

## 기상반응을 이용한 SiC 초미분말 합성에 관한 수치모사

유용호, 어경훈, 송은석\*, 이성철\*\*, 소명기\*\*

강원대학교 신소재공학과, 춘천, 200-701

\*한양대학교 화학공학과, 서울, 133-791

\*\*한양대학교 세라믹공정연구센터, 서울, 133-791

(1999년 10월 1일 접수)

## Numerical simulation for ultrafine SiC powder synthesis using the vapor phase reaction

Yong-Ho Yoo, Kyoung-Hoon Er, Eun-Seok Song\*, Sung-Chul Yi\*\* and Myoung-Gi So\*\*

*Department of Advanced Material Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea*

*\*Department of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea*

*\*\*Ceramic Processing Research Center (CPRC), Hanyang University, Seoul 133-791, Korea*

(Received October 1, 1999).

**요 약** 수평형 반응로에서  $\text{TMS}[\text{Si}(\text{CH}_3)_4]$ 와  $\text{H}_2$  가스를 이용하여 SiC 초미분말 합성시 최적 공정 조건을 알아보기 위하여 수치모사방법을 이용하였다. 이론적인 해석 결과, 반응온도가 증가함에 따라 TMS의 전환률은 증가하였지만, 수소유량이 증가함에 따라서는 TMS 전환률이 감소하였다. 또한 반응온도가 높을수록 기상의 충돌확률이 증가하여 최종 생성된 SiC 입자농도는 감소하였지만, 수소유량과 TMS 농도가 증가하는 경우에는 생성된 입자농도가 증가하였다. 한편 입자크기는 반응온도와 초기 TMS 농도가 증가함에 따라 증가하였지만 수소유량이 증가하는 경우 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 반응온도, 수소유량 및 TMS 농도에 따른 입자크기 변화는 실제 실험한 결과와 이론적으로 고찰한 결과가 일치하였다.

**Abstract** The numerical simulation method was utilized to investigate the optimal condition for synthesizing ultrafine SiC powders by using  $\text{TMS}[\text{Si}(\text{CH}_3)_4]-\text{H}_2$  gaseous mixtures in the horizontal reactor. As a result of the theoretical analysis, the conversion percentage of TMS source was increased with increasing reaction temperature, however, which was decreased with increasing  $\text{H}_2$  flow rate. Though the SiC particles concentration synthesized was decreased with increasing the reaction temperature due to the higher collision rate in the gas phase, they were increased with increasing the  $\text{H}_2$  flow rate and TMS concentration. The SiC particle size showed a tendency to become larger as the reaction temperature and the initial TMS concentration were increased and smaller as the  $\text{H}_2$  flow rate was increased. The variation of experimental particle size with the reaction temperature,  $\text{H}_2$  flow rate and TMS concentration was agreed with the theoretical results.

### 1. 서 론

탄화규소는 전형적인 공유결합성 물질로서 화학적, 열적 특성이 매우 안정하며 고온강도, 고경도, 높은 열전도도, 우수한 산화저항성, 내마모성 등으로 인해 비산화물계 세라믹스 중 가장 널리 산업분야에 적용되어지고 있는 물질 중의 하나이다. SiC 세라믹스는 1370°C까지 산화저항성이 우수하고 크립과 응력파괴에 대한 우수한 저항성과 높은 열전도도 및 낮은 열팽창계수를 가지기 때문에 특히 열충격성에 대해 우수한 성질을 가지고 있다. 초미분, 고순도의

탄화규소 분말을 제조하기 위한 여러 가지 방법이 있으나 그 중에서 TMS- $\text{H}_2$ 계를 이용한 기상합성법이 널리 이용되고 있다[1, 2]. 본 연구팀에서 TMS- $\text{H}_2$ 계에서 반응변수를 변화시켰을 때 입자크기 변화 및 제조된 탄화규소의 농도 변화와 전환률을 연구하여 초미분말의 SiC를 합성할 수 있는 실험 조건을 제시한 바가 있다[3, 4]. 그러나 이를 보다 더 체계화하기 위해서는 반응변수들의 변화에 따른 반응기 내에서의 여러 가지 현상들의 이론적인 해석이 필요하다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 기상반응을 이용한 수평형 반응기

