

티타니아 나노튜브(TNT)의 제조 및 응용

글 _ 정지훈, 홍성창
경기대학교

1. 서론

티타니아(TiO₂)는 광촉매 반응 등에 많이 사용되는 물질로 1970년대 Fujishima와 Honda가 물의 광분해 반응 연구를 발표한 이후 관심의 대상이 된 물질이다¹⁾. 티타니아는 온도의 영향을 받지 않고 조작성이 쉬우며 가격이 저렴함과 동시에 인체에 무해하기 때문에 광촉매 뿐 아니라, 염료감응 태양전지, 수소제조, 각종센서, 자정(self-cleaning), 초친수(superhydrophilicity), 살균, 탈취 등에 널리 적용되고 있다²⁾.

TiO₂를 보다 효율적으로 사용하기 위하여 티타니아를 고정화시켜 박막으로 만드는 연구도 활발히 진행되고 있으며, 주로 sol-gel, CVD, sputtering 등의 방법이 사용되고 있으나 낮은 비표면적, 효율저하, 높은 비용 등이 문제가 되고 있다.

최근에 티타니아 박막과 티타니아 분말의 반응성을 극대화 하기위한 방법으로 티타니아나노튜브(TNT) 박막과 나노튜브 분말이 그 대안으로 제시되고 있다. 나노튜브는 티타니아 표면이 빛을 받아 생성된 광전자 혹은 외부로부터 전달된 전자를 튜브를 통해 신속하게 전달시켜 전자와 정공의 재결합을 억제하고 티타니아의 반응효율을 극대화시키기 때문이다. 따라서 티타니아 나노튜브는 일반 티타니아 분말이나 박막에 비해 높은 전자확산도를 가지게 되며 이를 혹자는 전자 고속도로(electron highway) 라고 부르기도 한다. 본 글에서는 티타니아 나노튜브 박막을 제조하는 양극산화법과 티타니아 분말을 제조

하는 수열합성법, 그리고 티타니아 나노튜브의 대표적인 응용분야인 광촉매, 수소제조, 염료감응 태양전지 등에 대하여 살펴보았다.

2. 티타니아 나노튜브의 제조

2.1. 티타니아 박막 및 나노튜브 박막 제조

2.1.1. 양극산화에 의한 티타니아 박막제조

양극산화를 이용한 티타니아 나노튜브(TNT) 박막 제조기술은 일반 티타니아 박막 제조 기술에서 유래되었으며 따라서 양극산화를 이용한 티타니아 박막제조에 대하여 먼저 살펴보기로 하자. 티타늄(Ti) 금속 표면을 양극에서 전기적으로 산화시켜 TiO₂를 형성시키는 기술은 표면처리를 위해 개발되었다. 단순한 표면처리에 사용되는 양극산화 기술은 soft anodizing으로 표면에 형성되는 티타니아 박막은 촉매활성이 거의 없다. 활성을 가진 티타니아 박막을 티타늄 표면에 생성시키기 위해서는 보다 가혹한 제조조건을 갖는 hard anodizing 기술을 이용해야 한다.

Yasunaga 등은 티타늄과 티타늄 합금을 phosphoric acid에서 양극산화 한 후, 다양한 온도에서 annealing하여 anatase 결정을 확인하였으며³⁾, Miller 등은 400 mA/cm²의 전류밀도와 0-150volt 그리고 5N의 황산전해질에서 티타늄을 양극산화 하여, 대부분의 rutile 결정과 함께 소량의 anatase 결정을 가지는 다공성의 TiO₂ film을 얻었으며, 가시광 영역에서 높은 양자효율(quantum effi-

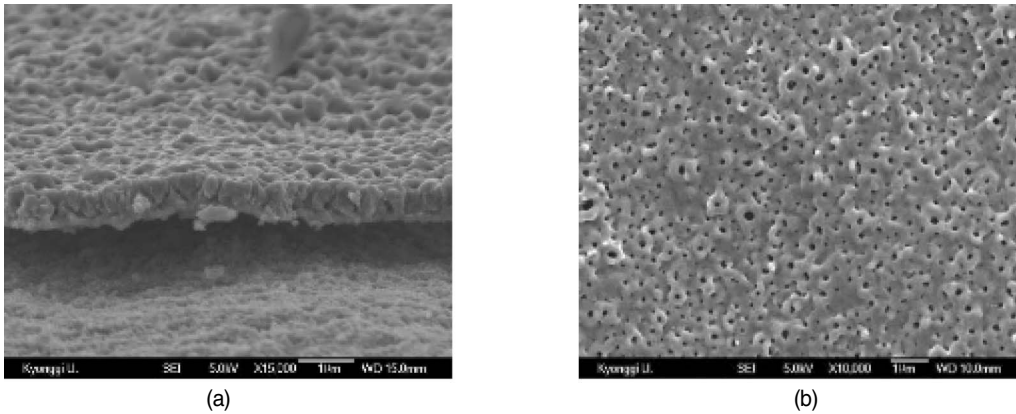


Fig. 1. SEM images for anodized TiO₂ film at 0.25M H₂SO₄, 110mA/cm² and 180V. (a) cross section and (b) surface.

