

< 논문 >

수소 확산화염에서 화염온도가 TiO₂ 나노입자의 합성에 미치는 영향

이교우*** · 이승복** · 정종수* · 배귀남†
(2005년 3월 10일 접수, 2005년 8월 18일 심사완료)

Effect of Flame Temperature on the Characteristics of Flame Synthesized TiO₂ Nanoparticles

Gyo Woo Lee, Seung Bok Lee, Jongsoo Jurng and Gwi-Nam Bae

Key Words: Flame Synthesis(화염합성), TiO₂ Nanoparticles(TiO₂ 나노입자), Flame Temperature(화염 온도), Photo-catalyst(광촉매), Anatase Phase(아나타제 상)

Abstract

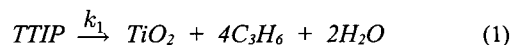
In this work, TiO₂ nanoparticles were synthesized using a N₂-diluted hydrogen coflow diffusion flame. The effects of flame temperature on the crystalline structure and the size of formed nanoparticles were investigated. The maximum centerline temperature of the flame ranged from 1,920K for H₂-only flame to 863K for 81% N₂-diluted flame. The morphology and the crystal structure of TiO₂ nanoparticles were analyzed by a TEM and a XRD, respectively. The particle size distribution was also measured by using a scanning mobility particle sizer (SMPS). The mean particle diameter was calculated from the TEM images depended on the flame temperature, having minimum at about 1,200K. Based on the SMPS measurements, the mean particle diameter of TiO₂ nanoparticles at flame temperatures > 1,300K was smaller than that at flame temperatures < 1,300K. From the XRD analysis, it was evident that the anatase fraction increased with decreasing the flame temperature. The portion of anatase phase in TiO₂ nanoparticles might be greater than 80% when the flame temperature was lower than 1,000K.

1. 서론

TiO₂ 나노입자는 광촉매로서 화학적 및 열적으로 매우 안정된 물질이고, 아나타제(anatase), 루타일(rutile) 및 비정질(amorphous)의 3가지 결정구조를 갖는다. 이 중에서 아나타제 결정구조를 갖는 TiO₂ 입자가 광촉매로서 활성이 더 우수한 것으로 알려져 있으며, 루타일 결정구조는 백색안료로 반도체 공정 등에 많이 사용된다. TiO₂는 자외선이 조사되면 여기상태로 되어 광활성을 나타내므로, 휘발성 유기화합물(volatiles organic com-

pounds, VOCs), 악취, 중금속 물질 등을 제어하는데 널리 사용되고 있으며, 물을 분해하여 수소를 발생시키는 경우에도 활용되고 있다.

TiO₂는 기상반응 또는 액상반응을 이용하여 합성되고 있는데, 기상반응은 액상반응에 비해 입자 크기를 제어하기 쉽다. 보통 전기로와 화염을 이용하는 방법이 기상반응에 의해 TiO₂ 입자를 합성하는데 많이 사용되고, TiO₂ 나노입자의 전구체(precursor)로는 TTIP(titanium tetra-isopropoxide, Ti[OCH(CH₃)₂]₄) 또는 TiCl₄가 사용된다. TTIP를 전구체로 사용하여 TiO₂ 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

*** 회원, 전북대학교 기계항공시스템공학부

** 한국과학기술연구원(KIST) 대기자원연구센터

* 회원, 한국과학기술연구원(KIST) 대기자원연구센터

† 책임저자, 회원, 한국과학기술연구원(KIST) 대기자원연구센터

E-mail : gnbae@kist.re.kr

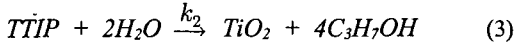
TEL : (02)958-5676 FAX : (02)958-5805

(rate constant) $k_1 [s^{-1}]$ 은 다음의 값을 가진다.

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

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⁽⁴⁾에 의하면 다음과 같다.

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

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.

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⁽⁹⁾은 화염조건을 변화시켜 화염온도를 1,700°C에서 1,400°C로 낮출 때 아나타제 구조가 41%에서 80%로 증가함을 보고하였다. 또한, Pratsinis 등⁽¹⁰⁾과 Katzer 등⁽¹¹⁾은 고온일수록 루타일 구조로의 전환이 지배적이라는 결과를 보여주었다. 이상의 세 연구에서는 모두 전구체로서

TiCl₄를 사용하였다. Lee와 Choi⁽¹²⁾는 CO₂ 레이저를 조사시켜 루타일 구조를 아나타제 구조로 전환시켰다.

이상의 선행 연구자들의 결과를 참고하여, 본 연구에서는 수소를 연료로 하는 확산화염에서 화염온도가 합성되는 TiO₂ 나노입자의 결정구조와 입자크기 등에 미치는 영향을 고찰하였다.