에서 초미립의 SiC 입자를 제조하는 공정을 모델링하여 SiC 초미립자의 생성 및 성장 메커니즘을 이론적으로 규명하고 이론치와 실험치를 비교 평가하고자하며 고기능성 SiC 초미립 분말을 제조하기 위한 공정변수의 영향을 분석하여 궁극적으로 최적의 기상 합성 조건을 찾고자 하였다. 본 모델에서는 반응기내의 열전달, 반응물의 수치, SiC 입자의 0차, 1차, 2차 모멘트에 대한 수치 관계를 풀었으며 에어로졸의 동력학에서는 화학 반응속도, 에어로졸 생성속도, 에어로졸의 충돌, 확산, 대류현상 등을 고려하였다[5, 6]. 본 모델 연구에서는 SiC 입자의 반응기내 축방향에 대해서는 편미분방정식으로 풀었으며 에어로졸 입도분포의 가정으로는 log-normal 분포식을 이용하였다. 반응변수로서 반응온도, 반응물 농도, 기체유량 등을 변화시키며 수평형 반응기에서 생성되는 미립 분말의 SiC 크기와 농도를 계산하였고 이를 실제 실험치와 비교 분석하였다.

## 2. 이론 및 실험방법

### 2.1. 이론

본 연구에서 반응기내의 모델식을 세우기 위해 수평형 반응로에서의 TMS 물질수지식, TMS 입자의 0차, 1차, 2차 모멘트 수치식을 고려하였으며 에어로졸의 동력학식에서는 화학 반응속도, SiC 입자의 생성속도 및 충돌 현상 등을 고려하였다[7, 8]. 모델식을 세우기 위한 가정은 다음과 같다[5, 6].

- (1) 반응관내 흐름을 plug흐름으로 가정하였다.
  - (2) 기체 중의 에어로졸의 loading이 크지 않아서 유체 전달현상이나 열전달 속도에 에어로졸의 영향은 없다.
  - (3) TMS의 열분해속도는 과량의 H<sub>2</sub>가 과잉 공급되고 반응에도 직접적으로 참여하지 않기 때문에 H<sub>2</sub> 농도에 무관하고 반응물인 TMS 농도(C)에 대해 1차 반응이다.
  - (4) 반응식 자체로는 몰수가 변화지만 과량의 H<sub>2</sub>를 공급하였으므로 전체 기체유량에 영향을 미치는 변수로는 TMS 보다는 H<sub>2</sub> gas 유량이므로 전체 기체유량은 일정하다.
- 위의 가정하에 반응관내의 TMS에 대한 물질 수치식을 세우면

$$u = \frac{\partial C}{\partial Z} = -RXN \quad (1)$$

으로 나타나며, TMS의 반응속도식으로  $-RXN = k_0 \exp(-E/RT)C$ 를 이용하였고( $k_0 = 2.44 \times 10^9 \text{ sec}^{-1}$ ,  $E = 160 \text{ kJ/mol}$ )[8], (1)식의 오른쪽 항은 열분해에 의한 소모속도를 보여 주고 있다.

TMS 입자의 화학반응, 확산, 충돌 및 대류 현상을 고

려하여 입자 크기가  $v \sim v + dv$  사이에 있는 TMS 입자에 대해 에어로졸 동력학식을 세우면[9, 10]

$$u \frac{\partial n}{\partial Z} = \frac{1}{2} \int_{v^*}^v \beta(v, v-v') n(v, r, z) n(v-v', r, z) dv' - \int_{v^*}^{\infty} \beta(v, v') n(v, r, z) n(v', r, z) dv' + RXN \delta(v - v') N_{av} \quad (2)$$

으로 표시된다. 식(2)에서 우변의 첫 번째 항은 TMS 입자의 충돌에 의한 생성속도이고 두 번째 항은 소멸속도를 각각 나타내며, 세 번째 항은 TMS가 열분해되어 SiC 입자가 초기에 생성되는 속도이며  $v'$ 는 반응에 의해 처음 만들어진 SiC 입자의 부피를 나타낸다.

