

연소합성된 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 입자특성에 대한 화염온도 변화의 영향

이 교 우\*

Effect of Flame Temperature on the Characteristics of the Combustion Synthesized TiO<sub>2</sub> Nanoparticles

Gyo Woo Lee\*

## ABSTRACT

In this work, TiO<sub>2</sub> nanoparticles were synthesized using N<sub>2</sub>-diluted and Oxygen-enriched coflow hydrogen diffusion flames. The effect of flame temperature on the characteristics of the formed TiO<sub>2</sub> nanoparticles was investigated. The measured maximum centerline temperature of the flame ranged from 2,103 K for oxygen-enriched flame to 1,339 K for N<sub>2</sub>-diluted flame. The visible flame length and the height of the main reaction zone were characterized by direct photographs. The characteristics of synthesized TiO<sub>2</sub> nanoparticles were analyzed by SEM and TEM images. From these images, it was evident that the formed nanoparticles were divided into two sorts. In the higher temperature region, over the 1,700 K, TiO<sub>2</sub> nanoparticles having spherical shapes with diameters about 60 nm were synthesized. In the lower temperature region, below the 1,600 K, the diameters of formed nanoparticles having unclear boundaries were ranged from 35 - 50 nm.

Key Words : Combustion Synthesis, TiO<sub>2</sub> Nanoparticles, Flame Temperature, Oxygen-Enriched Flame, Particle Characteristics

## 1. 서 론

일반적인 이산화티타늄에 비해 입자크기가 현격히 작은 나노 크기의 초미립 분말을 나노 이산화티타늄이라고 할 수 있다. 일반 TiO<sub>2</sub> 입자와 나노입자를 비교해보면, 일반 입자가 200~300 nm 이상의 입자크기를 가지지만 나노입자는 대략 20nm 내외의 크기를 가진다고 알려져 있다. 비표면적(BET)에서는 각각 10m<sup>2</sup>/g 이하와 50m<sup>2</sup>/g 이상의 값을 가진다. 때문에 나노입자는 높은 활성도와 반응성을 가지며 분산성과 내구성 이 우수하다.

TiO<sub>2</sub> 나노입자는 광촉매로서 화학적 및 열적

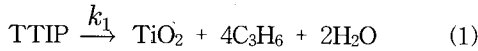
으로 매우 안정된 물질이고, 아나타제(anatase), 루타일(rutile) 및 비정질(amorphous)의 3가지 결정구조를 갖는다. 이 중에서 아나타제 결정구조를 갖는 TiO<sub>2</sub> 입자가 광촉매로서 활성이 더 우수한 것으로 알려져 있으며, 루타일 결정구조는 백색안료로 반도체 공정 등에 많이 사용된다. TiO<sub>2</sub>는 자외선이 조사되면 여기상태로 되어 광활성을 나타내므로, 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 악취, 중금속 물질 등을 제어하는데 널리 사용되고 있으며, 물을 분해하여 수소를 발생시키는 경우에도 활용되고 있다. 그밖에도 자외선 차단 재료나 화장품, 도료, 필름 등의 첨가원료로 사용되며, 각종 전자제품의 기초 소재 원료로 사용된다.

TiO<sub>2</sub>는 기상반응 또는 액상반응을 이용하여 합성되고 있는데, 기상반응은 액상반응에 비해 입자크기를 제어하기 쉽다. 보통 전기로와 화염

\* 전북대학교 기계항공시스템공학부

† 연락처, gwlee@chonbuk.ac.kr

을 이용하는 방법이 기상반응에 의해  $TiO_2$  입자를 합성하는데 많이 사용되고,  $TiO_2$  나노입자의 전구체(precursor)로는 TTIP(titanium tetra-isopropoxide,  $Ti[OCH(CH_3)_2]_4$ ) 또는  $TiCl_4$ 가 사용된다. TTIP를 전구체로 사용하여  $TiO_2$  나노입자를 생성하는 반응은 열분해(thermal decomposition)와 가수분해(hydrolysis)로 구분될 수 있다. 열분해는 아래와 같은 반응을 따른다 [1-3].



여기서, Okuyama 등[1]에 의하면 반응속도상수(rate constant)  $k_1[s^{-1}]$ 은 다음의 값을 가진다.

$$k_1 = 3.96 \times 10^5 \exp(-70.5kJ \cdot mol^{-1}/R_g T) \quad (2)$$

$R_g$  [J/mol K]는 기체상수이며, T [K]는 절대 온도이다.