열전대 급속삽입법을 이용하여 연료의 질소희석(N₂-dilution)에 의해서 변화되는 기체장의 온도를 측정하고, 수냉각 열영동 포집판(water-cooled thermophoretic collector)을 사용하여 생성된 TiO₂ 나노입자를 포집하여 형상, 크기 및 결정구조 등을 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치는 Fig. 1에서 보는 것처럼, 연료(H₂), 연료 희석기체(N₂), 산화제(Air) 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 TiO₂로 생성되는 반응기 역할을 하는 화염 및 연소기 부분으로 구분된다. 측정을 위한 부분으로는 입자의 열영동 포집장치, 온도측정 및 컨트롤 장치, 그리고 scanning mobility particle sizer (SMPS) 및 그에 부착된 고온·고농도용 희석 샘플링 프로브⁽¹³⁾가 있다.

화염을 안정시키기 위해서 직경 92mm의 스테인리스스틸 관으로 버너를 둘러싸서 주위공기와 차단하고 아울러 배기가스의 굴뚝으로 사용하였다. 사용된 버너는 Fig. 2에서 보는 것처럼 동축 삼중관의 형태인데, TTIP가 운반기체와 함께 공급되는 내경 8mm(외경 10mm)인 중앙 관과 이를 둘러싸고 있는 연료 및 희석기체가 공급되는 내경 18mm(외경 20mm)의 가운데 관 및 산화제인 공기가 공급되는 내경 90mm의 외부 관으로 구성되어 있다. 버너 상부에는 화염을 안정화시키기 위하여 굴뚝이 설치되었으며, 굴뚝 측면의 측정공을 통해서 열전대 및 TEM 그리드를 삽입하였다. 수냉포집판은 스테인리스스틸 재질로 만들어졌으며, 버너 팁(tip)에서 화염 하류 150mm에 화염 축방향에 수직하게 화염 중앙에 설치되어 생성된 나노입자를 열영동 현상을 이용해 포집하는