$\beta$ 는 충돌 빈도함수로서 free-molecule regime과 continuum regime에서의 기하학적 평균을 나타내고 식(2)에서 제시한 에어로졸 모멘트식을 풀기 위하여 에어로졸 입도분포에 대한 가정이 필요하며 여기서는 고온 반응기에서의 입자 성장에 실험적으로 많이 입증된 log-normal의 분포식으로 가정하였다.

$$n(v) = \frac{M_0}{3(2\pi)^{1/2} \ln \sigma_v} \exp \left[ \frac{-(\ln^2(v/v_g))}{18 \ln^2 \sigma} \right] \quad (3)$$

많은 실험에서 측정하는 에어로졸의 parameters로서 에어로졸 전체농도( $M_0$ ), 평균 입자 부피( $v_g$ ) 및 표준편차( $\sigma$ )가 있으며 log-normal 분포식을 가정할 경우  $v_g$ 와  $\sigma$ 를 다음 식과 같이 0~2차 모멘트로 표시할 수 있다.

$$v_g = M_1^2 / (M_0^3 M_2)^{1/2} \quad (4)$$

$$\ln^2 \sigma = \ln(M_0 M_2 / M_1^2) / 9 \quad (5)$$

그러므로 SiC 입자에 대한 농도, 크기 및 편차에 대한 정보를 얻기 위해서는 0차, 1차, 2차 모멘트에 대한 에어로졸 동력학식을 이용할 수 있다. 또한 log-normal의 분포식에서는 q차 모멘트( $M_q$ )와  $M_0$ ,  $v_g$ ,  $\sigma$  사이에 다음과 같은 관계가 있다.

$$M_q = M_0 v_g^q \exp(4.5q^2 \ln^2 \sigma) \quad (6)$$

식(2)에 식(3)-(6)의 관계를 대입하고 1,  $v$ ,  $v^2$ 을 곱한 다음 양변을 각각  $v^*$ 에서  $\infty$ 까지 적분하면 각각의 모멘트에 대한 다음의 식이 얻어진다. 먼저 0차 모멘트(SiC 입자의 농도)는[5, 11]

$$u \frac{\partial M_0}{\partial Z} = -\xi M_0^2 + RXN N_{av} \quad (7)$$

으로 나타나며 에어로졸의 1차 모멘트(SiC 입자의 부피)에 대한 수치식[5, 11]은 다음과 같이 쓸 수 있으며

$$u \frac{\partial M_1}{\partial z} = RXN N_{av} v^* \quad (8)$$

에어로졸의 2차 모멘트에 대한 수치식[5, 11]을 세우면 다음과 같다.

$$u \frac{\partial M_2}{\partial z} = 2\xi M_1^2 + RXN N_{av} v^{*2} \quad (9)$$

0차 모멘트와 2차 모멘트에서의 충돌 계수( $\xi$ ,  $\zeta$ )는 각각 아래의 식과 같이 freemolecule regime과 continuum regime 사이의 기하학적 평균으로 나타내었다.

$$\zeta = \zeta_{FM} \zeta_C / (\zeta_{FM} + \zeta_C) \quad (10)$$

식(2)의 경우, 초기농도  $C_0$ 를 양변에 나누어 주고 식(2), (7), (8), (9)에서는 기체 반응물의 유속  $u$ 를 위치에 따라 일정하다고 가정하여 미분항의 분모에 포함시키면 반응기 내의 위치를 나타내는  $z$ 는 기체 반응물이 반응기내에 머무는 시간  $\tau$ 로 바꾸어 생각할 수 있다. 따라서

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -RXN' \quad (11)$$

$$\frac{dM_0}{d\tau} = -\xi M_0^2 + RXN \cdot N_{av} \quad (12)$$

$$\frac{dM_1}{d\tau} = RXN \cdot N_{av} \cdot v^* \quad (13)$$

$$\frac{dM_2}{d\tau} = 2\zeta M_1^2 + RXN \cdot N_{av} \cdot v^{*2} \quad (14)$$

$$[-RXN' = k_0 \exp(-E/(RT))\theta, \theta = C/C_0, \tau = z/u]$$

식(11)~(14)의 형태로 바뀌어진 초기조건은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = 1, M_0 = M_1 = M_2 = 0 \text{ at } \tau = 0$$

반응에 가장 중요한 영향을 미치는 변수인 반응온도구배는 반응관의 거리( $Z$ )에 따라 측정하였으며 이를 regression하여 위치에 대한 함수로 정의하여 사용하였으며 이를 Fig. 1에서 보이고 있으며 가장 높은 온도( $T_{max}$ )를 공정조건인 반응온도로 하였다. 그 수식을 수치모사에서 TMS 열분해속도식의 온도로서 대입하였고 기체의 물성은 가장 높은 반응온도를 대입하여 수치모사에 사용하였다.