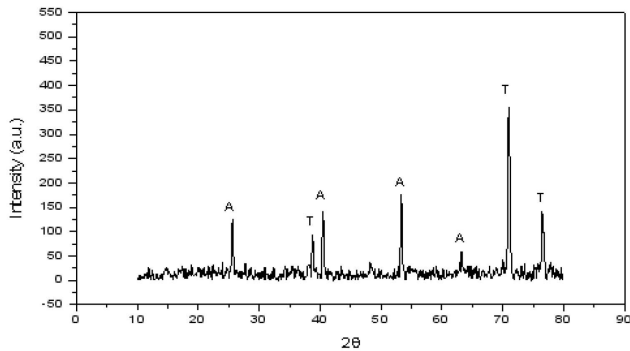


Fig. 2. XRD patterns for anodized TiO₂ film at 0.25M H₂SO₄, 110mA/cm² and 180V.

ciency)을 나타낸다고 보고하였다⁴⁾. Ito 등은 양극산화를 이용하여 티타늄 plate 표면에 TiO₂ 박막을 형성시키고 CH₃CHO 분해에 적용한 결과, 반응 5시간에 초기 농도의 50%의 제거율을 나타낸다고 보고하였다^{5,6)}. 본 연구실에서는 광촉매 반응에 적용하기 위한 티타니아 박막을 다양한 조건에서 제조하였다. 이때 0.25M H₂SO₄, 110mA/cm²의 전류밀도, 180V의 전압하에서 최적의 TiO₂ 박막을 얻을 수 있었으며, 이를 수처리 시스템과 대기 정화 시스템에 적용하여 촉매활성을 나타냄을 확인하였다. 제조된 티타니아 박막의 SEM 사진과 XRD 분석결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 실었다.

2.1.2. 양극산화에 의한 TNT 박막 제조

앞서 언급한 바와 같이 티타니아의 효율을 극대화하기 위해서는 전자와 정공의 재결합을 억제시켜야 하며, 이

를 위해서 생성된 전자를 재결합이 되기 전에 다른 곳으로 신속히 전달할 수 있는 나노튜브가 개발되었다. TNT layer가 생성되는 과정은 티타늄 표면에 산화막이 형성된 뒤, 화학적 산화로 인해 산화층을 형성한다. TNT는 그 산화층 두께만큼 TNT 길이가 형성되고 표면의 산화막이 사라지면서 TNT 표면이 드러나게 된다.

양극산화를 통한 TNT 제조는 2001년 Grimes group에 의해 처음으로 보고되었다⁷⁾. 이후 다양한 양극산화 조건에서 튜브의 형태⁸⁾, 길이와 기공 크기⁹⁾, 벽의 두께¹⁰⁾ 등의 변화에 대해 연구되어져 왔다. 또한 전해질에 따라 여러 가지 형태의 TNT가 제조되었으나 fluoride ion을 공통적으로 함유하고 있다¹¹⁾. 티타늄을 FTO상에 진공 증착시킨 후 양극산화시켜 TNT 박막을 제조하고 이를 태양전지에 적용한 사례도 연구되었다^{8,12)}.

본 실험실에서는 수백nm에서 수십μm의 길이를 갖는 TNT를 제조하였다. 양극으로는 티타늄 foil (Aldrich, purity>99.7%)을 사용하였고, 음극으로는 백금을 사용하였으며, 전해질로는 HF, NaF, NH₄F 등을 사용하였다³⁻¹⁶⁾. 제조된 TNT의 XRD 분석 결과 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 anatase 결정이 생성되었음을 확인할 수 있었으며, SEM 분석결과 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 제조조건에 따라 다양한 길이와 형태를 가진 나노튜브가 생성됨을 확인할 수 있었다.

2.2. 티타니아 나노튜브 분말제조

TNT 분말은 티타니아 박막에 비해 연구는 늦게 시작되었지만 응용분야가 더 넓다는 점에서 최근에 많은 연구가 되고 있다. 티타니아 분말을 이용하여 염료감응태양전지(DSSC)의 전극을 스크린 프린팅 기법으로 제조하여 9.8%의 에너지 전환율을 얻었다는 연구결과가 보고되었다⁷⁾. 또한 일본에서는 TNT 내부에 금속 화합물을 삽입하여 기존의 TNT보다 전자의 흐름을 보다 원활하게 해주는 연구가 시도되고 있다^{8,19)}. TNT 분말 제조방법으로는 대표적으로 수열합성방법(Hydrothermal method)가 가장 넓게 알려져 있다²⁰⁻²²⁾. 기존의 TiO₂ 분말 (P25, Degussa AG)을 NaOH(10M)와 같은 강 알칼리성 용액에 110~180°C로 12~72시간 수열 반응시켜 얻어진 물질을 증류수와 HCl로 씻어 내어 분말상의 TNT를 얻을 수 있다. 수열합성법으로 제조된 TNT 분말의 TEM 분석 결과 Fig. 5과 같이 내부가 비어있는 직경 약 10nm의 튜브형태를 볼 수 있다^{7,22)}.

