

No.53 June 2015

# 광과학세계

PHOTOSCIENCEWORLD

## The Korean society of Photoscience

802-2, Daedeuk Tech-Biz Center(TBC), 593 beon-gil, Daedeokdae-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

### 한국광과학회

(우)305-340 대전광역시 유성구 대덕대로 593 대덕테크비즈센터(TBC) 802-2호  
Tel: +82-42-867-5007 Fax: +82-42-867-5008 Homepage: <http://photos.or.kr/>  
대표자: 김 환 규

편집위원장 | 고민재      편집위원 | 김진영, 서필준, 손호진, 이재상, 이종찬

## Contents

KJFP 2015 보고 .....	1
<b>광과학 동향</b>	
•전기화학증착 공정을 이용한 CZTS 차세대 박막태양전지/서세원, 김진영 .....	3
•환경정화를 위한 그래핀 기반 광촉매 시스템/문건희 .....	10
<b>재미있는 총설</b>	
•분자구조체를 기반한 인공광합성 시스템 연구/한원식 .....	17
•시각체계 안에서의 광수용체 단백질들의 연구 동향/김소영, 김다솜, 박정희 .....	23
<b>연구소 소개</b>	
•한양대학교 나노과학기술연구소 .....	30
<b>한국광과학회 회의 보고</b> .....	36
<b>한국광과학회 예결산 및 예산안 보고</b>	
•2014년도 세입 및 세출 결산표 .....	42
•2015년도 세입 및 세출 예산안 .....	43
<b>2015년 임원 및 운영위원 명단</b> .....	44
<b>2015년 상임이사 및 이사 명단</b> .....	45
<b>2015년 RCP 편집위원장 및 광과학세계 편집위원 명단</b> .....	46
<b>RCP 투고 안내 및 2014년도 RCP 발간리스트</b> .....	47
<b>회원동정/관련학술회의</b> .....	52
<b>학회 연회비 안내/연회비 납부자</b> .....	53
<b>소식지투고 안내</b> .....	54

광과학세계 제53호

•발행인 : 김 환 규  
•편집인 : 고 민 재  
•발행 : 한국광과학회

## KJFP 2015 보고

The 11th Korea-Japan Symposium on Frontier Photoscience - 2015 한국광과학회의 주최로 2015년 2월 26일(금) ~ 6월 28일(일)에 제주 빠레브호텔에서 개최되었습니다. 약 100명 참석으로 이루어진 행사는 4명의 기조연사와, 69명의 초청연사의 발표로 진행되었습니다. 또한, 18여 편의 포스터 발표와 그에 따른 우수발표자 시상식도 함께 있었습니다. 아울러 내년도 KJFP 2016 에 더 많은 참가와 발전을 기대합니다.



▲ 단체사진 (제주 빠레브호텔 Camellia Grand Ballroom Hall)



▲ 우수 포스터상 시상자&수상자 (제주 빠레브호텔 Camellia Grand Ballroom Hall)





▲ 반일투어 단체사진 (제주 섭지코지 마을)



▲ 반일투어 단체사진 (제주 성산일출봉)

# 전기화학증착 공정을 이용한 CZTS 차세대 박막태양전지

서세원,<sup>1,2</sup> 김진영<sup>1\*</sup>/<sup>1</sup>한국과학기술연구원 광전하이브리드 연구센터,<sup>2</sup>서울대학교 재료공학부/kimjy@kist.re.kr

현재 태양전지 시장을 주도하고 있는 실리콘 기반의 1세대 태양전지를 대체할 2세대 태양전지인 박막태양전지에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 박막태양전지는 기존의 실리콘 태양전지에 비해 광 흡수율이 10배 이상 높고, 박막공정을 활용하기 때문에 현재 사용되는 실리콘 태양전지에 비해 1/100 이하의 원소재가 필요하여 물질 단가가 낮고, 제조공정에 상대적으로 적은 에너지가 소모되어 제조단가도 낮은 장점을 가지고 있기 때문에, 양산체제가 갖추어질 경우 웨이퍼 기반 태양전지 모듈에 비해 단가가 상당히 낮아질 것으로 예상하고 있다. 또한 그림 1에서 보듯이, 성능 면에서도 대표적인 박막태양전지인 Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS)태양전지의 경우, 셀 효율 기반으로 최근 21.7%의 고효율이 보고되어 이미 다결정 실리콘 태양전지의 최고 효율인 20.8%를 넘어서는 우수한 특성을 가지고 있다. CIGS 이외에도 CdTe 박막태양전지의 경우, 21.5%의 고효율과 제조공정의 양산성이 우수한 장점을 바탕으로 이미 시장에 진입하고 있다.

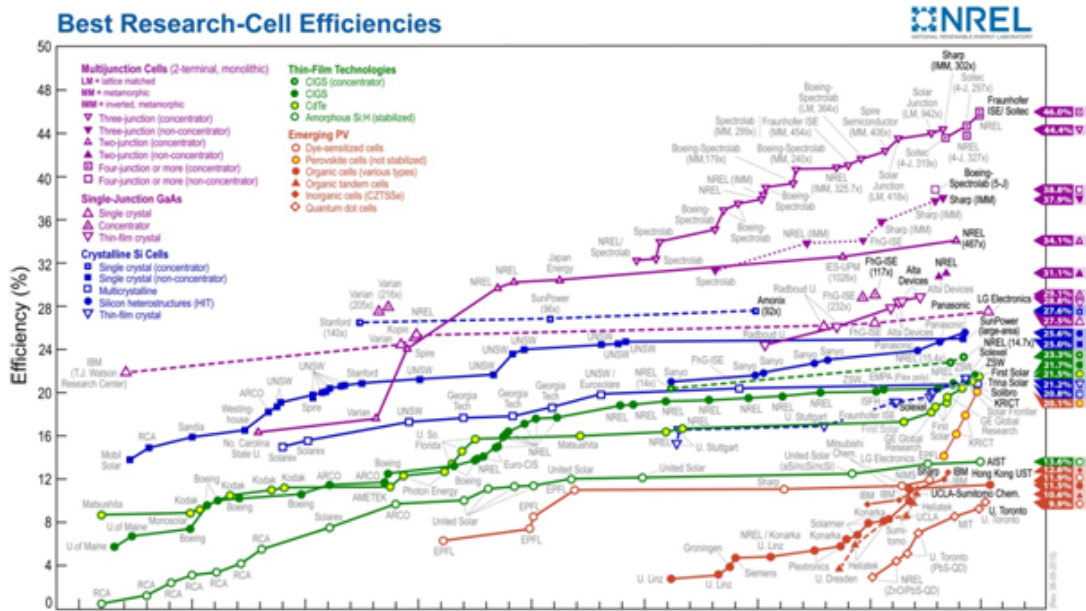


그림 1. 태양전지 최고효율 도표 (출처: www.nrel.gov)

하지만, 상기 두 박막태양전지의 경우, 실리콘 태양전지를 완전히 대체하기에는 근본적인 문제점을 가지고 있다. 먼저, CdTe의 경우, 독성원소인 Cd의 사용이 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있고, CIGS의 경우, 고가의 희소원소인 In, Ga를 주 원료로 사용하고 있기 때문에 향후 TW급 발전을 목표로 할 경우에는 공급량 및 잠재적인 가격경쟁력의 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로, Cd 등의 독성물질을 이나 In, Ga 등의 고가 희소원소를 사용하지 않는 새로운 박막태양전지 물질로서 Cu<sub>2</sub>ZnSn(S,Se)<sub>4</sub>(CZTS)에 관한 연구가 최근 매우 활발히 진행되고 있다. CZTS는 CIGS의 In과 Ga를 저가의 범용원소인 Zn와 Sn으로 대체한 물질로, kesterite 구조를 가지고



있다 (그림 2). Kesterite 구조에서는 Cu 이온이 2a (0,0,0) 위치를 차지하고, Zn 이온과 나머지 Cu 이온이 각각 2d (0,1/4,3/4) 및 2c (0,1/2,1/4) 위치를 차지하며, Sn 이온은 2b (0,0,1/2) 위치를 차지한다. 또한 S 이온은 8g (x,y,z) 위치의 (110) 거울면에 위치한다.[1] CZTS에서는 모든 S/Se 비율에서 고용체를 형성하며, S 분율이 1에서 0으로 변함에 따라 단위셀 부피가 증가하고 밴드갭이 감소하게 되는데, 아래의 표 1에 정리되어 있다. 또한 음이온의 종류에 따라 물질의 전기적 특성도 달라지는데, 아래의 표 2에 정리되어 있다.

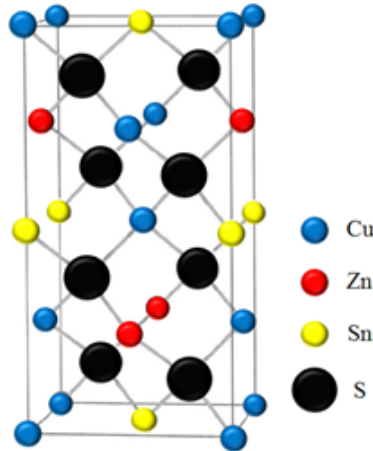


그림 2. Kesterite 구조 (파랑; Cu, 빨강; Zn, 노랑; Sn, 검정; S)

조성	a (Å)	c (Å)	V (Å <sup>3</sup> )	E <sub>g</sub> (eV)	참고문헌
Cu <sub>2</sub> ZnSnS <sub>4</sub>	5.426	10.81	318.3	1.45	[2]
Cu <sub>2</sub> ZnSn(S <sub>1.6</sub> Se <sub>2.4</sub> )	5.567	11.168	346.1	1.21	[3]
Cu <sub>2</sub> ZnSn(S <sub>0.1</sub> Se <sub>3.9</sub> )	5.668	11.349	364.6	1.03	[3]
Cu <sub>2</sub> ZnSnSe <sub>4</sub>	5.684	11.353	366.8	0.94	[4]

표 1. 음이온 비율에 따른 CZTS의 구조 및 물성

조성	전하밀도 (/cm <sup>3</sup> )	전하이동도 (cm <sup>2</sup> /Vs)	비저항 (Ωcm)	참고문헌
Cu <sub>2</sub> ZnSnS <sub>4</sub>	8.2 x10 <sup>18</sup>	6.3	0.16	[5]
Cu <sub>2</sub> ZnSnSe <sub>4</sub>	2.1 x10 <sup>17</sup>	39.7	0.74	[6]

표 2. 음이온 종류에 따른 CZTS의 전기적 특성

상기와 같이 이미 물질단가가 저렴한 CZTS 박막태양전지의 가격경쟁력을 더욱 제고하기 위해, 기존의 박막태양전지 제조에 주로 사용되고 있는 진공공정 대신 공정단가 훨씬 낮은 비진공 공정을 활용하려는 시도도 많이 이루어지고 있다. 대표적인 비진공 공정으로 용액기반 전기화학증착, 스프레이, 잉크기반 프린팅 공정 등이 있는데, 본 기고에서는 그 가운데 전기화학증착을 이용한 CZTS 박막태양전지 연구에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

전기화학증착 공정은 전기도금과 같은 원리로, 전해액에 녹아있던 이온들이 전극표면에서 환원 또는 산화되어 금속, 산화물, 수산화물, 및 칼코겐화물 등으로 코팅되는 공정인데 (그림 3), 공정을 위한 장비의 단가가 낮고, 인가전위에 따른 반응 선택성이 우수하여 상대적으로 낮은 순도의 용액에서도 고순도의 막을 형성할 수 있으며, 용액의 재활용이 가능하여 롤투롤 등의 연속공정에 용이하다는 장점을 가지고 있다.

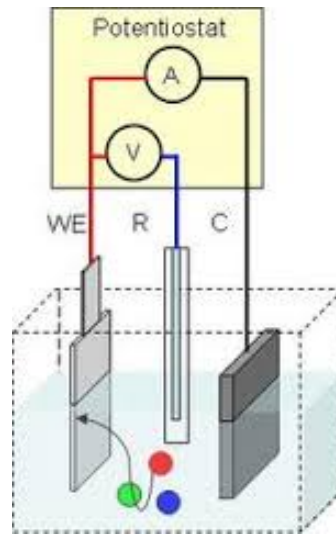


그림 3. 전기화학증착 장치 모식도

전기화학증착 공정을 이용한 CZTS 제작은 크게 두 가지로 분류될 수 있는데, 첫 번째는 금속막을 증착한 후 황화 (혹은 셀렌화) 공정을 통하여 상을 합성하는 방법이고, 두 번째는 황 (혹은 셀렌)을 포함하는 용액에서 한번에 CZTS 막을 형성하는 방법이다. 먼저 금속막 증착의 경우, 다층 금속막을 형성하는 공정과 Cu, Zn, 및 Sn 모두를 한번에 증착하는 합금막 형성 공정으로 다시 나눌 수 있다. 다층 금속막 형성은 각 금속간 비율 조절이 용이한 장점을 가지고 있는 반면 각각의 금속에 따로 존재하기 때문에, 이차상 생성을 막기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 다층 금속막을 이용한 초기의 연구에서는 [7] 높은 직렬 및 병렬저항 및 전하재결합으로 인하여 0.8% 정도의 효율을 보고하는데 그쳤으나, 스택 구조를 바꾸거나 회전판 전극을 사용하는 등의 시도를 통하여 3.2% 수준까지 효율이 향상되었다.[8] 이후, 발표된 IBM의 결과에서는 금속 다층막을 350 °C 이하의 낮은 온도에서의 열처리를 통하여 우수한 미세구조를 가지는 금속 합금막으로 변환한 후 추가 황화처리를 함으로써 Se이 없는 순수 CZTS에서의 효율을 7.3%로 획기적으로 올렸으며,[9] 이와 비슷한 접근 방법으로 낮은 온도에서 예비 열처리 후 고온에서 황화처리를 하는 방법으로 일본의 오사카대학에서는 Se 없는 순수 CZTS에서 현재 세계 최고수준인 8.0%의 효율을 기록하고 있다.[10]

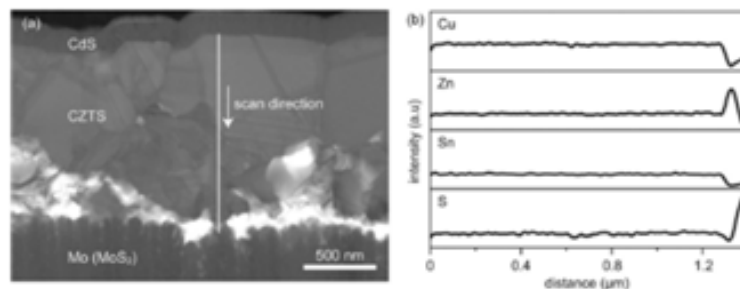


그림 4. 예비 열처리 및 황처리를 통해 얻은 CZTS막의 투과현미경사진(좌)과 깊이에 따른 조성 분석(우)[10]

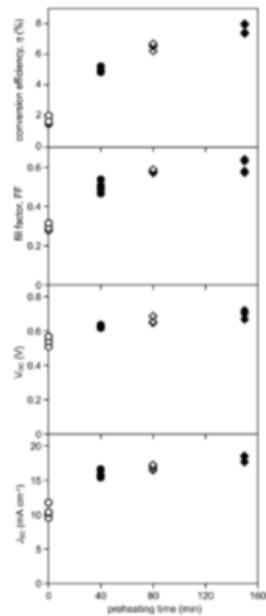


그림 5. 금속 다층막의 전기화학증착을 통해 제작된 CZTS 박막태양전지의 태양전지 특성[10]

이 외에도, 수용액 기반이 아닌 이온성 용액을 이용한 금속막 증착에 관한 연구도 진행이 되어 왔는데, 이온성 용액은 물에 비해 전기화학적 안정성이 높기 때문에 상대적으로 환원전위가 높은 Zn나 Sn 층의 증착에 용이함이 보고된 바 있지만, 태양전지 특성은 1.7%로 낮은 수준에 머물렀다.[11]

합금막 형성 공정의 경우, 2009년 비슷한 시기에 A. Ennaoui 및 H. Araki 등에 의해 각각 3.4% 및 3.16%의 효율을 보고하였는데,[12,13] 이는 당시 전기화학증착 기반 CZTS 박막태양전지 중 가장 높은 효율이었고, 금속 다층막을 열처리하는 공정에 비해 양이온들이 전구체 막에 균일하게 혼재하여 열처리 시 순수상 형성이 용이한 장점으로 인해 효율이 향상된 것으로 이해되었다. 하지만, 그 이후 K. D. Lee 등이 보고한 바에 따르면,[14] 전구체인 금속 합금막 내의 양이온들이 고르게 섞여있지 않고 CuSn, CuZn 및 Sn 등 이성분계 합금과 금속원소의 혼합물 박막이 증착됨이 알려졌고, 향후 황화 열처리 공정을 통해 500 °C이상의 고온에서 kesterite CZTS가 형성됨이 보고되었다. 또한, 동일 그룹의 후속 연구에서,[15] 금속 합금막을 황 증기 분위기에서 금속으로 열처리할 경우  $Cu_xS$  등의 전도성 이차상이 형성되어 박막태양전지 특성이 열화됨이 보고되었다. 이러한 결과를 바탕으로 동일 그룹에서는 최근 S 없는 순수 셀레늄 기반 CZTS에서 현재 세계 최고 수준인 8.0%의 효율을 보고하였다. 합금막을 사용하였기 때문에 예비 열처리 없이 셀레늄 증기 분위기의 550 °C에서 짧은 열처리 시간 동안 두께 방향으로 단일 그레인이 잘 성장한 형상을 보여 주었다.[16]

