

< 논문 >

## 산소부화를 통한 화염온도 변화에 따른 연소합성된 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 결정구조 변화

이 교 우\*

(2006년 3월 21일 접수, 2006년 5월 9일 심사완료)

### Effect of Oxygen-Enriched Flame Temperature on the Crystalline Structures of the Flame-Synthesized TiO<sub>2</sub> Nanoparticles

Gyo Woo Lee

**Key Words:** Combustion Synthesis(연소합성), TiO<sub>2</sub> Nanoparticles(TiO<sub>2</sub> 나노입자), Flame Temperature(화염온도), Oxygen-Enriched Flame(산소부화 화염), Crystalline Structure(결정구조)

#### Abstract

In this work, TiO<sub>2</sub> nanoparticles were synthesized using N<sub>2</sub>-diluted and Oxygen-enriched co-flow hydrogen diffusion flames. The effect of flame temperature on the crystalline structure of the formed TiO<sub>2</sub> nanoparticles was investigated. The measured maximum centerline temperature of the flame ranged from 2,103K for oxygen-enriched flame to 1,339K 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 crystalline structures of TiO<sub>2</sub> nanoparticles were analyzed by XRD. From the XRD analysis, it was evident that the crystalline structures of the formed nanoparticles were divided into two sorts. In the higher temperature region, over the 1,700K, the fraction of formed TiO<sub>2</sub> nanoparticles having anatase-phase crystalline structure increased with increasing the flame temperature. On the contrary, in the lower temperature region, below the 1,600K, the fraction of anatase-phase nanoparticles increased with decreasing the flame temperature.

#### 1. 서 론

티타늄은 18세기말 처음으로 발견되었으며, 금속티타늄(Ti)과 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>) 모두 20세기에 들어와서 본격 생산이 개시되면서 지속적인 기술적 발전을 하고 있다. 이산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)은 대표적인 백색안료로서 우수한 내산성 및 내 알칼리성을 지닌다. 또한 빛에 대한 굴절률이 크며 착색성이 높다고 알려져 있다.

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 200~300nm

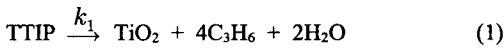
이상의 입자크기를 가지지만 나노입자는 대략 20 nm 내외의 크기를 가진다고 알려져 있다. 비표면적(BET)에서는 각각 10m<sup>2</sup>/g 이하와 50m<sup>2</sup>/g 이상의 값을 가진다. 때문에 나노입자는 높은 활성도와 반응성을 가지며 분산성과 내구성이 우수하다.

TiO<sub>2</sub> 나노입자는 광촉매로서 화학적 및 열적으로 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 제어하는

\* 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부  
E-mail : gwlee@chonbuk.ac.kr  
TEL : (063)270-3997 FAX : (063)270-2460

데 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 입자 크기를 제어하기 쉽다. 보통 전기로와 화염을 이용하는 방법이 기상반응에 의해 TiO<sub>2</sub> 입자를 합성하는데 많이 사용되고, TiO<sub>2</sub> 나노입자의 전구체(precursor)로는 TTIP {titanium tetra-isopropoxide, Ti[OCH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>]<sub>4</sub>} 또는 TiCl<sub>4</sub>가 사용된다. TTIP를 전구체로 사용하여 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 생성하는 반응은 열분해(thermal decomposition)와 가수분해(hydrolysis)로 구분될 수 있다. 열분해는 아래와 같은 반응을 따른다.<sup>(1-3)</sup>

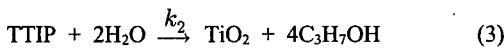


여기서, Okuyama 등<sup>(1)</sup>에 의하면 반응속도상수(rate constant)  $k_1$  [s<sup>-1</sup>]은 다음의 값을 가진다.

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

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

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



여기서, 가수분해 반응속도상수  $k_2$ 는 Kashima와 Sugiyama<sup>(4)</sup>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 발생되는 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.<sup>(5-7)</sup> 한편, Nakaso 등<sup>(8)</sup>은 전기로의 온도가 600~1,000°C일 때 합성된 입자가 대부분 아나타제 구조이고, 약 700°C를 기준으로 온도에 대한 입자 크기의 특성이 달라진다고 보

고하였다. 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.

