

튜브 전기로를 이용한 TiO_2 나노입자의 합성 및 특성 분석

Synthesis and Analysis of Nanosized TiO_2 Particles Using a Tube Furnace

배귀남* · 현정은¹⁾ · 이태규¹⁾ · 정종수
한국과학기술연구원 대기자원연구센터, ¹⁾연세대학교 화학공학과
(2003년 12월 6일 접수, 2004년 5월 27일 채택)

Gwi-Nam Bae*, Jung-Eun Hyun¹⁾, Tai-Gyu Lee¹⁾ and Jongsoo Jurng
Air Resources Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea
¹⁾*Department of Chemical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*
(Received 6 December 2003, accepted 27 May 2004)

Abstract

Titania particles are widely used as a photocatalyst to treat various contaminants in air and water. Titania particles were formed by vapor-phase oxidation of titanium tetraisopropoxide (TTIP) in a tube furnace between 773 and 1,273 K. The effect of process variables such as furnace temperature, flow rate of carrier air, and flow rate of sheath air on powder size and phase characteristics was investigated using a scanning mobility particle sizer (SMPS), transmission electron microscopy (TEM) and X-ray diffraction (XRD). The size distribution of synthesized titania particles was characterized with mode diameter and peak concentration. The mode diameter ranging from 20 to 80 nm decreased with increasing flow rates of sheath air and carrier air, and increased with increasing furnace temperature. The peak concentration increased with increasing flow rates of sheath air and carrier air. The best synthetic condition for high production rate can be derived from the experimental data set represented by mode diameter and peak concentration. The crystal structure of synthesized titania particles was found to be anatase phase, ensuring high photocatalytic potential.

Key words : Titania, Vapor synthesis, Nanoparticle, Particle size distribution

1. 서 론

TiO_2 는 광촉매로서 화학적 및 열적으로 매우 안정

된 물질이고, 크게 anatase, rutile 및 amorphous의 3가지 결정구조를 갖는다. 이 중에서 anatase의 결정구조를 갖는 TiO_2 입자가 광촉매로서 활성이 더 우수한 것으로 알려져 있으며, rutile의 결정구조는 백색안료로 반도체 공정 등에 많이 사용된다. TiO_2 는 자외선이 조사되면 여기상태로 되어 광활성을 나타내므로, 휘발성 유기화합물 (volatile organic compounds,

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-958-5676, E-mail : gnbae@kist.re.kr

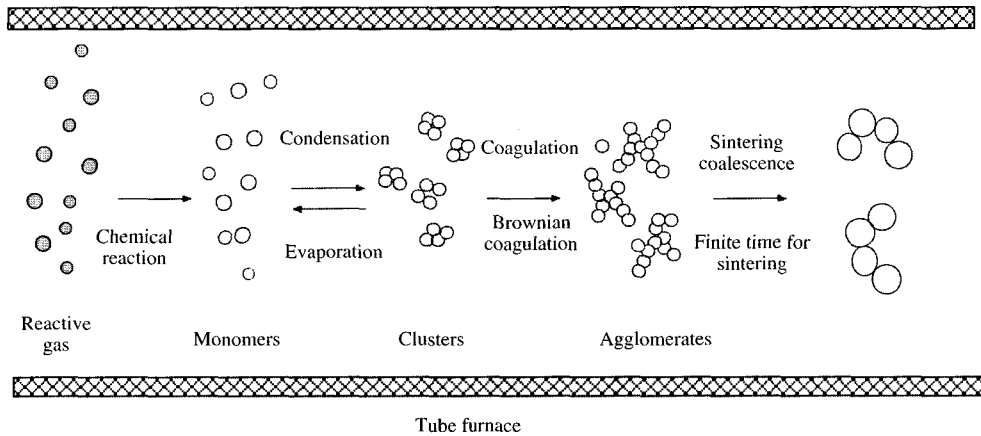


Fig. 1. Formation and growth mechanisms of TiO₂ particles in a tube furnace (Nakaso *et al.*, 2001).

VOCs), 약취, 중금속 물질 등을 제어하는데 널리 사용되고 있으며 (이주용 등, 2003; 박종숙 등, 2002; 서정민 등, 2002; 이정우와 장혁상, 2002; 정창훈 등, 2000; Lee and Biswas, 1998), 물을 분해하여 수소를 발생시키는 경우에도 활용되고 있다 (Honda and Fujisima, 1972). TiO₂는 보통 기상반응 또는 액상반응을 이용하여 합성되고 있는데 (Morooka *et al.*, 1989), 기상반응은 액상반응에 비해 입자크기를 제어하기 쉽다. 보통 전기로와 화염을 이용하는 방법이 기상반응에 의해 TiO₂ 입자를 합성하는데 많이 사용되고, TiO₂ 입자의 전구물질 (precursor)로는 TTIP (titanium tetraisopropoxide, Ti[OCH(CH₃)₂]₄)나 TiCl₄가 사용된다 (장혁상과 이정우, 2002; 정상철 등, 2001; Akhtar *et al.*, 1991).

