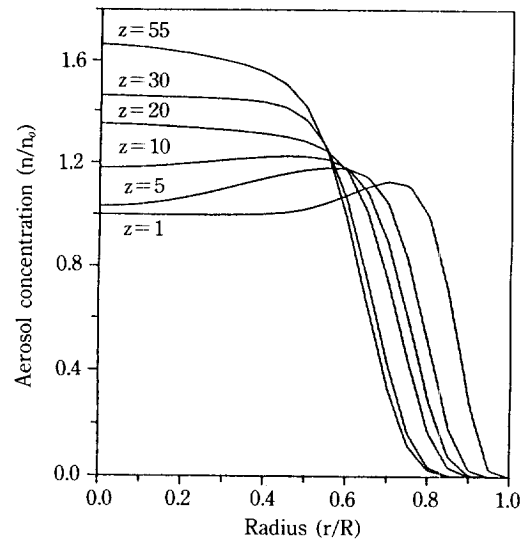


Fig. 5. Profiles of dimensionless aerosol concentration inside the reactor ( $Q=2$  lpm).

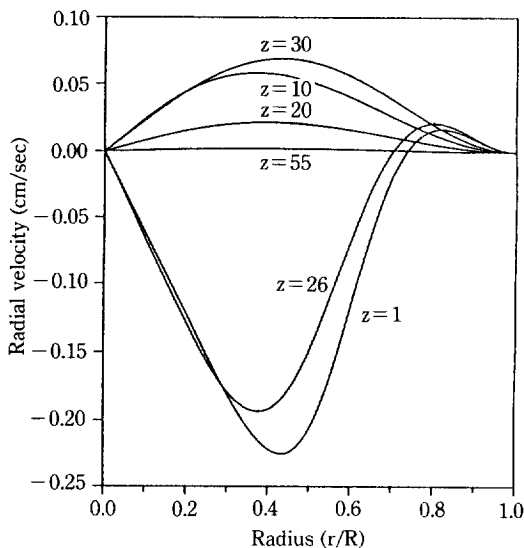


Fig. 4. Profiles of radial velocity inside the reactor ( $Q=2$  lpm).

반응기 반경( $r/R$ )의 함수로 나타냈다. 고온의 반응기 벽으로부터의 열전달에 의해 기체가 가열되므로  $r/R \approx 1$  근처에서의 온도가  $r/R \approx 0$  근처에서의 온도보다 높게 나타난다.  $0 \leq z \leq 25$ 에서는 반응기 벽온도가 643 K( $T_E$ )로 유지되므로  $z$ 가 증가함에 따라서 반응기내의 기체 온도가 643 K로 접근하고 있으며  $z > 25$ 에서는 반응기 벽온도가 923 K( $T_p$ )로 유지되고 있어서 반응기내 기체 온도가 923 K에 접근하고 있다.

Fig. 3은 반응기내에서 축방향 기체 속도( $u$ )를 여러  $z$ 에 대하여  $r/R$ 의 함수로 나타냈다.  $u$ 는  $r/R$ 에 대하여 대략 포물선 형태를 유지하고 있으며  $z$ 가 증가함에 따라서 기체의 온도가 상승하므로(Fig. 2) 온도 상승에 따른 기체의 부피 팽창에 의해 축방향 기체의 속도가 빨라지게 된다.

$r$ 방향의 기체 속도( $v$ )를 여러  $z$ 에 대하여  $r/R$ 의 함수로 Fig. 4에 나타냈다. 반응기 벽으로부터 기체가 가열되기 시작할 때에는( $z=1, 26$ ) 반응기 벽 근처의 기체가 급격히 팽창하며 모멘텀 수지식을 만족시키기 위해서  $v$ 가 반응기 안쪽 방향으로 비교적 빠르게 흐르게 된다( $v < 0$ ). 반응기 중심( $r/R \approx 0$ ) 근처의 기체가 가열되기 시작하면( $z=10, 20, 30$ ) 반응기 중심쪽의 기체가 팽창하게 되며 다시 모멘텀 수지식을 만족시키기 위해 기체가 반응기 바깥쪽 방향으로 흐르게 된다( $v > 0$ ).  $r/R=0$ 과 1에서는 경계조건에 의해  $v$ 가 0으로 나타나며  $z=55$ 에서는 기체의 가열이 거의 끝난 상태이므로 모든  $r$ 에 대하여  $v$ 가 거의 0이다.