위에서 얻어진  $C$ ,  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  각각에 대한 모델식(11)~(14)은 4개의 연립 상미분방정식으로서 Fehlberg 4.5 차 Runge-Kutta method를 이용한 RKF45 subroutine을 사용하여 적분하였다. 수치모사에 의하여 반응기 내에서의  $C$ ,  $M_0$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ 의 변화를 계산하였으며, 수평형 반응로에서의 SiC 전환률, SiC의 평균 입자크기, 입자의 표준

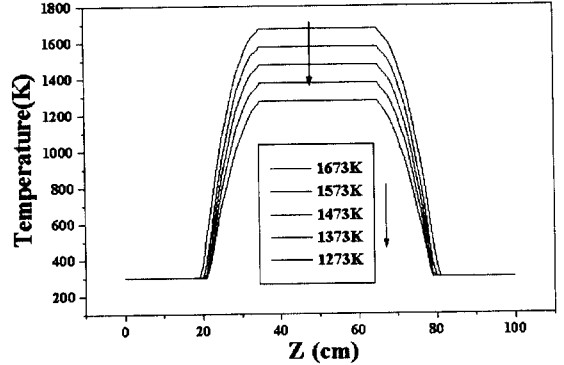


Fig. 1. The curve fitting temperature profiles in tube furnace for various setting temperature.

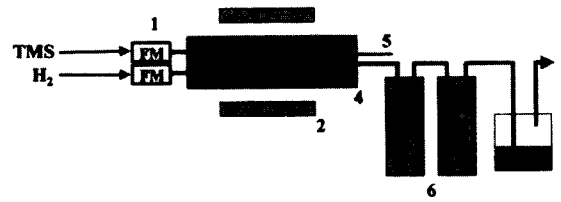


Fig. 2. Schematic drawing of experimental apparatus 1. Flowmeter 2. Furnace 3. Alumina tube (I.D-4 mm, 300 L) 4. Alumina tube (I.D-23 mm, 1000 L) 5. Thermocouple 6. Collecting flask.

편차 등을 계산하였으며, 실험치와 이론치의 입자크기를 비교 평가하였다.

## 2.2. 실험방법

본 실험에서는 TMS와  $H_2$  가스를 출발물질로하여 기상 합성장치를 이용해서 탄화규소분말을 합성하였으며 Fig. 2에 장치의 개략도를 나타내었다. 실험방법에 대해서는 이미 자세히 발표된 바 있으며[3, 4] 본 논문에서 고려한 반응변수로는 실험값과 이론값을 비교 분석하기 위한 동일한 조건인 반응온도 1273~1673 K, 수소유량 200~2000 cc/min, TMS 농도 1~10% 조건에서 실험을 행하였다. 한편 평균 입자크기는 TEM 사진을 Image analyzer(Image pro plus)를 통하여 측정하였다.

## 3. 수치모사 결과 및 분석

### 3.1. 여러 변수에 따른 영향

Fig. 3는 수소유량 1000 cc/min, TMS 농도 2%일 때 반응기 길이( $z$ )에 따른 TMS의 전환률을 반응온도 변화에

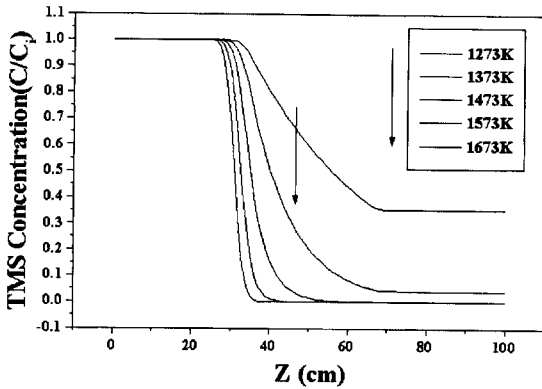


Fig. 3. The dimensionless TMS concentration profiles along the axial distance for reaction temperature ( $H_2$  flow rate = 1000 cc/min, TMS concentration = 2 %).