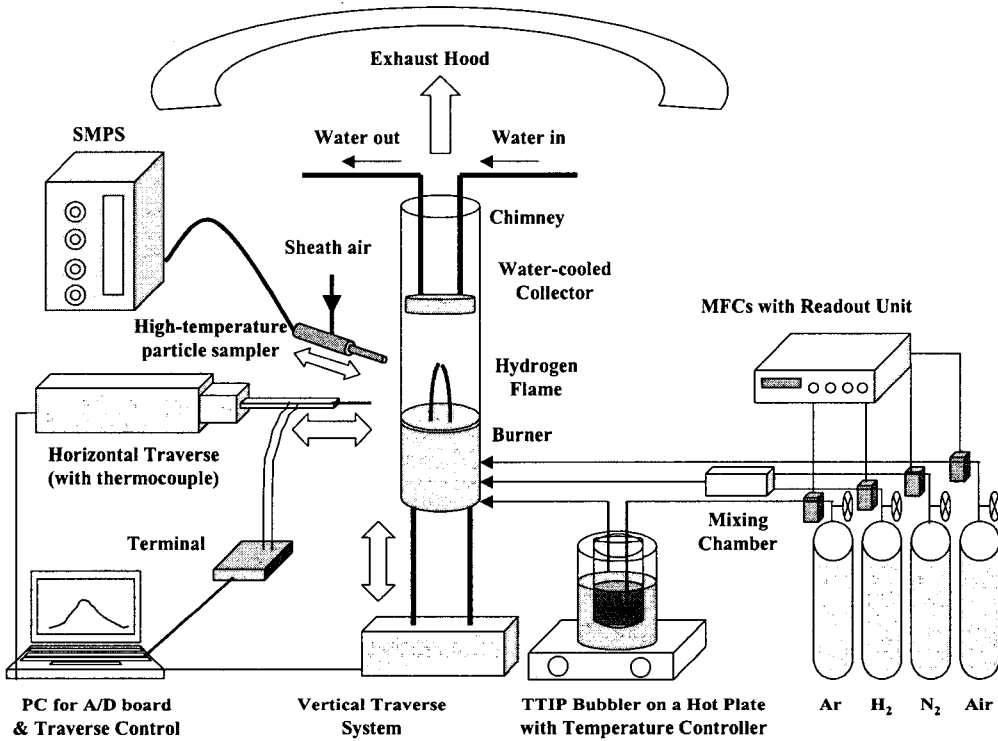


Fig. 1 Experimental setup

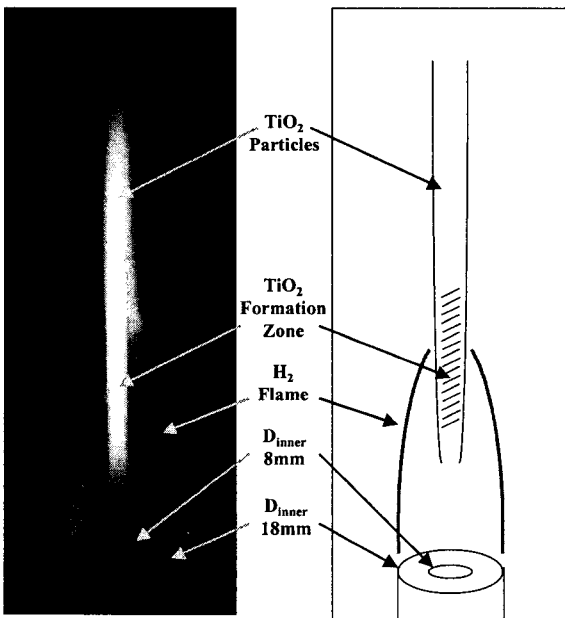


Fig. 2 A direct photograph and a schematic diagram of the hydrogen flame forming TiO₂ particles

데 사용되었다.

급속압입 온도측정을 위해 응답특성이 좋은 직경 50 μ m인 세선(fine wire)의 R-type(Pt/Pt-13%Rd) 열전대를 사용하였다. 발생한 열전대의 기전력은 A/D 컨버터(HG-818, Advantech Co.)를 통해 디지털로 전환되어 1초 동안 1000개의 데이터로 컴퓨터에 저장되었다. 버너 팁을 기준으로 높이 25 mm부터 95mm까지 5mm 간격으로 7회 반복 측정하여 평균치를 구하였다.^(14,15)

Table 1에 나타난 바와 같이 전구체의 양은 고정시키고 연료와 화석기체의 비율을 다양하게 조절하여 화염조건을 달리하였으며, 각 경우에 버너의 중앙에서 측방향으로 온도를 측정하여 최고 측정온도를 그 화염의 대표온도로 사용하였다. 수냉 열영동판에 포집된 TiO₂ 나노입자는 끊어낸 후에 TEM(transmitting electron microscope, Phillips Co., CM-30) 및 XRD(X-ray-diffraction, Rigaku Inc., DMAX-2500) 등으로 분석하여 입자크기와 결정 구조 등을 파악하였다.

한편, 직접 샘플링에 의한 방법인 열영동 샘플링 이외에 SMPS를 구성하는 nano-DMA

Table 1 Experimental conditions

Case	Flowrate (L/min)				N ₂ dilution(%)
	Ar (TTIP)	H ₂	N ₂	Air	
#1	0.2	4.0	0.0	30	0
#2	0.2	3.0	1.0	30	25
#3	0.2	2.0	2.0	30	50
#4	0.2	1.5	2.5	30	63
#5	0.2	1.0	3.0	30	75
#6	0.2	0.75	3.25	30	81

(differential mobility analyzer, TSI Inc., 3085)와 초미세 입자 계수기(ultrafine condensation particle counter, TSI Inc., 3025)에 의한 4.5~160nm 범위의 실시간 입경분포 측정은 응집 혹은 응결된 형태의 입자(aggregate or agglomerate)를 구성하고 있는 개개의 기본입자에 대한 정보가 아니라 응집 혹은 응결 여부와 관계없이 독립된 입자에 대하여 동일한 전기 이동도를 갖는 입자의 수농도 분포를 의미한다. 본 실험과 같이 고온·고농도 조건에서 입자를 실시간으로 직접 샘플링하기 위하여 Ahn 등⁽¹⁴⁾이 개발한 이젝터형 회석 샘플링 프로브를 열영동 샘플링과 동일한 지점에 위치시키고, 회석가스로 14L/min의 압축공기를 이용하였고, SMPS의 흡입유량인 0.3L/min을 제외한 나머지 유량은 배출시켰다. 회석가스 및 출구 유량을 측정하여 이 회석 샘플링 프로브의 회석비(샘플 유량을 회석가스 유량과 샘플 유량의 합으로 나눈 값)를 계산하면 회석가스의 유량이 10~20L/min 범위에서 실온의 경우 5.2±0.2이었고, 약 100℃의 경우 회석비가 약 10% 증가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염온도

TiO₂ 나노입자의 발생기 역할을 하는 수소 화염은 산화제로 공급된 공기 중의 산소와 반응하여 수분을 생성한다. 수분은 화염대 근처에서 반응 생성물로 나타나며, 전구체인 TTIP와 반응하여 TiO₂ 입자를 생성한다. 화염을 통한 TiO₂ 나노입자의 생성 시 이러한 가수분해 반응 및 화염대

전후에서의 열분해 반응이 함께 나타난다. Fig. 2는 수소화염 및 발생되는 TiO₂ 나노입자의 직접 사진과 이를 도식화한 것이다. TTIP가 공급되는 중앙관의 하류 측에서는 생성된 TiO₂ 입자가 매우 밝게 보이며, 상대적으로 어두운 주위의 수소화염과 대조를 이루고 있다.