본 연구에서는 기상방법의 하나인 튜브 전기로 (electrically heated tube furnace)를 이용하여 TiO₂ 입자를 합성하였다. 즉, TiO₂ 입자의 전구물질인 TTIP (Aldrich >97%)와 공기를 전기로의 열원을 이용하여 반응시키는 방법을 사용하였다. 전기로 내부에서 TiO₂ 입자가 생성되는 화학 반응식은 식 (1)과 같다.

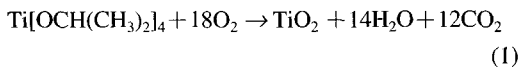


그림 1은 전기로 내에서 TiO₂ 입자의 생성 및 성장과정을 개략적으로 나타낸 것이다 (Nakaso *et al.*, 2001). TTIP 용액이 기화되어 기체상태로 산소와 만

나서 고온의 열원인 전기로 내에서 산화되면 핵화 (nucleation)가 일어나 모노머 (monomer)가 생기고, 이들이 응축 (condensation)과 증발 (evaporation) 과정을 거치면서 분자 클러스터가 생긴 후 이들이 서로 응집 (coagulation)되어 응집체 (agglomerates)로 성장하며, 최종적으로 소결 (sintering)에 의한 융합 (coalescence) 과정을 거쳐 나노크기의 TiO₂ 입자가 생성된다. 이때 응집과 융합의 정도에 따라 생성되는 TiO₂ 입자의 크기가 달라진다. 합성되는 TiO₂ 입자의 크기 및 광활성에 영향을 미치는 변수로는 전기로의 온도, TTIP의 초기 농도, 캐리어 가스의 유량, 캐리어 공기의 유량, 보호공기 (sheath air)의 유량, 산화시키기 위한 산소의 양, 수분의 양 등이 있다. 본 연구에서는 전기로의 온도, 캐리어 공기의 유량 및 보호공기의 유량을 변화시켜 합성되는 TiO₂ 입자의 크기분포, 형상 및 결정구조를 분석하였으며, 합성조건에 따라 비슷한 크기인 TiO₂ 입자의 합성율을 비교하였다.

2. 실험

광촉매 TiO₂ 입자를 합성하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 2에 나타냈다. 실험장치는 크게 튜브 전기로 (Lindberg/Blue M 1, 200°C split-hinge tube furnace model HTF55347C), 반응관, TTIP 용액을 증발시키기 위한 항온조 (water bath), 가스 실린더, 질량

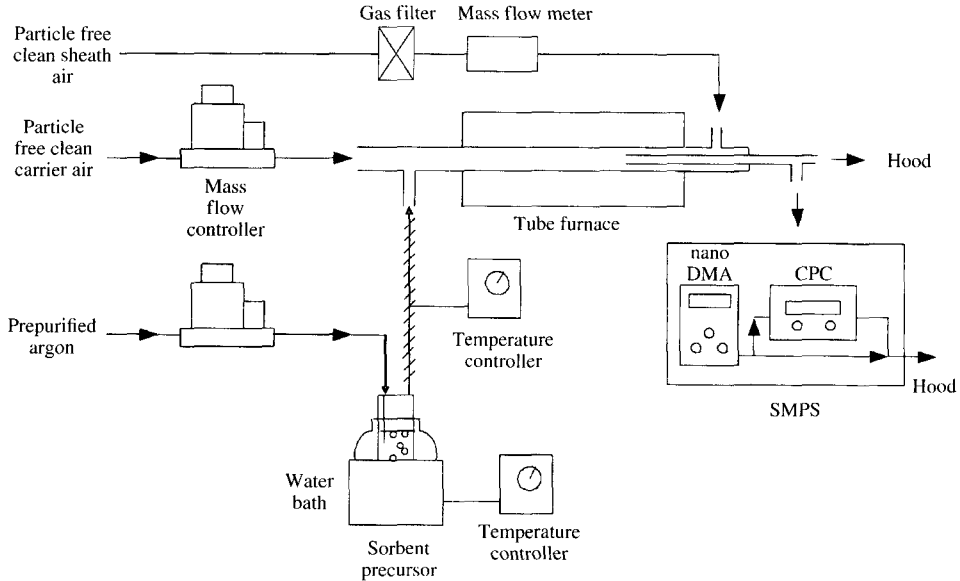


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental system.

유량 제어기 (mass flow controller), 온도 제어기 등으로 구성되어 있다. 튜브 전기로에서 사용할 수 있는 반응관의 직경은 2.54~7.62 cm이며, 같은 길이의 3개의 구역이 각각 독립적으로 1,200°C까지 가열될 수 있는 구조로 총 가열 길이는 60.96 cm이다. 본 연구에서는 반응관으로 내경이 25.4 mm, 길이가 927 mm인 석영관을 사용하였고, 석영관의 출구 부분은 보호공기를 주입하여 TiO₂ 입자의 응집을 제어할 수 있도록 특별하게 고안하였다 (Akhtar, *et al.*, 1991). TiO₂ 입자를 합성하기 위한 전구물질로 TTIP 용액을 사용하였고, TTIP 용액이 담긴 임핀저를 항온조에 담가 온도를 75°C로 맞추는 후 일정한 유량으로 기포를 발생시켰다. TTIP 증기의 캐리어 가스로는 Ar 가스를 사용하였고, 질량유량 제어기로 Ar 가스 및 캐리어 공기의 유량을 조절하였다. 이때 임핀저 출구로부터 전기로 입구까지 연결된 관의 표면을 전열밴드 (heating band)로 감아 관내 응축을 방지하였다. 석영관의 출구 부분에서 보호공기의 유량은 질량유량계 (mass flow meter, TSI model 3063)와 밸브로 조절하였다.