한편, 본 연구의 대상인 화염합성에서의 주된 생성기구인 가수분해에 의한 생성은 다음의 반응을 따른다.



여기서, 가수분해 반응속도상수  $k_2$ 는 Kashima와 Sugiyama[4]에 의하면 다음과 같다.

$$k_2 = 3.0 \times 10^{15} \exp(-8.43kJ \cdot mol^{-1}/R_g T) \quad (4)$$

식 (2)와 (4)를 보면 화염대에서 반응의 부산물로 발생하는 수분에 의한 가수분해 반응이 열분해 반응에 비해서 훨씬 빠르다는 것을 알 수 있다.

전구체로 TTIP를 사용하고 생성된 입자를 소결(sintering)을 통해서 변화시킬 경우, 첨가물에 따라 다소 차이는 있지만 700~800°C 정도를 기준으로 아나타제 구조에서 루타일 구조로 변환된다고 보고되고 있다[5-7]. 한편, Nakaso 등[8]은 전기로의 온도가 600~1,000°C일 때 합성된 입자가 대부분 아나타제 구조이고, 약 700°C를 기준으로 온도에 대한 입자 크기의 특성이 달라진다고 보고하였다. 이들은 고온영역 및 저온영역에서 전구체의 농도에 따라 서로 다른 크기의 기본입자(primary particles)가 생성되며, 고온영역에서는 주로 덩어리진(agglomerated) 작은 기본입자들이 소결과정을 통해서 큰 입자로 변화되는 반면, 저온영역에서는 단위체(monomer)들의 응집(coagulation) 및 융합(coalescence)에 의해 생성된 비교적 큰 기본입자로 새로운 단위체가 응결되거나 응축(condensation)되어 보다 큰 기본입자가 생성된다고 보고하였다. 대략 10~20 nm 수준이 입자직경을 가진다고 보고하고 있다.

화염을 이용한 합성의 경우에는 전체적으로 온도가 일정한 영역이 전기로에 비해서 매우 제한

적이기 때문에 온도의 직접적인 영향을 정량적으로 규명하는 것은 전기로에 비해서 다소 어렵다. Jang 등[9]은  $TiCl_4$ 를 전구체로 사용하고 화염조건을 변화시켜 화염온도를 1700°C에서 1400°C로 낮출 때 아나타제 구조가 41 %에서 80 %로 증가함을 보고하였으며 입자의 직경은 14~23 nm 정도로 보고하고 있다. 또한, Pratsinis 등[10]과 Katzer 등[11]은 고온일수록 루타일 구조로의 전환이 지배적이라는 결과를 보여주었으며, 입자 직경은 실험 조건에 따라 각각 10~105 nm와 20~30 nm 수준이었다. 이상의 세 연구에서는 모두 전구체로서  $TiCl_4$ 를 사용하였다. Lee와 Choi[12]는  $CO_2$  레이저를 조사시켜 루타일 구조를 아나타제 구조로 전환시켰다.

한편, Yang 등[13]은 TTIP를 전구체로 사용하여 메탄 확산화염을 이용한 합성에서 반응지역의 온도가 900~1,430°C의 범위에서는 아나타제상과 루타일상이 혼합되어 나타나고 있으며 1,500~1570°C의 경우에는 100 % 아나타제상의 결정 구조를 가지는  $TiO_2$  나노입자가 생성됨을 보고하였으며 생성된 입자들은 10 nm 내외의 크기를 가진다고 보고하였다.

이상의 선행 연구자들의 결과를 참고하여, 본 연구에서는 80~90°C로 중탕 가열되는 TTIP를 전구체로 사용하며 수소를 연료로 하는 확산화염에서 화염온도가 합성되는  $TiO_2$  나노입자의 입자 크기 및 입자의 응집형태에 미치는 영향을 고찰하였다. 화염의 온도를 조절하기 위하여 다중관형 버너를 사용하여 연료와 산화제 사이에 질소를 주입하여 화염온도를 낮추거나 산화제에 산소를 부화(enriched)하여 화염온도를 높이는 방법을 사용하였다. 열전대 급속삽입법을 이용하여 연소조건에 따라 변화되는 화염 중심축의 온도를 측정하고, 열영동 그리드(thermophoretic grid)와 포집판(collector plate)를 사용하여 생성된  $TiO_2$  나노입자를 포집하여 전자현미경을 이용하여 입자의 형상과 크기 등을 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치는 Fig. 1에서 보는 것처럼, 연료( $H_2$ ), 중간 회색기체( $N_2$ ), 산화제( $N_2$  및  $O_2$ ) 그리고 전구체인 TTIP를 운반하는 이송기체(Ar)를 각각 정량하여 공급하는 유량제어 부분과 공급된 연료 및 산화제가 반응하여 화염이 형성되고 그 화염에서 가수분해 반응 등에 의해서 TTIP가  $TiO_2$ 로 생성되는 반응기 역할을 하는 화염 및 연소기 부분으로 구분된다. 측정을 위한 부분으로는 입자의 열영동 포집장치, 그리고 온도 측정 및 컨트롤 장치가 있다.