Fig. 3은 Table 1에 나타난 실험조건별 화염에 대하여 화염 축방향으로 온도분포를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 세선(fine wire)의 R-형 열전대로 온도를 측정하였으며, 측정 데이터는 열전대 접점 자체의 복사(radiation) 손실을 보상(compensation)한 것이다. 2,000K 및 1,500K의 측정치에서는 각각 100K 및 40K 정도의 접점 복사 보정치를 갖는다.^(14,15)

수소연료를 사용하면 단일화염온도가 대략 2,400K에 도달하지만, 본 연구에서와 같이 확산화염의 중심축에서의 온도는 2,000K 이하였다. 질소회석이 없는 Case #1의 경우 최고온도가 1,920K 정도였다. Case #2부터 #6의 경우 최고온도는 각각 1,745, 1,395, 1,255, 1,012, 863K였다.

연료에 대한 질소의 회석량이 많아질수록 화염의 온도는 낮아져서 Case #1과 #6의 최고온도 차이는 대략 1,050K 이상이었다. 또한, 회석량이 커짐에 따라 화염대의 명확한 구분이 모호해지면서 최고온도 이후에 하류로 가면서 온도가 떨어지는 경향이 상대적으로 둔화되어 굴뚝 내부가 일종의 반응기 구실을 하는 것으로 여겨진다. 이것은 Nakaso 등⁽⁸⁾의 연구에서 논의된 것처럼 생성된 입자의 응축(condensation), 응집(coagulation), 융합(coalescence) 또는 소결(sintering) 및 재구성(restructuring) 등과 관련되기 때문에 입자의 크기 등에 대한 해석을 다소 어렵게 할 수도 있다.

3.2 TiO₂ 나노입자의 크기

Fig. 4는 Table 1에 나타난 실험조건에서 생성된 입자의 형상과 크기를 살펴보기 위해서 TEM 사진을 나타낸 것이다. 4장의 사진은 각각 질소 회석 25, 50, 63, 81%인 경우 합성된 TiO₂ 나노입자의 모습을 나타낸 것이다.

정성적으로 볼 때, 기본입자(primary particle)의 크기는 상대적으로 고온인 (a)의 경우에는 20nm 이상이지만, 질소 회석량의 증가로 저온으로 갈수록 점차 직경이 감소하여, 질소 회석량이 63%인 (c)의 경우에는 15nm 이하로 기본입자의 크기