본 실험에서는 전기로의 온도가 500, 700, 1,000°C 일 때 보호공기의 유량을 0~10 sL/min 범위로 변화시키면서 합성된 TiO₂ 입자의 크기분포를 nano-

DMA (TSI model 3085)가 장착된 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, TSI model 3936N10)로 측정하였다. 모든 실험에서 Ar 가스의 유량은 50 scm³/min으로 고정시켰고, 캐리어 공기의 유량은 1, 3 sL/min으로 변화시켰다. 또한, 합성된 TiO₂ 입자의 형상과 결정구조를 각각 TEM과 XRD로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 TiO₂ 입자의 크기분포

기상반응에 의해 합성되는 TiO₂ 입자의 크기분포 및 농도는 합성조건에 따라 달라진다. 먼저 보호공기의 유량(Q_{sa})이 합성되는 TiO₂ 입자의 크기분포에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 전기로의 온도(T_f)가 500, 700, 1,000°C이고, 캐리어 공기의 유량(Q_{ca})이 1, 3 sL/min일 때 보호공기의 유량을 0~10 sL/min으로 변화시키면서 SMPS로 측정된 입경분포를 그림 3에 나타냈다.

전기로의 온도가 500°C 이고, 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min일 때 입경분포를 나타낸 그림 3(a)를 보면, 보호공기의 유량이 0~5 sL/min인 경우 주로 10~100 nm 크기의 TiO₂ 입자가 합성되고 이들의 입

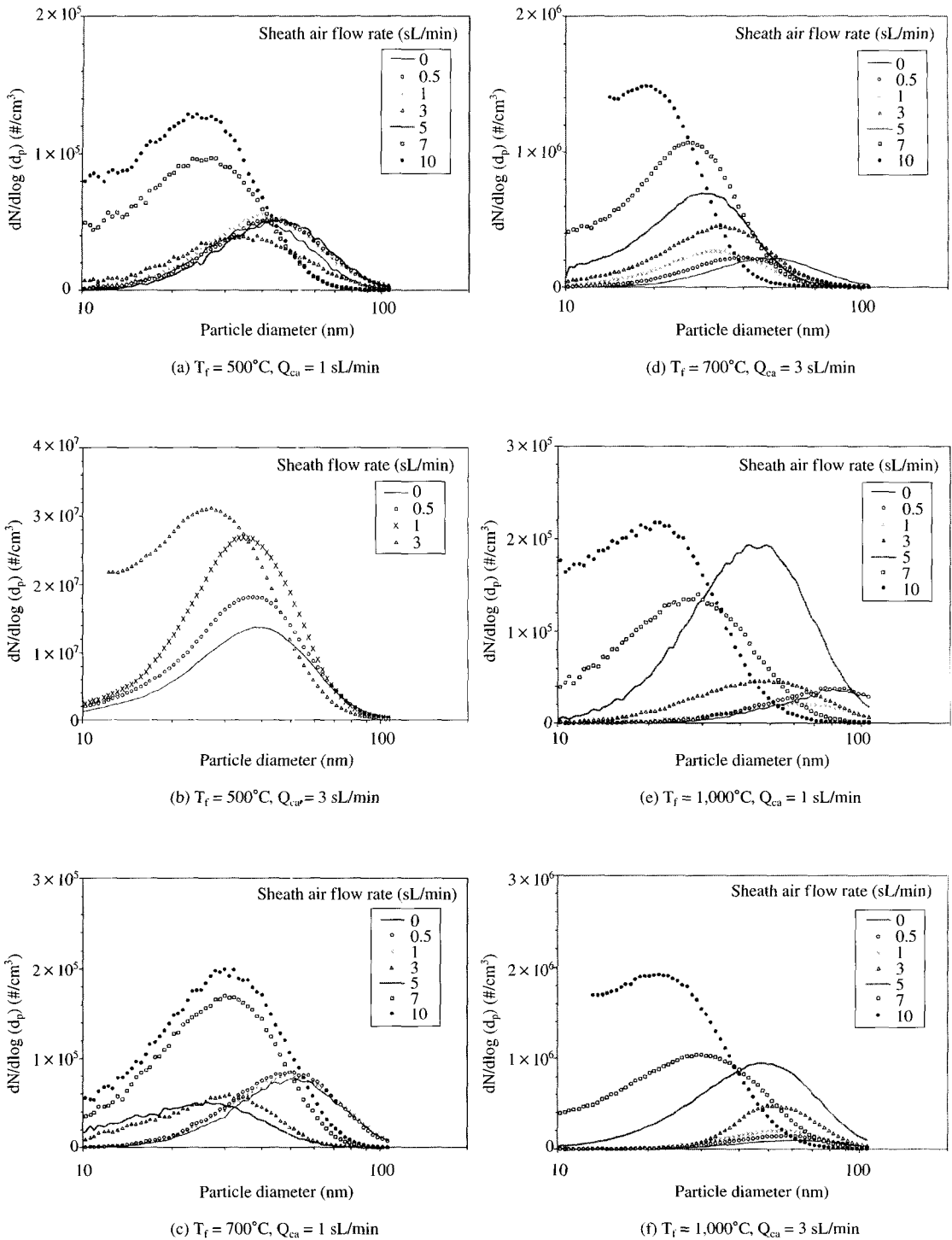


Fig. 3. Change of the TiO₂ particle size distribution with sheath air flow rate.