사용된 버너는 Fig. 1의 우측 상부에 보는 것처럼 동축관의 형태인데, TTIP가 운반기체(Ar)와 함께 공급되는 내경 3.87 mm(외경 6.35 mm)인 중앙 관과 이를 둘러싸고 있는 연료(H<sub>2</sub>)가 공급되는 내경 10.22 mm(외경 12.70 mm)의 두 번째 관과 희석기체(N<sub>2</sub>)가 공급되는 내경 16.57 mm(외경 19.05 mm)의 세 번째 관, 그리고 제일 바깥쪽에서 산화제인 공기와 질소가 공급되는 내경 22.10 mm(외경 25.40 mm)의 외부 관으로 구성되어 있다.

생성된 입자의 포집은 10 mm x 10 mm 크기의 스테인리스스틸 기판(두께 0.2 mm) 및 열영동 그리드(micro grid, Cu 200 mesh, Jeol Co.)을 사용하였으며, 화염 및 소결(sintering) 영향을 배제할 수 있는 위치인 버너 팁(tip)에서 150 mm 하류에 설치하여 입자를 포집하였다.

급속압입 온도측정을 위해 응답특성이 좋은 직경 127  $\mu\text{m}$ 인 R-형 (Pt/Pt-13%Rd) 열전대를 사용하였다. 발생된 열전대의 기전력은 A/D 컨버터(HP 34970A)를 통해 디지털로 전환되어 컴퓨터에 저장되었다. 버너 팁을 기준으로 높이 10 mm부터 160 mm까지 5 mm 간격으로 10회 반복 측정하여 평균치를 구하였다.

Table 1에 나타낸 바와 같이 전구체 운반가스 및 연료의 양은 고정시키고, 희석기체를 추가하

Table 1 Experimental conditions

Case	Flowrate (Liters/min.)				
	Ar	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
	TTIP	Fuel	Dilution	Oxidizer	
#1	0.5	3.3	5.4	10.0	2.7
#2	0.5	3.3	3.6	10.0	2.7
#3	0.5	3.3	1.8	10.0	2.7
#4	0.5	3.3	0.0	10.0	2.7
#5	0.5	3.3	0.0	8.9	3.8
#6	0.5	3.3	0.0	7.6	5.1

여 화염온도를 낮추거나 산화제에 산소를 추가하여 화염온도를 높이는 방법을 사용하였으며, 각 경우에 버너 상부의 중앙에서 축 방향으로 온도를 측정하여 최고 측정온도를 그 화염의 대표온도로 사용하였으며, 기관과 그리드에 포집된 TiO<sub>2</sub> 나노입자는 SEM (scanning electron microscope, Hitachi Inc., S-4700) 및 TEM (transmitting electron microscope, Jeol Inc., JEM-2010)으로 분석하여 생성된 나노입자의 입