화염을 이용한 합성의 경우에는 전체적으로 온도가 일정한 영역이 전기로에 비해서 매우 제한적이기 때문에 온도의 직접적인 영향을 정량적으로 규명하는 것은 전기로에 비해서 다소 어렵다. Jang 등<sup>(9)</sup>은 TiCl<sub>4</sub>를 전구체로 사용하고 화염조건을 변화시켜 화염온도를 1700°C에서 1400°C로 낮출 때 아나타제 구조가 41%에서 80%로 증가함을 보고하였다. 또한, Pratsinis 등<sup>(10)</sup>과 Katzer 등<sup>(11)</sup>은 고온일수록 루타일 구조로의 전환이 지배적이라는 결과를 보여주었다. 이상의 세 연구에서는 모두 전구체로서 TiCl<sub>4</sub>를 사용하였다. Lee와 Choi<sup>(12)</sup>는 CO<sub>2</sub> 레이저를 조사시켜 루타일 구조를 아나타제 구조로 전환시켰다.

한편, Yang 등<sup>(13)</sup>은 TTIP를 전구체로 사용하여 메탄 확산화염을 이용한 합성에서 반응지역의 온도가 900~1430°C의 범위에서는 아나타제상과 루타일상이 혼합되어 나타나고 있으며 1500~1570°C의 경우에는 100% 아나타제상의 결정구조를 가지는 TiO<sub>2</sub> 나노입자가 생성됨을 보고하였다. 반면, 이교우 등<sup>(14)</sup>은 TTIP를 전구체로 사용한 수소 확산화염에서 Yang 등<sup>(13)</sup>의 연구결과와는 상반되게 1000K 이하의 저온에서 아나타제상의 TiO<sub>2</sub> 나노입자가 생성되었다고 보고하고 있다.

이상의 선행 연구자들의 결과를 참고하여, 본 연구에서는 전구체로 TTIP를 사용하며 수소를 연료로 하는 확산화염에서 화염온도가 합성되는 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 결정구조에 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 급속압입법을 이용하여 연소 조건에 따라 변화되는 화염 중심축의 온도를 측

정하고, 열영동 포집판(thermophoretic collector)을 사용하여 생성된 TiO<sub>2</sub> 나노입자를 포집하여 형상, 크기 및 결정구조 등을 분석하였다.

이전에 수행된 본 연구자의 연구결과<sup>(14)</sup>에서 나타났던 스테인리스 스틸 굴뚝(chimney)에 의한 모호한 결과 해석을 좀더 명확히 하여 Yang 등<sup>(13)</sup>의 연구결과와의 상반된 결과의 원인을 규명하고자 본 연구를 수행하였으며, 산소부화 및 질소희석을 이용하여 화염온도의 변동 폭을 확대하여 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치는 Fig. 1에서 보는 것처럼, 연료(H<sub>2</sub>), 중간 희석기체(N<sub>2</sub>), 산화제(N<sub>2</sub> 및 O<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub>로 생성되는 반응기 역할을 하는 화염 및 연소기 부분으로 구분된다. 측정을 위한 부분으로는 입자의 열영동 포집장치, 그리고 온도측정 및 컨트롤 장치가 있다.

사용된 버너는 Fig. 1의 우측 상부에 보는 것처

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

생성된 입자의 포집은 10mm x 10mm 크기의 스테인리스스틸 기관(두께 0.2mm)을 사용하였으며, 화염 및 소결(sintering) 영향을 배제할 수 있는 위치인 버너 팁(tip)에서 150mm 하류에 설치하여 입자를 포집하였다.

급속압입 온도측정을 위해 응답특성이 좋은 직경 127μm인 세선(fine wire)의 R-type (Pt/Pt-13%Rd) 열전대를 사용하였다. 발생된 열전대의 기전력은 A/D 컨버터(HP 34970A)를 통해 디지털로 전환되어 컴퓨터에 저장되었다. 버너 팁을 기준으로 높이 10mm부터 160mm까지 5mm 간격으로 10회 반복 측정하여 평균치를 구하였다.<sup>(15)</sup>

Table 1에 나타낸 바와 같이 전구체 운반가스와 연료의 양은 고정시키고, 희석기체를 추가하여 화염온도를 낮추거나 산화제에 산소를 추가하여 화염온도를 높이는 방법을 사용하였으며, 각