따라 수치모사한 결과를 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 반응온도가 증가함에 따라 TMS의 열분해되는 정도가 증가하여 1473 K 이상에서는 반응이 완전히 종결되고 있지만 1473 K 이하에서는 TMS가 미반응 gas로 배출되고 있음을 보이고 있다. 1273 K에서의 최종전환율은 약 66.7 %이고 1673 K에서의 최종전환율은 약 99.9 % 이상이었다. Fig. 4는 반응온도 1373 K, TMS 농도 2 %일 때 반응기 길이(z)에 따른 TMS의 전환율을 수소유량 변화에 따라 수치모사한 결과이며 수소유량이 감소함에 따라 반응관내 기체의 체류시간이 증가하여 오랜시간 반응함으로써 TMS의 농도가 빨리 감소함과 동시에 전환율은 증가함을 보여주고 있으며, 수소유량이 600 cc/min 이하인 경우 최종전환율이 약 99.9 % 이상임을 알 수 있었다.

Fig. 5는 총유량 1000 cc/min, TMS 농도 2 %일 때 반응기 길이(z)에 따른 SiC 입자의 농도 변화를 반응온도

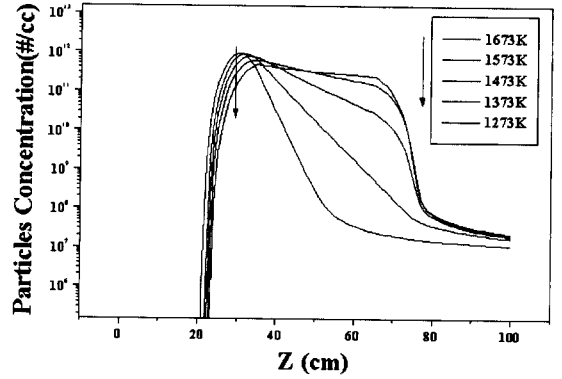


Fig. 5. The concentration profiles of SiC particles along the axial distance for various reaction temperature ( $H_2$  flow rate = 1000 cc/min, TMS concentration = 2 %).

변화에 따라 수치모사한 결과를 보이고 있는데, 전체적으로 반응 초기에는 열분해반응에 의해 SiC 입자의 농도가 급격히 증가하지만 열분해반응이 종료된 후에는 입자간 충돌에 의해 SiC 입자의 성장과 동시에 소멸되기 때문에 SiC의 농도가 급격히 감소함을 나타내고 있다. 또한 고온일수록 핵생장이 빨리 일어남에 따라 SiC 입자가 감소되는 반응로의 위치는 가스 주입구 쪽으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 반응온도가 증가하는 경우 열분해반응도 증가하여 저온보다 SiC 입자가 빨리 생성되고 충돌에 의한 성장 및 소멸이 역시 빨라짐을 보이고 있다. 즉 반응온도가 증가함에 따라 최종 SiC 입자의 농도는 감소함을 알 수 있다. Fig. 6는 반응온도 1373 K, TMS 농도 2 %일 때 반응기 길이(z)에 따른 SiC 입자의 농도 변화를 수소유량 변화에 따라 수치모사한 결과이다. 그림에서 보면 전체적으로 반응온도의 변화와 유사한 경향을 보이고 있으며 수소유량이 감소할수록 반응기 내 체류시간이 증가하여 SiC 입자는 빨리 생성

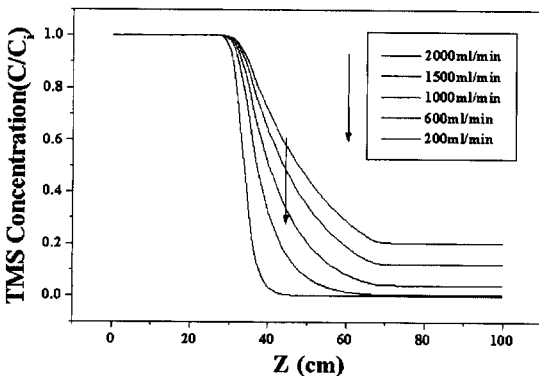


Fig. 4. The dimensionless TMS concentration profiles along the axial distance for total flow rate (Reaction temperature = 1373 K, TMS concentration = 2 %).