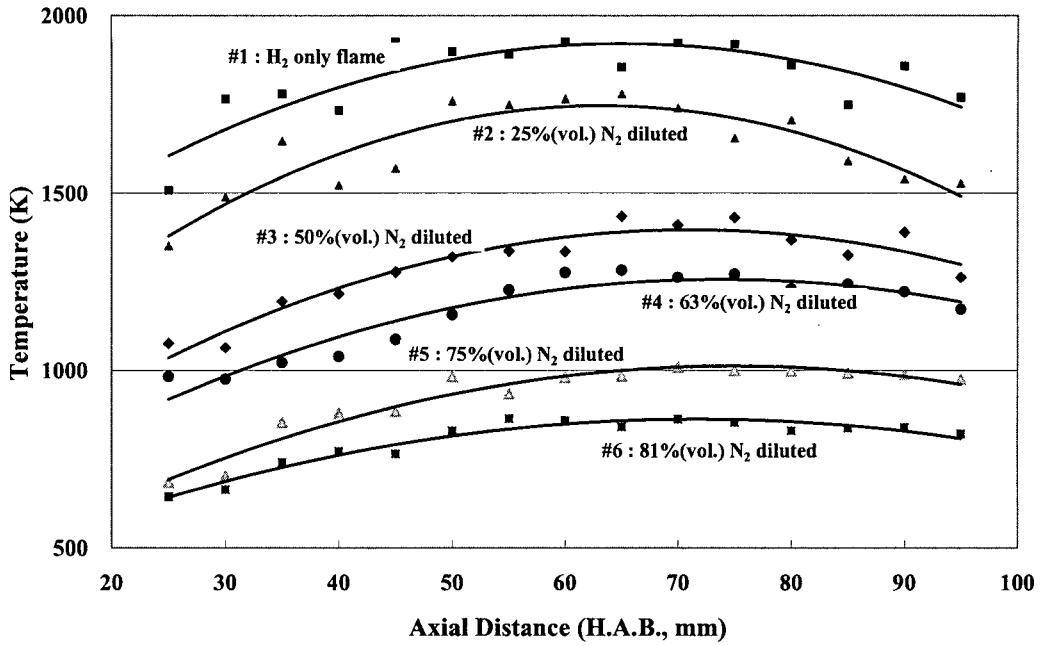


Fig. 3 Averaged axial temperature distributions

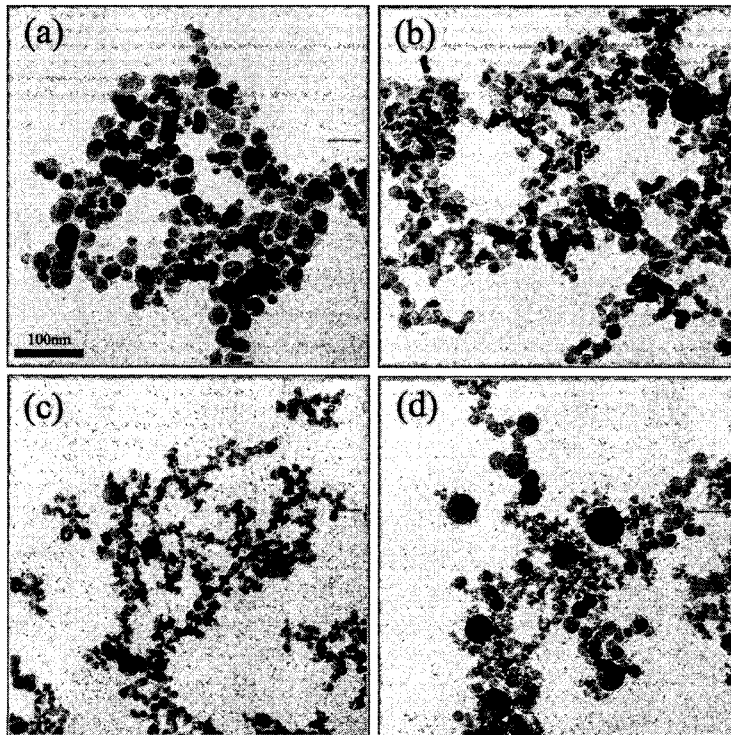


Fig. 4 TEM images of formed TiO₂ nanoparticles. (a) Case #2, (b) Case #3, (c) Case #4, (d) Case #6

가 감소하는 것으로 보인다. 또한, 크기 이외의 구조적인 특징으로 저온으로 갈수록 입자간의 경계가 명확하지 못한 현상이 두드러지게 나타난다. 이것은 작은 기본입자가 응집(coagulation) 및 소결(sintering)에 의해서 큰 입자로 성장하는 생성 및 성장 메커니즘⁽⁸⁾에 비추어 볼 때, 온도가 낮아 원활한 소결이 이루어지지 못한 것으로 추정된다. 특이한 점은 실험조건 가운데 가장 저온인 질소 희석량 81% 조건인 (d)의 경우 직경이 작은 기본입자들의 응집체 이외에 매우 큰 독립적인 개별입자가 나타나고 있다는 점이다. 이러한 입자는 75% 희석조건에서부터 일부 나타나고 있다. Nakaso 등⁽⁸⁾의 주장에 의하면 상대적으로 반응의 진행이 느린 저온 반응 구역에서 표면성장, 응축, 응집, 융합 등의 과정을 거쳐서 비교적 큰 기본입자가 생성될 수 있다. 하지만 본 연구와는 달리 Nakaso 등⁽⁸⁾은 전기로를 사용하였기 때문에 이에 관해서 결론을 도출하기 위해서는 보다 많은 고찰이 필요하다.

정성적으로 판단한 이상의 결과를 정량적으로 살펴보기 위하여 다수의 TEM 사진에 나타난 입자들을 실측하여 각 조건에서 평균 직경과 표준편차를 Fig. 5에 나타내었다. 실험조건별로 100~200개의 데이터를 분석하였다. 화염의 온도는 각 조건별로 측정된 온도 중에서 최고온도를 기준으로 나타냈는데, 1,200K 근처를 기준으로 입자 크기의 특성이 구분되어 나타남을 볼 수 있다. 즉, 저온 영역에서는 Fig. 4(d)에서 보는 것과 같은 비교적 직경이 큰 입자가 다수 나타나게 되어 평균 직경이 커진다. 반면 고온으로 가면 작은 기본입자의 응집 및 소결에 의해 큰 입자로 성장하는 것으로 추정된다.