본 실험실에서는 환류냉각기가 설치된 반응기에 P25 분말 2g을 10M NaOH 250ml 와 혼합하여 130°C에서 24시간 동안 반응 후, 증류수와 0.1M HCl로 TNT 분말을 씻어 NaOH를 제거한다. 용매를 여과한 후 건조시켜 TNT 분말을 얻었으며, 결정을 성장시키기 위해 420°C에서 3시간 동안 열처리 과정을 거쳤다. Fig. 6(a)에 나타낸 SEM 분석 결과 튜브의 직경이 약 20-25nm 인 티타니아 나노

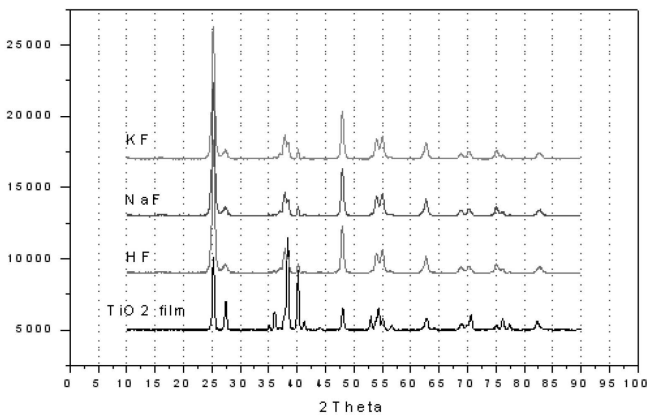


Fig. 3. XRD patterns of Titania nanotubes prepared by various electrolytes.

튜브가 관찰되었고 XRD 분석으로부터 anatase의 결정이 관찰되었다. 또한 일반적인 수열합성법 이외에 양극 산화에 의해 제조된 티타니아 나노튜브 박막을 초음파 처리하여 나노튜브 박막을 티타늄 표면으로부터 분리해 내었다. Fig. 6(b)는 초음파로 분리해낸 티타니아 나노튜브의 SEM 사진이다.

3. 티타니아 나노튜브의 응용

3.1. 광촉매 반응

TNT표면에 자외선이 조사되면 TiO₂ 표면의 전자가 광여기(photo excited)되면서 정공을 만들고, 이 정공에서 강력한 산화제인 OH 라디칼이 만들어진다. 그러나

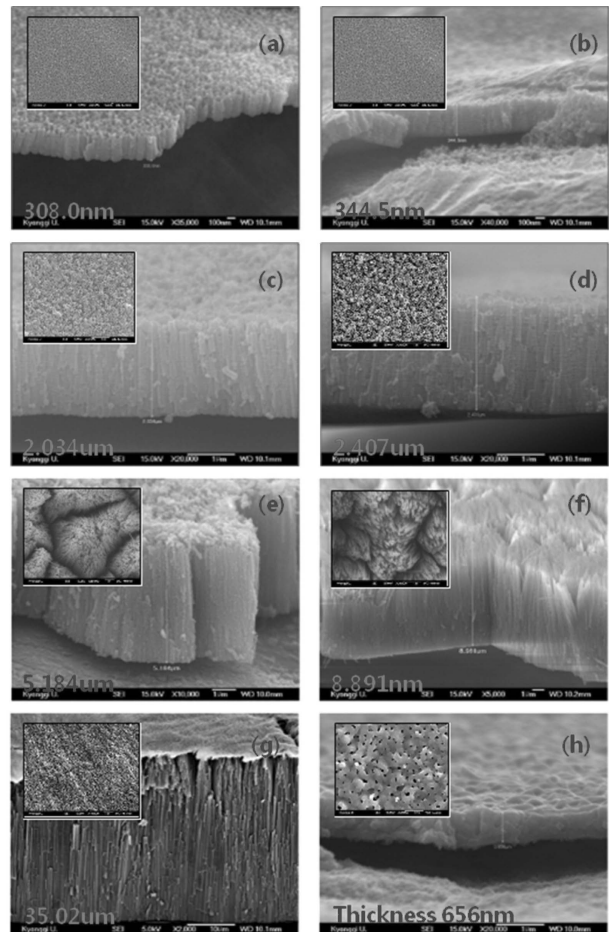


Fig. 4. FE-SEM image of Titania nanotubes prepared by various conditions.