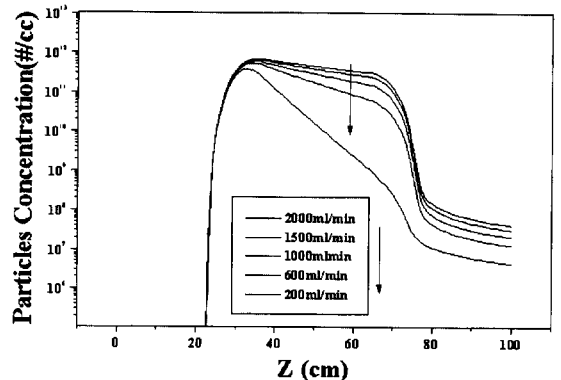


Fig. 6. The concentration profiles of SiC particles along the axial distance for various total flow rate (Reaction temperature = 1373 K, TMS concentration = 2 %).

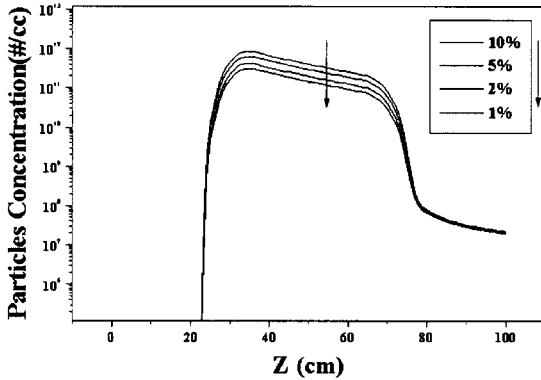


Fig. 7. The concentration profiles of SiC particles along the axial distance for various TMS concentration (Reaction temperature = 1373 K, H<sub>2</sub> flow rate = 1000 cc/min).

되나 긴 체류시간과 충돌횟수 증가로 인해 최종 SiC 입자의 농도는 감소함을 보이고 있다. 즉, 최종 SiC 입자의 농도는 수소유량이 감소함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있고 이는 입자의 충돌로 인한 성장때문인 것으로 사료된다. Fig. 7에서는 반응온도 1373 K, 수소유량 1000 cc/min 일 때 반응기 길이(z)에 따른 SiC 입자의 농도 변화를 TMS 농도 변화에 따라 수치모사한 결과를 보이고 있다. 반응온도와 수소유량이 일정하므로 입자가 받는 열에너지나 체류시간이 동일하므로 반응가스의 농도인 TMS 농도가 증가할수록 보다 더 많은 입자가 생성되고 충돌하므로 최종적으로 생성되는 SiC 입자의 농도는 증가되는 것으로 생각된다.

3.2. 실험값과 이론값의 입자크기 비교

Fig. 8, 9, 10에 입자크기에 대한 반응 변수에 따른 수

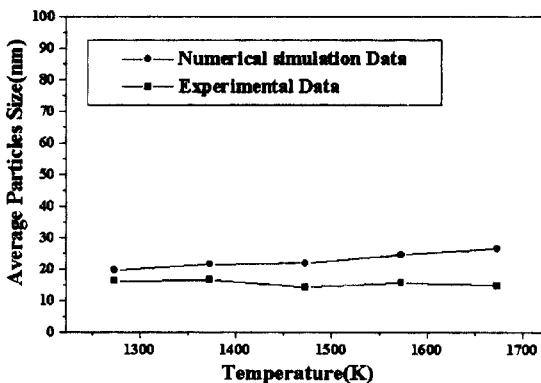


Fig. 8. The comparison of theoretical value and experimental value for various reaction temperature (H<sub>2</sub> flow rate = 1000 cc/min, TMS concentration = 2 %).