Fig. 5는 반응기내의 에어로졸 농도 분포를 보이고 있다. 에어로졸은 반응기내의  $r$ 방향으로 thermophoresis와  $v$ 에 의해 주로 움직이고 있으며 thermophoresis의 방향은 반응기내의 온도 구배에 의해(Fig. 2) 항상 반응기 안쪽으로 향하고 있으며  $v$ 의 방향 및 크기는 Fig. 4에 따른다. 반응기의 초기에는( $z \leq 5$ ) 온도 구배가  $r/R \approx 1.0$  근처에서 크므로 반응기 벽 근처의 에어로졸이 thermophoresis에 의해 반응기 안쪽으로 이동하며 반응기 벽 근처의 에어로졸 농도가 0에 가까워진다. 반

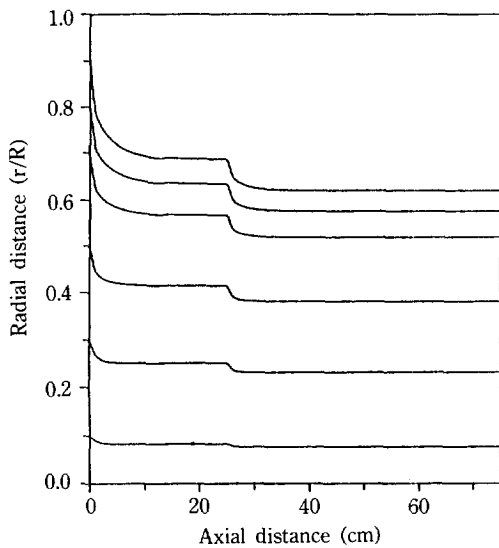


Fig. 6. Trajectories of aerosols inside the reactor ( $Q=1$  lpm).

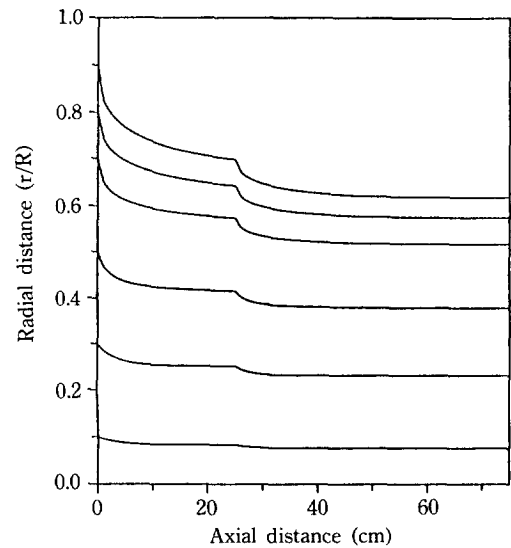


Fig. 8. Trajectories of aerosols inside the reactor ( $Q=3$  lpm).

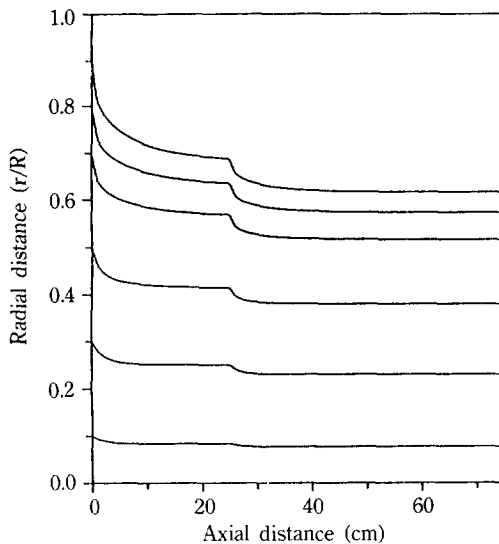


Fig. 7. Trajectories of aerosols inside the reactor ( $Q=2$  lpm).