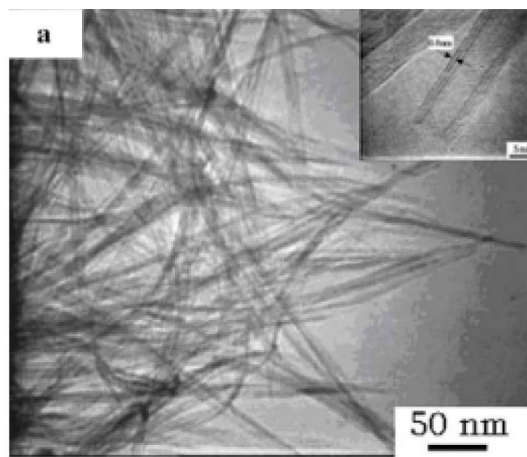
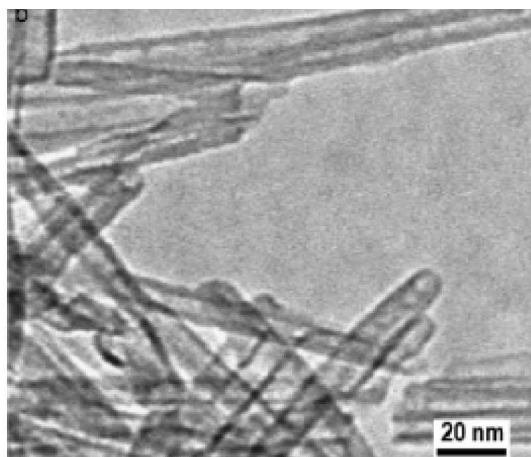
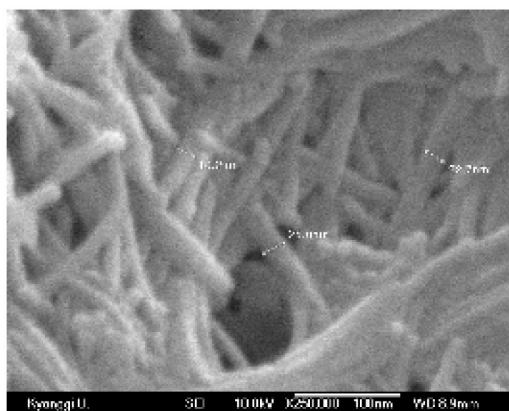


Fig. 5. TEM image of TNT powder.

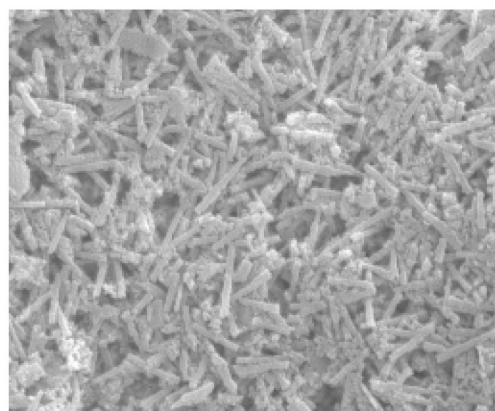
전자와 정공은 짧은 시간 안에 재결합을 하므로 이를 억제해야 광촉매 반응에서 사용되는 OH radical의 생성을 늘릴 수 있다. TNT는 광여기된 전자를 나노튜브를 통해 내부로 전달해 줌으로써 정공과의 결합을 억제할 수 있다.

환경오염에 주범이 되고 있는 phenol, pentachlorophenol과 같은 난분해성 유기물을 TNT를 광촉매로 사용하여 제거하려는 연구가 이루어지고 있다¹⁵⁻²³. 또한 TNT 광촉매에 PC(Photocatalytic)반응과 PEC(Photoelectrocatalytic)반응을 적용하여 Methyl orange와 같은 유기화합물을 분해시킨 연구가 보고되었다²⁴.

본 연구실에서는 TiO₂ 박막과 TNT 박막을 광촉매로 사용하여 기상의 아세트알데하이드와 Methylene blue 용액을 분해하는 연구를 수행하였다^{25,26}. Fig. 7은 티타니아 박막을 이용한 기상의 아세트알데하이드의 분해반응을 나타낸 것이다. 광촉매와 전극에 자외선과 암방전(dark plasma)을 동시에 가해준 경우에 가장 높은 반응성을 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 TNT와 티타니아 박막에 자외선을 조사하여 메틸렌블루 용액을 분해한 실험 결과로서 TNT의 경우가 티타니아 박막에 비해서 2배 이상의 분해속도를 보여주었다. 이는 TNT가 전자와 정공의 재결합을 억제하여 반응성을 향상시킨다는 이론이 잘 적용되는 결



(a)



(b)

Fig. 6. SEM image of TNT powder prepared by (a) Hydrothermal of P25, (b) Sonication of TNT film.