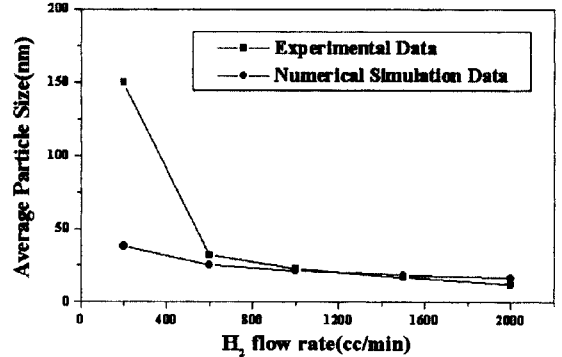


Fig. 9. The comparison of theoretical value and experimental value for various H<sub>2</sub> flow rate (Reaction temperature = 1373 K, TMS concentration = 2 %).

치모사 결과와 실제 실험결과를 비교하여 함께 나타내었다. 이론적 계산은 모든 변수에 대해서 반응기 길이가 증가함에 따라 입자의 크기가 증가하므로 본 그림에 나타난 입자의 크기는 반응이 모두 끝난 후 반응로 길이(z)가 100일 때의 최종 입자 크기만을 선택하여 실험결과[3, 4]와 비교하였다. Fig. 8에서는 반응기내의 반응온도 변화에 따른 SiC 입자크기 변화를 나타내었다. Fig. 8에서 보이는 바와 같이 이론적 결과는 반응온도가 증가함에 따라 반응관내의 SiC 입자가 빨리 생성되고 일찍 생성된 SiC 입자는 충돌에 의해 더욱 빨리 성장하게 되어 SiC 입자크기가 증가하였으나 실험적인 결과에서는 20 nm 이하의 입자크기로 일정하게 나타나고 있으며 이는 빠른 유속으로 인한 체류시간이 짧아 입자의 충돌kernel이 이론적인 결과보다 작았기 때문이라고 생각된다. 반응온도에 따른 입자크기 모사의 결과는 실험적인 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. Fig. 9에 반응기내의 수소유량 변화에 따른 SiC 입자크기 변화를 나타내었다. 두 경우 모두, 수소유량이 증가함에 따라 입자크기가 감소하는 경향을 보이고 있으며 이는 충유량이 증가함에 따라 체류시간이 감소하여 생성된 SiC 입자의 충돌이 감소하였기 때문이고 낮은 수소유량의 경우 (<600 cc/min) 입경이 서로 다른 이유는 표면반응에 의한 입성장 개념이 이론식에 포함되지 않고 단순히 입자의 성장을 충돌개념으로만 고려한 결과로 생각된다. Fig. 10에 반응기내의 TMS 농도 변화에 따른 SiC 입자크기 변화를 나타내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, 이론적 결과에서는 TMS의 농도가 증가함에 따라 입자의 크기가 증가함을 보이고 있는데 이는 TMS 농도가 증가함에 따라 생성되는 SiC 입자의 농도가 증가하여 반응관내에서의 입자충돌 확률이 증가하므로 입자의 크기가 증가하는 것으로 생각된다. 실험적 결과에서는 TMS의 농도변화에 따라 입자 크기가 증가하다가 일정함을 보이고 있는데 이미 발표된 논문에서

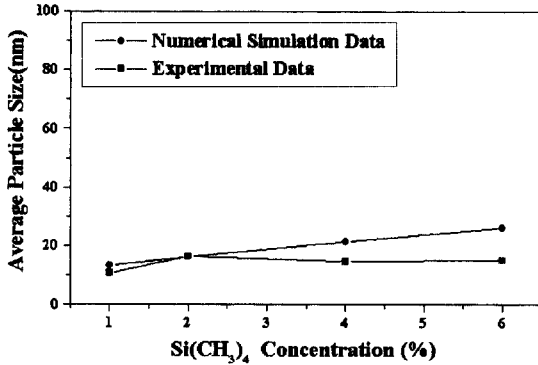


Fig. 10. The comparison of theoretical value and experimental value for various H<sub>2</sub> flow rate (Reaction temperature = 1373 K, Total flow rate = 1000 cc/min).