응기 길이가 증가함에 따라서 에어로졸의 농도가 희박해지는 구역의 넓이가 증가하며  $z \geq 30$ 에서는 대부분의 에어로졸이  $0 \leq r/R \leq 0.7$ 에 존재하게 된다.  $z \geq 55$ 에서는  $v$ 가 0이고(Fig. 4) 온도 구배가 거의 존재하지 않으므로(Fig. 2) 에어로졸의 농도 분포가 더 이상 변화하지 않는다.

Fig. 6-8은 기체 유량이 1, 2, 3 liter/min(lpm)일 때의 반응기내에서의 에어로졸의 궤적을 보여주고 있다. 반

응기에 가해진 에어로졸의  $z$ 방향 속도는  $u$ 에 의해 결정되고  $r$ 방향의 속도는  $v$ 와 thermophoresis에 의한 속도( $-Kv \partial \ln T / \partial r$ )의 합으로 나타난다. 따라서  $z$ 의 변화에 대한 에어로졸 입자의  $r$ 방향 진로 변화량은  $\partial r_p / \partial z = (v - Kv \partial \ln T / \partial r) / u$ 로 나타낼 수 있다. 이 식을 식(1)-(5)와 동시에 풀면 반응기내에서의 에어로졸의 움직임을 계산할 수 있다. 반응기의 입구 근처( $z \approx 0$ )과  $z=25$  직후에 에어로졸이 반응기 중심쪽으로 크게 이동하고 있음을 보여주고 있다. 반응기 벽 근처의 에어로졸은 강한 온도 구배에 의해 진로가 많이 휘어지고 있지만 반응기 중앙 근처에( $r/R \approx 0$ ) 있는 에어로졸은 온도 구배가 심하지 않으므로 진로가 크게 바뀌지 않고 있다. 기체 유량이 증가할수록 열전달에 필요한 길이가 증가하여 기체 중의  $r$ 방향의 온도 구배가 오랫동안 유지되므로 에어로졸의 진로가 비교적 긴 거리에서 바뀌고 있다.

Fig. 9-11은 에어로졸이 반응기를 흐르는 동안에 겪는 온도 과정을 기체 유량이 1, 2, 3 lpm에 대하여 각각 나타냈다. 에어로졸의 온도 경로에 의해 용매의 증발 속도, 용질의 결정화 속도, 열분해 속도 등이 영향을 받게 되므로 반응기에서의 유체 전달, 열전달, 물질 전달을 고려한 에어로졸의 온도 경로를 이해하는 것이 매우 중요하다. 반응기 입구에서의 에어로졸의  $r$ 방향 위치에 따라서 에어로졸이 반응기내에서  $r$ 방향과  $z$ 방향으로 움직이면서 거치는 온도 경로를  $z$ 의 함수로써 나타냈다. 반응기 벽 근처로 가해진 에어로졸은 열전달에 의해 빨리 가열되는데 비해 반응기의 중앙에 가

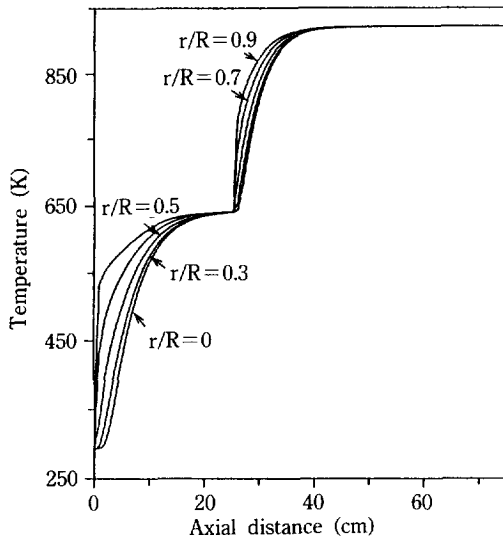


Fig. 9. Temperature histories of aerosols inside the reactor for various locations of aerosols at the reactor inlet ( $Q = 1$  lpm).