경분포는 거의 비슷하다. 그런데 보호공기의 유량이 7, 10 sL/min으로 증가하면 입경분포가 입경이 작은 쪽으로 이동되고 수 농도도 증가한다. 이것은 더 작은 TiO₂ 입자가 많이 합성되는 것을 의미하며, 10 nm 이하인 TiO₂ 입자도 어느 정도 합성된다고 추정된다. 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 9.4초에서 3.3초로 짧아지면(그림 3(b) 참조), 보호공기의 유량이 0~3 sL/min으로 적은 경우에도 입경분포가 보호공기의 유량 변화에 매우 민감하게 변하여 입경분포의 차이가 뚜렷하게 나타난다.

전기로의 온도가 700°C 이고, 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min일 때 입경분포를 나타낸 그림 3(c)를 보면, 보호공기의 유량이 0~1 sL/min인 경우에는 입경분포가 서로 비슷한 반면, 유량이 3, 5 sL/min으로 증가하면 입경분포는 입경이 작은 쪽으로 이동되며, 유량이 7, 10 sL/min으로 더욱 증가하면 전체적인 크기는 별로 변하지 않고 수 농도만 증가하는 입경분포를 나타낸다. 한편, 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 7.5초에서 2.6초로 짧아지면(그림 3(d) 참조), 입경분포가 보호공기의 유량 변화에 매우 민감하게 변하여 입경분포의 차이가 뚜렷하게 나타난다. 보호공기의 유량이 0~1 sL/min인 경우 수 농도는 비슷하고 입경이 작은 쪽으로 입경분포가 변하며, 유량이 3 sL/min 이상으로 증가하면 수 농도가 증가하고 입경이 작은 쪽으로 입경분포가 변한다.

전기로의 온도가 1,000°C 이고, 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min일 때 입경분포를 나타낸 그림 3(e)에서도 보호공기의 유량이 0~1 sL/min인 경우 입경분포가 서로 비슷하고, 유량이 3 sL/min 이상으로 증가하면 입경분포가 입경이 작은 쪽으로 이동되며 수 농도도 변한다. 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 5.7초에서 2.0초로 짧아지면(그림 3(f) 참조), 보호공기의 유량이 0~1 sL/min인 경우 입경분포가 서로 비슷하고, 유량이 3 sL/min 이상으로 증가하면 수 농도는 증가하고 입경이 작은 쪽으로 입경분포가 변한다.

이상의 실험결과를 요약하면, 전기로의 온도와 캐리어 공기의 유량이 일정할 때는 보호공기의 유량이 증가함에 따라 전기로 출구 부근에서 입자의 응집 현상이 감소되어 합성되는 TiO₂ 입자의 최대 농도가

나타나는 모드 입경(mode diameter)이 작아지고 피크 농도는 대체로 증가하는 입경분포를 나타낸다. 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min에서 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 짧아지면, 합성되는 TiO₂ 입자의 입경분포는 보호공기의 유량에 보다 민감하게 변한다.

그림 3에 나타낸 TiO₂ 입자의 크기분포는 대수정규분포와 비슷하며, 이러한 입경분포 특징은 모드 입경, 피크 농도, 기하학적 표준편차(σ_g)로 표현될 수 있다. 캐리어 공기의 유량이 1, 3 sL/min일 때 전기로의 온도와 보호공기의 유량에 따른 TiO₂ 입자의 모드 입경과 피크 농도의 변화를 각각 그림 4와 5에 나타냈다.

캐리어 공기의 유량이 1 sL/min일 때 TiO₂ 입자의 모드 입경을 나타낸 그림 4(a)를 보면, 전기로의 온도가 500°C인 경우 모드 입경은 보호공기의 유량이 증가함에 따라 대체로 감소하고, 20~45 nm 범위이다. 이것은 보호공기에 의해 전기로 출구 근처에서 응집 현상이 억제되어 TiO₂ 입자가 더 이상 커지지 않기 때문이다. 전기로의 온도가 700, 1,000°C로 높아지면 보호공기의 유량이 적은 범위에서 모드 입경은 증가하지만, 유량이 증가함에 따라 모드 입경의 차이는 감소하여 10 sL/min인 경우 모드 입경이 서로 비슷하다. 전기로의 온도가 1,000°C인 경우 모드 입경은 보호공기의 유량에 따라 20~85 nm 범위이다. 이러한 결과로부터 보호공기의 유량이 원하는 크기의 입경분포를 갖는 TiO₂ 입자를 합성하는데 중요한 변수임을 알 수 있다. 보호공기의 유량이 같을 때 전기로의 온도가 높을수록 합성되는 TiO₂ 입자의 모드 입경이 커진다(Okuyama *et al.*, 1986).