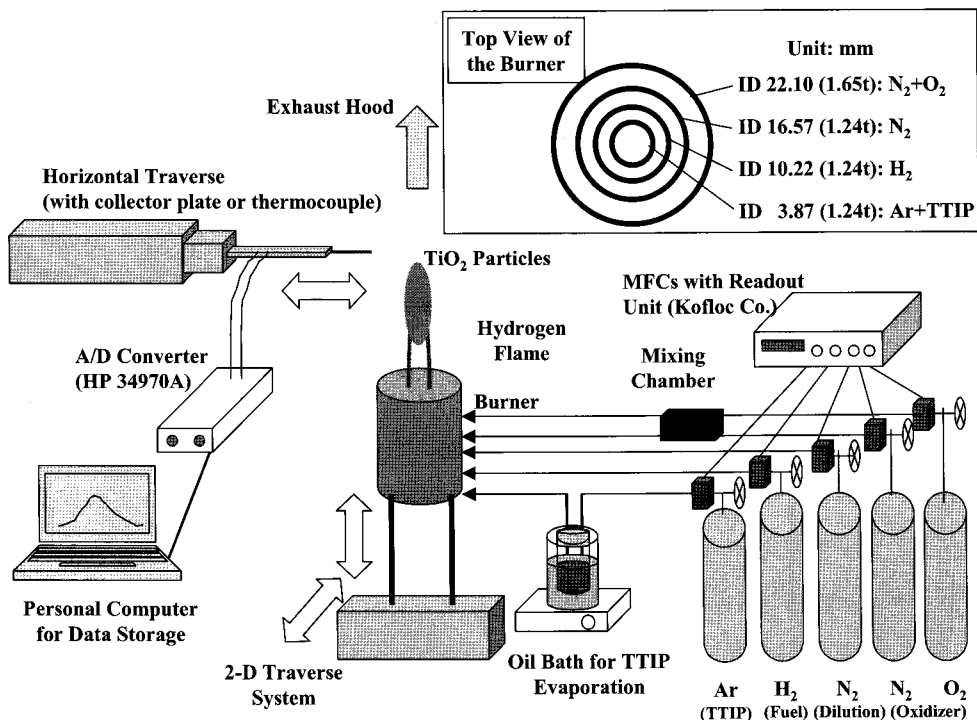


Fig. 1 Experimental setup

자 크기 및 분포형태를 파악하였다.

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 화염 특성의 변화

TiO<sub>2</sub> 나노입자의 발생기 역할을 하는 수소 화염은 산화제로 공급된 공기 중의 산소와 반응하여 수분을 생성한다. 수분은 화염대 근처에서 반응의 생성물로 나타나며, 전구체인 TTIP와 반응하여 TiO<sub>2</sub> 입자를 생성한다. 화염을 통한 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 생성 시 이러한 가수분해 반응 및 화염대 전후에서의 열분해 반응이 함께 나타날 수 있다. Fig. 2의 우측에 도식적으로 표시한 그림을 참조하고 사진을 확인하면, 화염의 하류 측에서는 생성된 TiO<sub>2</sub> 입자로 인해 매우 밝게 보이며, 상대적으로 어두운 주위의 수소화염과 대조를 이루고 있다.

유량 조건에 따른 가시화염 길이의 변화와 입자의 생성 지역을 정성적으로 직접 확인하기 위하여 촬영한 Fig. 2의 사진에서는, 연료와 산화제 사이에 투입한 희석제 N<sub>2</sub>로 인해 Case #1부터 #3의 경우에는 기준 상태라고 할 수 있는 수소-공기 화염인 Case #4와 비교할 때 가시화염의 길이가 상당히 늘어난 상태임을 알 수 있다. 반

면, 산화제에 산소량을 늘린 산소부화(oxygen-enriched) 화염인 Case #5와 #6의 경우에는 상대적으로 화염의 길이가 감소하였음이 명확히 확인된다.

또한 입자 생성영역에 해당하는 밝은 부분의 위치도 그림에서 보는 것과 같이 순차적으로 변화하고 있으며, 이 부분의 상대적인 밝기로 알 수 있는 입자의 개략적인 생성량은 비교적 저온인 Case #1과 #2의 경우 매우 적음을 사진을 통해 정성적으로 확인할 수 있다.

#### 3.2 화염온도

Figure 3은 Table 1에 나타난 실험조건별 화염에 대하여 화염의 축 방향으로 온도분포를 버너 팁(tip)에서 10 mm부터 160 mm까지 5 mm 간격으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. 이는 TTIP는 공급하지 않고 단지 화염의 온도만을 측정된 결과이다. 화염대로부터 중앙에 위치한 열전대 접점으로의 열전달을 배제하고자 급속삽입법으로 온도를 측정하였다. 측정 데이터는 열전대 접점 자체의 복사(radiation) 손실을 보상(compensation)한 것인데, 2,000 K 및 1,500 K의 측정치에서는 각각 약 100 K 및 40 K 정도의 접점 복사 보정치를 갖는다[14].