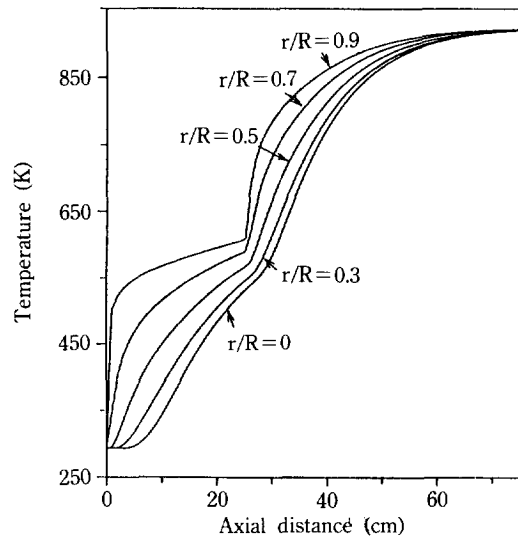


Fig. 11. Temperature histories of aerosols inside the reactor for various locations of aerosols at the reactor inlet ( $Q = 3$  lpm).

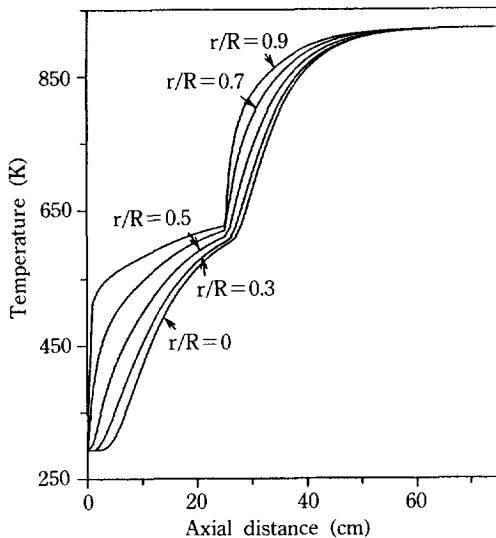


Fig. 10. Temperature histories of aerosols inside the reactor for various locations of aerosols at the reactor inlet ( $Q = 2$  lpm).

해진 에어로졸은 반응기 벽으로부터 열전달에 시간이 오래 걸리고 빨리 이동하므로 천천히 가열되고 있음을 알 수 있다. 또한 기체 유량이 증가함에 따라 열전달에 필요한 반응기 길이가 길어지게 되어 1 lpm의 유량에서는 거의 모든 에어로졸이 30 cm 정도에서( $45 \leq z \leq 75$ ) 열분해 온도(923 K)를 유지하고 있으나 3 lpm의

유량에서는 10 cm 정도에서( $65 \leq z \leq 75$ ) 열분해 온도를 유지하고 있다.