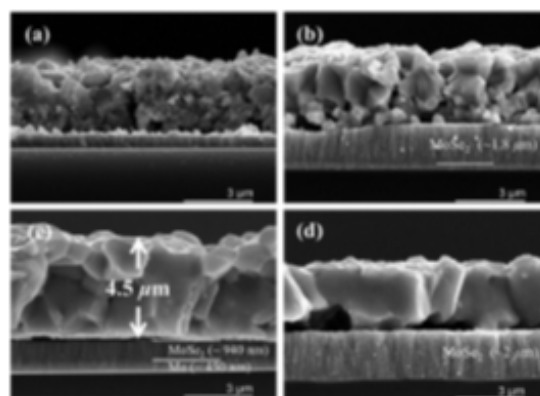


그림 6. 셀레늄화 열처리 온도에 따른 CZTS막 전자현미경 사진[16]



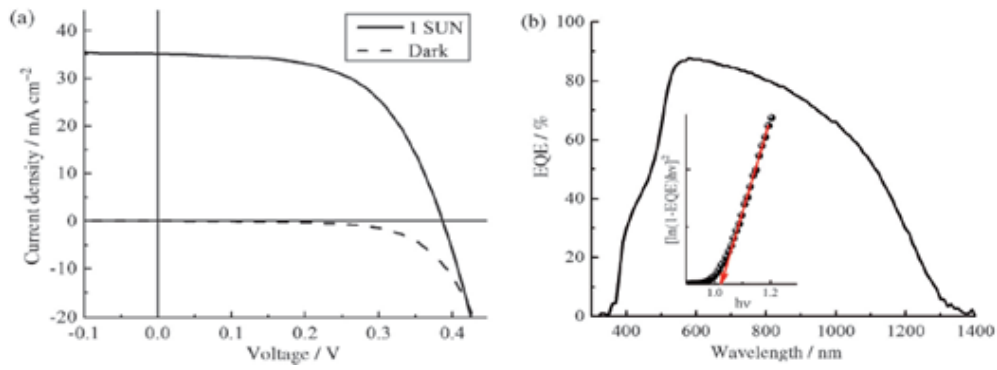


그림 7. 합금막 전기화학증착을 통해 제작된 CZTS 박막태양전지의 태양전지 특성[16]

마지막으로 황을 포함하는 용액에서 단일 전기화학공정을 통해 직접 CZTS를 증착하는 공정은 2010년 S. M. Pawar 등에 의해 처음으로 보고되었다.[17] 이 경우, 비정질의 전구체 막이 각 양이온 정량비가 맞는 조성으로 증착되었고, 550 °C의 후속 황화 열처리 공정을 통해 결정상 CZTS가 형성됨이 X선 회절분석 및 광학 밴드갭 측정분석을 통해 확인되었으나, 열처리 후에도 결정립의 조대화가 이루어지지 않아 결정성이 부족한 단점을 가지고 있었다. 이 연구를 시발점으로 활발히 연구되어 현재는 J. Ge 등이 보고한 5.5%의 효율까지 달성하였다.[18] 이 보고에 의하면 Cu-Zn-Sn-S의 단일 전기화학공정을 통해 전구체를 만들고 590°C에서 15분 동안 황 증기 분위기에서 열처리를 하여 막을 형성하였으나, 형성된 CZTS 막은 결정화가 잘된 층과 Sn이 부족한 파티클이 밀집된 층의 두 층으로 형성되었으며 이로 인해 재결합이 높은 특성을 보였다.

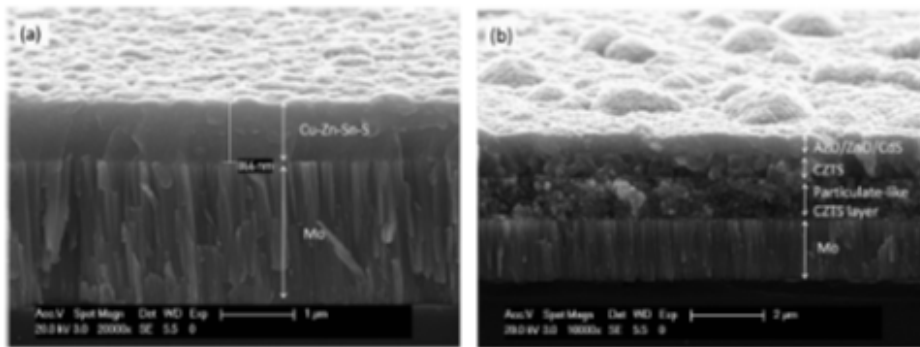


그림 8. Cu-Zn-Sn-S 전구체와 열처리된 CZTS막의 전자현미경사진[18]

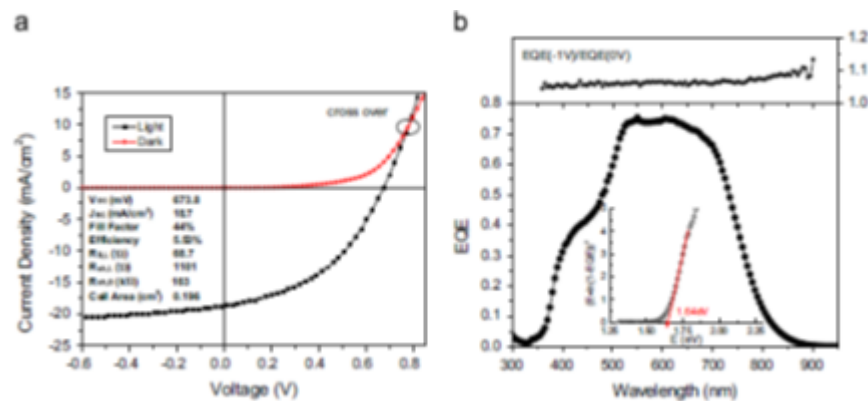


그림 9. Cu-Zn-Sn-S 전기화학증착을 통해 제작된 CZTS 박막태양전지의 태양전지 특성[18]

지금까지 간단히 살펴본 바와 같이, 전기화학증착 공정은 몰투몰 등이 연속공정을 통한 박막태양 전지의 저가화에 적합한 공정이다. 특히, 미국의 솔로파워사에 의해 금속박판을 활용한 CIGS 박막태양전지의 몰투몰 공정이 최근 상용화된 상황에서 그 응용 가치가 더욱 높아질 것으로 예상된다. 따라서, 이러한 저가 공정을 저가 물질인 CZTS의 증착에 활용할 수 있게 되면 매우 큰 파급 효과를 가질 것으로 예상되기 때문에, 향후 보다 심도있고 지속적인 연구개발이 필요한 분야 가운데 하나로 자리매김 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] S. Schorr, H.-J. Hoebler, M. Tovar, A neutron diffraction study of the stannite-kesterite solid solution series, *Eur. J. Mineral.* 19 (2007) 65-73.
- [2] H. Katagiri, N. Sasaguchi, S. Hando, S. Hoshino, J. Ohashi, T. Yokota, Preparation and evaluation of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films by sulfurization of E-Bevaporated precursors, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 49 (1997) 407-414.
- [3] T. K. Todorov, K. B. Reuter, D. B. Mitzi, High-efficiency solar cell with earth-abundant liquid-processed absorber, *Adv. Mater.* 22 (2010) E156-E159.
- [4] G. Zoppi, I. Forbes, R. W. Miles, P. J. Dale, J. J. Scragg, L. M. Peter,  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  thin film solar cells produced by selenization of magnetron sputtered precursors, *Prog. Photovolt.: Res. Appl.* 17 (2009) 315-319.
- [5] J. Zhang, L. Shao, Y. Fu, E. Xie,  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin films prepared by sulfurization of ion beam sputtered precursor and their electrical and optical properties, *Rare Met.* 25 (2006) 315-319.
- [6] R. A. Wibowo, E. S. Lee, B. Munir, K. H. Kim, Pulsed laser deposition of quaternary  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  thin films, *Phys. Status Solidi A* 204 (2007) 3373-3379.
- [7] J. J. Scragg, P. J. Dale, L. M. Peter, G. Zoppi, I. Forbes, New routes to sustainable photovoltaics: evaluation of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  as an alternative absorber material, *Phys. Status Solidi B* 245 (2008) 1772-1778.
- [8] J. J. Scragg, D. M. Berg, P. J. Dale, A 3.2% efficient kesterite device from electrodeposited stacked elemental layers, *J. Electroanal. Chem.* 646 (2010) 52-59.
- [9] S. Ahmed, K. B. Reuter, O. Gunawan, L. Guo, L. T. Romankiw, H. Deligianni, A High Efficiency Electrodeposited  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  Solar Cell, *Adv. Energy Mater.* 2 (2012) 253-259.
- [10] F. Jiang, S. Ikeda, T. Harada, M. Matsumura, Pure Sulfide  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  Thin Film Solar Cells Fabricated by Preheating an Electrodeposited Metallic Stack, *Adv. Energy Mater.* 4 (2014) 1301381
- [11] R. N. Bhattacharya and J. Y. Kim, Cu-Zn-Sn-S Thin Films from Electrodeposited Metallic Precursor Layers, *Open Surf. Sci. J.* 4 (2012) 19-24.
- [12] A. Ennaoui, M. Lux-Steiner, A. Weber, D. Abou-Ras, I. Kötschau, H.-W. Schock, R. Schurr, A. Hölzing, S. Jost, R. Hock, T. Voß, J. Schulze, A. Kirbs,  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  thin film solar cells from electroplated precursors: Novel low-cost perspective, *Thin*

- Solid Films 517 (2009) 2511-2514.
- [13] H. Araki, Y. Kubo, K. Jimbo, W. S. Maw, H. Katagiri, M. Yamazaki, K. Oishi, and A. Takeuchi, Preparation of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films by sulfurization of co-electroplated Cu-Zn-Sn precursors, *Phys. Status Solidi C* 6 (2009) 1266-1268.
- [14] K. D. Lee, S.-W. Seo, D.-K. Lee, H. Kim, J.-h. Jeong, M. J. Ko, B.S. Kim, D. H. Kim, J. Y. Kim, Preparation of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films via electrochemical deposition and rapid thermal annealing, *Thin Solid Films* 546 (2013) 294-298.
- [15] K. D. Lee, S.-W. Seo, D.-K. Lee, H. Kim, M. J. Ko, B.S. Kim, D. H. Kim, J. Y. Kim, The effect of a heating rate on the properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> thin films solar cells, *ECS Transactions* 50 (2013) 101-106.
- [16] J.-O. Jeon, K. D. Lee, L. S. Oh, S.-W. Seo, D.-K. Lee, H. Kim, J.-H. Jeong, M. J. Ko, B. Kim, H. J. Son, J. Y. Kim, Highly Efficient Copper-Zinc-Tin-Selenide (CZTSe) Solar Cells by Electrodeposition, *ChemSusChem* 7 (2014) 1073-1077
- [17] S. M. Pawara, B. S. Pawar, A. V. Moholkar, D. S. Choi, J. H. Yun, J. H. Moon, S. S. Kolekar, J. H. Kim, Single step electrosynthesis of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> (CZTS) thin films for solar cell application, *Electrochem. Acta* 55 (2010) 4057-4061.
- [18] J. Ge, J. Jiang, P. Yang, C. Peng, Z. Huang, S. Zuo, L. Yang, J. Chu, A 5.5% efficient co-electrodeposited ZnO/CdS/Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>/Mo thin film solar cell, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 125 (2014) 20-26



## 환경정화를 위한 그래핀 기반 광촉매 시스템

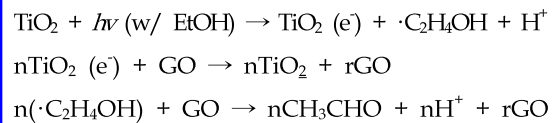
Graphene-based Photocatalytic Systems for Environmental Remediation

문건희/POSTECH 환경연구소/blusea1219@postech.ac.kr

### 1. 서론

그래핀 (graphene)은 흑연 (graphite)을 구성하는 단일층 (monolayer)으로 이루어진 2차원적 탄소 구조체로, 2004년 영국 맨체스터 대학의 Geim과 Novoselov에 의해 발견되기 전까진 열역학적 불안정성의 이유로 이론상에서만 존재하는 가상의 물질로 간주되었다. 하지만 이들 두 과학자는 scotch tape method를 이용하여 흑연으로부터 단일층의 그래핀을 분리하는데 성공하였고, 그래핀 소재만이 갖는 독특한 물리적·화학적 성질에 대한 연구결과를 발표함에 따라 불과 6년 뒤인 2010년 노벨물리학상 공동 수상이란 영예를 안게 된다.<sup>1</sup> 그래핀이 다양한 분야에 걸쳐 큰 관심을 받게 된 이유는 1) 상온에서 massless Dirac fermions, quantum hall effect, spin dependent transport와 같은 독특한 electronic property, 2) 높은 열전도도 [ $\sim 5,000 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ], 3) 상온에서 전자의 ballistic transport [ $\sim 15,000 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ], 4) 높은 mechanical stiffness [ $\sim 1,060 \text{ GPa}$ ], 5) 넓은 비표면적 [ $\sim 2,630 \text{ m}^2/\text{g}$ ], 6) 투명성 (transparency) 등 뛰어난 물성에서 기인한다.<sup>2</sup> 이러한 물성 중 뛰어난 전자·정공의 전달 능력, 높은 비표면적, 빛을 투과할 수 있는 투명성과 더불어 반도체 소재에서 생성된 전자·정공을 받아들일 수 있는 에너지 레벨은 에너지·환경 분야에 응용이 가능한 그래핀 기반 광촉매·광전극 복합소재 개발을 촉진하는 계기가 되었다. 이에 대한 신호탄은 2008년 Notre Dame 대학의 Kamat 그룹에 의해 쏘아졌는데, 연구내용을 요약하자면,  $\text{TiO}_2$ 에서 광여기 (photo-excitation)에 의해 생성된 전자

를 이용하여 그래핀 옥사이드 (graphene oxide; GO)에 존재하는 hydroxyl 및 epoxide와 같은 산소를 포함한 작용기를 환원시켜 산소 작용기가 제거된 GO 즉 환원된 그래핀 옥사이드 (reduced graphene oxide; rGO)를 얻었다 (그림 1).<sup>3</sup> 반응식은 다음과 같다.<sup>4</sup>



흑연을 출발 물질로 산화 흑연 (graphite oxide), GO를 거쳐 최종적으로 rGO를 얻는 공정의 경우 scotch tape method나 chemical vapor deposition (CVD)에 비해 많은 결함 (defect sites) 및 낮은 전기 전도도 (electrical conductivity)를 갖기 때문에 전자 장치 (electronic devices)에 적용하기엔 한계가 있다. 하지만, 공정이 단순하고, 경제적이며, 반도체 나노 입자 및 전극물질과 복합체를 이루기 용이하게 때문에 광촉매·광전극 시스템에서는 주로 rGO가 사용된다.

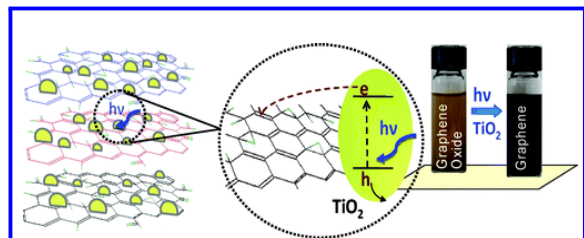
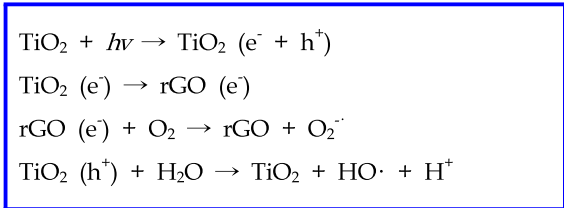


그림 1.  $\text{TiO}_2$ 가 담지된 그래핀 복합체. 광여기에 의해 생성된  $\text{TiO}_2$ 의 전자는 GO로 이동해 산소를 포함하는 작용기들을 환원시킴. 이때 색깔은 갈색에서 검은색으로 변함. [참고문헌 3]

2008년 당시는 그래핀을 손쉽게 합성하는 방법들에 대한 연구가 주를 이루었던 시기로, 위에서 언급한 Kamat 그룹의 연구결과 또한 ‘광촉매 시스템을 이용한 GO의 작용기 제거’에 초점을 둔 연구라 할 수 있다. 이후 그래핀 기반 광촉매 시스템에 대한 연구결과는 해마다 방대한 양이 발표되었지만, 본 연구기술 동향에서는 환경정화 측면에 입각하여 환경오염물질 분해, 중금속 처리/제거, 박테리아·바이러스 살균에 보다 초점을 두고 기술하고자 한다. 또한 최근에 제기된 이러한 공정이 갖고 있는 한계점을 짚어보고 대안을 제시하고자 한다.