수소연료를 사용하면 단열화염온도(adiabatic flame temperature)가 대략 2,400 K에 도달하지

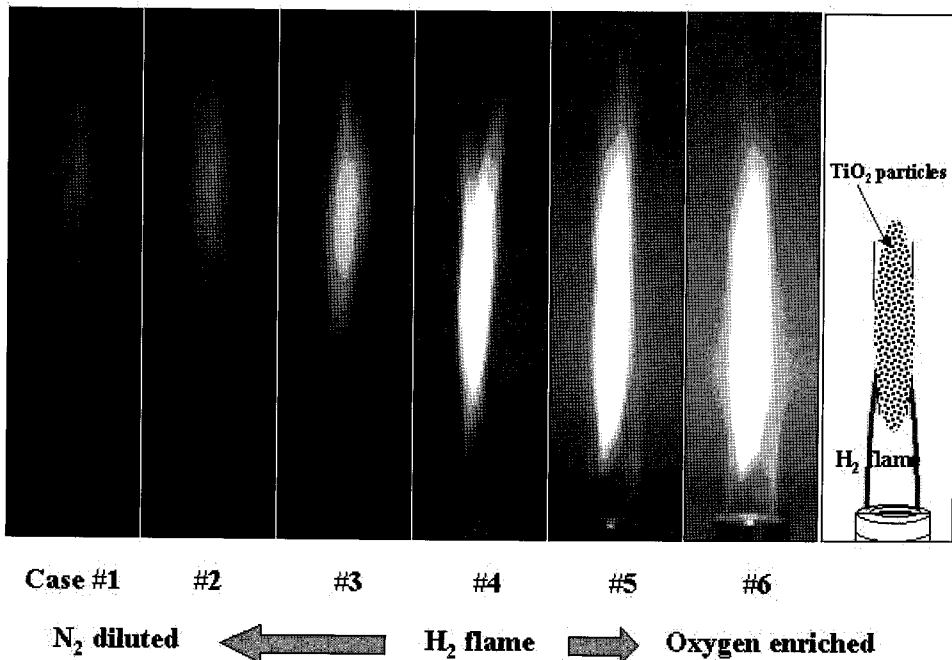


Fig. 2 Direct photographs and schematic diagrams of H<sub>2</sub> flame forming TiO<sub>2</sub> nanoparticles

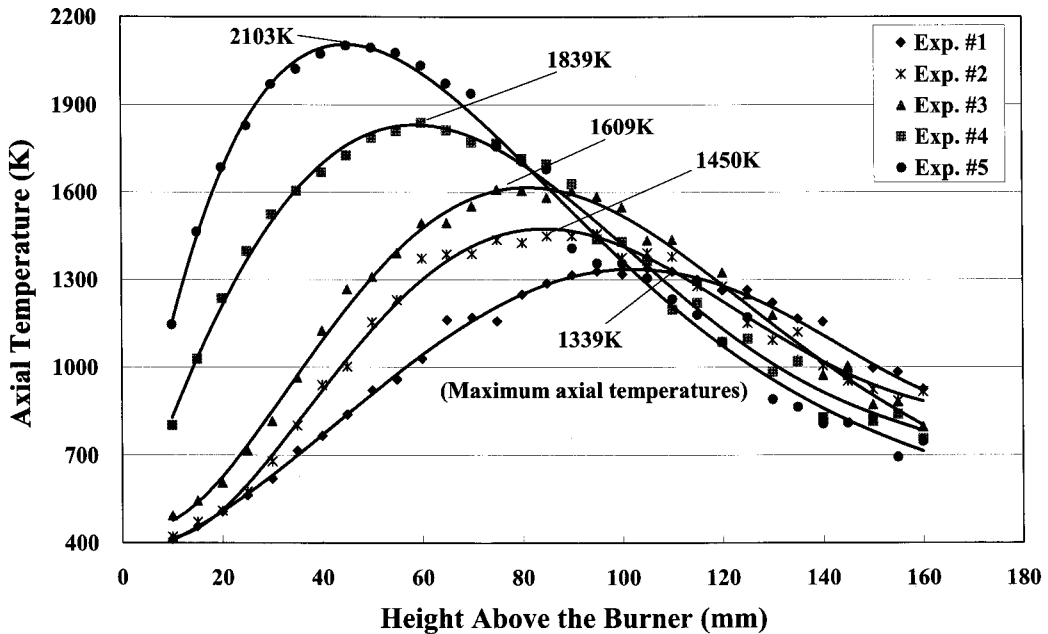


Fig. 3 Averaged axial temperature distributions

만, 측정 결과를 보면 약 29.9 %의 산소를 함유한 산화제를 투입한 Case #5의 경우에 축 방향의 최고온도는 버너 팁에서 45 mm 하류에서 약 2,103 K로 측정되었다. 수소-공기 화염인 산소 21 %의 경우인 Case #4는 하류 60 mm 지점에서 약 1,839 K로 나타났다. 연료와 산화제 사이에 질소를 투입한 나머지 세 경우인 Case #3부터 #1은 각각 버너 팁에서 75, 85, 110 mm 떨어진 곳에서 1,609 K, 1,450 K 및 1,339 K로 측정되었다.