캐리어 공기의 유량이 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 짧아지면(그림 4(b) 참조), 보호공기의 유량이 적을 때 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min인 경우에 비해 합성되는 TiO₂ 입자의 모드 입경이 감소한다. 또한, 보호공기의 유량이 증가함에 따라 모드 입경이 계속 감소하는 경향을 나타내므로, 전기로의 온도가 500°C인 경우 모드 입경이 20 nm 이하로 작은 TiO₂ 입자를 합성할 수 있다. 합성조건에 따라 모드 입경이 20~60 nm 범위에 있으며, 이것으로부터 원하는 크기의 TiO₂ 입자를 합성할 수 있는 조건을 설정할 수 있다.

한편, 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min일 때 TiO₂ 입

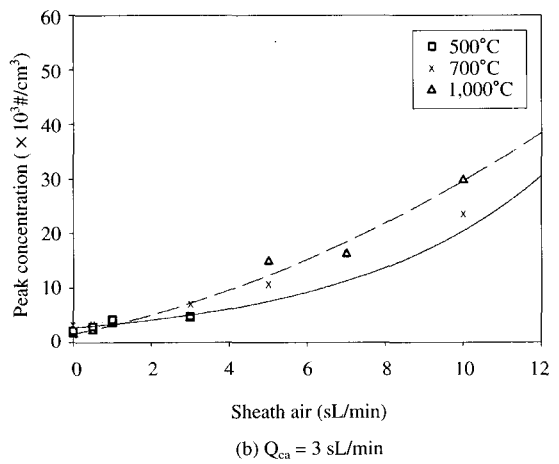
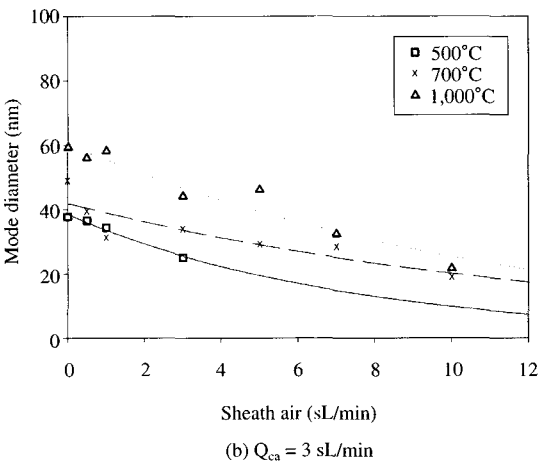
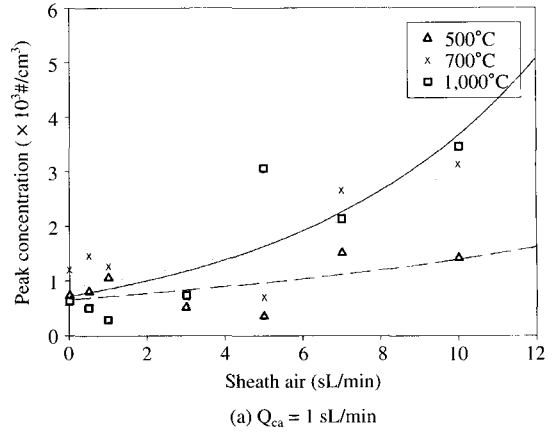
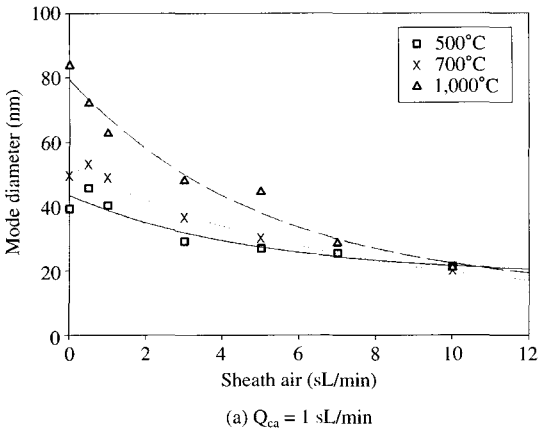


Fig. 4. Variation of the mode diameter of TiO_2 particles with sheath air flow rate.

Fig. 5. Variation of the peak concentration of TiO_2 particles with sheath air flow rate.

자의 피크 농도를 나타낸 그림 5(a)를 보면, 보호공기의 유량이 3 sL/min 이하로 적은 경우에는 피크 농도에 큰 차이가 없지만, 유량이 7 sL/min 이상으로 증가하면 피크 농도가 상당히 높아진다. 즉, 전기로의 온도가 1,000°C인 경우 보호공기의 유량이 10 sL/min일 때의 피크 농도는 유량이 0 sL/min일 때의 농도보다 5배 정도 높다. 보호공기의 유량이 증가하면 합성되는 TiO_2 입자의 수 농도가 감소하지만, 회석에 의해 입자의 응집 현상이 줄고 튜브 벽면에 침착되는 입자 수도 감소하므로 수 농도가 보호공기의 유량 증가에 비례하여 감소하지 않으며 유량이 많은 경우 오히려 수 농도가 증가하는 것으로 추정된다.

합성조건에 따라 입자의 피크 농도는 $0.3 \sim 3.5 \times 10^3$ 개/cm³ 범위에 있다.