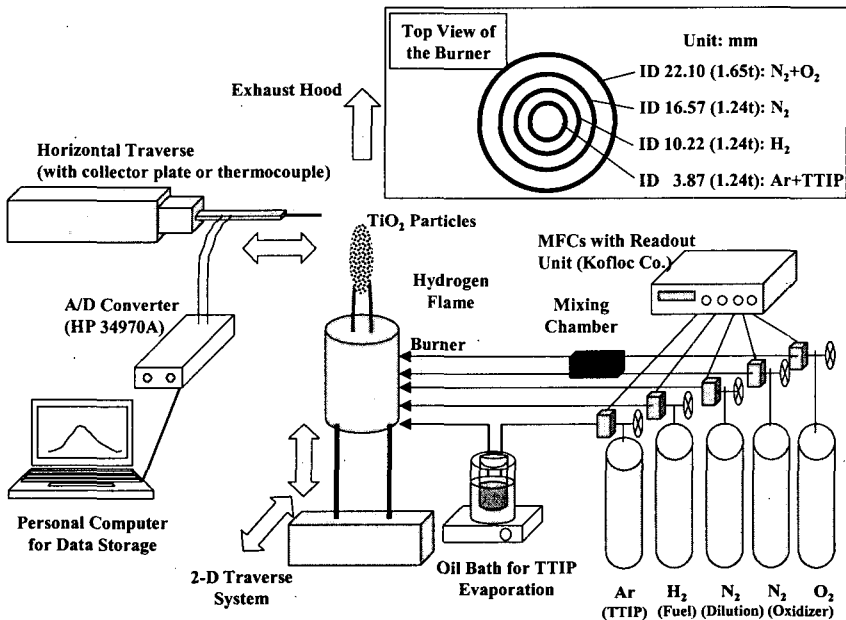


Fig. 1 Experimental setup

경우에 버너 상부의 증앙에서 축 방향으로 온도를 측정하여 최고 측정온도를 그 화염의 대표온도로 사용하였으며, 기판에 포집된 TiO<sub>2</sub> 나노입자는 XRD(X-ray-diffraction, Rigaku Inc., DMAX-2500)으로 분석하여 생성된 나노입자의 결정구조를 파악하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 화염 특성의 변화

TiO<sub>2</sub> 나노입자의 발생기 역할을 하는 수소 화염은 산화제로 공급된 공기 중의 산소와 반응하

여 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. Case #4에서 #6의 화염 상류를 보면 증앙의 입자생성이 시작되는 부분으로 보이는 밝은 부분의 모양이 대칭을 이루지 못하고 있다. 또한 전체 화염 역시 다소 비대칭 형태를 보이고 있다. 이는 실험에 사용한 다중관 버너가 정확히 대칭을 이루지는 못하고 일부 관이 약간 편심되어 나타나는 현상이다.

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. 반면, 산

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

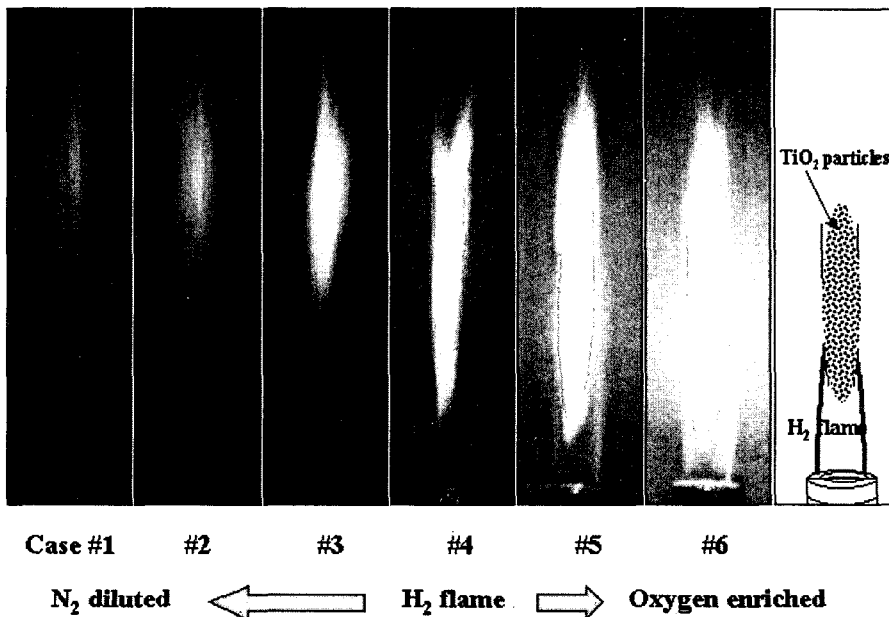


Fig. 2 Direct photographs and schematic diagrams of H<sub>2</sub> flames forming TiO<sub>2</sub> nanoparticles