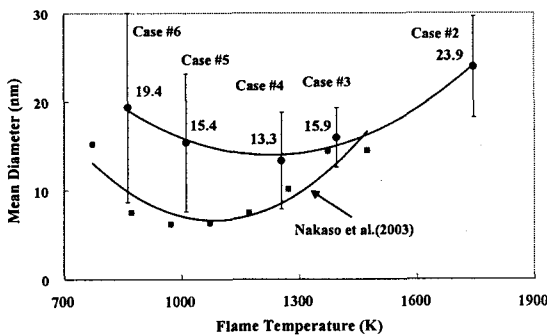


Fig. 5 Changes in primary particle diameter obtained from TEM images

이러한 결과는 화염이 아닌 전기로를 사용하여 Nakaso 등⁽⁸⁾이 보고한 결과와 경향이 매우 유사하다. 그림에 함께 나타낸 것과 같이 이들의 결과는 약 1,100K의 반응온도에서 이러한 온도 대역의 구분이 나타났으며, 입자 직경은 6~16nm의 범위를 가진다고 보고하였다. 이들이 지적하였듯이 소결 등의 과정을 통한 입자의 성장은 체류시간과 매우 밀접하게 관계되므로, 서로 다른 두 실험의 결과를 정량적인 입경으로 비교할 수는 없다. 하지만 온도 대역에 따라 입자의 성장 메커니즘의 구분이 필요함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 화염의 최고온도를 기준으로 측정결과를 구분한 것을 고려한다면, 두 연구결과는 잘 부합한다고 생각된다. 하지만 이러한 특성이 본 연구에서 사용한 철제 굴뚝(steel chimney)의 역할에 의해서 나타난 것이라면 화염을 이용한 입자의 합성에서 일반적으로 나타날 수 있는 현상은 아닐 수도 있다.

SMPS로 측정된 입경분포 결과를 나타낸 Fig. 6을 보면 Cases #1~#3에서는 Fig. 5와는 달리 평균 입경이 거의 변하지 않았다. Fig. 5의 특성이 Fig. 4의 TEM 사진에서 확인되듯이 Case #2에 비하여 Case #3의 경우 기본입자의 크기가 훨씬 작아졌으나, Fig. 6에서 보듯이 SMPS로 측정된 평균 입경의 차이가 크지 않다는 것은 Case #3 조건에서 1개의 입자를 구성하고 있는 기본입자의 개수가 상대적으로 많았거나 입자 농도가 상대적으로 낮았음을 암시한다. 희석된 샘플의 입경분포를 그린 Fig. 7의 결과에서 보듯이 입경분포의 특성이 Cases #1~#3과 Cases #4~#6으로 크게 구분되는 것으로 생각된다. Cases #1~#3에서는 수소 유량이 4L/min에서 2L/min으로 감소할수록 입경분포에서

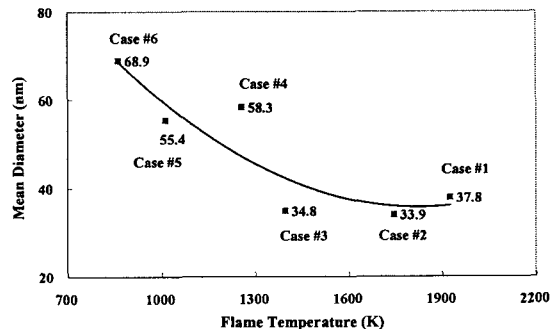


Fig. 6 Changes in particle diameter obtained from SMPS measurement

피크 농도가 낮아지면서 폭이 넓어지는 경향을 나타내었고, Cases #4~#6에서는 수소 유량에 무관하게 피크 농도가 유사하였다. 이러한 결과는 앞에서 언급한 회석량이 클 때의 온도분포 특성과도 연관이 있을 것으로 생각되며, Case #4는 천이조건으로 여겨지는데 현재로서는 단언하기 어렵다. Ahn 등⁽¹³⁾은 화염의 온도가 낮아질수록 화염 내 체류 시간이 길어지고, 응집율이 커지기 때문에 SMPS로 측정된 평균 직경의 성장률이 커진다고 하였다. Fig. 6에서 표시한 추세를 살펴보면, 본 연구에서도 회석량이 커질수록, 즉 화염의 온도가 낮아질수록 평균 입경이 커지는 경향을 보인다.

3.3 TiO₂ 나노입자의 결정구조

Fig. 8은 각 조건에서 생성된 나노입자를 XRD 분석을 통해서 결정구조를 살펴본 것이다. 상대적으로 고온인 50% 질소 회석까지는 루타일 구조가 주를 이루지만, 63% 회석 조건에서부터 아나타제 구조가 나타나며 75%와 81% 조건에서는

아나타제 구조가 주된 생성물로 판명되었다.