기체 유량이 증가하면 대략 이에 반비례하여 체류 시간이 감소하므로 기체 유량이 3 lpm일 때의 분무 열분해 온도( $T_p$ )에의 체류 시간은 1 lpm일 때의 1/9 정도임을 알 수 있다. 분무 열분해법에서 최종 입자의 균질성이나 편석성, 결정성, 기공성 등이 주로 에어로졸의 온도 경로 및 체류 시간에 의해 결정되므로 공정 변수로써 기체 유량이나 반응로 벽온도의 조절이 중요하게 된다. 균일한 최종 입자를 얻고 분무 열분해 반응기의 최대 효율을 위해서는 반응기내의 모든 에어로졸이 원하는 온도 경로와 체류 시간을 가지면서 또한 생산 속도를 최대화 하는 것이 바람직하다. Fig. 9-11에서부터 기체 유량이 1 lpm일 때 반응기에 가해진 에어로졸의 온도 경로가 비교적 균일하지만 최종 입자의 생산 속도는 기체 유량에 비례하여 증가한다. 따라서 최종 입자의 균질성이나 분말 생성 속도를 증대시키기 위하여 생성하려는 분말에 따라서 본 모델에 의해 공정변수의 영향을 조사할 수 있으며 반응기의 구조를 변경시킬 수도 있다. 그 예로 반응기에서 가열면을 반응기 중앙에도 설치하여 기체가 양쪽 면에서 가열되는 경우에는 기체 흐름 전체가 빨리 가열되므로 비교적 많은 에어로졸이 원하는 균일한 온도 경로를 따를 수 있다.

#### 4. 결 론

분무 열분해법에 의해 세라믹 분말 제조시의 반응기의 모델식을 풀어서 반응기내의 온도 분포, 속도 분포, 에어로졸 농도 분포, 에어로졸의 진행 경로, 에어로졸의 온도 경로 등을 살펴 보았다.

분무 열분해 반응기에 가해진 에어로졸은 r방향으로 기체 흐름 및 thermophoresis에 의하여 움직이고 있다. Thermophoresis에 의해 에어로졸이 주로 r방향으로 이동하고 있으며 반응기 안쪽으로 움직이고 있다. r방향의 기체 유속은  $r/R \approx 0.5$  근처에서 크게 나타나며 기체가 급격하게 가열되는 부분에서 빠르다. 반응기 벽 근처의 에어로졸은 thermophoresis에 의해 반응기 안쪽으로 빠르게 이동하지만 반응기 중심 근처의 에어로졸은 r방향으로의 이동이 크지 않다. 반응기 길이가 증가함에 따라서 반응기 중심 근처의 에어로졸 농도는 증가하는 반면에 반응기 벽 근처에는 ( $r/R > 0.8$ ) 에어로졸이 거의 존재하지 않게 된다.

$r/R \approx 1$  근처를 지나는 에어로졸은 반응기 벽 온도의 변화에 민감하게 변화하고 있으나  $r/R \approx 0$  근처의 에어로졸은 온도 상승에 시간이 걸리고 있다. 반응기 입구에서의 에어로졸의 초기 위치에 따라서 분무 열분해 온도에서 머무르는 체류 시간의 차이가 있으며 기체 유량이 증가함에 따라 분무 열분해 온도에서 머무르는 시간이 감소하고 초기 에어로졸 위치에 따른 온도 경로의 차이가 크게 나타나고 있다. 본 연구 결과를 이용하여 분무 열분해 반응기에서의 공정변수의 영향을 조사하여 특정 반응에 적당한 공정 조건을 찾을 수 있으며 기체 가열 방법 등을 변경하여 원하는 균일한 온도 경로를 거친 균질의 최종 입자를 제조할 수도 있다.

## 감 사

본 연구는 1989년도 문교부 지원 한국학술진흥재단의 신진교수 학술연구 조성비에 의해 이루어진 연구 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

## NOMENCLATURE

C	: gas concentration [ $\text{mol}/\text{cm}^3$ ]
$C_p$	: heat capacity of gas [ $\text{J}/\text{mole}^\circ\text{K}$ ]
$C_{p1}, C_{p2}$	: constants for calculation of heat capacity
k	: heat conductivity of carrier gas [ $\text{cal}/\text{cm K s}$ ]
$k_0, k_1, k_2$	: constants to calculate heat conductivity of gas
K	: thermophoretic coefficient