화제에 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

Fig. 3은 Table 1에 나타낸 실험조건별 화염에 대하여 화염의 축 방향으로 온도분포를 버너 팁(tip)에서 10mm부터 160mm까지 5mm 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, 2,000K 및 1,500K의 측정치에서는 각각 약 100K 및 40K 정도의 접점 복사 보정치를 갖는다.<sup>(15)</sup>

일반적으로 수소-공기 화염의 단열화염온도(adiabatic flame temperature)가 대략 2,400K에 도달하지만, 측정 결과를 보면 약 29.9%의 산소를

함유한 산화제를 투입한 Case #5의 경우에 축 방향의 최고온도는 버너 팁에서 45mm 하류에서 약 2,103K로 측정되었다. 수소-공기 화염인 산소 21%의 경우인 Case #4는 하류 60mm 지점에서 약 1839K로 나타났다. 연료와 산화제 사이에 질소를 투입한 나머지 세 경우인 Case #3부터 #1은 각각 버너 팁에서 75, 85, 110mm 떨어진 곳에서 1,609K, 1,450K 및 1,339K로 측정되었다.

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

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 연구에서는 입자의 포집은 하류 150mm에서 이루어지므로 모두 1,000K 이하의 조건에서 입자의 포집이 이루어지는 것으로 판단된다.

차후에 진행될 연구에서 추가적으로 고려되어야 하겠지만, 화염온도의 변화는 결정구조 뿐 아니라 합성되는 입자 자체의 크기나 응집상태 등에도 영향을 줄 수 있으며, 또한 화염길이의 변화와 화염 내 입자 발생 위치의 변화, 그리고 포집 위치까지의 상대적인 체류시간 등에 의해서 영향을 받을 수 있다.

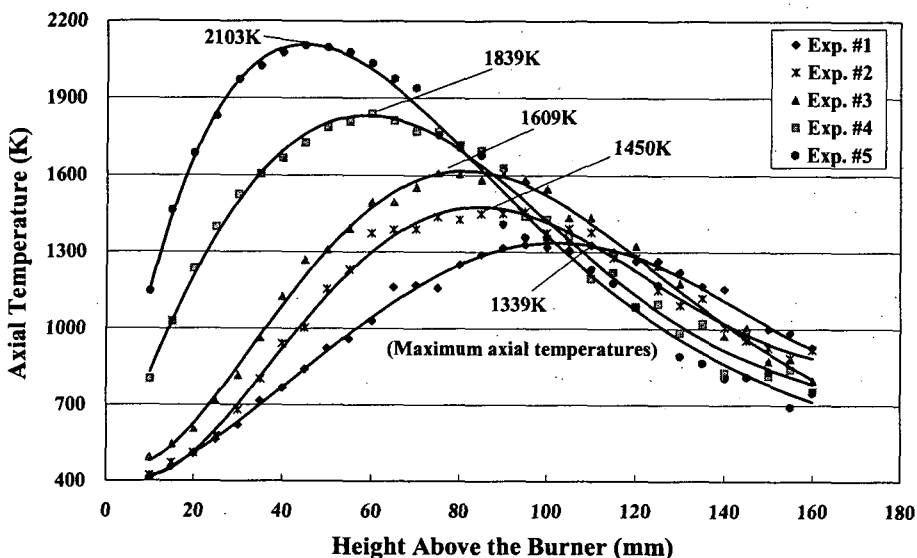


Fig. 3 Averaged axial temperature distributions

3.3 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 결정구조

Fig. 4는 각 조건에서 생성된 나노입자를 XRD 분석을 통해서 결정구조를 살펴본 것이다. 수소 연료와 공기를 산화제로 사용한 Case #4와 비교하여 상대적으로 고온인 29.9%와 40.2%의 산소부화 화염에 해당하는 Case #5와 #6에서는 아나타제 결정구조가 대부분을 차지하고 있다. 반면, 상대적으로 저온인 질소 희석 화염에 해당하는 Case#3과 #2는 루타일 결정구조가 주를 이루는 것으로 판명되었다.