과이다. Fig. 8(b)는 TNT 길이에 따른 methylene blue의 분해능을 비교한 실험결과로 TNT의 길이 약 2 μm 까지는 분해속도가 증가하였으나 2 μm 이상 길이에서는 분해속도가 오히려 감소하였다. 이는 2 μm 이하의 길이에서는 TNT의 길이가 길어질수록 표면적이 증가하여 반응속도가 증가하였으나, 튜브길이가 2 μm 이상 길어지면 TNT의 저항이 증가하여 전자의 이동이 원활하지 못하기 때문이다.

3.2. TNT를 이용한 수소제조

기존의 화석연료를 대신할 새로운 대체에너지 모색 과정의 하나로 수소에너지를 경제적으로 생산하기 위한 연

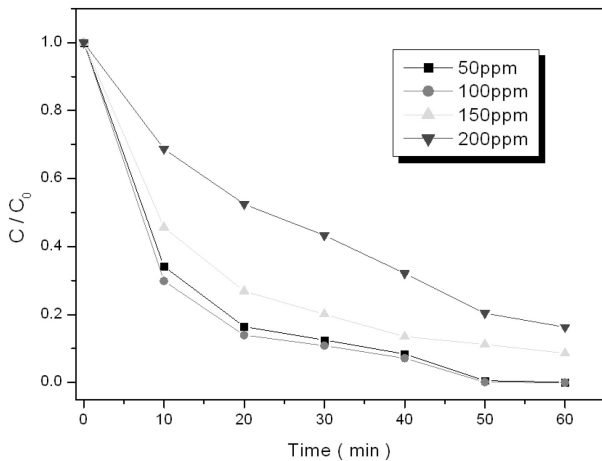
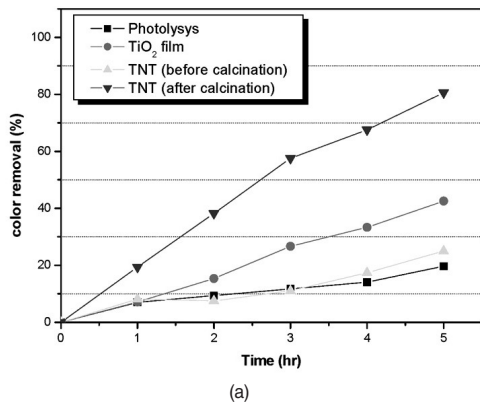


Fig. 7. Degradation of acetaldehyde with various initial concentrations.



구가 진행되고 있다. 그에 대한 연구 중 하나로 수증에서 티타니아에 자외선을 조사하게 되면 물 분해가 이루어져 수소가 생성된다. 하지만 수소 생성량이 매우 미량이기 때문에 반응성을 향상시키고자 TNT를 수소제조에 적용하게 되었다^{1,27)}.

본 연구실에서는 TNT 박막에 자외선을 조사하여 각각 PC와 PEC 조건에서 수소생성에 대한 연구를 진행하였다. Fig. 9(a)에 나타난 반응기를 이용하여 양극산화를 통해 제조된 TNT 박막을 백금(Pt)과 함께 0.1M KOH의 전해질에 장착한 후 UV를 조사한 결과 수소가 생성됨을 확인할 수 있었다. 대조 실험으로 이전 연구에서 제조한 TiO₂ 박막과 비교 실험을 한 결과 TNT 박막이 더 많은 수소를 발생시키는 것을 확인하였다. 또한 Fig. 9(b)에서 보듯이 UV를 조사하면서 아울러 티타니아 박막과 백금 전극 사이에 전압을 걸어 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 미세전류(micro current)를 흘려주면 자외선만을 조사한 경우나 전류만을 흘려준 경우보다 훨씬 많은 수소가 발생하였다.

3.3. 염료감응태양전지

1991년 스위스 Grätzel 그룹에서 보고한 염료감응 나노 분말 산화물 광전기화학 태양전지²⁶⁾는 에너지 변환 효율이 비정질 실리콘 태양전지에 버금가는 높은 에너지 변환 효율과 함께 매우 저렴한 제조단가로 인하여 연구계 및 산업계의 비상한 관심을 모았다. TiO₂ 나노 분말을 전도성 유리 위에 필름형태로 코팅하여 염료를 입혀 태양

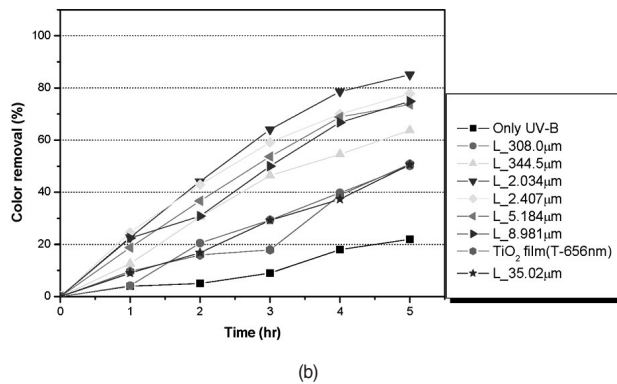


Fig. 8. (a) Degradation of methylene Blue by TiO₂ film and TNT, (b) Degradation of methylene Blue with TNT length.