## 2. 환경정화 측면에서의 그래핀 기반 광촉매 소재

그래핀 기반 반도체 복합체를 이용한 유기오염물질 분해, 중금속 처리, 박테리아 살균은 광전극 보다는 주로 광촉매 시스템에 국한되며, 가시광 촉매보다는 상대적으로 밴드갭 (bandgap)이 큰 자외선 활성 광촉매가 사용되었다. 가장 활발히 연구된 rGO/TiO<sub>2</sub> 복합체의 경우 광조사하에 생성된 전자는 TiO<sub>2</sub> 전도띠 (conduction band; CB)에서 rGO로 빠르게 이동하여 정공과의 재결합이 효율적으로 억제됨과 동시에 최종적으로 용존산소를 환원시켜 초과산화물 (superoxide; O<sub>2</sub><sup>-</sup>)을 생성하게 된다. 반대로 가전도띠 (valence band; VB)에 남아 있는 정공은 유기오염물질을 직접 산화하거나 물을 산화시켜 산화력이 강한 히드록실 라디칼 (hydroxyl radical; HO·)을 생성한다. 반응식을 요약하면 다음과 같다.



### 2. 1. 환경오염물질 분해

그래핀 기반 TiO<sub>2</sub> 시스템을 유기오염물질 분해에 처음 적용한 사례는 2009년에 Li 그룹에 의해 보고되었다. rGO/TiO<sub>2</sub> 복합체는 hydrothermal 방법을 이용하여 합성되었고, 이를 유기염료인 메틸렌블루 (methylene blue; MB) 분해에 적용하였다. 그림 2 (가)를 보면 그래핀이 담지된 TiO<sub>2</sub>의 경우 MB 분해

효율이 급격히 증가하며, 탄소나노튜브 (carbon nanotube; CNT)와 비교했을 때보다 더 좋은 활성이 관찰된다. 그래핀이 가장 높은 효율을 보이는 이유는 1) Ti-O-C 결합에 따른 가시광 영역 흡수 향상 및 band edge의 red-shift (그림 2 나), 2) MB와 그래핀에 존재하는 방향족 탄소 사이에 π-π 상호작용에 의한 흡착력 (adsorptivity) 증대 (그림 2 다), 3) 전자 전달에 대한 저항 감소 (그림 2 라)로 압축할 수 있다. 이 밖에도 TiO<sub>2</sub> 필름, TiO<sub>2</sub> nanorod, TiO<sub>2</sub> plate, TiO<sub>2</sub> nanotube, 도핑된 TiO<sub>2</sub>, titanate, titanosilicate, ZnO, Cu<sub>2</sub>O, BiVO<sub>4</sub>, Ag/AgX(X=Br, Cl), SiC, CdS, ZnSe, WO<sub>3</sub> nanorod, Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>, CoFeO<sub>4</sub>, BiOBr, C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SnO<sub>2</sub>, CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 등과 그래핀을 조합하여 MB, 메틸오렌지 (methyl orange; MO), 로다민 B (rhodamine B), sulforhodamine 640 dye, active black BL-G, malachite green, 디클로로아세트산 (dichloroacetic acid; DCA), 니트로피놀 (4-nitrophenol), 페놀 (phenol), 디클로로페놀 (dichlorophenol), 기체상의 벤젠 (benzene (g)), 4-클로로피놀 (4-chloropheno; 4-CP), 쿠마린 (coumarin), 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D), 2-프로판올 (2-propanol) 등의 분해에 적용하였다.<sup>6</sup>

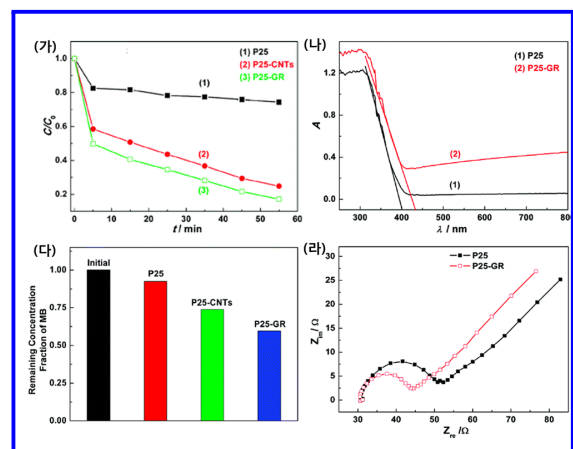
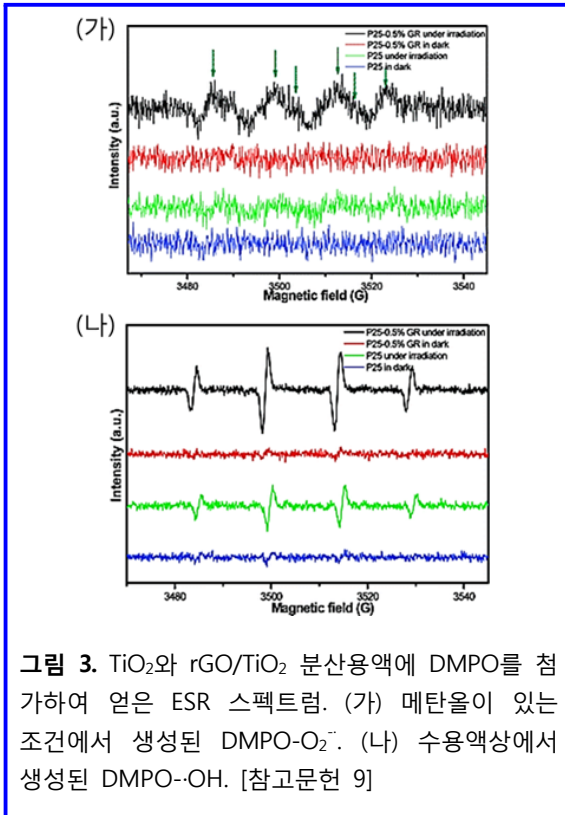


그림 2. (가) UV 조사 하에 TiO<sub>2</sub>, CNT/TiO<sub>2</sub>, rGO/TiO<sub>2</sub>의 메틸렌블루 분해 실험. (나) TiO<sub>2</sub>와 rGO/TiO<sub>2</sub>의 UV-Visible 흡수 스펙트럼. (다) TiO<sub>2</sub>, CNT/TiO<sub>2</sub>, rGO/TiO<sub>2</sub>의 메틸렌블루 흡착량 비교 실험. (라) TiO<sub>2</sub>와 rGO/TiO<sub>2</sub>의 임피던스 측정. [참고문헌 5]

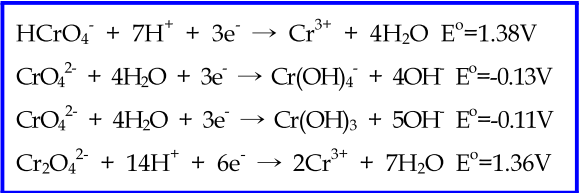


위에서 언급한 그래핀/반도체 복합체 활성평가는 MB, MO, RhB와 같은 유기염료 분해가 주를 이루는데, 그 이유는 대부분의 연구가 새로운 소재 합성에 중점을 두고 있으며, 소재의 활성평가를 위해 상대적으로 실험이 단순한 유기염료를 선택했기 때문이다. 하지만 광촉매 반응은 굉장히 복잡한 반응경로를 따르기 때문에, 가장 많은 연구가 진행된 TiO<sub>2</sub> 마저도 TiO<sub>2</sub> 합성방법 (sol-gel, hydrothermal, spray pyrolysis, etc.), 제조회사 (Degussa, Aldrich, Hombikat, Junsei, etc.), 결정성 (crystallinity), 결정상 (anatase, rutile, brookite), 결정면 ((001), (101)), 표면적, 각각의 오염물질 특성에 따라 분해 활성 및 메커니즘이 변하게 된다.<sup>7</sup> 이와 더불어 같은 촉매를 사용한다 할지라도 유기염료 종류에 따라 활성의 차이가 역전이 되기도 하는데,<sup>8</sup> 이러한 모든 변수를 고려할 때 단순히 소재기반 광촉매 특성 평가보다는 메커니즘 연구가 수반된 연구결과를 도출할 필요성이 대두된다. 대표적인 예가 Xu 그룹에서 보고한 ‘그래핀/TiO<sub>2</sub> 복합체를 이용한 기체상의 벤젠 및 수용액상에 존재하는 MB 분해’로 광활성 향상에 대한 원인을 그림 3에서 보는 바와 같이 산소활성종 (reactive oxygen species; ROS)의 발생에서 찾았다.<sup>9</sup>

DMPO를 첨가 하에 실험조건을 변화시켜가며 초과산화물과 히드록실 라디칼 발생을 측정할 결과, 그래핀/TiO<sub>2</sub> 복합체의 경우 개질 전 순수한 TiO<sub>2</sub>에 비해 두 산소활성종의 발생이 모두 증가하는 것을 전자 스핀 공명 분석 (electron spin resonance analysis; ESR)을 통해 규명하였다.

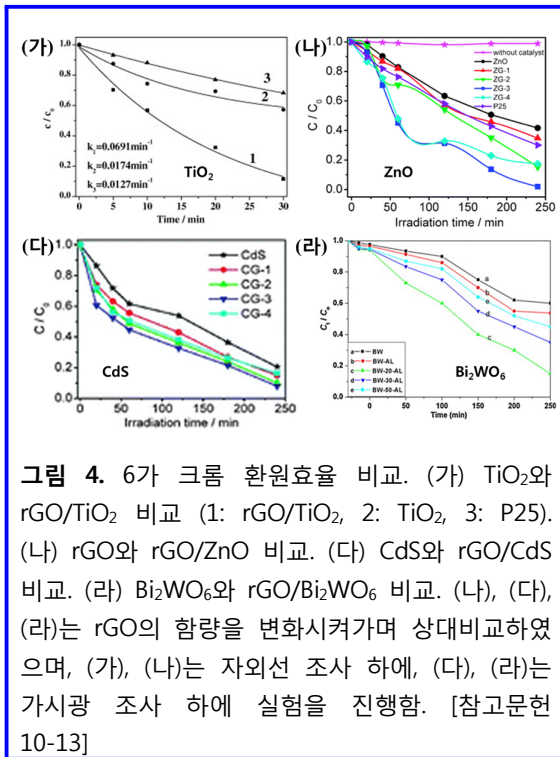
## 2. 2. 중금속 처리/제거

3차원 그래핀 구조체를 이용한 흡착 또는 그래핀 기반 전극을 이용한 전기화학적 환원법을 이용한 Hg<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Pd<sup>2+</sup> 등의 중금속 제거는 상대적으로 많이 보고되었지만, 광촉매 시스템에서는 6가 크롬 (Cr(VI))을 독성이 상대적으로 약하고 처리 용이한 3가 크롬 (Cr(III))으로 환원시키는 연구가 주를 이룬다. 6가 크롬은 chromate (HCrO<sub>4</sub><sup>-</sup>, CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 또는 dichromate (Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>)와 같이 음이온의 형태로 존재하며, 산화 환원 반응 및 포텐셜 (redox potential)은 아래와 같다.



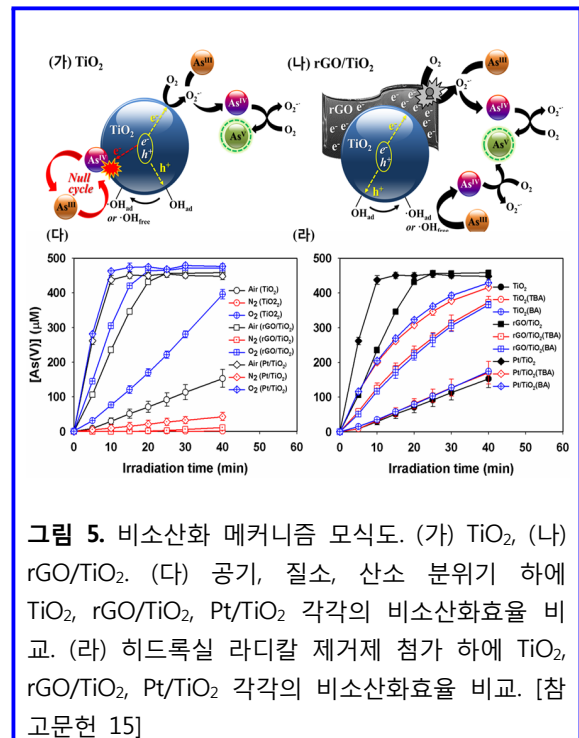
chromate 환원에 사용된 그래핀/반도체 복합체는 rGO/TiO<sub>2</sub>, rGO/ZnO, rGO/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>, rGO/CdS 등이 있으며, 모두 전도띠의 에너지 레벨이 위의 반응을 일으키기 충분한 포텐셜을 갖는다. 일반적으로 GO를 완전히 환원시켜도 가장자리에 남아있는 카르복실기 (carboxylic functional group) 때문에 그래핀/광촉매의 zpc (zero point of charge) 값은 음의 방향으로 이동하게 된다. 따라서 단순히 음이온인 chromate의 흡착을 그래핀이 방해하여 광활성은 감소될 것으로 예상되지만, 그림 4를 보면 TiO<sub>2</sub>, ZnO, CdS, Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub>의 경우 모두 그래핀이 담지된 광촉매에서 광활성이 증대되는 것을 알 수 있다.<sup>10-13</sup> 비록 pH 변화에 따른 표면 전하의 변화가 6가 크롬 환원에 어떠한 영향을 주는지에 대한 비교실험이 선행돼야 함에도 불구하고, 위 경우에는 그 어떤 대조(control) 실험도 수행되지 않은 점이 아쉬움이 남는다.





앞서 언급한 크롬 환원과 반대로 비소는 3가 비소 (arsenite; As(III))의 형태가 5가 비소 (arsenate; As(V))에 비해 독성이 강하고 높은 mobility를 가지기 때문에 흡착제를 이용한 제거가 어렵다. 따라서 효율적인 제거를 위해 산화공정은 필수적이라 할 수 있으며, TiO<sub>2</sub> 광촉매를 이용한 비소산화공정 또한 이 범주에 포함된다. 일반적으로 TiO<sub>2</sub> 자체에서는 As(III)의 산화가 느리게 일어나는데 그 이유는 1) 산소로 전달되지 못한 전자와 정공의 빠른 재결합 (recombination) (전자가 산소로 전달되는 과정은 율속단계(rate determining step)), 2) 정공 또는 히드록실 라디칼과 As(III)가 반응하여 생성된 As(IV)가 다시 전자와 재결합을 일으켜 본래의 상태인 As(III)로 돌아오는 null cycle 때문이다 (그림 5 가). 따라서 As(III)가 As(V)로 가는 주된 반응 메커니즘은 정공이 배제된 전자가 산소와 만나면서 생성된 초과산화물에 의한 것임을 유추할 수 있다.<sup>14</sup> 하지만 그래핀을 TiO<sub>2</sub>에 담지하면 비소산화 속도는 급격히 증가하며, 비소산화 메커니즘 또한 백금이 담지된 TiO<sub>2</sub>와 유사한 경향을 보이게 된다 (그림 5 나).<sup>15</sup> 그림 5(다)를 보면, TiO<sub>2</sub>만 있을 경우 공기 포화 조건에서는 낮은 광활성이 산소 포화 조건에서 급격히 향상되지만, rGO/TiO<sub>2</sub>, Pt/TiO<sub>2</sub>에서는 그 증가폭이 크지

않다. 이는 rGO와 백금이 산소로 전자 전달을 촉진할 수 있는 뛰어난 능력에 기인한 것으로, 비소산화 공정에서 특히 좋은 조촉매로 사용될 수 있음을 시사한다. rGO와 Pt가 담지된 TiO<sub>2</sub> 표면에서 일어나는 메커니즘 변화는 히드록실 라디칼 제거제 (hydroxyl radical scavenger)인 tert-butyl alcohol (TBA), benzoic acid (BA)를 첨가했을 때 명확하게 관찰된다. 그림 5 (라)에서 보는 바와 같이 TiO<sub>2</sub>, rGO/TiO<sub>2</sub>, Pt/TiO<sub>2</sub> 각각에 TBA, BA를 첨가했을 때, TiO<sub>2</sub>의 광활성은 전혀 차이가 없는데 반해, Pt/TiO<sub>2</sub>와 rGO/TiO<sub>2</sub>에서는 비소산화 속도가 절반 정도로 줄어드는 경향을 보인다. 이는 히드록실 라디칼이 비소산화반응에 직접적으로 참여한 증거라 할 수 있으며 개질 전의 TiO<sub>2</sub>와 명확히 차이를 보인다. 반응을 다시 한번 간략히 요약하자면, TiO<sub>2</sub>만 있을 경우 null cycle에 의해 초과산화물이 주 산화제로 작용하지만, 그래핀과 같은 조촉매를 TiO<sub>2</sub>에 담지하게 되면, 그래핀에서는 환원반응이, TiO<sub>2</sub>에서는 산화반응이 일어나기 때문에, 정공에 의해 생성된 As(IV)와 전자와의 재결합을 효율적으로 막아 비소산화 효율이 크게 증가하게 된다.



### 2. 3. 박테리아/바이러스 살균

광조사 하에 그래핀/반도체 복합체는 초과산

화물, 히드록실 라디칼, 과산화수소 등 강력한 산화력을 갖는 산소활성종 (ROS)의 생성을 촉진할 수 있어, 박테리아 및 바이러스를 죽이는데 높은 효율을 보인다. 그림 6 (가)를 보면 태양광 조사 하에 그래핀이 담지된 TiO<sub>2</sub>의 경우 E coli 살균 효율이 급격하게 증가하는 경향이 관찰되며,<sup>16</sup> 그림 6 (나)는 ROS에 의해 protein capsid가 분해하고 방출된 RNA efflux를 측정된 결과로, 가시광 조사 하에 그래핀이 담지된 WO<sub>3</sub>의 경우 높은 Bacteriophage MS2 virus의 제거율을 보인다.<sup>17</sup> 또한 후자의 경우 20번의 재사용 후 다시 실험을 진행한 결과 활성저하는 10% 내외로 관찰되었는데, 이는 소재의 높은 안정성을 나타낸다.