가장 고온인 산화제 내 산소농도 40.2 %인 Case #6의 경우에는 급속삼입 및 후퇴를 함에도 불구하고 화염대를 가로지르는 열전대 나선의 응용으로 인하여 측정이 불가능하였다.

중심축 최고온도의 축 방향 위치변화 및 온도가 조건에 따라 달라지는 것은 Fig. 2에서 가지적으로 확인할 수 있으며, Fig. 3에서는 이를 정량적으로 보여주고 있다. 또한, 본 연구에서 SEM 분석을 위한 기판을 통한 입자의 포집은 하류 150 mm에서 이루어지므로 모두 1,000 K 이하의 조건에서 입자의 포집이 이루어지는 것으로 판단된다.

### 3.3 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 입자특성

Figure 4는 각 조건에서 생성된 나노입자를 SEM 분석을 통해서 입자의 형태를 살펴본 것이다. Fig. 3의 화염온도 측정 결과와 연계해서 보면, 합성온도 즉 화염온도가 증가할수록 포집된

입자의 직경은 증가한 것을 볼 수 있다. 산소부화나 질소회석을 하지 않은 단순한 수소-산소 화염에 해당하는 Case #4를 기준으로 상대적으로 저온인 Case #1부터 #3까지는 입자직경이 35 내지는 50 nm 수준이며 입자들의 형태 또한 서로 경계가 불분명한 상태로서 응집(coagulation) 혹은 응축(condensation)의 형태로 나타난다. 반면 상대적으로 고온인 Case #4부터 #6까지의 경우에는 주요 입자직경이 50 내지 60 nm 내외로 나타나고 있으며 입자의 형상 역시 독립된 구형 입자의 형태를 보이고 있다. 즉, 두 그룹 사이에는 입자 크기 이외에 입자들이 덩어리진 형태에서 크게 차이가 남을 발견할 수 있다.

외형상의 이러한 두드러진 차이는 고온영역에서는 주로 덩어리진(agglomerated) 기본입자들(primary particles)이 소결(sintering) 과정을 통해서 큰 입자로 변화되는 반면, 상대적인 저온영역에서는 단위체(monomer)들의 응집(coagulation) 및 융합(coalescence)에 의해 생성된 입자 쪽으로 새로운 단위체가 응결되거나 응축(condensation)되어 SEM 사진과 같은 경계가 불분명한 형태의 입자로 나타난다고 유추해볼 수 있다.

Figure 5에서는 Fig. 4의 SEM 사진과 이미지 프로세싱 방법을 이용하여 포집된 입자들의 산술 평균과 표준편차를 구한 것이다. SEM 사진에서 볼 수 있듯이 입자직경의 분포는 30 nm에서 60 nm 수준으로 분포하고 있으며, 상대적으로 고온