캐리어 공기의 유량이 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 짧아지면(그림 5(b) 참조), 입자의 응집 현상이 줄어들어 피크 농도는 보호공기의 유량에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타내고 1 sL/min인 경우에 비해 10배 정도 높다. 합성조건에 따라 입자의 피크 농도는 $2.1 \times 10^3 \sim 3.0 \times 10^4$ 개/cm³ 범위에 있다.

그림 4를 보면, 동일한 크기의 TiO_2 입자를 합성할 수 있는 조건이 여러 가지 있을 수 있다. 모드 입경이 약 20 nm 및 50 nm인 TiO_2 입자를 합성할 수 있

Table 1. Effect of synthetic condition on the size distribution and the production rate of TiO₂ particles.

Synthetic condition	Mode diameter (nm)	Total number concentration (particles/cm ³)	Geometric standard deviation	Production rate (particles/min)
T _f = 500°C, Q _{ca} = 1 sL/min, Q _{sa} = 10 sL/min	21.4	2.5 × 10 ⁶	1.74	2.8 × 10 ¹⁰
T _f = 700°C, Q _{ca} = 3 sL/min, Q _{sa} = 10 sL/min	18.8	3.9 × 10 ⁷	1.66	5.1 × 10 ¹¹
T _f = 700°C, Q _{ca} = 1 sL/min, Q _{sa} = 0 sL/min	49.3	2.4 × 10 ⁶	1.51	2.5 × 10 ⁹
T _f = 1,000°C, Q _{ca} = 3 sL/min, Q _{sa} = 5 sL/min	46.1	3.5 × 10 ⁷	1.43	2.8 × 10 ¹¹

는 조건의 예를 비교하여 표 1에 나타냈다. 여기서, 입자의 합성율 (production rate)은 총 수 농도와 총 유량(캐리어 공기의 유량+보호공기의 유량)을 곱하여 구한 것이다. 표 1에서 2가지 합성조건을 비교해 보면, 전기로의 온도가 700°C, 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min, 보호공기의 유량이 10 sL/min일 때 약 20 nm 크기인 TiO₂ 입자가 시간당 1.8배 정도 상대적으로 더 많이 합성되고, 전기로의 온도가 1,000°C, 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min, 보호공기의 유량이 5 sL/min일 때 상대적으로 약 50 nm 크기인 TiO₂ 입자가 시간당 110배 정도 더 많이 합성됨을 알 수 있다. 결론적으로 그림 4와 5에 나타낸 모드 입경과 피크 농도의 측정결과로부터 원하는 크기의 TiO₂ 입자를 가장 많이 합성할 수 있는 조건을 설정할 수 있다.

3. 2 TiO₂ 입자의 형상 및 결정구조

기상반응에 의해 합성된 TiO₂ 입자의 특성을 살펴 보기 위하여 형상과 결정구조를 분석하였다. 전기로의 온도에 따라 합성된 TiO₂ 입자를 필터로 샘플링 하여 찍은 TEM 사진을 그림 6에 나타냈다. 전기로의 온도가 500°C, 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min, 보호공기의 유량이 10 sL/min인 조건에서 합성된 TiO₂ 입자는 많은 기본 입자(primary particles)가 상당히 밀집되어 응집된 포도송이 형상을 나타낸다(그림 6 (a) 참조). 전기로의 온도가 700°C, 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min, 보호공기의 유량이 10 sL/min인 조건에서 합성된 TiO₂ 입자는 많은 기본 입자가 엉성하

게 응집된 포도송이 형상을 나타낸다(그림 6 (b) 참조). 전기로의 온도가 700°C, 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min, 보호공기의 유량이 0 sL/min인 조건에서 합성된 TiO₂ 입자는 그림 6 (b)와 비슷하게 많은 기본 입자가 엉성하게 응집된 포도송이 형상을 나타낸다(그림 6 (c) 참조). 전기로의 온도가 1,000°C, 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min, 보호공기의 유량이 0 sL/min인 조건에서 합성된 TiO₂ 입자는 많은 기본 입자가 좀 더 엉성하게 응집된 포도송이 형상을 나타낸다(그림 6 (d) 참조). 이러한 TEM 사진의 비교로부터 전기로에서 합성된 TiO₂ 입자는 전기로의 온도가 높을 수록 기본 입자가 더 엉성하게 응집되어 외부 접촉 표면적이 넓은 형상을 이루고 있음을 알 수 있다.