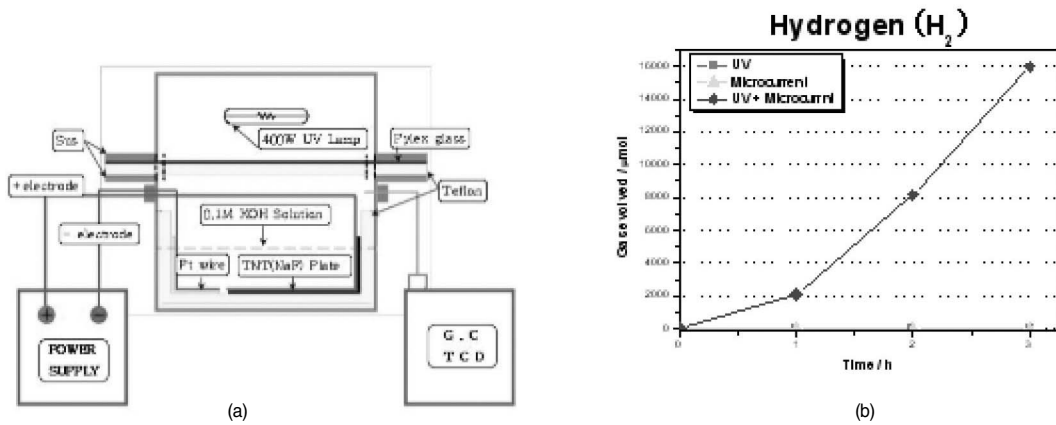


Fig. 9. (a) Reactor for hydrogen generation. (b) Hydrogen generation rate by UV, Microcurrent and UV + Microcurrent.

전지 제조에 성공하였으며, 티타니아 분말(P25, Degussa)과 TNT 분말을 태양전지에 각각 적용하여 비교 실험한 연구도 보고되었다^{7,29)}. Grimes 그룹에서는 스퍼터링 기법으로 티타늄을 FTO glass 위에 입힌 후 이를 양극산화시켜 TNT를 성장시킨 후 Fig.10과 같이 빛을 비추는 방향에 따른 태양전지 효율을 평가하였다³⁰⁾. 또한 얇은 티타늄 막을 FTO glass 위에 열과 Sn foil을 이용하여 부착시킨 뒤 양극산화하여 TNT를 성장시켜 태양전지에 적용하였다³¹⁾.

본 연구실에서는 다양한 조건에서 제조된 티타니아 나노튜브 분말과 나노튜브에 금속 분말을 복합화 시킨 분

말을 염료감응 태양전지에 적용하여, 기존 티타니아 분말과 비교 하여 그 특성을 확인하는 연구를 진행 중에 있다.

4. 결론

기존 티타니아의 한계를 극복하기 위해 도입된 티타니아 나노튜브의 제조와 응용분야에 대하여 간단히 살펴보았다. 티타니아 나노튜브는 높은 전자확산도를 가지고 있어서 기존 티타니아에 비해 탁월한 반응성을 나타내며 이러한 특성을 이용하여 앞에서 살펴본 광촉매, 수소제

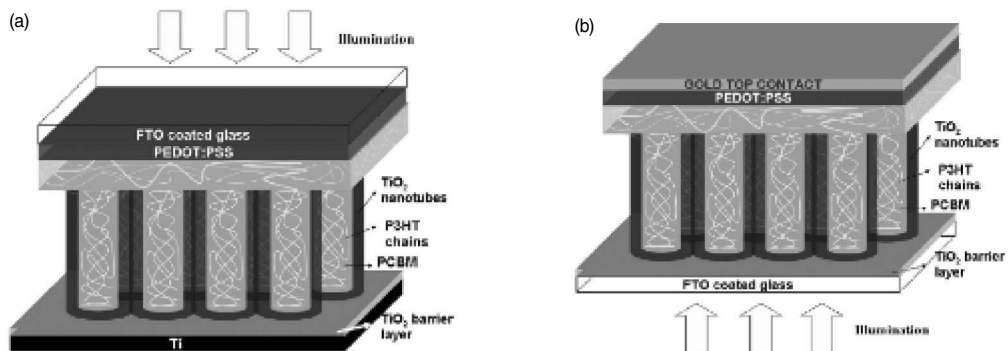


Fig. 10. Schematic diagrams of the TiO₂ nanotube array-polymer double heterojunction solar cells. (a) Backside illumination geometry and (b)frontside illumination geometry³¹⁾.