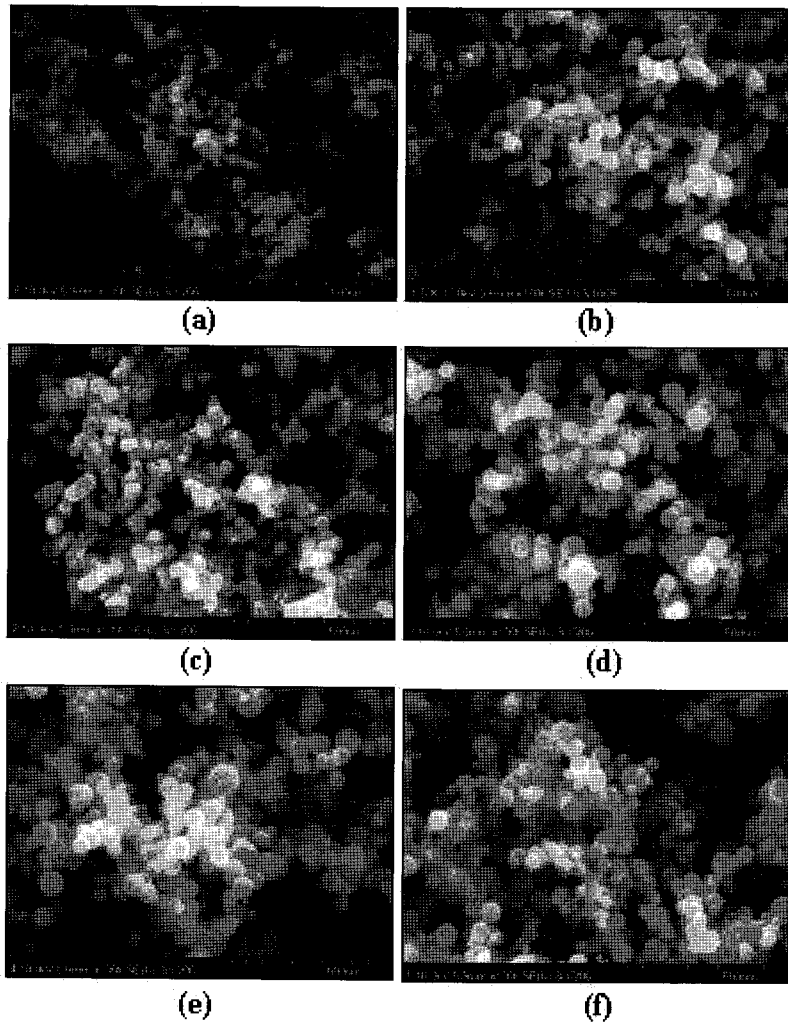


Fig. 4 SEM images for a) Case #1, b) #2, c) #3, d) #4, e) #5, and f) #6, respectively

인 Case #4와 #5의 경우가 입자직경의 편차가 더 크게 나타났다.

한편, Fig. 6은 Case #3와 #6에 대한 TEM 그리드 샘플링 결과이다. 각각 버너 팁에서 110 mm와 130 mm에서 1초의 체류시간을 가지고 포집한 결과이다. SEM 사진의 결과와 거의 동일한 결과를 보여주고 있다. 고온인 #6의 경우 덩어리진 상태에서 소결을 통해 완전히 구형 입자로 변화된 상태이지만, Case 3의 경우에는 경계가 불분명한 상태로 서로 응축되거나 응집된 상태로 남아있다.

SEM과 TEM 사진 상으로 확인해 본 결과, 입자 직경은 당초 예상했던 20 nm 수준보다는 비교적 큰 30~60 nm 정도로 나타났다. 이는 초기의 단위체(monomer) 농도를 결정하는 전구체 투

입량에 따라 크게 달라지는 것으로 판단된다. 즉 전구체의 종류, 전구체의 중탕 가열 온도, 전구체 운반가스 유량, 등에 크게 영향을 받을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 수소를 연료로 하는 확산화염을 매개로 하여 TTIP(titanium tetra- isopropoxide)를 전구체로 생성되는  $TiO_2$  나노입자의 결정구조에 미치는 합성온도의 영향을 고찰하였다. 열전대 금속삼입법을 이용하여 질소희석 및 산화제 산소부화 등에 의해서 변화되는 연소장의 온도를 측정하고, 열영동 포집 기관을 사용하여 생성된

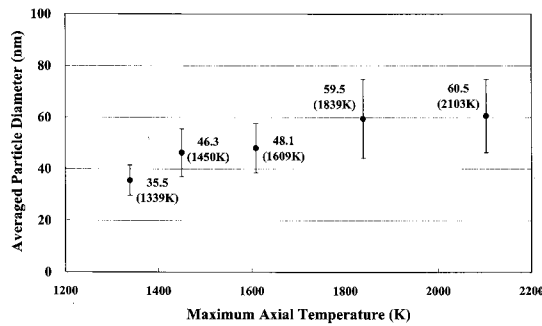
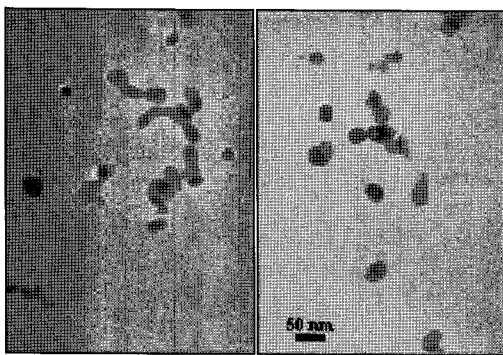
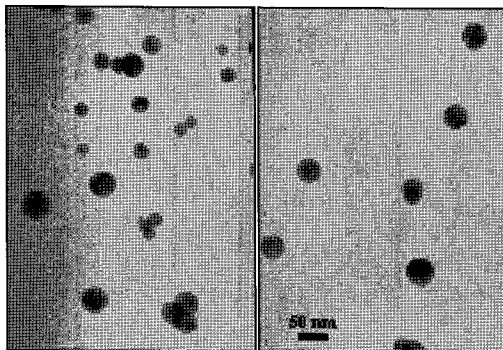


Fig. 5 Averaged particle diameters obtained from SEM images



(a)



(b)

Fig. 6 TEM images for a) Case #3 and b) #6

TiO<sub>2</sub> 나노입자를 포집하고 분석하였다.