생성된 나노입자의 결정구조와 화염온도의 관계를 도시하기 위하여 측정 최고온도에 대하여 아나타제 결정구조의 비율을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9는 XRD 데이터 중에서 아나타제와 루타일 결정구조의 첫 번째 피크의 강도(intensity)의 합에 대한 아나타제 구조의 강도의 비를 나타낸 것이다. 1,000K 이하의 화염온도에서 80% 이상의 아나타제 결정구조를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

하지만 본 결과는 화염의 안정화를 위해서 버너 상부를 둘러싸는 스틸 재질의 굴뚝이 화염 하류에서 소결(sintering)이나 응집(agglomeration)의 경로로 이용될 수 있기 때문에 이에 대한 고찰이 필요하다. Fig. 3의 온도분포에서 본 것과 같이 화염을 벗어나서도 굴뚝 내부는 비교적 고온으로 유지되며, 일반적으로 700~800°C 부근부터 아나타제에서 루타일 구조로 변환된다. 따라서 현재와 같이 굴뚝이 있는 구조가 아닌 주위공기(ambient air)에 대해서 열린 구조의 버너를 사용

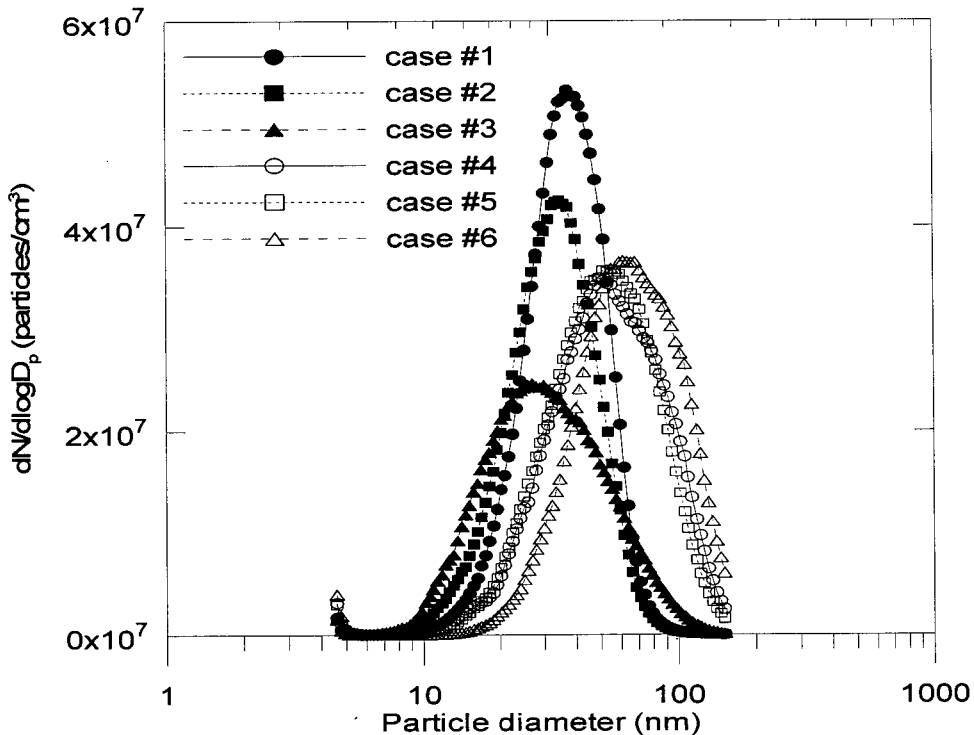


Fig. 7 Changes in particle size distribution obtained from SMPS measurement

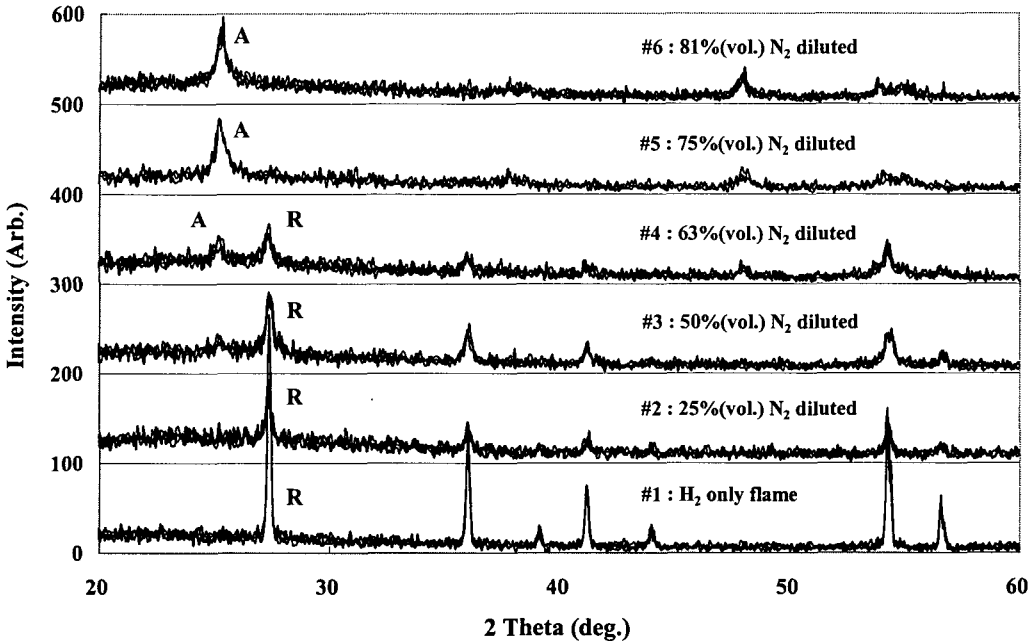


Fig. 8 X-ray diffraction patterns of formed TiO₂ nanoparticles

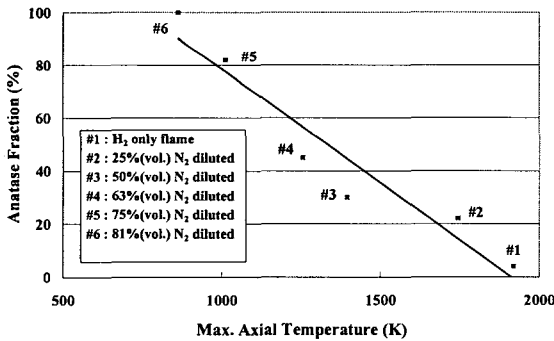


Fig. 9 Fractions of anatase phase TiO₂ nanoparticles

한다면 입자의 생성 후 화염 후류의 온도는 급격히 하강하여 소결이나 응집의 효과 및 상 변환(phase transformation)도 상당히 줄어들 것으로 생각된다.

결과적으로 화염을 안정화시키고 입자의 포집을 용이하게 하기 위해서 설치한 굴뚝이 일종의 반응기 구실을 하여 본 연구의 주 목적인 아나타제 상의 TiO₂ 나노입자의 생성에는 오히려 부정적인 요인으로 작용한 것으로 추정된다.

4. 결론

본 논문에서는 수소를 연료로 하는 확산화염을

매개로 하여 생성되는 TiO₂ 나노입자의 결정구조와 입자크기 등에 미치는 합성온도의 영향을 고찰하고자, 열전대 급속삽입법을 이용하여 연료의 질소희석에 의해서 변화되는 기체상의 온도를 측정하고, 수냉 포집판을 사용하여 생성된 TiO₂ 나노입자를 포집하여 분석하였고, 동일한 지점에서 고온-고농도용 희석 샘플링 프로브와 SMPS를 이용하여 실시간으로 입자의 입경분포를 측정하여 상호 비교하였다.