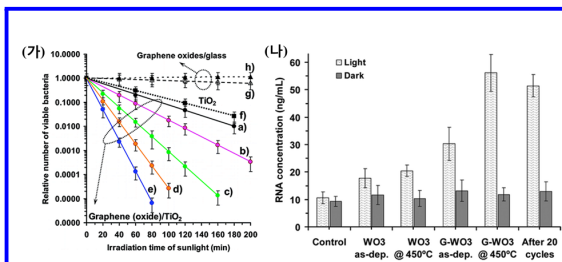


그림 6. (가) 태양광 조사 하에 E coli 제거 효율 비교 [TiO<sub>2</sub> vs rGO/TiO<sub>2</sub>]. (나) 3시간 가시광 조사 후 Bacteriophage MS2 viruses의 RNA efflux 비교 [WO<sub>3</sub> vs rGO/WO<sub>3</sub>]. [참고문헌 17, 18]

### 3. 그래핀 기반 광촉매 시스템이 직면한 문제점

경제성, 낮은 광효율 등 광촉매 시스템 고유의 한계를 제외하고, 최근 그래핀 기반 광촉매 시스템에서 대두된 가장 큰 문제점은 그래핀의 안정성이다. 일반적으로 광반응에 의해 생성된 히드록실 라디칼은 기질에 선택성이 없기 때문에 오염물질을 분해할 수 있는 동시에 그래핀도 공격할 수 있다. 따라서 rGO/TiO<sub>2</sub> 복합체의 경우 그림 7 (가)에서와 같이 정공을 효율적으로 제거할 수 있는 전자주개 (electron donor) 부재 시 또는 정공 및 히드록실 라디칼과 효율적으로 반응할 수 있는 오염물질이 없을 경우 rGO는 생성된 히드록실 라디칼에 의해 분해된다. 분해는 GO, polyaromatic hydrocarbon (PAH)를 거쳐, 이산화탄소로 무기화 (mineralization)된다.<sup>18</sup> 이러한 과정 중 육안으로 볼 수 있는 색깔 변화가 [rGO (검정) → GO (밝은 갈색) → PAH (열은 갈색 또는 무

색) → CO<sub>2</sub> (무색)] 순으로 관찰된다. 그림 7 (나)는 히드록실 라디칼과 rGO간의 반응을 간접적인 방법으로 측정된 결과로, 히드록실 라디칼과 반응하는 SCN<sup>-</sup>이 분산된 용액에 rGO의 첨가량을 정량적으로 증가시킬 때 '(SCN)<sub>2</sub><sup>-</sup> 생성 quantum yield'가 선형 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 rGO이 히드록실 라디칼과 반응하여 SCN<sup>-</sup>과 경쟁반응을 일으켰기 때문이다. 그림 7 (다)는 rGO가 광조사 하에 무기화되는 과정 중에 absorbance 변화 및 total organic carbon (TOC)를 측정된 결과를 토대로 용액의 색깔은 무색을 띄지만 PAH 생성으로 인해 TOC는 어느 정도 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 피하기 위해서는 1) 전자주개의 첨가 하에 CCl<sub>4</sub>와 같이 환원에 의해 분해되는 반응에 주로 적용, 2) 가전도 띠가 TiO<sub>2</sub>에 큰 음의 값을 갖는 반도체 소재 사용, 3) 히드록실 라디칼과 빠르게 반응하는 오염물질 전처리에 사용, 4) 그래핀이 내부에 삽입된 나노구조체 개발 등을 고려해볼만 하다.

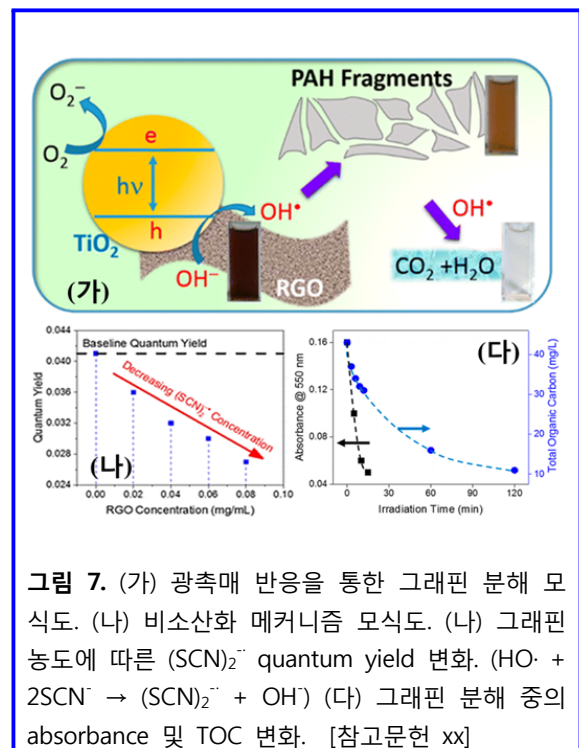


그림 7. (가) 광촉매 반응을 통한 그래핀 분해 모식도. (나) 비소산화 메커니즘 모식도. (나) 그래핀 농도에 따른 (SCN)<sub>2</sub><sup>-</sup> quantum yield 변화. (HO· + 2SCN<sup>-</sup> → (SCN)<sub>2</sub><sup>-</sup> + OH·) (다) 그래핀 분해 중의 absorbance 및 TOC 변화. [참고문헌 xx]

### 4. 맺음말

환경정화 측면에서 그래핀/광촉매 복합체가 높은 활성을 보이는 이유는 1) 그래핀과 오염물질 간의 상호작용에 따른 흡착량 증가, 2) 광여기에 의해 생성된 전자가 그래핀에 의해

분리되어 정공과의 재결합 억제, 3) 가전도띠에 남아 있는 더 많은 정공이 물을 산화시켜 히드록실 라디칼 생성을 향상, 4) Ti-O-C 결합을 통해 빛 흡수영역 증대로 요약할 수 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 대부분의 그래핀/광촉매 복합체에 대한 연구는 소재 개발에 중점을 두고 진행되어 왔으며, 광반응 중에 일어나는 현상들에 대한 규명은 대부분 무시되거나 관심 밖의 일로 간주되었다. 또한, 최근에 그래핀의 안정성 문제가 대두된 만큼, 향후 진행되는 그래핀/광촉매 시스템에 대한 연구는 메커니즘 규명과 더불어 안정성 확보라는 이슈가 항상 대두될 것이 자명하다. 따라서 그래핀/광촉매 시스템을 보다 깊게 이해하고, 안정성을 확보해 나가고자 하는 노력은 필수불가결할 것으로 사료된다.

## 5. 참고문헌

- [1] "This month in physics history: October 22, 2004: Discovery of graphene". (2009) APS News, 18 (9): 1-8.
- [2] Park S., Ruoff RS. (2009) Chemical methods for the production of graphenes. *Nature Nanotech.*, 4: 217-224.
- [3] Williams G., Seger B., Kamat PV. (2008) TiO<sub>2</sub>-graphene nanocomposites. UV-assisted photocatalytic reduction of graphene oxide. *ACS Nano*, 2: 1487-1491.
- [4] Moon G., Park Y., Kim W. Choi W. (2011) Photochemical loading of metal nanoparticles on reduced graphene oxide sheets using phosphotungstate. *Carbon*, 49: 3454-3462.
- [5] Zhang H., Lv X., Li Y., Wang Y., Li J. (2009) P25-graphene composite as a high performance photocatalyst. *ACS Nano*, 4: 380-386.
- [6] Tu W., Zhou Y., Zou Z., (2013) Versatile graphene-promoting photocatalytic performance of semiconductors: Basic principles, synthesis, solar energy conversion, and environmental applications. *Adv. Funct. Mater.*, 23: 4996-5008.
- [7] Ryu J., Choi W., (2008) Substrate-specific photocatalytic activities of TiO<sub>2</sub> and multiactivity test for water treatment application. *Environ. Sci. Technol.*, 42: 294-300.
- [8] Bae S., Kim S., Lee S., Choi W., (2014) Dye decolorization test for the activity assessment of visible light photocatalysts: Realities and limitations. *Catal. Today*, 224: 21-28.
- [9] Zhang Y., Tang Z.R., Fu X., Xu Y.J., (2010) TiO<sub>2</sub>-graphene nanocomposites for gas-phase photocatalytic degradation of volatile aromatic pollutant: is TiO<sub>2</sub>-graphene truly different from other TiO<sub>2</sub>-carbon composite materials? *ACS Nano*, 4: 7303-7314.
- [10] Jiang G., Lin Z., Chen C., Zhu L., Chang Q., Wang N., Wei W., Tang H., (2011) TiO<sub>2</sub> nanoparticles assembled on graphene oxide nanosheets with high photocatalytic activity for removal of pollutants. *Carbon*, 49: 2693-2701.
- [11] Liu X., Pan L., Lv T., Lu T., Zhu G., Sun Z., Sun C., (2011) Microwave-assisted synthesis of ZnO-graphene composite for photocatalytic reduction of Cr(VI). *Catal. Sci. Technol.*, 1: 1189-1193.
- [12] Liu X., Pan L., Lv T., Zhu G., Sun Z., Sun C., (2011) Microwave-assisted synthesis of CdS-reduced graphene oxide composites for photocatalytic reduction of Cr(VI). *Chem. Commun.*, 47: 11984-11986.
- [13] Ma H., Shen J., Shi M., Lu X., Li Z., Long Y., Li N., Ye M., (2012)



- Significant enhanced performance for Rhodamine B, phenol and Cr(VI) removal by Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> nanocomposites via reduced graphene oxide modification. *Appl. Catal. B: Environ.*, 121-122: 198-205.
- [14] Ryu J., Choi W., (2006) Photocatalytic oxidation of arsenite on TiO<sub>2</sub>: Understanding the controversial oxidation mechanism involving superoxides and the effect of alternative electron acceptors. *Environ. Sci. Technol.*, 40: 7034-7039.
- [15] Moon G., Kim D., Kim H., Bokare A.D., Choi W. (2014) Platinum-like behavior of reduced graphene oxide as a cocatalyst on TiO<sub>2</sub> for the efficient photocatalytic oxidation of arsenite. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 1: 185-190.
- [16] Akhavan O., Ghaderi E., (2009) Photocatalytic reduction of graphene oxide nanosheets on TiO<sub>2</sub> thin film for photoinactivation of bacteria in solar light irradiation. *J. Phys. Chem. C*, 113: 20214-20220.
- [17] Akhavan O., Choobtashani M., Ghaderi E., (2012) Protein degradation and RNA efflux of viruses photocatalyzed by graphene-tungsten oxide composite under visible light irradiation. *J. Phys. Chem. C*, 116: 9653-9659.
- [18] Radich J.G., Krenselewski A.L., Zhu J., Kamat P.V., (2014) Is graphene a stable platform for photocatalysis? Mineralization of reduced graphene oxide With UV-irradiated TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Chem. Mater.*, 26: 4662-4668.

## 분자구조체를 기반한 인공광합성 시스템 연구

Molecular System-based Artificial-photosynthesis for Solar fuel Production

한원식/서울여자대학교 화학과/wshan@swu.ac.kr

자연에서는 아주 오랜 시간 동안 최적화된 메커니즘을 통해 이산화탄소와 물로부터 수소, 탄소 및 산소를 만들어 인간과 생물이 필요한 에너지원을 제공하고 있다. 인공광합성은 이러한 자연에서 일어나는 광합성을 모사하여 태양광을 이용하여 물과 이산화탄소로부터 에너지를 얻어내고자 하는 신재생에너지 연구라 할 수 있다. 아직 상용화에는 많은 시간이 소요될 것으로 예상되나, 석유 고갈과 지구환경오염이라는 문제점에 도달한 우리에게 매우 중요한 연구분야인 것은 분명하다. 따라서 많은 국가와 연구소에서 막대한 연구비를 투자하며 인공광합성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

자연에서는 광합성 작용을 위해 빛 흡수, 전하분리, 그리고 촉매가 잘 짜인 시스템을 오랜 시간에 걸쳐 최적화 시켜왔다. 이 화학적 반응은 매우 큰 에너지 증가과정이며, 녹색식물이 태양빛을 흡수하여 진행되는 반응이다:  $6\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 48h\nu \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$  ( $\text{DG}^0 = 29.1\text{eV} = 674\text{kcal/mol}$ ). 전체적인 반응 과정은 그림 1에 표현하였다. 반응은 크게 PS-II 및 PS-I 시스템으로 구별되는 reaction center (RC)를 중심으로 각 계는 태양 빛을 화학에너지로 변환하게 된다. PS-II시스템에서 P680이라는 물질과  $\text{CaMn}_4$ 가 물을 산소로 산화하고 이 때 물로부터 생성된 전자를 높은 에너지 준위로 올리게 된다. 이 후 4개의 전자가 PS-I시스템의 RC인 P700이라는 물질로 전달되면 한층 더 높은 준위로 활성화되게 된다. 이후 활성화된 전자는 ferredoxin으로 전달되고 ferredoxin에 의해  $\text{NADP}^+$ 가  $\text{NADPH}$ 로 환원 되는 것으로 알려져 있다. 이렇게 형성된  $\text{NADPH}$ 는 Calvin Cycle에 들어가서  $\text{CO}_2$ 를 탄수화물로 환원하는데 참여하게 된다. 이러한 일련의 과정을 Z-Scheme이라하며, 녹색식물의 생체막에서 진행되게 된다.

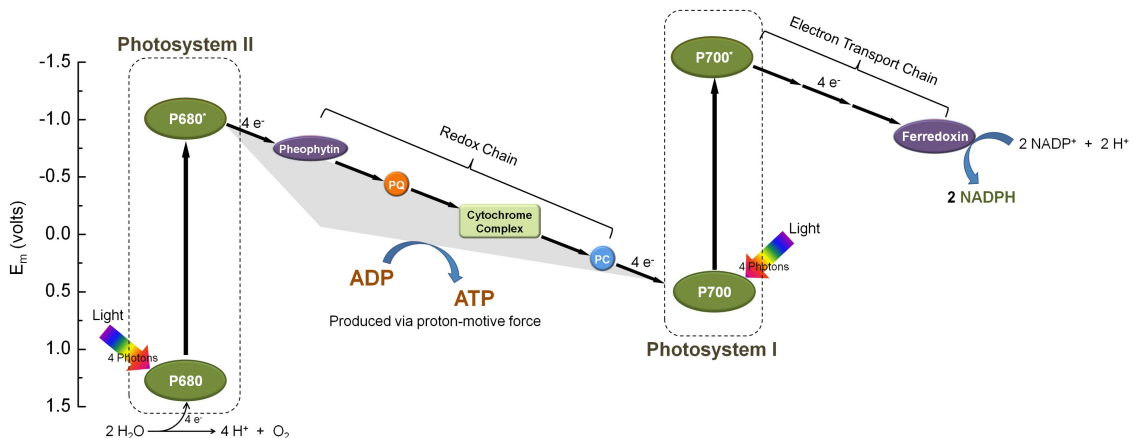


그림 1. 자연광합성에서 일어나는 녹색 식물의 Z-Scheme.

이러한 과정의 자연광합성을 모사한 인공광합성 연구를 통해 실질적인 에너지를 얻기 위해서는 사용되는 광감응체는 1) 주로 가시광선부터 근적외선에 이르는 태양 빛(400~900 nm)을 큰 흡수 계수 ( $\epsilon > 10^4$ )를 가지며 흡수할 수 있는 안테나 기능을 가져야 하고, 2) 효율적인 전하분리가 일어나야 하며 또한 3) 분리된 전하는 실질적으로 물 산화반응을 통해 수소를 만들어 내는 촉매로의 전하 수송 역시 효율적으로 일어나야 한다. 위의 조건을 만족시키기 위한 광감응체로 주로 전자 주개, 그리고 전자 받개의 공유 결합을 통한 화합물들이 개발되었으며 (전자 주개-받개 형태의 화합물은 들뜬 상태에서 전하 분리에 의한 가시광선 흡수가 가능해진다), 전자 주개-받개의 거리와 구조, 그리고 이들 간의 전자 상호 작용에 따른 전하 이동에 관한 연구가 진행되어왔다. 공유 결합 Dyad 시스템은 다양한 합성과 분석을 통해 분자의 구조를 정확하게 예측, 이해할 수 있다. 특히 전자 주개와 받개 간의 거리와 구조적 위치를 명확하게 분석할 수 있으므로 분자의 구조와 광물리적 특성 간 상관관계의 명확한 이해가 가능하다.