TiO₂ 입자는 크게 anatase, rutile 및 amorphous의 결정구조를 갖고 있으며, 이 중에서 anatase의 결정구조를 갖는 TiO₂ 입자가 광촉매로서 활성이 더 우수한 것으로 알려져 있다. TiO₂ 입자의 결정구조는 주로 전기로의 온도에 영향을 받는다고 알려져 있으므로, 캐리어 공기의 유량이 3 sL/min, 보호공기의 유량이 0 sL/min일 때 3가지 전기로의 온도(500, 700, 1,000°C)에서 합성된 TiO₂ 입자의 결정구조를 XRD로 분석하여 그림 7에 나타냈다. Anatase 결정구조의 경우 101 반사에 대해 가장 큰 피크를 나타내는 회절각(2θ)은 25.4° 이고, rutile 결정구조의 경우 110 반사에 대해 가장 큰 피크를 나타내는 회절각은 27.5° 이다(Akhtar *et al.*, 1991; Spurr and Myers, 1957). 그림 7을 보면, 3가지 전기로의 온도에서 모두 anatase의 결정구조를 나타내는 피크만 보이고, rutile의 결정구조를 나타내는 피크는 보이지 않는다. Akhtar *et al.* (1991)의 연구결과에서도 1,127°C 이하에서 anatase의 결정구조만 보이고, 1,327°C보다 높을 때 rutile의 결정구조가 관찰되었다. 이것으로부터 전기로의 온도가 500~1,000°C인 조건에서 합성된 TiO₂ 입자는 anatase의 결정구조를 갖고 있어 광촉매로서 사용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 튜브 전기로를 사용하여 기상반응에 의해 100 nm 이하의 TiO₂ 입자를 합성하였으며, 합성조건에 따른 입경분포, 형상 및 결정구조를 분석

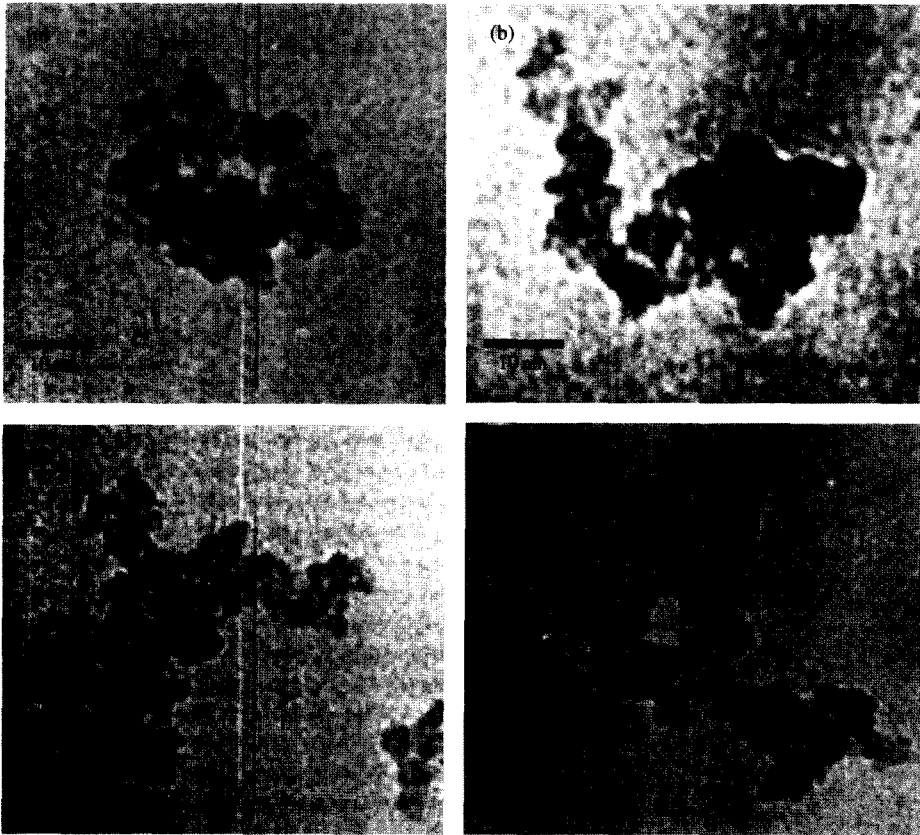


Fig. 6. TEM photographs of TiO₂ particles. (a) T_f = 500°C, Q_{ca} = 1 sL/min, Q_{sa} = 10 sL/min; (b) T_f = 700°C, Q_{ca} = 3 sL min⁻¹, Q_{sa} = 10 sL/min; (c) T_f = 700°C, Q_{ca} = 1 sL min⁻¹, Q_{sa} = 0 sL min⁻¹; (d) T_f = 1,000°C, Q_{ca} = 3 sL min⁻¹, Q_{sa} = 0 sL min⁻¹.

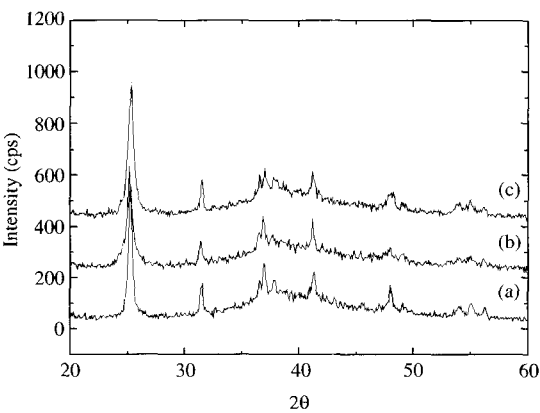


Fig. 7. XRD profiles of TiO₂ particles. (a) T_f = 500°C, Q_{ca} = 3 sL min⁻¹, Q_{sa} = 0 sL min⁻¹; (b) T_f = 700°C, Q_{ca} = 3 sL min⁻¹, Q_{sa} = 0 sL min⁻¹; (c) T_f = 1,000°C, Q_{ca} = 3 sL min⁻¹, Q_{sa} = 0 sL min⁻¹.

하여 다음과 같은 사실을 밝혀냈다.