화염 중심축의 온도는 실험을 실시한 조건에서는 중심축 최고온도를 기준으로 1,339 K부터 2,103 K까지 분포하였다. 상대적인 고온영역인 중심축 최고온도 1,700 K 이상의 화염을 통해서 덩어리진 입자들이 소결되어 완전한 구형 입자로 생성되었으며 실험한 조건에서 입자의 직경

은 60 nm 내외로 나타났다. 반면, 상대적인 저온 영역인 중심축 최고온도 1600 K 이하의 화염에서는 경계가 불분명하게 연결된 채로 응축 혹은 응집된 형태의 직경 35~50 nm인 입자가 생성되었다.

## 후기

이 논문은 전북대학교 자동차신기술 연구센터의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] K. Okuyama, R. Ushio, Y. Kousaka, R. C. Flagan and J. H. Seinfeld, "Particle Generation in a Chemical Vapor Deposition Process with Seed Particles," *AIChE Journal*, Vol. 36, No. 3, 1990, pp. 409-419.
- [2] T. Seto, M. Shimada, and K. Okuyama, "Evaluation of Sintering of Nanometer-Sized Titania Using Aerosol Method," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 23, 1995, pp. 183-200.
- [3] T. O. Kim, J. Suh, and M. Choi, "An Experimental Study on Composition Characteristics of SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Multicomponent Particle Generated in a Coflow Diffusion Flame," *Trans. of the Korean Soc. of Mech. Engineers B*, Vol. 25 No. 9, 2001, pp. 1175-1182.
- [4] K. Kashima, and H. Sugiyama, "Particle Size Control of TiO<sub>2</sub> Ultrafine Particles by CVD Method," *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, Vol. 16, 1990, pp. 551-556.
- [5] J. K. Park, J. P. Ahn and G. Kim, "Effect

- of Compact Structure on Phase Transformation Kinetics from Anatase Phase to Rutile Phase and Microstructure Evolution During Sintering of Ultrafine Titania Powder Compacts," *Metals and Materials*, Vol. 5, No. 2, 1999, pp. 129-134.
- [6] S. R. Kumar, S. C. Pillai, U. S. Hareesh, P. Mukundan and K. G. K. Warriar, "Synthesis of Thermally Stable, High Surface Area Anatase-Alumina Mixed Oxides," *Materials Letters*, Vol. 43, 2000, pp. 286-290.
- [7] K. Okada, N. Yamamoto, Y. Kameshima, A. Yasumori and K. J. D. MacKenzie, "Effect of Silica Additive on the Anatase-to-Rutile Phase Transition," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 84, No. 7, 2001, pp. 1591-1596.
- [8] K. Nakaso, K. Okuyama, M. Shimada and S. E. Pratsinis, "Effect of Reaction Temperature on CVD-made  $\text{TiO}_2$  Primary Particle Diameter," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, 2003, pp. 3327-3335.
- [9] H. D. Jang, S. K. Kim and S. J. Kim, "Effect of Particle Size and Phase Composition of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Photocatalytic Properties," *J. Nanoparticle Research*, Vol. 3, 2001, pp. 141-147.
- [10] S. E. Pratsinis, W. Zhu and S. Vemury, "The Role of Gas Mixing in Flame Synthesis of Titania Powders," *Powder Tech.*, Vol. 86, 1996, pp. 87-93.
- [11] M. Katzer, A. P. Weber and G. Kasper, "The Effects of Electric Fields on Growth of Titania Particles Formed in a  $\text{CH}_4\text{-O}_2$  Diffusion Flame," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, 2001, pp. 1045-1067.
- [12] D. G. Lee and M. S. Choi, "Coalescence Enhanced Synthesis of Nanoparticles to Control Size, Morphology and Crystalline Phase at High Concentrations," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 33, 2002, pp. 1-16.
- [13] G. Yang, H. Zhuang and P. Biswas, "Characterization and sinterability of nanophase titania particles processed in flame reactor," *Nanostructured Materials*, Vol. 7, No. 6, 1996, pp. 675-689.
- [14] G. W. Lee, J. Jurng and J. Hwang, "Soot Concentration and Temperature Measurements in Laminar Ethylene Jet Double-Concentric Diffusion Flames," *Trans. of the Korean Soc. of Mech. Engineers B*, Vol. 26 No. 3, 2002, pp. 402-409.