언급하였듯이[3, 4] 수소가스의 증가로 인해 CH<sub>x</sub>종들이 CH<sub>4</sub>로 방출시킬 수 있는 가능성이 증가되어 TMS source 가 CH<sub>4</sub>로 방출됨에 따라 반응물들이 소모되어 증가된 TMS 농도만큼 핵생성과 충돌로 인한 핵성장이 이루어지지 못하였기 때문에 TMS 농도가 2% 이상에서는 일정한 입자크기를 나타낸다고 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수평형 반응로를 이용한 기상반응에 의해 초미세 SiC 입자의 제조 시 입자특성을 plug 흐름으로 가정한 간략화 된 모델을 이용하여 이론적으로 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 반응온도 1473 K 이상에서는 TMS의 열분해속도가 증가하여 반응관 길이 58 cm 이내( $z \leq 58$ )에서 99% 이상 열분해 되었다.

2) 반응온도가 높고 총유량이 감소할수록 반응기내에서의 TMS 전환률은 증가하였다.

3) 최종 SiC 농도는 반응온도가 낮고 TMS 농도와 수 소유량이 높을수록 증가하였다.

4) 생성된 SiC 입자의 크기는 반응온도가 증가할수록, TMS 초기농도가 증가할수록, 또는 총유량이 감소할수록 증가하였으며 실제 실험값과는 약간의 차이가 있었으나 대략 20 nm로 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한양대학교 세라믹공정연구센터를 통한 한국과 학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

#### 사용기호

- A<sub>1</sub> : constant,  $1.257(6/\pi)^{1/3}$
- b : constant
- B(v) : Cunningham correction factor
- C : concentration of TMS [mol/cm<sup>3</sup>]
- C<sub>i</sub> : inlet concentration of TMS [mol/cm<sup>3</sup>]
- E : activation energy for pyrolysis of TMS [J/mol]
- K<sub>0</sub> : preexponential Arrhenius rate constant [1/sec]
- K<sub>B</sub> : Boltzman's constant
- M<sub>0</sub> : total concentration of aerosol [mol/cm<sup>3</sup>]
- M<sub>q</sub> : q-th order moment of aerosol
- n : particles size distribution function
- N<sub>av</sub> : Avogadro's number
- RXN : pyrolysis rate of TMS
- T : gas temperature [K, °C]
- u : average gas velocities [cm/sec]
- v, v' : particles volume [cm<sup>3</sup>]
- v<sub>g</sub> : geometric mean volume of SiC particle [cm<sup>3</sup>]
- v\* : volume of SiC monomer [cm<sup>3</sup>]
- z : axial distance from burner [cm]

#### 그리스 문자

- β : collision frequency function
- ρ<sub>p</sub> : density of TMS [g/cm<sup>3</sup>]
- θ : conversion of TMS
- τ : residence time in tube furnace
- μ : viscosity of gas stream [g/cm · sec]
- σ : standard deviation
- λ : mean free path [cm]
- ξ : collision coefficient for zeroth moment
- ζ : collision coefficient for second moment

#### 참 고 문 헌

- [1] Y. Okabe, J. Hojo and A. Kato, J Less-Common Met. 68 (1979) 29.
- [2] A. Kato, J. Hojo and Y. Okabe, Kyushu University 41(4) (1981) 319.
- [3] K.H. Er, S.H. Lee, Y.H. Yoo and M.G. So, J. Korean Ceramic Soc. 35(11) (1998) 1190.

- [ 4 ] Y.H. Yoo, K.H. Er and M.G. So, J. Korean Ceramic Soc. 36(8) (1999) 853.
- [ 5 ] B.S. Chae and K.S. Kim, HWAHAK KONGHAK 37(1) (1999) 1.
- [ 6 ] K.S. Kim and B.S. Hyun, J. Korean Ceramic Soc. 32(11) (1995) 1246.
- [ 7 ] S.E. Pratsinis and K.S. Kim, J. Aerosol Sci. 20(1) (1989) 101.
- [ 8 ] F. Henry, B. Armas, C. Combescure, A. Figueras and S. Garelik, Surface and Coatings Technology 80 (1996) 134.
- [ 9 ] S.K. Friedlander, Smoke, Dust and Haze (Wiley, New York, 1977) p. 263.
- [10] J.H. Seinfeld, Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution (Wiley, New York, 1986) p. 307.
- [11] K.S. Kim and S.E. Pratsinis, J. AIChE 34(6) (1988) 912.