여기서 또 한 가지 흥미로운 사실은 Case #1, #2, #3의 경우 조건에서 기대하는 것과는 상반되게 XRD 결과가 나왔다는 사실이다. 즉 질소 희석량을 늘려서 화염온도를 낮추었음에도 불구하고 오히려 Case #2와 #1의 아나타제 구조의 발생량이 증가했다는 점이다. 이는 고온에서 아나타제 결정구조가 잘 생성된다는 앞의 Case #3부터 #6까지의 일관성 있는 결과와는 배치되는 것이다. 이러한 분석결과의 원인은 Fig. 3의 온도측정 결과 등과 비교하여 고찰이 필요한 부분이다.

이러한 XRD 분석결과로 미루어 판단하자면, TTIP를 전구체로 사용하여 확산화염 반응기를 통한 TiO<sub>2</sub> 나노입자의 합성에서는 Case #3과 #4를 기점으로 두 가지의 생성 메커니즘이 존재할 수

있음을 보여주는 결과라고 할 수 있다. 즉, Case #4 이상의 고온에서는 온도가 높아지면서 아나타제 구조가 지배적으로 나타나며, 반면 Case 3 이하의 경우에는 온도가 낮아질수록 아나타제 구조가 더 많이 나타나고 있다.

Fig. 5에서는 XRD 분석결과에 나타난 아나타제 구조와 루타일 구조의 첫 번째 피크의 강도 (intensity)의 합에 대한 아나타제 구조의 강도의 비를 측정된 축 방향의 화염 최고온도로 나타낸 것이다. 이전에 이교우 등<sup>(14)</sup>과 Yang 등<sup>(13)</sup>이 발표한 결과를 비교를 위해서 함께 나타내었다.

XRD 분석의 정량적인 표현을 위해서는 각각의 피크의 면적을 계산하여야 하지만 본 결과에서는 단순히 온도변화에 대한 다른 두 경향을 보이기 위한 것이므로, 루타일과 아나타제 두 결정구조의 첫 번째 강도의 값의 합에 대한 각각의 강도의 비로서 나타내었다. Yang 등<sup>(13)</sup>의 결과는 앞서 설명한 바와 같은 정량적인 방법을 사용한 것으로 판단되지만, 이는 각각의 비율에 대한 정량적인 차이만 나타나며 경향을 보는 것에서는 차이가 없을 것으로 판단된다.

결과에서 가장 먼저 눈에 띄는 것으로는 Yang 등<sup>(13)</sup>의 결과와 본 연구에서 모두 공통적으로 약 1,600K에서 1,700K 범위를 기준으로 온도에 대한