M	: molecular weight of gas mixture
n	: number of aerosols per one mole of carrier gas
$n_0$	: number of aerosols per one mole of carrier gas at the reactor inlet
p	: pressure
$p_0$	: pressure
Q	: total gas flow at the reactor inlet rate through the preform tube [ $\text{l}/\text{min}$ ]
r	: radial distance [ $\text{cm}$ ]
R	: reactor radius [ $\text{cm}$ ]
$R_G$	: gas constant [ $82.06 \text{ cm}^3 \cdot \text{atm}/\text{mol} \cdot \text{K}$ ]
T	: gas temperature [ $\text{K}$ ]
$T_E$	: reactor wall temperature in drying zone [ $\text{K}$ ]
$T_P$	: reactor wall temperature in pyrolysis reaction zone [ $\text{K}$ ]
$T_a$	: inlet gas temperature [ $\text{K}$ ]
u	: axial velocities [ $\text{cm}/\text{s}$ ]
U	: average gas velocity at the inlet [ $\text{cm}/\text{s}$ ]
v	: radial velocities [ $\text{cm}/\text{s}$ ]
z	: axial distance of reactor [ $\text{cm}$ ]
$z_E$	: axial distance at the end of drying zone [ $\text{cm}$ ]
$z_P$	: axial distance at the end of pyrolysis reaction zone [ $\text{cm}$ ]

## Greek Letters

$\mu$	: viscosity of gas stream [ $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s}$ ]
$\nu$	: kinematic viscosity [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]
$\nu_0$	: constant for calculation of kinematic viscosity

## REFERENCES

1. Bowen, H. K.: *Mater. Sci. Eng.*, **44**, 1(1980).
2. Pratsinis, S. E. and Mastrangelo, S. V. R.: *Chem. Eng. Proc.*, May, 62(1989).
3. Ellis, S. K. and McNamara, Jr., E. P.: *Ceram. Bull.*, **68**, 998(1989).
4. Kim, K. S.: Proc. 2nd SICHEM Symp., Powder Technology, 229(1990).
5. Gardner, T. J. and Messing, G. L.: *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **63**, 1498(1984).
6. Ono, T., Kagawa, M. and Syono, Y.: *J. Mater. Sci.*, **20**, 2483(1985).
7. Inshizawa, H., Sakurai, O., Mizutani, N. and Kato, M.: *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **65**, 1399(1986).
8. Liu, T. Q., Sakurai, O., Mizutani, N. and Kato, M.: *J.*

- Mater. Sci.*, **21**, 3698(1986).
9. Kanno, Y. and Suzuki, T.: *J. Mater. Sci. Lett.*, **7**, 386(1987).
  10. Tohge, N., Tatsumisago, M., Minami, T., Okuyama, K., Adachi, M. and Kousaka, Y.: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, L1086(1988).
  11. Kudas, T., Datye, A., Lee, V. and Engler, E.: *J. Appl. Phys.*, **65**, 2149(1989).
  12. Park, I. S.: MS Dissertation, Kangweon National Univ., Chuncheon, Korea(1990).
  13. Kays, W. M. and Perkins, H. C.: "Handbook of Heat Transfer", (edited by Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P. and Ganic, E. N.), 2nd ed., McGraw-Hill, New York, Ch. 7(1985).
  14. Slattery, J. C.: "Momentum, Energy, and Mass Transfer in Continua", 2nd ed., McGraw-Hill, New York (1981).
  15. Kim, K. S. and Pratsinis, S. E.: *AIChE J.*, **34**, 912 (1988).
  16. Kim, K. S. and Pratsinis, S. E.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 2475(1989).
  17. Walker, K. L., Geyling, F. T. and Nagel, S. R.: *J. Am. Ceram. Soc.*, **63**, 522(1980).
  18. Anderson, D. A., Tannerhill, J. C. and Pletcher, R. H.: "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", McGraw-Hill, New York(1984).
  19. Gerald, C. F. and Wheatley, P. O.: "Applied Numerical Analysis", 3rd edn, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts(1984).