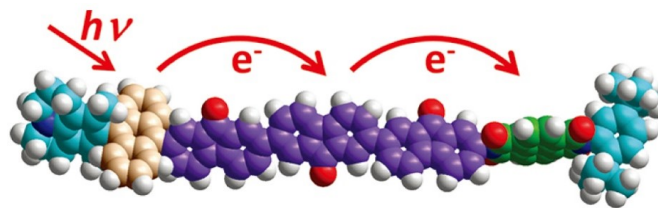
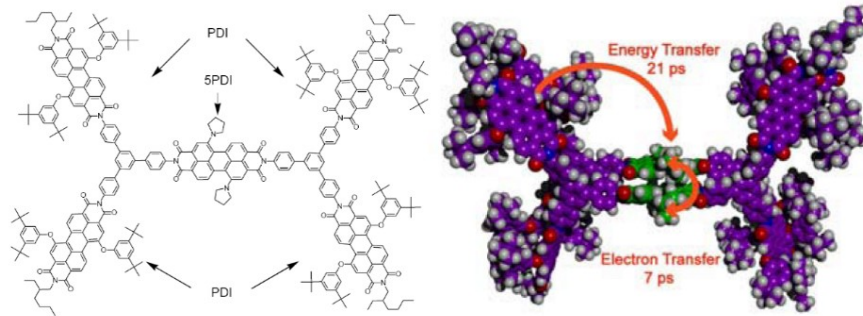


그림 2. Dyad 시스템을 이용한 전하이동 모식도.

하지만 여러 가지 복잡한 과정에서 더 높은 효율의 태양광변환효율을 기대하기 위해서는 단분자 레벨뿐 아니라 초분자(supra molecular) 레벨에서도 시스템이 잘 짜여져야한다. 즉, 단분자 레벨에서 전자주개와 받개 사이의 거리 조절 등과 같은 정밀한 화합물 구조 변화를 통해 전자 또는 에너지 이동을 조절할 수 있는 반면, 자기조립(self-assembly) 또는 초분자(supra molecular) 구조에서는 많은 단분자 화합물을 하나의 구조로 엮어 이러한 기능을 나노미터 사이에서 마이크로미터 사이즈로 키움으로써 태양광변환효율을 증대시킬 수 있는 것으로 기대되어 자기조립(self-assembly) 또는 초분자(supra molecular) 구조에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>[1-3]</sup> 특히 자기조립시스템을 개발할 경우 단분자에서는 보이지 않던 시너지효과를 얻을 수 있다. 이러한 구조는 주로 수소결합, nanosegregation, 그리고  $\pi$ - $\pi$  stacking interaction을 이용하여 테일 구조, 헬릭스 구조, 실린더 구조, 그리고 튜브 구조의 초분자를 형성할 수 있는 것으로 알려져 있다.<sup>[4-8]</sup> 즉, 전자 주개-받개 형태의 단분자를 초분자화 시킴으로써 새로운 광유발전자이동(photoinduced electron transfer)이 가능하게 된다. 자기조립화된 화합물의 구조 및 전하 이동 성질은 Small Angle X-ray Scattering (SAXS) 측정, 시간분해법(time resolved spectra) 측정, 그리고 자기공명 측정법을 통해 분석할 수 있다. 예를 들어, 그림 2에서 보이는 5PDI-PDI4 화합물의 경우 용액 안에서 2분자체(dimer)로 존재함을 SAXS측정을 통해 증명하였으며<sup>[9]</sup>, 펨토 초 시간분해법(femto-second transient absorption spectroscopy) 분석을 통해 빠른 시간 내에 정량적으로 전하분리가 이루어지는 것을 확인하였다. 특히 이러한 전자이동은 단분자 내에서는 이루어지지 않고, 2분자체를 형성할 경우에는 이루어지는 것을 확인함으로써 자기조립에 의한 시너지 효과를 증명하였다.

그림 3. Dyad 시스템을 이용한 들뜬 상태에서의 에너지이동과 전하이동 특성 분석의 예.[9]

다른 예로 역시 PDI 단위체를 가지는 단분자를 사용하여 자기조립을 통한 나노튜브 형성에 관한 연구가 있다.<sup>[10]</sup> 이 연구에서는 수소결합과  $\pi$ - $\pi$  stacking interaction을 통한 nanosegregation을 유도하였으며, SAXS 실험을 통해 자기조립에 의해 12분자체(dodecamer)가 형성되어 고체상에서 약 1마이크로미터크기의 헬릭스 구조를 가진 나노튜브가 형성됨을 확인하였다. 또한 형성된 자기조립 나노튜브는 1 ps의 빠른 시간 내에 전하분리가 효율적으로 일어남을 시간분해법측정을



통해 확인하였으며 자기조립 시 단분자에 비해 전하재결합(charge recombination)은 약 2000 배 느려지는 것을 확인하였다. 즉, 자기조립 시에는 단분자에 비해 긴 전하분리상태를 유지함을 확인할 수 있었다.

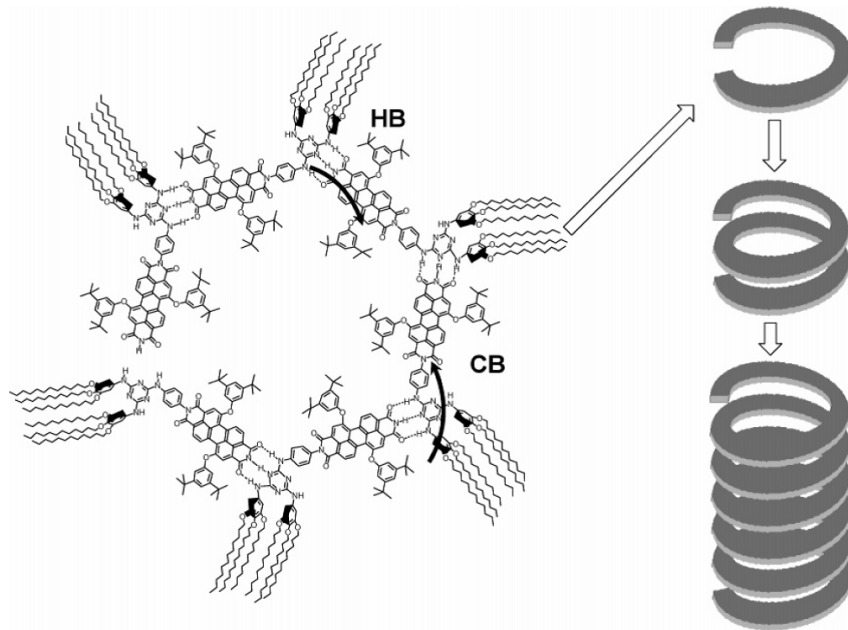


그림4. PDI 단위체의 자기조립현상을 이용한 광전변환용 나노튜브 형성.<sup>[10]</sup>

광흡수를 통해 효율적인 전하분리가 이루어진 이후에는 실질적으로 물 산화반응을 통해 수소와 산소가 발생할 수 있도록 촉매로의 효율적인 전하이동이 이루어져야 한다. 자연광합성의 PS-II 반응에서는 다중 망간(Mn) 금속이 이러한 기능을 하고 있다.<sup>[11]</sup>인공광합성의 중심이 되는 화학과정이 물분자 (또는 양성자)와 이산화탄소의 환원과 물분자의 산화반응이다. 따라서 각 반응에서 필요로 하는 에너지를 정확히 알고 이와 유사한 에너지 준위를 가지는 촉매의 개발이 매우 중요하다. 현재 진행되고 있는 연구들은 보통 물 분해 반응 중 반쪽 반응 ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$  또는  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ )에 대한 연구가 진행되고 있으며<sup>[12-15]</sup> 알려진 효율적인 촉매로써 주로 귀금속 계열의 Pt이 사용되어왔다. 하지만 최근에는 값이 싼 비금속 계열의 촉매에 관한 연구가 많이 진행되고 있으며 주로 Ni, Co, 그리고  $\text{MoS}_3$ 와 같은 촉매에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한 예로 전자 주개-받개 시스템에 Ni 촉매 (nickel cobaloxime)을 공유결합으로 연결한 시스템에 관한 시간분해법을 이용한 광 특성 및 수소 발생 가능성에 관한 연구가 최근 발표되었다.<sup>[16]</sup>이 연구에서는 전자 주개-받개-촉매의 triad 시스템을 사용하여 광에 의해 생성된 전하이동이 99% 이상 가능한 시스템이 소개되었다.



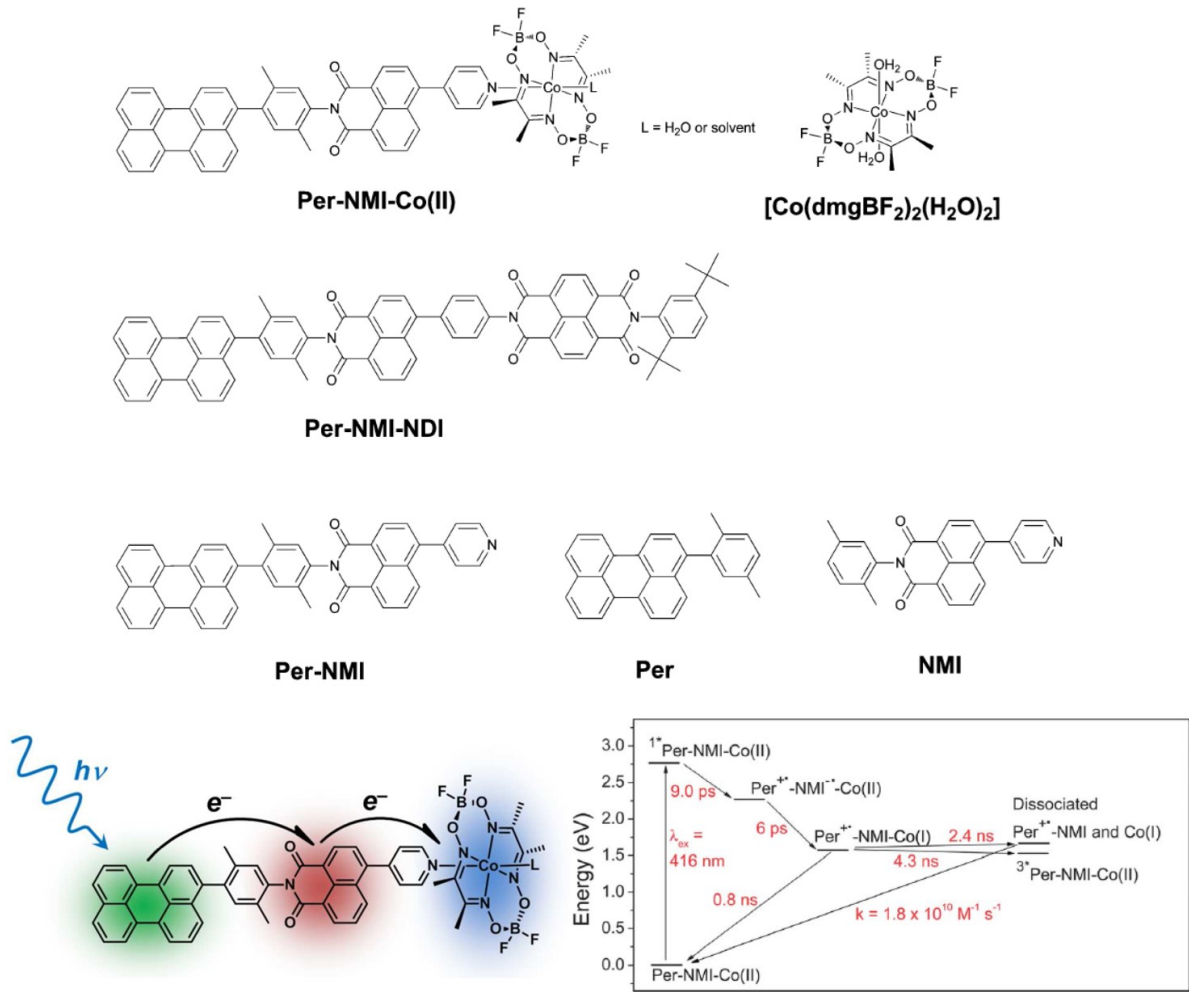


그림 5. 전자 주개-받개-니켈촉매 triad system의 에너지 다이어그램 및 광 유발 반응 속도

또한 최근 수소발생의 활성화 에너지가 낮은 촉매물질로서 [FeFe]hydrogenase enzyme의 값 싸고 환경친화적인 촉매로의 성능이 보고되었다.<sup>[17,18]</sup> 염료감응형태의 광촉매로 광흡수체인 염료와 촉매를 TiO<sub>2</sub>나 ZrO<sub>2</sub>와 같은 semiconductor에 결합하는 hybrid system에 관한 연구도 많이 진행되고 있으나 본 총설에서는 제외하고자 한다. 주로 초창기에는 광흡수제와 촉매를 각각 독립적으로 사용하는 연구가 진행되었으나 최근에는 광흡수제와 촉매 결합을 통해 하나의 물질로 만드는 연구방법이 주로 진행되고 있다. 예를 들어 위에서 언급한 [FeFe]hydrogenase enzyme 를 촉매로 사용하고 광흡수제로 포피린(porphyrin)을 결합하여 포피린으로부터 [FeFe]hydrogenase enzyme로의 전하이동과 수소발생 실험에 관한 연구가 발표된 바 있으며<sup>[18]</sup> 그 외에도 다양한 광흡수제와 [FeFe]hydrogenase enzyme을 결합한 시스템에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>[19]</sup>

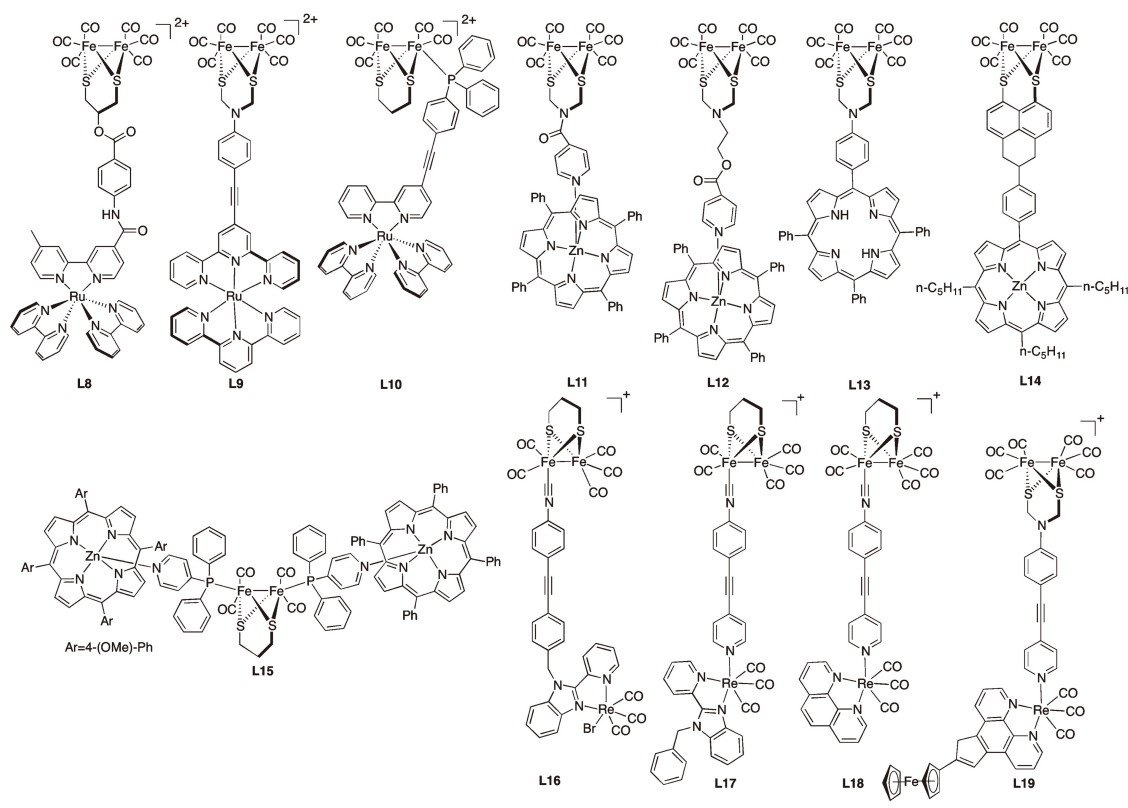


그림 6. [FeFe]hydrogenase enzyme를 이용한 생태계 모방 시스템의 예.[18]

본 총설에서는 자연광합성의 기본 기능인 안테나 기능, 전하분리기능, 촉매 기능에 대한 내용에 대해 알아보았다. 현재 조절이 용이한 분자구조체 기반 고효율 인공광합성 시스템 개발을 위하여 전세계 우수연구기관들이 활발히 연구하고 있는 상황이며 앞으로 높은 안정성과 효율을 가진 다양한 관련재료개발 및 시스템 최적화를 위한 다양한 연구시도들이 향후 미래에너지산업의 핵심연구로서 큰 주목을 받을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] Reinhoudt, D. N.; Crego-Calama, M. "Synthesis Beyond the Molecule", *Science* **2002**, *295*, 2403-2407.
- [2] Lehn, J.-M. "Toward Self-Organization and Complex Matter", *Science* **2002**, *295*, 2400-2403.
- [3] Ikkala, O.; ten Brinke, G. "Functional Materials Based on Self-Assembly of Polymeric Supramolecules", *Science* **2002**, *295*, 2407-2409.
- [4] Würthner, F.; Thalacker, C.; Sautter, A. "Hierarchical organization of functional perylene chromophores to mesoscopic superstructures by hydrogen bonding and  $\pi$ - $\pi$  interactions", *Adv. Mater.* **1999**, *11*, 754-758.
- [5] Thalacker, C.; Würthner, F. "Chiral Perylene Bisimide-Melamine Assemblies: Hydrogen Bond-Directed Growth of Helically Stacked Dyes with Chiroptical Properties", *Adv. Funct. Mater.* **2002**, *12*, 209-218.
- [6] Würthner, F.; Thalacker, C.; Sautter, A.; Scharrel, W.; Ibach, W.; Hollricher, O. "Hierarchical self-organization of perylene bisimide-melamine assemblies..." *Chem. Eur. J.* **2000**, *6*, 3871-3886.
- [7] Sautter, A.; Thalacker, C.; Würthner, F. "Control of Liquid Crystallinity of