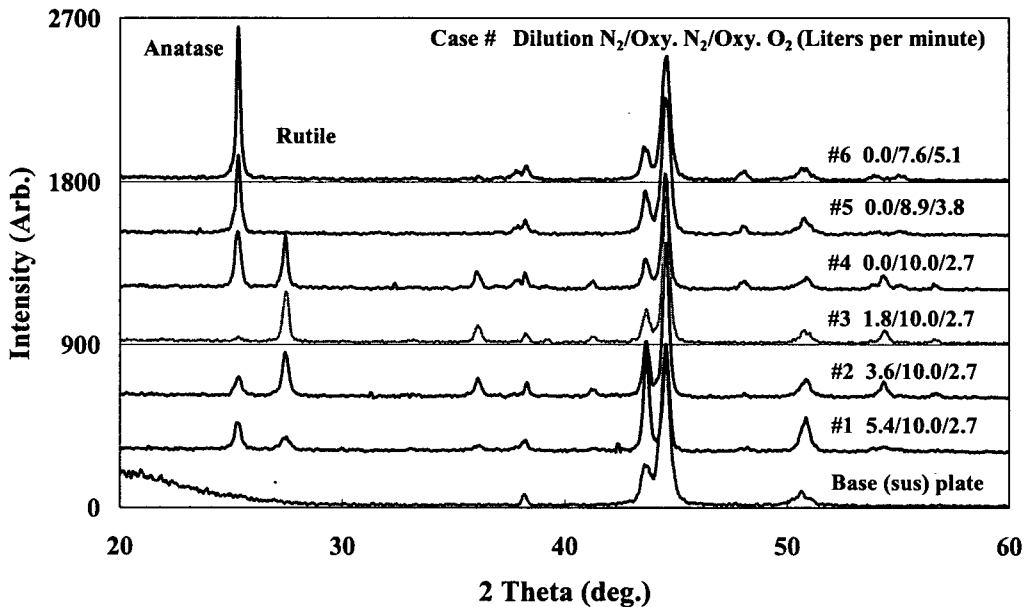


Fig. 4 X-ray diffraction patterns of formed TiO<sub>2</sub> nanoparticles

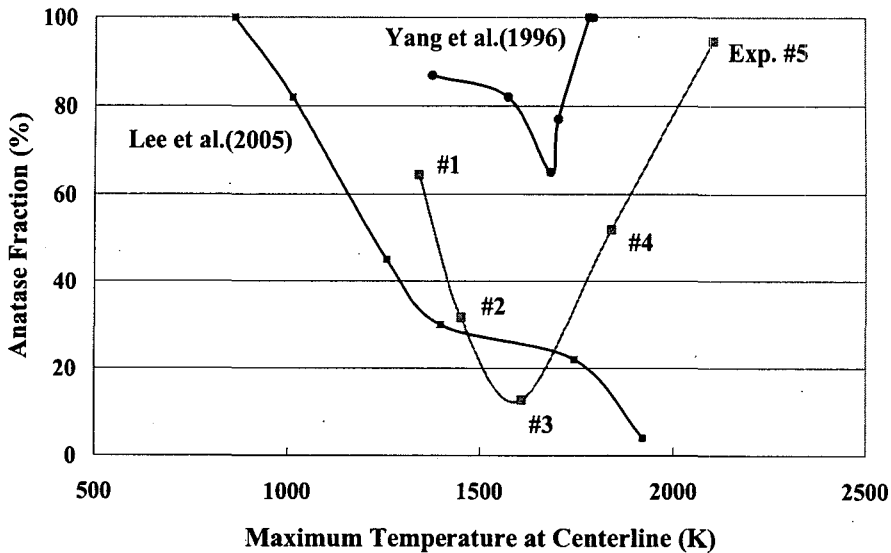


Fig. 5 Fractions of anatase phase  $\text{TiO}_2$  nanoparticles

아나타제 결정구조의 생성 경향이 상반되게 나타나고 있음을 알 수 있다. 상대적으로 고온영역에 해당하는 1,700K 이상의 영역에서는 온도증가에 따라 아나타제 결정구조의 비율이 증가하지만, 저온영역인 1,600K 이하의 지역에서는 온도가 높아질수록 루타일 결정구조가 증가하고 오히려 온도가 낮아질수록 아나타제 결정구조의 비율이 증가함을 알 수 있다.

이는 이교우 등<sup>(14)</sup>이 아나타제 결정구조를 위해서는 질소 희석된 1000K 이하의 저온화염이 필요하다고 한 연구결과와는 반대로 나타나는 것이다. 즉, 이교우 등<sup>(14)</sup>이 발표한 결과는 전체 온도 범위에서 만족되는 것이 아니라 1,600K 이하의 상대적인 저온 화염에 국한되는 것임을 알 수 있다. 또한 이교우 등<sup>(14)</sup>의 연구결과에서 1,600K 이상의 고온영역에서도 루타일 구조가 지배적으로 나타난 이유는 상기 논문의 고찰에서 언급된 것처럼 화염의 안정화를 위해서 버너 상부에 사용한 스틸 재질의 굴뚝(chimney)이 화염 하류에서 소결(sintering) 경로로 이용되었기 때문이라고 추론할 수 있다. 즉, 생성된 입자가 화염을 벗어나서도 굴뚝 내부에서 비교적 고온인 1,500K 이상으로 유지되면서 아나타제에서 루타일 구조로 변환되기 때문에 이 부분의 결과가 반대로 나타났다고 판단된다. 화염을 안정화시키고 입자의 포

집을 용이하게 하기 위해서 설치한 굴뚝이 일종의 반응기 구실을 하여 아나타제 상의  $\text{TiO}_2$  나노입자의 생성에는 오히려 부정적인 요인으로 작용한 결과였음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 수소를 연료로 하는 확산화염을 매개로 하여 TTIP(titanium tetra-isopropoxide)를 전구체로 생성되는  $\text{TiO}_2$  나노입자의 결정구조에 미치는 합성온도의 영향을 고찰하였다. 열전대 급속삽입법을 이용하여 질소희석 및 산화제 산소부화 등에 의해서 변화되는 연소장의 온도를 측정하고, 열영동 포집 기판을 사용하여 생성된  $\text{TiO}_2$  나노입자를 포집하고 분석하였다.