첫째, 튜브 전기로의 온도와 캐리어 공기의 유량이 일정할 때 보호공기의 유량이 증가함에 따라 전기로 출구 부근에서 응집 현상이 감소되어 합성 TiO₂ 입자의 최대 농도가 나타나는 모드 입경이 작아지고 피크 농도는 대체로 증가하는 입경분포를 나타낸다. 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min에서 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 짧아지면, 합성되는 TiO₂ 입자의 입경분포는 보호공기의 유량 변화에 보다 민감하게 변한다.

둘째, 보호공기의 유량이 적은 범위에서 합성되는 TiO₂ 입자의 모드 입경은 전기로의 온도가 높을수록 커지지만, 유량이 증가함에 따라 모드 입경의 차이는 감소하며 10 sL/min인 경우 모드 입경이 전기로의 온도에 무관하게 비슷해진다. 보호공기의 유량이 많

은 범위에서는 합성되는 TiO₂ 입자의 피크 농도가 증가하고, 캐리어 공기의 유량이 1 sL/min에서 3 sL/min으로 증가하여 전기로내 체류시간이 짧아지면, 피크 농도는 보호공기의 유량에 따라 급격히 증가한다. 이러한 합성조건에 따른 모드 입경과 피크 농도에 대한 자료로부터 원하는 크기의 입경분포를 갖는 TiO₂ 입자를 보다 많이 생산할 수 있는 합성조건이 존재함을 알 수 있다.

셋째, 전기로에서 합성된 TiO₂ 입자는 전기로의 온도가 높을수록 서로 엉성한 포도송이 모양으로 응집되어 외부와의 접촉 표면적이 넓은 형상을 이루고 있으며, 전기로의 온도가 500~1,000°C인 조건에서 합성된 TiO₂ 입자는 anatase의 결정구조를 갖고 있어 광촉매로서 사용될 수 있다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원의 2002~2003년도 기관과유사업(대기 유해성분 제어기술, 나노물질을 이용한 유해염소화물질 및 중금속 제어기술 개발)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

박종숙, 이진홍, 김진석, 오상협, 김동현 (2002) TiO₂ 광촉매 반응기의 기체상 탄화수소의 분해효율, 한국대기 환경학회지, 18(3), 223-230.
 서정민, 정창훈, 최금찬 (2002) 대기 중 휘발성 유기화합물의 광산화 공정 및 광촉매산화 공정의 처리효율 비교, 한국대기환경학회지, 18(2), 139-148.
 이정우, 장혁상 (2002) 화염 합성에 의한 TiO₂ 제조와 VOCs 제거에 대한 적용 I: 화염 합성 TiO₂의 광촉매적 성질, 대한환경공학회지 · 논문, 24(5), 889-900.
 이주용, 김성관, 안영철, 황유진, 이재근, 황정성, 김태호 (2003) TiO₂ 나노 입자를 이용한 휘발성 유기 화

합물의 광분해에 관한 실험적 연구, 대기환경학회 2003년도 춘계학술대회논문집, 1881-1884.
 장혁상, 이정우 (2002) 화염 합성 조건에 따른 TiO₂ 입자의 형상 특성 및 광촉매적 성질의 변화, 대한환경공학회 2002 춘계학술연구발표회 논문집 (II), 175-176.
 정창철, 김상재, 서성규 (2001) 화학기상증착법으로 제조한 TiO₂ 막의 광촉매 활성, HWAHAK KONGHAK, 39(4), 385-389.
 정창훈, 서정민, 김석택, 최금찬 (2000) 이산화 티타늄 (TiO₂) 광촉매 산화 반응을 이용한 트리클로로에틸렌 (TCE) 처리에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16(5), 521-528.
 Akhtar, M.K., Y. Xiong, and S.E. Pratsinis (1991) Vapor synthesis of titania powder by titanium tetrachloride oxidation, AIChE Journal, 37(10), 1561-1570.
 Lee, D. (2000) *Control of Size, Morphology and Phase of Nanoparticles Using Laser Irradiation in Flame Aerosol Synthesis*, Ph.D. thesis, Seoul National University.
 Lee, T.G. and P. Biswas (1998) Kinetics of mercury capture using titania sorbents, J. Aerosol Sci., 29, s577-s578.
 Morooka, S., T. Yasutake, A. Kobata, K. Ikemizu, and Y. Kato (1989) A mechanism for the production of ultrafine particles of TiO₂ by a gas-phase reaction, J. Int. Chem. Eng., 29, 119-126.
 Nakaso, K., T. Fujimoto, T. Seto, M. Shimada, K. Okuyama, and M. Lunden (2001) Size distribution change of titania nano-particle agglomerates generated by gas phase reaction, agglomeration, and sintering, Aerosol Science and Technology, 35, 929-947.
 Okuyama, K., Y. Kousaka, N. Tohge, S. Yamamoto, J.J. Wu, R.C. Flagan, and J.H. Seinfeld (1986) Production of ultrafine metal oxide aerosol particles by thermal decomposition of metal alkoxide vapors, AIChE Journal, 32(12), 2010-2019.
 Spurr, R.A. and H. Myers (1957) Quantitative analysis of anatase-rutile mixtures with an X-ray diffractometer, Anal. Chem. 29, 760.