- Diazadibenzoperylene Dyes by Covalent and Hydrogen-Bonded Attachment of Mesogens", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **2001**, *40*, 4425-4428.
- [8] Jonkheijm, P.; Miura, A.; Zdanowska, M.; Hoeben, F. J. M.; Feyter, S. D.; Schenning, A. P. H. J.; Schryver, F. C. D.; Meijer, E. W. " $\pi$ -Conjugated Oligo-(p-phenylenevinylene) Rosettes and Their Tubular Self-Assembly", *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* **2004**, *43*, 74-78.
- [9] Sinks, L. E.; Rybtchinski, B.; Jones, B. A.; Goshe, A. J.; Zuo, X.; Tiede, D. M.; Li, X.; Wasielewski, M. R. "Selfassembly of Photofunctional Cylindrical Nanostructures Based on Perylene-3,4:9,10-bis(dicarboximide)", *Chem. Mater.* **2005**, *17*, 6295-6303.
- [10] Rybtchinski, B.; Sinks, L. E.; Wasielewski, M. R. "Combining Light-harvesting and Charge Separation in a Self-assembled Artificial Photosynthetic System based on Perylenediimide Chromophores", *J. Am. Chem. Soc.* **2004**, *126*, 12268-12269.
- [11] Yagi, M.; Kaneko, M. "Molecular Catalysts for Water Oxidation", *Chem. Rev.* **2001**, *101*, 21-35.
- [12] Grätzel, M. "Artificial Photosynthesis: Water Cleavage into Hydrogen and Oxygen by Visible Light", *Acc. Chem. Res.* **1981**, *14*, 376-384.
- [13] Meyer, T. J. "Chemical approaches to artificial photosynthesis", *Acc. Chem. Res.* **1989**, *22*, 163-170.
- [14] Bard, A. J.; Fox, M. A. "Artificial Photosynthesis: Solar Splitting of Water to Hydrogen and Oxygen", *Acc. Chem. Res.* **1995**, *28*, 141-145.
- [15] Königstein, C. "Some aspects of photochemical systems for direct light-induced hydrogen production", *J. Photochem. Photobiol. A* **1995**, *90*, 141-152.
- [16] Veldkamp, B.; Han, W. S.; Dyar, S. C.; Eaton, S. W.; Ratner, M. A.; Wasielewski, M. R. "Photoinitiated multi-step charge separation and ultrafast charge transfer induced dissociation in a pyridyl-linked photosensitizer-cobaloxime assembly", *Energy Environ. Sci.*, **2013**, *6*, 1917-1928.
- [17] Cammack, R. "Hydrogenase sophistication", *Nature* **1999**, *397*, 214-215. (17) Tye, J. W.; Hall, M. B.; Darensbourg, M. Y. "Better than platinum? Fuels cells energized by enzymes", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **2005**, *102*, 16911-16912.
- [18] Samuel, A. P. S.; Co, D. T.; Stern, C. L.; Wasielewski, M. R. "Ultrafast Photodriven Intramolecular Electron Transfer from a Zinc Porphyrin to a Readily Reduced Diiron Hydrogenase Model Complex" *J. Am. Chem. Soc.*, **2010**, *132*, 8813-8815.
- [19] Eckenhoff, W. T.; Eisenberg, R. "Molecular systems for light driven hydrogen production" *Dalton Trans.*, **2012**, *41*, 13004-13021.

## 시각체계 안에서의 광수용체 단백질들의 연구 동향

Research Trends of Photoreceptor Proteins in Vision System

김소영, 김다솜, 박정희/전북대학교 생명공학부/junghee.park@jbnu.ac.kr

### 1. 서론

지구상에 살아있는 생명체들에게 있어 빛은 생명 에너지의 근원이 될 뿐만 아니라, 환경을 인지하고 적응하는데 영향을 미치는 중요한 요인이다. 따라서 이들은 적합한 파장의 빛을 에너지원으로 이용하거나 빛의 유무 또는 그 특성을 인식하기 위한 다양한 종류의 광수용체 단백질을 가지고 있는데 예를 들면 적색광/원적색광 수용체인 피토크롬(Phytochrome), 청색광 수용체인 크립토크롬(Cryptochrome)과 포토트로핀(Phototropin), UV-A/B 광수용체, 녹색광 수용체 로돕신(Rhodopsin)등이 있다<sup>1</sup>. 이러한 광수용체 단백질 중에서 레티날(vitamin A)을 chromophore로 갖는 로돕신 단백질은 동물뿐만이 아니라<sup>2</sup> 다양한 미생물에서도 널리 존재하는 것으로 보고되고 있다<sup>3-4</sup>. 기본적으로 로돕신은 7개의 helix가 생체막으로 둘러싸인(7-transmembrane) 구조를 갖는 막 단백질로서 종에 따라 그 모양과 기능이 조금씩 차이가 있고, 단독으로 기능하거나 고유의 신호전달자를 통해 외부 신호를 전달하는 등 다양한 역할을 한다<sup>3-5</sup>.

고등 동물에서 눈의 망막은 로돕신 단백질의 밀도가 매우 높은 구조의 하나로 빛 에너지를 효율적으로 전달하기 위해 체계적으로 구성되어 있고 빛의 유무 또는 강도를 인식할 뿐만 아니라, 색을 감지할 수 있는 고도의 기능을 갖는다. 동물의 피부에도 빛을 감지하는 로돕신 단백질이 존재한다는 것이 연구를 통해 밝혀졌는데<sup>6</sup>, 그 역할은 아직 명확하게 밝혀지지 않았으나 피부세포에서 UV-A에 의한 DNA 손상을 칼슘 이온 매개 반응을 이용하여 방어하는 기작이 제시되는 등 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>7</sup>.

### 2. 연구동향

#### 1) 동물 눈 속의 빛 감지 단백질들

동물 눈의 망막에는 Rod와 Cone의 두 가지 타입의 시각 소자가 매우 높은 밀도로 모여 있어서 광 자극을 받아들여 이를 전기 신호로 전환하여 환경을 감지할 수 있다. 이 두 가지 타입의 시각 소자들은 우선적으로 그 형태로 구분이 되며 (그림 1), 이중 대부분을 차지하는 간상 세포(Rod cell)에 존재하는 것이 로돕신 단백질로 이 로돕신은 빛의 명암을 구분하여 형태를 감지하는 역할을 한다. 또한 망막에는 색을 구분하는 기능을 하는 Cone opsin도 로돕신에 비해 적은 비율로 존재한다. 이 비율은 종에 따라 다르게 나타나는데 mouse의 경우 95:5, bovine은 92:8, salamander는 65:35의 값은 나타내며, 일부 cone이 우세한 닭의 경우 60%, ground squirrel의 경우 96%의 cone을 갖는 것으로 보고되어 있어 연구에 매우 유용하게 사용된다. 인간의 망막에는 95%의 Rod와 5%의 Cone이 발견된다<sup>8</sup>.



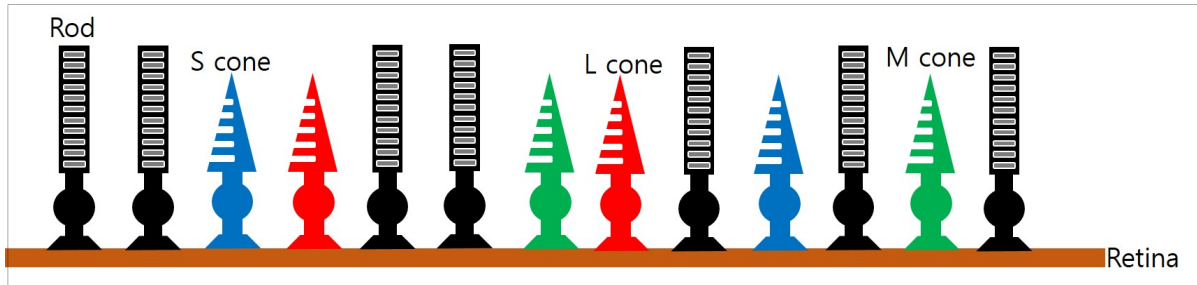


그림 1. 동물 눈의 레티나에 존재하는 광수용체 단백질의 모식도. 명암을 구분하는 Rod cell과 색을 감지하는 L opsin (Long wavelength sensitive opsin), M opsin (Middle wavelength sensitive opsin), S opsin (Short wavelength sensitive opsin)으로 구성된 L, M, S cone 세포들로 분포되어 있다.

로돕신과 cone opsin 각각은 광흡수 파장의 차이뿐만 아니라 광 민감도, 반응 속도의 차이로 인해 dim-light와 bright-light에 각각 최적화 되어 있다. Rod의 경우 매우 약한 빛을 감지할 수 있는 대신 강한 빛에 노출되었을 때 회복기간이 오래 걸리는 반면, Cone의 경우 광자에 대한 민감도는 약하지만 빠른 회복속도로 인해 밝은 빛 하에서 기능을 나타낸다.

여기에 망막에 존재하는 ganglion cell에서는 melanopsin이라는 또 다른 종류의 옵신 단백질이 발견되었는데 빛을 감지하여 생체 시계를 조절하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

## 2) Rhodopsin

소의 망막세포로부터 추출한 로돕신은 간상세포의 outer segment 내의 disk 막에 존재하며 약 40 kDa 크기의 막단백질로 11-*cis* 형태의 retinal을 발색단(chromophore)으로 사용한다. G protein의 일종인 Transducin( $G_t$ )과의 상호작용을 통해 광신호를 신경세포로 전달하기 때문에 옵신 단백질은 GPCR (G-protein coupled receptor)의 일종으로 구분된다. 또한 로돕신 안에서 그 발색단 11-*cis* 레티날은 로돕신의 비활성화 상태를 안정화 시키는데 기여한다. 이러한 사실은 로돕신의 3차원 구조가  $\beta_2$  adrenergic receptor 유사하다는 것이 밝혀진 이후<sup>9</sup>, 팔체프스키 그룹에서 2000년에 X-ray crystallography를 이용하여 최초로 광수용체인 로돕신의 3차원적 구조를 규명함으로써 확인되었다<sup>10</sup>. 또한 로돕신 단백질의 3차원적 구조 규명은 생화학적, 생물리학적 연구가 활발하게 진행되도록 촉진제 역할을 하고 있다. 이러한 결과, 시각 신호 전달체계에 관련된 로돕신의 광신호 전달 기작의 연구들이 활발해지게 되었고, 현재 간상세포 안에서의 로돕신의 광신호 전달 기작이 완성 단계에 이르렀다.

로돕신의 광신호 전달 메커니즘은 다음과 같이 단계적으로 이루어지는데 우선 광자극에 의한 레티날 구조 이성질화가 단백질의 구조 변화를 야기하여 활성 상태(active form)인 MetaII 단계로 전이한다. 이 활성상태의 에너지는 신호 전달 매개체인 Transducin( $G_t$ )으로 옮겨지고 로돕신 단백질은 레티날이 떨어져 나가면서 비활성 상태로 바뀌게 된다.

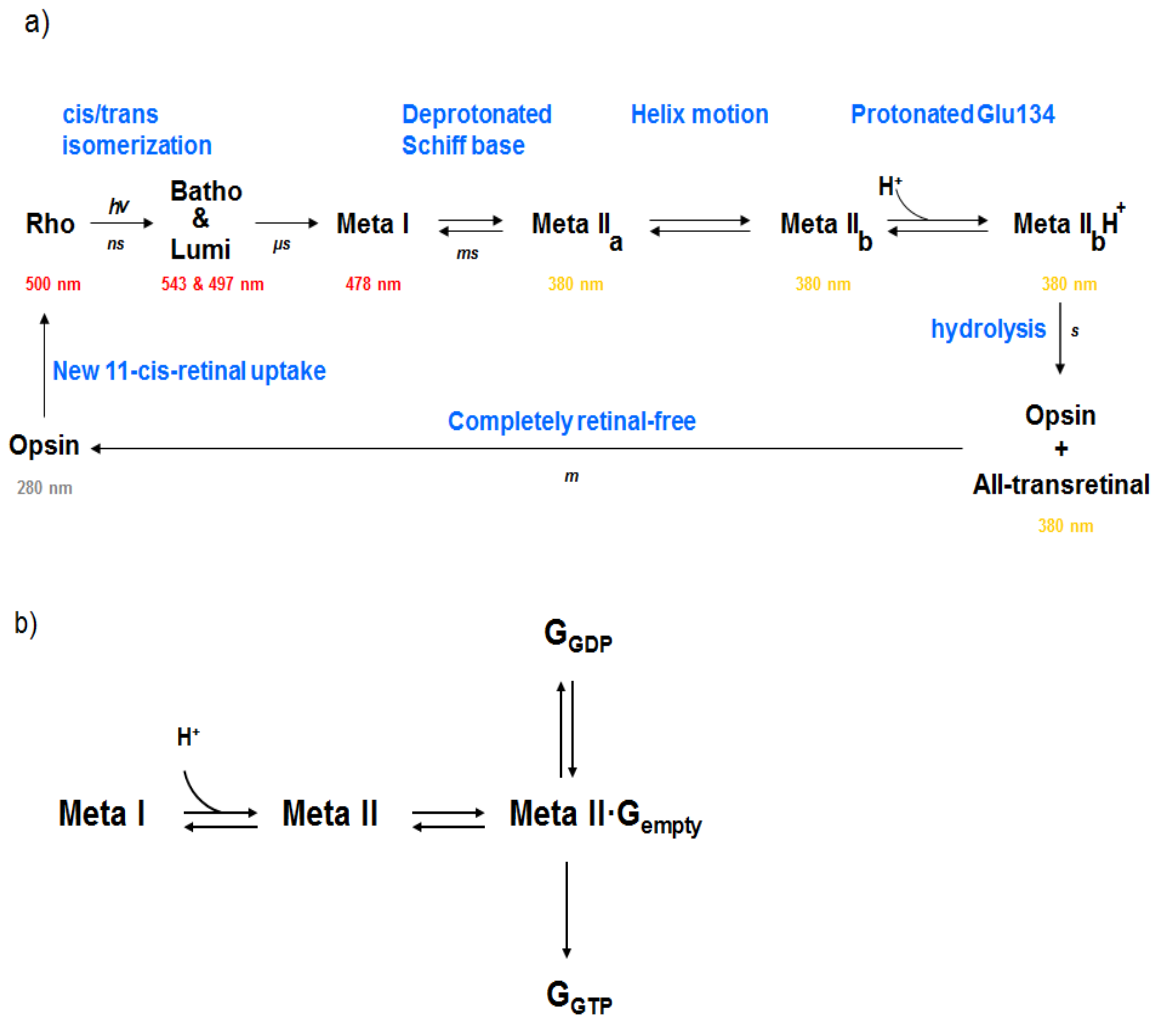


그림 2 로돕신의 탈색 (photobleaching) 경로(a) 및 활성화 로돕신과 G-단백질의 상호작용(b).

로돕신으로부터 Transducin으로 전이된 광신호는 GDP에서 GTP로의 전이를 매개함으로써 하위 신호전달 과정을 촉진하게 된다. 로돕신의 전이단계는 각 단계의 구조적 특징에 따라 몇 개의 중간체로 구분되는데 로돕신이 빛을 받아 들뜬 상태가 된 다음 thermal decay를 통해 에너지 준위가 낮아지면서 batho  $\rightarrow$  lumi  $\rightarrow$  Meta I  $\rightarrow$  Meta II 의 중간단계를 거치게 되고 각각의 단계는 광자극 후 picosecond, nanosecond, microsecond, millisecond의 시간을 가지고 빠르게 진행된다 (그림 2)<sup>11-13</sup>.

로돕신의 구조를 살펴보면 7번째 helix 이후 세포막 쪽으로 존재하는 8번째 helix는 두 개의 cysteine 잔기에 결합된 palmitoyl acid를 이용하여 세포막에 고정되어 있다 (그림3). Chromophore인 11-*cis* 레티날은 296번째 lysine과 Schiff base(Lys296)를 형성하며 counter-ion인 113번째 glutamic acid에 의해 안정화되어 있다. 또한 특징적으로 로돕신은 TM6가 강하게 경사져있고, 세포내로 연결된 loop이 상대적으로 길며, 8번째 helix는 palmitoylated 된 두 개의 cystein 잔기들(Cys322와 Cys323)에 의해 생체막에 고정화되어있고 extracellular 영역의 TM3과 loop2와 cystein 잔기들에 의해 disulfied bridge가 형성되어 안정화되어있다. 로돕신의 비활성화 3차원적 구조가 발표된 이래로 현재까지 생화학적, 생물리학적 연구가 활발하게 진행되고 있고 그중에 단백질 결정학 분야에서도 탁월한 연구 성과들이 도출되어왔다. 그림 3은 로돕신의 결정학 구조기반으로하여 발표된 연구 성과를 timetable로 보여주고 있다.