화염 중심축의 온도는 실험을 실시한 조건에서는 최고온도를 기준으로 1,339K부터 2,103K까지 분포하였다. XRD 분석에 의하면 1,600K에서 1,700K 범위를 기준으로 온도에 대한 아나타제 결정구조의 생성 경향이 상반되게 나타나고 있음을 알 수 있다. 상대적으로 고온영역에 해당하는 1,700K 이상의 영역에서는 온도증가에 따라 아나타제 결정구조의 비율이 증가하지만, 저온영역인 1,600K 이하의 지역에서는 온도가 높아질수록 오히려 루타일 결정구조가 증가함을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(KRF-2005-003-D00043), 부분적으로 2005년도 전북대학교 지원 연구비에 의해 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Okuyama, K., Ushio, R., Kousaka, Y., Flagan, R. C. and Seinfeld, J. H., 1990, "Particle Generation in a Chemical Vapor Deposition Process with Seed Particles," *AIChE Journal*, Vol. 36, No. 3, pp. 409~419.
- (2) Seto, T., Shimada, M. and Okuyama, K., 1995, "Evaluation of Sintering of Nanometer-Sized Titania Using Aerosol Method," *Aerosol Sci. Tech.*, Vol. 23, pp. 183~200.
- (3) Kim, T. O., Suh, J. and Choi, M., 2001, "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, pp. 1175~1182.
- (4) Kashima, K. and Sugiyama, H., 1990, "Particle Size Control of TiO<sub>2</sub> Ultrafine Particles by CVD Method," *Kagaku Kougaku Ronbunshu*, Vol. 16, pp. 551~556.
- (5) Park, J.-K., Ahn, J.-P. and Kim, G., 1999, "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, pp. 129~134.
- (6) Kumar, S. R., Pillai, S. C., Hareesh, U. S., Mukundan, P. and Warriar, K. G. K., 2000, "Synthesis of Thermally Stable, High Surface Area Anatase-Alumina Mixed Oxides," *Materials Letters*, Vol. 43, pp. 286~290.
- (7) Okada, K., Yamamoto, N., Kameshima, Y., Yasumori, A. and MacKenzie, K. J. D., 2001, "Effect of Silica Additive on the Anatase-to-Rutile Phase Transition," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 84, No. 7, pp. 1591~1596.
- (8) Nakaso, K., Okuyama, K., Shimada, M. and Pratsinis, S. E., 2003, "Effect of Reaction Temperature on CVD-made TiO<sub>2</sub> Primary Particle Diameter," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 58, pp. 3327~3335.
- (9) Jang, H. D., Kim, S.-K. and Kim, S.-J., 2001, "Effect of Particle Size and Phase Composition of Titanium Dioxide Nanoparticles on the Photocatalytic Properties," *J. Nanoparticle Research*, Vol. 3, pp. 141~147.
- (10) Pratsinis, S. E., Zhu, W. and Vemury, S., 1996, "The Role of Gas Mixing in Flame Synthesis of Titania Powders," *Powder Tech.*, Vol. 86, pp. 87~93.
- (11) Katzer, M., Weber, A. P. and Kasper, G., 2001, "The Effects of Electric Fields on Growth of Titania Particles Formed in a CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> Diffusion Flame," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 32, pp. 1045~1067.
- (12) Lee, D. G. and Choi, M. S., 2002, "Coalescence Enhanced Synthesis of Nanoparticles to Control Size, Morphology and Crystalline Phase at High Concentrations," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 33, pp. 1~16.
- (13) Yang, G., Zhuang, H. and Biswas, P., 1996, "Characterization and Sinterability of Nanophase Titania Particles Processed in Flame Reactor," *Nanostructured Materials*, Vol. 7, No. 6, pp. 675~689.
- (14) Lee, G. W., Lee, S. B., Jurng, J. and Bae, G.-N., 2005, "Effect of Flame Temperature on the Characteristics of Flame Synthesized TiO<sub>2</sub> Nanoparticles," *Trans. of the Korean Soc. of Mech. Engineers B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1013~1021.
- (15) Lee, G. W., Jurng, J. and Hwang, J., 2002, "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, pp. 402~409.