조, 염료감응 태양전지뿐만 아니라 각종 센서, 연료전지 등으로 그 영역을 넓혀 가고 있다. 티타니아 나노튜브에 대한 연구는 아직 시작단계에 불과하며 장차 그 응용 가능성은 무한할 것으로 생각된다. 아마 탄소나노튜브 (CNT)가 처음 발견되었을 때에도 CNT의 종류와 제조 방법, 적용분야 등이 지금처럼 많을 것으로는 아무도 상상하지 못했을 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업으로 진행중이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Fujishima, and K. Honda, "Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode", *Nature*, **238** 37-8 (1972)
2. A. Fujishima, K. Hashimoto, and T. Watanabe, "TiO₂ Photocatalysis Fundamentals and Applications", BKC Inc. Tokyo, 1999
3. T. Yasunaga, F. Kamikubo, N. Kitagawa, Y. Ito, T. Ogawa, T. Saito, S. Ono, K. Ajito, T. Minabe, K. Hashimoto, and A. Fujishima, "Surface Treatment for Photocatalytic Interior Materials II -Photocatalytic Behaviors of Anodized Titanium and its Alloy", *Titanium'95: Science and Technology, The Institute of Materials*, UK, 1879(1996)
4. D. Miller, S.e Mamiche-Afara, M. J. Dignam, and M. Moskovits, "The photoactivity of Porous TiO₂ Anodized at a High Voltage", *Chemical Physics Letters*, **100** [3] 236-40 (1983)
5. S. Ito, J. Kuraki, H. Tada, and M. Iwasaki, "Preparation of Anodized Titanium Plates with Photocatalytic Activity", *Journal-Surface Finishing Society of Japan*, **50** [12] 1171-72(1999)
6. J. Kuraki, M. Iwasaki, H. Tada, and S. Ito, "Photocatalytic Activity of Anodized titanium Plates Prepared in a Bath Containing SnO₂ and TiO₂ Particles Through 2-step Anodization", *Journal- Japan Society of Colour Material*, **74** [7] 332 -8(2001)
7. D. Gong, C.A. Grimes, O.K. Varghese, W. Hu, R.S. Singh, Z. Chen, and E.C. Dickey. "Titanium Oxide Nanotube Arrays Prepared by Anodic Oxidation", *J. Mater. Res.*, **16**[2], 3331-34 (2001)
8. G.K. Mor, Oomman K. Varghese, Maggie Paulose, Niloy Mukherjee and Craig A. Grimes, "Fabrication of Tapered, Conical-shaped Titania Nanotubes", *J. Mater. Res.*, **18**[11] 2588-93 (2003)
9. Q. Cai, M. Paulose, O.K. Varghese, C.A. Grimes, "The Effect of Electrolyte Composition on the Fabrication of Self-organized Titanium Oxide Nanotube Arrays by Anodic Oxidation", *J. Mater. Res.*, **20** [1] 230-6(2005)
10. G.K. Mor, K. Shankar, M. Paulose, O.K. Varghese, and C.A. Grimes, "Enhanced Photocleavage of Water Using Titania Nanotube Arrays", *Nano Lett.*, **5** [1] 191-5 (2005)
11. G. K. Mor, O. K. Varghese, M. Paulose, K. Shankar, C. A. Grimes, "A review on Highly Ordered, Vertically Oriented TiO₂ Nanotube Arrays: Fabrication, Material Properties, and Solar Energy Applications", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **90** [14] 2011-75 (2006).
12. E. Y. Kim, J. H. Park, and G. Y. Han, "Design of TiO₂ Nanotube Array-based Water-splitting Reactor for Hydrogen Generation", *Journal of Power Sources*, **184** 284-87 (2008)
13. S. H. Kang, J.-Y. Kim, H. S. Kim, and Y.-E. Sung, "Formation and Mechanistic Study of Self-ordered TiO₂ Nanotubes on Ti Substrate", *J. Ind. Eng. Chem.*, **14** [1] 52-9 (2008).
14. G.K. Mor and Oomman K. Varghese, Maggie Paulose and Niloy Mukherjee, and Craig A. Grimes, "Fabrication of Tapered, Conical-shaped Titania nanotubes", *J. Mater. Res.*, **18** [11] 2589-93 (2003).
15. Z. Liu, X. Zhang, S. Nishimoto, M. Jin, Donald A. Tryk, T. Murakami, and A. Fujishima, "Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays with Controllable Length for Photoelectrocatalytic Degradation of Phenol", *J. Phys. Chem. C.*, **112** [1] 253-9 (2008).
16. K. Shankar, G. K Mor, H. E Prakasam, S. Yoriya, M. Paulose, O. K Varghese, and C. A Grimes, "Highly-ordered TiO₂ Nanotube Arrays up to 220 μm in Length: Use in Water Photoelectrolysis and Dye-sensitized Solar Cells", *Nanotechnology*, **18** [6] [Note(s): 065707.1-.11](2007)
17. X.D. Li, D.W. Zhang, Z. Sun, Y.W. Chen, and S.M. Huang, "Metal-free Indoline-dye-sensitized TiO₂ Nanotube Solar Cells", *Microelectronics Journal*, **40** [1] 108-14 (2009)
18. K. Nishijima, T.Fukahori, N. Murakami, T. Kamai, T. Tsubota, and T. Ohno, "Development of a Titania Nanotube (TNT) Loaded Site-selectively with Pt