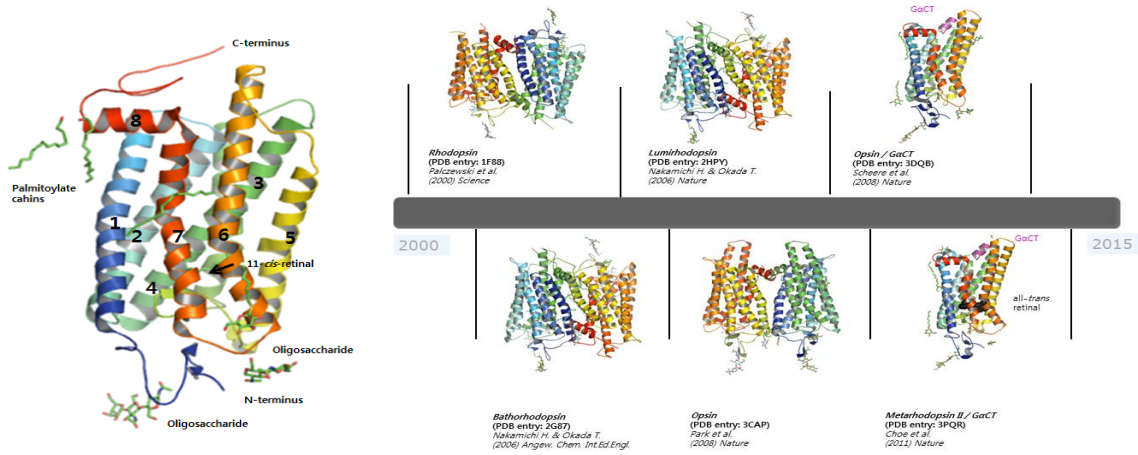


그림 3. 소 눈으로부터 추출한 광수용체 로돕신의 3차원적 구조들 및 구조 기반 연구 진행 Timetable

또한 로돕신 단백질의 연구는 대표적인 유전질환인 retinitis pigmentosa model을 이용하여 시력 회복에 초점을 맞추고 있다. 로돕신으로부터의 광신호 전달 기전을 명확히 알아냄으로써 시력 저하 또는 실명 상태의 환자의 시력 회복을 위한 연구가 진행되고 있다<sup>14</sup>.

### 3) Cone-opsin

Cone opsin은 망막에 적은 비율로 존재하는 cone 세포의 막에서 발견되며 photopsin이라고도 한다. Cone opsin의 경우 감지할 수 있는 색의 파장에 따라 3~4종으로 나뉠 수 있고 감지하는 파장은 종에 따라 다르게 나타난다. 사람의 경우 세 종류의 Cone opsin이 발견되는데 각각 L opsin (Long wavelength sensitive opsin), M opsin (Middle wavelength sensitive opsin), S opsin (Short wavelength sensitive opsin)로 나타낸다<sup>15</sup> (그림 4). S cone은 전체 Cone 세포의 5% 정도만을 차지하고 있으며, L과 M cone은 망막의 fovea에 집적되어 있는 반면 S cone은 망막 외곽에 좀 더 퍼져 있고 중심부에는 존재하지 않는다.

간단히 살펴보면 Cone disc는 세포의 조직으로 열려있는 구조를 갖는다 (그림 1). 디스크 막을 확장해서 상대적인 표면적을 넓히는 반면 이러한 열린 구조는 세포의 조직과의 빠른 물질 교환을 통해 빠른 광신호전달 반응을 가능하게 한다<sup>8,16</sup>.

Cone opsin의 경우 빛에 의해 4-12개 정도의 pigment가 자극이 되어야 광자극이 전달되는데 이는 하나의 pigment의 자극만으로 신호전달이 유도되는 Rod와 구별되며, 또한 Cone의 경우 Dark state에서 3~4분 만에 바닥상태로 회귀하는데 반해 Rod의 경우는 30분 이상이 소요된다. 따라서 Cone opsin은 밝은 빛을 감지하는데 특화되어 있다고 볼 수 있다<sup>8,17</sup>. 이러한 빠른 visual pigment의 회복은 내재하는 광수용체의 광순환 속도에서 기인하며 따라서 Rod와 대비되는 Cone opsin 특이적인 광순환이 존재할 가능성은 내포한다<sup>8</sup>. 현재 Cone photopigment 특이적 광순환은 최근 Zebrafish에서 parallel visual cycle을 갖는다는 것이 보고된 반면, Rod가 우세한 척추동물에서는 아직 보고되지 않았다<sup>18</sup>. Cone opsin 특이적인 광신호 전달 메커니즘은 아직 명확하게 밝혀지지 않은 상태로 향후 더 많은 연구가 필요한 부분이다.

광신호 전달 메커니즘에서 보면 Dark state에서 MetaII state까지의 구조변화는 Rod

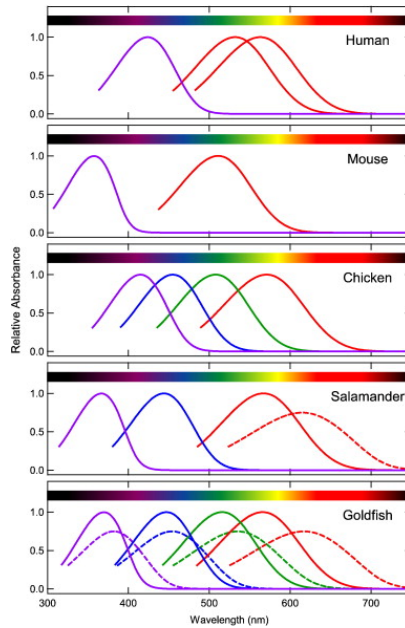


그림 4. 인간을 포함한 동물의 눈이 감

지하는 빛의 파장<sup>15</sup>.  
 opsin과 Cone opsin을 비교해보면 별다른 차이를 보이지 않는데, 다만 각각의 opsin과 결합하는 전달자 단백질(Transducin)은 서로 다르다는 것이 알려져 있다. Rod opsin과 Transducin 사이의 결합은 최근 Crystal structure를 통해 알려져 있는 반면 Cone opsin과 전달자 사이의 결합은 아직 구조적 연구가 발표되지 않았다<sup>19</sup>.

망막에서 Cone 세포 기능의 이상으로 인한 다양한 안과적 질병이 알려져 있다. 이러한 Cone 세포의 기능 저하는 우선 central vision의 상실 및 color vision의 감소를 야기한다. Cone cell의 기능 상실로 야기되는 증상은 우선 색맹을 들 수 있고, 강한 광선에 Rod 세포 및 소수의 Cone 세포에 과자극이 발생하면서 광선협오증을 유발할 수 있다<sup>20</sup>. 또한 blue-cone monochromatism, oligocone trichromacy, Bohnholm eye disease 등의 질병을 야기하기도 한다. 이러한 질병은 주로 상염색체 연관 유전자 결실 또는 X염색체 연관 유전자의 결실 등 유전적으로 발생하는 경우가 많아 예방 및 치료에 어려움이 있다. 전색맹 (Complete achromatopsia)의 경우 연관된 5개의 유전자가 발견되었고, 이들 각각의 기능 이상이 원인이 되어 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이 경우 Rod opsin은 정상적으로 기능하는 것으로 보고되어 있다.

아직까지는 이러한 Cone 기능 이상을 회복하는 치료법은 알려져 있지 않지만 최근 발표된 연구에 따르면 유전자치료 방법을 이용하여 cone 기능 상실로 인한 색맹 모델에서 cone 기능을 회복하였다는 결과가 보고되는 등의 희망적인 결과를 포함하여 다각적인 치료방법이 모색되고 있다<sup>21</sup>.

### 3. 맺음말

지구상의 생명체들은 다양한 광감지 단백질을 통해 빛 에너지를 생체 시스템에 이용하고 있고, 특히 동물에게 있어 빛을 감지한다는 것은 생존에 매우 중요한 요인이 된다. 지금까지의 많은 연구로 인해 명암을 감지하는 로돕신 단백질의 특성과 광신호전달 메커니즘은 많이 밝혀져 있지만 막단백질의 순수 분리의 어려움으로 인해 다른 색소 단백질인 cone photopigment 및 생체 시계와 연관되어 있다는 melanopsin, 아직 기능이 알려지지 않은 다양한 opsin들에 대한 연구는 아직 많이 진행되어 있지 않은 편이다.

이들 단백질은 의학적으로도 매우 중요한 의미를 갖고 있으며 따라서 이러한 광수용체 단백질의 기능을 밝혀내는 것이 매우 중요하다. 동물 광수용체 단백질의 생물학적 기능 및 특성에 관한 기초적인 연구를 바탕으로 하여 다양한 원인으로 발생하는 시각 관련 질병에의 예방 및 치료 가능성을 모색하기 위해 꾸준한 연구가 지속되어야 할 것이다.



#### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업임(NRF-2012R1A1A1042354).

#### 4. 참고문헌

- [1] Spudich JL, Jung KH. (2005) **Microbial rhodopsins : phylogenetic and functional diversity.** In **Handbook of photosensoryreceptors.** Briggs, WR and Spudich JL (ed), pp.1-24.: *Wiley-VCH, Weinheim.*
- [2] Nickle B, Robinson PR. (2007) **The opsins of the vertebrate retina: insights from structural, biochemical, and evolutionary studies.** *Cell. Mol. Life Sci.* 64: 2917-2932.
- [3] Spudich JL, Jung KH. (2005) **Microbial rhodopsins : phylogenetic and functional diversity.** In **Handbook of photosensoryreceptors.** *Briggs, WR and Spudich JL (ed), pp.1-24.*: Wiley-VCH, Weinheim.
- [4] Jung KH (2007) **The distinct signaling mechanisms of microbial sensory rhodopsins in Archaea, Eubacteria and Eukarya,** *PhotochemPhotobiol* 83: 63-69.
- [5] Ernst OP, Lodowski DT, Elstner M, Hegemann P, Brown LS, Kandori H (2014) **Microbial and animal rhodopsins: structures, functions, and molecular mechanisms** *Chem. Rev.* 8:126-163.
- [6] Tsutsumi M, Ikeyama K, Denda S, Nakanishi J, Fuziwara S, Aoki H, Denda M. (2009) **Expressions of rod and cone photoreceptor like proteins in human epidermis.** *Exp. Dermatol.* 18: 567-570
- [7] Wicks NL, Chan JW, Najera JA, Ciriello JM, Oancea E. (2011) **UVA phototransduction drives early melanin synthesis in human melanocytes.** *Curr. Biol.* 21: 1906-1911.
- [8] Wang JS, Kefalov VJ (2011) **The cone-specific visual cycle** *Prog. Retin. Eye Res.* 30: 115-128.
- [9] Lefkowitz RJ (2004) **Historical review: A brief history and personal retrospective of seven-transmembrane receptors.** *Trends Pharmacol Sci.* 25: 413-422.
- [10] Palczewski K, Kimasaka T, Hori T, Behnke CA, Motoshima H, Fox BA, Trong IL, Teller DC, Okada T, Stenkamp RE (2000) **Crystal structure of rhodopsin: a G protein-coupled receptor** *Science* 289: 739-745.
- [11] Terakita A (2005) **The opsins.** *Genome Biol.* 6: 213
- [12] Okada T, Fujiyoshi Y, Silow M, Navarro J, Landau EM, Shichida Y. (2002) **Functional role of internal water molecules in rhodopsin revealed by X-ray crytallography** *Proc. Natl. Acad. Sci.* 99: 5982-5987.
- [13] Park JH, Sgeerer P, Hofmann KP, Choe HW, Ernst OP (2008) **Crystal structure of the ligand-free G-protein-coupled receptor opsin** *Nature* 454: 183-187.
- [14] Tsang SH, Chan L, Tsai YT, Wu WH, Hsu CW, Yang J, Tosi J, Wert KJ, Davis RJ, Mahajan VB (2014) **Silencing of tuberlin enhances photoreceptor survival and function in a preclinical model of retinitis pigmentosa (an American ophthalmological society thesis)** *Trans Am Ophthalmol Soc.* 112: 103-115
- [15] Imamoto Y, Shichida Y (2014) **Cone visual pigments** *Biochim. Biophys. Acta* 1837: 664-673.
- [16] Solomon SG, Lennie P (2007) **The machinery of colour vision** *Nat. Rev. Neurosci.* 8:

276-286.

- [17] Korenbrot JI (2012) **Speed, adaptation, and stability of the response to light in cone photoreceptors: the functional role of Ca-dependent modulation of ligand sensitivity in cGMP-gated ion channel** *J. Gen. Physiol.* 139: 31-56.
- [18] Fleish VC, Neuhayss S.C.F (2010) **Parallel visula cycles in the zebrafish retina** *Prog. Retin. Eye. Res.* 29: 476-486.
- [19] Korenbrot JI (2012) **Speed, sensitivity, and stability of the light response in rod and cone photoreceptors: Facts and models** *Prog. Retin. Eye. Res.* 31: 442-466.
- [20] Aboshiha J, Dubis AM, Carroll J, Hardcastle AJ, Michaelides M (2015) **The cone dysfunction syndromes** *Br. J. Ophthalmol.* pii:bjophthalmol-2014-306505, doi: 10.1136/bjophthalmol-2014-306505 [Epub ahead of print]
- [21] Komaromy AM, Alexander JJ, Rowlan JS, Garcia MM, Chiodo VA, Kaya A, Tanaka JC, Acland GM Hauswirth WW, Aguirre GD (2010) **Gene therapy rescues cone function in congenital achromatopsia** *Hum. Mol. Genet.* 19: 2581-2593.



## 한양대학교 나노과학기술연구소 (Institute of Nano Science and Technology)

연 구 소 장: 김종만 교수(한양대학교 화학공학과)  
 주 소 : (133-791) 서울특별시 성동구 왕십리로 222  
 한양대학교 융합기술관(FTC) 6층  
 이 메 일 : jmk@hanyang.ac.kr  
 전 화 : 02-2220-1934  
 팩 스 : 02-2220-1935  
 홈 페 이 지: <http://nst.hanyang.ac.kr>

### 연구소 소개

한양대학교 내 부설연구기관인 ‘나노과학기술연구소(INST)’는 교내 자연과학대학과 공과대학을 주축으로, 나노기술과 관련된 연구그룹들의 학제 간 연구를 활발히 추진하기 위하여 2004년 설립 되었으며 교내 융합기술관(Fusion Technology Center)의 6층 전체를 연구소 전용공간으로 사용하고 있다.

2015년 5월 현재 50명의 전임연구교수와 10명의 전임연구인력(연구교수 및 Post-Doc.)이 나노과학기술연구소에 소속되어 있으며, 우수한 연구진의 헌신적인 노력으로 설립 이후 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 특히 세계적인 수준의 연구소로 도약하기 위해 연구소 인프라 구축에 힘쓰고 있으며, 국내외 우수 NT 관련 연구기관과의 효과적이고도 실질적인 국제 공동연구 프로그램의 개발도 함께 추진해 나가고 있다. 이러한 노력에 대한 가시적인 성과로 2012년 ‘교육과학기술부 주관 이공분야 대학중점연구소 지원 사업’에 선정되어 총 9년 동안 지원을 받게 되었다. 또한 세계적인 연구소 중 하나인 일본의 이화학연구소(RIKEN)의 분소를 한양대학교 내에 유치하는데 큰 기여를 하였으며, 이와 관련하여 서울시/삼성의 지원을 받아 국내외 우수 연구기관들이 공동연구를 진행하는 ‘융합기술관(Fusion Technology Center, FTC)’을 완공하는데 주도적인 역할을 하였다.

연구소 전용공간 내에는 세미나실, 소장실 및 행정실이 있으며 소속교수의 연구를 지원하기 위하여 소재합성실, 나노바이오실, 나노소재제작실, 나노소자제작실 및 전파차단실을 두고 있으며, 연구소 전용 FE-SEM, Confocal Microscope, Mask Aligner, Dynamic Light Scatter, Microarrayer 등을 갖추고 있다.



융합기술관(FTC)



6층 연구소 입구



세미나실



소재합성실



나노바이오실



나노소재제작실



나노소재제작실



형광측정실



SEM실

그림1. 연구소 주요 시설

## 2 주요 활동

본 연구소는 나노과학기술 분야의 학제간 융합연구, 우수연구인력 양성, 국제협력을 통한 세계 최고 수준의 연구소로서 경쟁력을 확보하기 위해 아래와 같은 세 가지 세부 목표를 가지고 운영하고 있다.

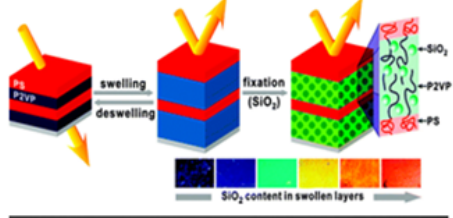
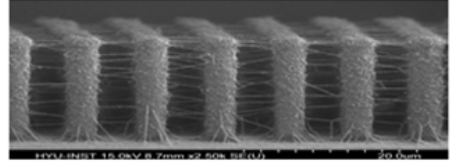

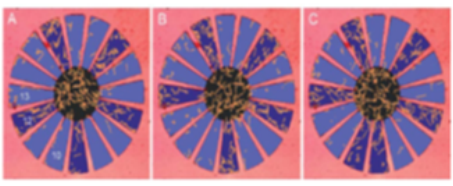


그림2. 나노과학기술연구소 중점 추진분야



## 1) 연구활동: 경쟁력 있는 NT 관련 융복합과학기술 연구 분야 개발

본 연구소에서는 학제간 연구, 산업적인 응용 가능 및 미래를 선도할 NT-BT, NT-IT 융복합 과학기술 연구를 장려하고, 대형 연구사업 유치를 위해, 구성원들의 연구 분야를 ‘NT-BT, NT-IT’ 융합분야로 세분화하고, 각 분야별로 ‘나노재료(Nanomaterials), 나노소자(Nanodevice), 나노소자제작(Nanofabrication)’을 중심으로 전문화하여 아래와 같이 연구를 수행하고 있다.