화염 중심축의 온도는 최고온도를 기준으로 1,920K부터 863K까지 분포하였다. TEM 사진을 근간으로 정량화한 입자의 크기는 1,000~1,100K를 기준으로 보다 고온의 경우에는 입자간의 소결이나 응집의 영향으로 커지는 경향을 나타내었다. 화염의 온도가 1,000K 이하가 되어야 아나타제 구조의 입자가 80% 이상인 것으로 분석되었으며, 아울러 1,000K 이하부터 비교적 직경이 큰 개별입자도 나타났고 이로 인해 평균 입자크기는 오히려 증가하였다.

화염의 안정화 및 입자포집의 용이성을 위해서 설치한 굴뚝이 일종의 반응기 구실을 하여 본 연구의 주 목적인 아나타제 상의 TiO₂ 나노입자의 생성에는 오히려 부정적인 요인으로 작용한 것으로 추정된다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원의 2004년도 기
관고유사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

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 SiO₂/TiO₂ 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 TiO₂ 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 TiO₂ 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 CH₄-O₂ 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) Ahn, K. H., Jung, C. H., Choi, M. and Lee, J. S., 2001, "Particle Sampling and Real Time Size Distribution Measurement in H₂/O₂/TEOS Diffusion Flame," *J. Nanoparticle Research*, Vol. 3, pp. 161~170.
- (14) Mcneally, C. S., Köylü, Ü. Ö., Pfefferle, L. D. and Rosner, D. E., 1997, "Soot Volume Fraction and Temperature Measurements in Laminar Nonpremixed Flames Using Thermocouples," *Combust. Flame*, Vol. 109, pp. 701~720.
- (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.