- nanoparticles and their Photocatalytic Activities”, *Applied Catalysis A: General*, **337** [1] 105-9 (2008).
19. L. Miao, Y. Ina, S. Tanemura, T. Jiang, M. Tanemura, K. Kaneko, S. Toh, and Y. Mori, “Fabrication and Photochromic Study of Titanate Nanotubes Loaded with Silver Nanoparticles”, *Surface Science*, **601** [13] 2792-99 (2007).
 20. T. Kasuga, M. Hiramatsu, A. Hoson, T. Sekino, and K. Niihara, “Titania Nanotubes Prepared by Chemical Processing”, *Adv. Mater.*, **11**[15] 1307-11 (1999).
 21. G. Zhanqi, Y. Shaogui, T. Na, and S. Cheng, “Microwave Assisted Rapid and Complete Degradation of Atrazine Using TiO₂ Nanotube Photo Catalyst Suspensions”, *Journal of Hazardous Materials*, **145** [3] 424-30 (2007)
 22. Q. Li, J. Zhang, Z. Jin, and D. Yang, X. Wang, J. Yang, Z. Zhang, “Photo and Photoelectrochemical Properties of P-type Low-temperature Dehydrated Nanotube Titanic Acid”, *Electrochemistry Communications*, **8** [5] 741-46 (2006)
 23. X. Quan, X. Ruan, H. Zhao, S. Chen, and Y. Zhao, “Photoelectrocatalytic Degradation of Pentachlorophenol in Aqueous Solution Using a TiO₂ Nanotube Film Electrode”, *Environmental Pollution*, **147** [2] 409-14 (2007)
 24. Z. Zhang, Y. Yuan, G. Shi, Y. Fang, L. Liang, H. Ding, and L. Jin, “Photoelectrocatalytic Activity of Highly Ordered TiO₂ Nanotube Arrays Electrode for Azo Dye Degradation”, *Environ. Sci. Technol.*, **41** [17] 6259-63 (2007)
 25. H. Park, L.-k. Choi, and J.-h. Jung, “Photoelectrochemical Decomposition of VOCs on an Anodized TiO₂ Plate”, *J. Adv. Oxid. Technol.* **10** [1] 37-42 (2007)
 26. S. Ahn, L.-k. Choi, J. Jung, “Characterization of Anodized Titanium Oxide Film and Photocatalytic Decomposition of Methylene Blue with Microcurrent”, *J. Adv. Oxid. Technol.*, **10** [2] 354-60 (2007)
 27. E. Young Kima, J. H.k Park, and G. Y. Han, “Design of TiO₂ Nanotube Array-based Water-splitting Reactor for Hydrogen Generation”, *Journal of Power Sources*, **184** [1] 284-87 (2008).
 28. B. O’ Regan, M. Gratzel, “A Low-cost, High Efficiency Solar Cell Based on Dye- sensitized Colloidal TiO₂ Film”, *Nature*, **253** 737-9 (1991).
 29. Nam-Gyu Park, “Dye-Sensitized Solar Cell(in Korean)”, *J. Korean Ind. Eng. Chem*, **15** [3] 265-77 (2004)
 30. Karthik Shankar, Gopal K. Mor, Maggie Paulose, Oomman K. Varghese, and Craig A. Grimes, “Effect of Device Geometry on the Performance of TiO₂ Nanotube Array-organic Semiconductor Double Heterojunction Solar Cells”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **354** [19-25] 2767-71 (2008).
 31. Jonathan M. Perez-Blanco, and Greg D. Barber, “Ambient Atmosphere Bonding of Titanium Foil to A transparent Conductive”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, **92** [9] 997-1002 (2008).

정지훈



- 1993년 고려대학교 화학공학과 박사
- 1994년 한서대학교 화학공학과 전임강사
- 1996년~ 경기대학교 화학공학과 교수

홍성창



- 1991년 고려대학교 화학공학과 박사
- 1996년~ 경기대학교 환경에너지시스템 공학과 교수