<p><b>나노재료</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 자연 물질 및 시스템의 구조/ 기능을 모방한 자연모방 재료</li> <li>• 세포막을 모방한 신호 증폭 센서</li> <li>• 광젤, 광결정 구조와 같은 광감응형 재료</li> <li>• 그래핀 및 그래핀계 재료</li> <li>• 기능성 나노섬유</li> </ul> <p><b>나노소자</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 펄스 이하를 감응 가능한 초고감도 나노센서</li> <li>• 전자코, 혀, 피부, 귀, 눈</li> <li>• 점성질 금형과 미생물 기반 생체컴퓨터</li> <li>• 자가조립형 광 패턴-리듬 생성기</li> </ul> <p><b>나노소자제작</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3차원 CNT, 금속, 무기, 유기 나노네트워크 구조</li> <li>• 나노소자 성능 최적화 및 분자 구조 제어를 위한 나노 분자 공학</li> <li>• 분자단위 자가 조립 기반 나노구조 제작</li> <li>• 원자층 증착 공정 기반 나노구조제작</li> <li>• 잉크젯 공정을 이용한 나노구조 배열체 제작</li> </ul>	   
--	--

## 2) 교육활동: NT 관련 융복합 과학기술 교육체계 구축

나노과학기술연구소에서는 NT, BT, IT와 관련된 여러 전공들을 유기적으로 연계시키는 창의적인 교육 프로그램을 개발하고 이를 위한 교육사업의 일환으로 대학원에 학과간 협동과정인 ‘나노융합과학과 (<http://dcn.hanyang.ac.kr>)’를 개설하여 운영하고 있다.

또한 중·단기 연구관련 교육 프로그램을 운영 중이며, 나노소자제작 및 측정분석 교육 프로그램 운영을 중점으로 하여 여러 전공의 연구원과 학생들에게 나노소자 제작을 위하여 사용되는 소자 제작용 장비의 기초 원리와 사용법을 교육하여 창의적인 융합기술 연구기회를 제공하고 있다.



### 나노과학기술연구소 연구장비 교육 내용

1. Wafer scribing & sample cleaning
2. Optical Lithography
3. Sputter Deposition
4. Thermal Evaporation
5. Rapid Thermal Annealing
6. Furnace Annealing
7. FE-SEM 이론 및 운영교육
8. E-beam Lithography

### 3) 국제협력: 세계적 수준의 국내외 NT 연구기관과의 국제 협력 체제 구축

나노과학기술연구소에서는 국제협력을 통한 세계적 연구소로서의 경쟁력을 강화하기 위해 일본, 미국, 중국 등의 우수 연구소와 적극적인 교류를 통해 국제협력의 기틀을 마련하고 실질적인 교류를 위해 정기적인 국제학술대회, Workshop, 초청세미나, 인적교류 등을 추진하고 있다.

본 연구소는 ARN(Asian Research Network, 아시아 연구 네트워크, <http://www.asianrn.org>) 핵심 참여연구기관으로, ARN 소속기관의 협력을 통해 인적 교류를 활발히 진행 중에 있으며, 연구소 참여교수를 비롯하여 대학원생의 상호 방문, Post Doc. 파견 등을 지속적으로 추진하고 있다.

## 이공분야 대학 중점연구소

나노과학기술연구소는 2012년 이공분야 대학 중점연구소 지원 사업(총 3단계, 9년 연구계획)에 선정되었으며, ‘생체모방 나노센서시스템 연구’ 활동을 현재 활발히 진행 중이다. 본 연구소는 우수한 연구 인프라를 바탕으로 중점연구소 지원사업을 통해 ‘생체모방 나노센서’ 분야의 글로벌 선도 연구소로 도약하고자 한다.

### 1) 중점연구소 연구개요: 생체시스템 모방 센서연구

생체시스템의 구조 및 기능을 모방하는 연구는 생체 시스템의 이해에 도움이 될 뿐만 아니라 새로운 기능을 지니는 구조체를 만들 수 있다. 본 연구에서는 다양한 생체시스템 중에서 세포막, 나비의 날개에 있는 광결정, 촉각기능의 피부 및 3차원 네트워크 구조의 신경망의 구조 및 기능을 모방하는 나노구조체를 제조하고 센서 기능을 부여하여 DNA, 바이러스, 중금속 이온과 같은 생체 분자 검출, 환경유해물질인 휘발성유기화합물(VOC) 감지, 자외선 감지센서 및 촉각센서 응용에 관한 연구에 중점을 두고 있다.



그림3. 중점연구소 연구 개요

## 2) 세부과제별 연구내용

생체모방 고성능 나노센서 시스템 개발을 위해 4개의 세부과제를 설정하여 연구를 진행하고 있으며, 세포, 스킨, 나비 날개, 신경망 등의 생체 구조를 모방하여 초분자 소재, 광결정 소재, 나노박막, 3D CNT네트워크 등을 개발하고 그 특성을 향상시켜 고성능 나노센서시스템(폐암진단, 구강암진단, 이온센서, 촉각센서)을 개발하는데 최종 연구목표를 두고 있다.

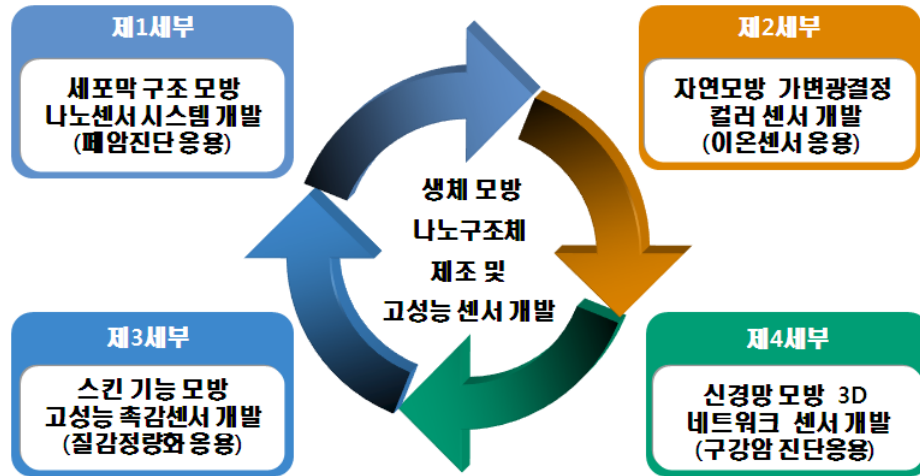


그림4. 세부과제별 연구개요

## 4

### 나노과학기술연구소 연구진 소개 (\*표시는 중점연구사업 참여인력)

- 참여 교수 (전임교원)

성명	E-mail	소속	성명	E-mail	소속
*김종만 (소장)	jmk@hanyang.ac.kr	화학공학과	안진호	jhahn@hanyang.ac.kr	신소재공학부
*노재근 (부소장)	jgnoh@hanyang.ac.kr	화학과	*안희준	ahn@hanyang.ac.kr	유기나노공학과
*송시몬	simonsong@hanyang.ac.kr	기계공학과	오성근	seongoh@hanyang.ac.kr	화학공학과
*강영중	youngikang@hanyang.ac.kr	화학과	이근용	leeky@hanyang.ac.kr	생명공학과
강용수	kangys@hanyang.ac.kr	에너지공학과	이동윤	dongyunlee@hanyang.ac.kr	생명공학과
김동립	dongrip@hanyang.ac.kr	기계공학과	*이상경	sangkyunglee@hanyang.ac.kr	생명공학과
김동원	dongwonkim@hanyang.ac.kr	화학공학과	*이승백	sbl22@hanyang.ac.kr	융합전자공학부
김성중	sungjkim@hanyang.ac.kr	원자력공학과	이영무	ymlee@hanyang.ac.kr	에너지공학과
김영범	ybkim@hanyang.ac.kr	기계공학과	이윤정	yjlee94@hanyang.ac.kr	에너지공학과
*김영필	ypilkim@hanyang.ac.kr	생명과학과	이조원	jowon@hanyang.ac.kr	나노융합과학과
*김재용	kimjy@hanyang.ac.kr	물리학과	*이해원	haiwon@hanyang.ac.kr	화학과
김창경	ckkim@hanyang.ac.kr	신소재공학부	임승순	imss007@hanyang.ac.kr	유기나노공학과

김태환	twk@hanyang.ac.kr	융합전자공학부	임태연	rhim@hanyang.ac.kr	생명공학과
*김학성	kima@hanyang.ac.kr	기계공학과	장건희	ghjang@hanyang.ac.kr	기계공학과
박완준	wanjun@hanyang.ac.kr	융합전자공학부	정규선	kschung@hanyang.ac.kr	전기공학과
박원일	wipark@hanyang.ac.kr	신소재공학부	정정주	cchung@hanyang.ac.kr	전기공학과
*박인성	parkis77@hanyang.ac.kr	신소재공학부	정진욱	joykang@hanyang.ac.kr	전기공학과
박진성	jsparklime@hanyang.ac.kr	신소재공학부	조은철	enjoe@hanyang.ac.kr	화학공학과
박호범	badtzhb@hanyang.ac.kr	에너지공학과	조천규	ccho@hanyang.ac.kr	화학과
상병인	biosang@hanyang.ac.kr	화학공학과	한성환	shhan@hanyang.ac.kr	화학과
서경도	kdsuh@hanyang.ac.kr	화학공학과	*한진욱	jwhan@hanyang.ac.kr	화학과
서영웅	ywsuh@hanyang.ac.kr	화학공학과	한태희	than@hanyang.ac.kr	유기나노공학과
선양국	yksun@hanyang.ac.kr	에너지공학과	*Justyn W. Jaworski	justyn.jaworski@gmail.com	화학공학과
성명모	smm@hanyang.ac.kr	화학과	William T. Nichols	nichols@hanyang.ac.kr	신소재공학부
신흥수	hshin@hanyang.ac.kr	화학공학과	Ming-Chieh Lin	mclin@hanyang.ac.kr	전기공학

• 전임연구인력 (연구교원)

성명	직위	이메일
*이찬우	연구교수	lcw@hanyang.ac.kr
*설원제	연구부교수	ojsul@hanyang.ac.kr
이용은	연구조교수	yeleekoo@gmail.com
Aravindaraj G. Kannan	연구조교수	aravind@hanyang.ac.kr
*Chinna Bathula	Post-Doc.	chinnuchem@gmail.com
*송충길	Post-Doc.	saintck@naver.com
*Koduru Mallikarjuna	Post-Doc.	mallikar999@gmail.com
*Mohammed Iqbal A.K.	Post-Doc.	iqbal.khazi@gmail.com
Umesha Kundapur	Post-Doc.	umeshacharkota@gmail.com
Bebi Hambirrao Patil	Post-Doc.	patilbebi@yahoo.com

## 제68차 이사회

일시: 2015. 1. 14 (수) 오후 4:00

장소: 대전 유성구 도룡동 연구개발특구진흥재단 비전룸1

참석: 김환규, 박현범, 김경근, 서필준, 구은혜

위임: 이희우, 정영호, 김은경, 김종승, 이재준, 정대홍, 김동원, 문용환, 송필순, 윤민중, 이재성, 이춘환, 김용록, 황광진, 백진욱, 안태규, 유영민, 정광환, 인수일, 임찬

### 보고사항

#### 1. 2015년 사업계획

	행사명	일시 및 장소	비고
1월	신임 임원 및 운영위원 회의	2014. 1. 14(수) 연구개발특구진흥재단	
	위촉장 발송		
2월	RCP 3-4 호 발간		
3월	광과학세계 52 호 발간		
	RCP 4-1 호 발간		
4월	광생물학 콜로키움	2015. 4. 28(화) 전남대학교	전남대 김정일 교수 주관
	상임이사회 및 이사회		
6월	광과학세계 53 호 발간		
	RCP 4-2 호 발간		
	ICP2015	2015. 6. 28(일)~7.3(금), 제주국제컨벤션센터	
7월	광재료학 콜로키움		이화여대 유영민 교수 주관
8월	광과학 아카데미	2015. 8. 24(월) 이화여자대학교	인하대 이완인 교수, 극동대 최창식 교수 주관
	정기학술대회	2015. 8. 25(화)~8. 26(수), 이화여자대학교	
	2015 유럽광생물학술대회	2015. 08. 31(월)~9. 4(수) Aveiro, Portugal	ESP-KSP 공동으로 한세션을 운영, 제주대 송필순 교수님 발표예정
9월	RCP 4-3 호 발간		
	광과학세계 54 호 발간		
11월	광화학 콜로키움		영남대 조대원 교수 주관
12월	신·구 임원진 인수인계식	2014. 12.	
	송년회	2014. 12.	
	광과학세계 55 호 발간		
	RCP 4-4 호 발간		

#### 2. 현재까지 진행상황

가. 2015년도 임원, 운영위원, 상임이사, 이사 구성 완료

나. 사무서장의 승인에 의해 법인으로 보는 단체 등록

①사업자번호: 318-82-60832

②전자세금계산서, 전자계산서 발급가능

다. 2015년 연회비 납부

①10명

②연회비 관련 안내 예정(이메일)

라. 정기 학술대회

①개최규모: 150명~200명.



- ②일시: 8월 24~26일, 첫날(24일)은 광화학 아카데미, 장소: 이화여자대학교
- ③주최: 한국유기태양전지학회와 공동으로 추진
- ④운영위원장, 분야별 학술위원장의 초청연사 추천(5~6명) 예정
- ⑤Tetsuro Majima(일본 오사카대학교) 교수 기조강연 및 공로상 예정
- ⑥작년과 동일하게 학술대회 등록비에 연회비를 포함하여 받는 것으로 진행

**마. ICP2015**

- ①일시: 2015년 6월 28일(일)~7월 3일(금)
- ②장소: 제주 컨벤션센터
- ③홈페이지 구축: <http://www.icp2015.org/>
- ④조직책임자: 서강대학교 윤경병 교수

**바. KJFP-2015**

- ①일시 및 장소: 2015년 6월 26일(금)~6월 28일(일), 제주 빠레브호텔
- ②초청연사 명단(붙임3)
- ③홈페이지 구축: <http://photos.or.kr/kjfp-2015/>
- ④조직책임자: 고려대학교 김환규 교수
- ⑤등록비: 일반 25만원, 학생 15만원  
<등록비에 포함된 부분>  
-26일(금): Welcome Reception  
-27일(토): Lunch, Banquet, Excursion(투어는 일반은 무료, 그 외는 4만원 추가)  
-28일(일): Lunch
- ⑥초록 및 예약 접수: 6월 5일까지
- ⑦일본, 한국측 기조강연, 초청강연자 별도 연사비 지급 없음, 등록비로 자체경비 총당 후 나머지는 학회 수익금으로 처리
- ⑧ICP2015 & IUPAC Symposium on Photochemistry 연계해서 개최 (단 한국 측 참가자 50명 요청)

**사. 분야별 콜로키움**

- ①광생물학 콜로키움: 전남대학교 김정일 교수 주관, 4월 28일 개최
- ②광재료학 콜로키움: 이화여자대학교 유명민 교수 주관, 7월 15일 개최 예정
- ③광화학 콜로키움: 영남대학교 조대원 교수 주관, 11월 중 개최 예정.

**아. 광과학세계**

- ①기존 년 3회 발간에서 년4회 발간으로 복원(4/8/12월 발간→3/6/9/12월 발간)
- ②52호(2015년 3월호) 발간완료: 광과학 동향: 1편, 재미있는 총설: 2편, 연구실 소개: 1편, 업체광고: 2편
- ③광고수주 현황

광고 기재	광고 처	금액
2015-1호 52호(3월)	고려대 김환규 교수 연구실	2,000,000
2015-1호 52호(3월)	플러스특허국제법률사무소	1,000,000
2015-1호 52호(3월)	ChemOptics㈜	2,000,000
2015-2호 53호(6월)	윤경병 교수 사업단	3,000,000
2015-2호 53호(6월)	대주전자재료㈜	2,000,000
2015-2호 53호(6월)	한양대 김종만 교수 연구실	2,000,000
2015-2호 53호(6월)	라보텍㈜	500,000
2015-4호 55호(12월)	이화여자대학교 윤주영 교수 연구실	2,000,000
광고예정 및 유치진행 중	성균관대학교 박남규 교수 연구실	2,000,000
	경희대학교 임상혁 교수 연구실	2,000,000
	상보㈜	2,000,000
	한국화학연구원 석상일 박사	2,000,000
	고려대학교 고재중 교수 연구실	2,000,000
<b>합 계</b>		<b>24,500,000</b>

**자. RCP**

- ①3-4호(2014년 12월호) 원고 9편 발간완료
- ②4-1(2015년 3월호) 원고 7편 발간완료

**의결 및 토의사항****1. 안건****가. 학회 규정 수정**

- ① 기존: 부회장 5인 이내 -> 변경: 부회장 5인~10인으로 변경 승인
- ② 분야확장: 광촉매-차세대 태양전지-인공광합성(광에너지) 대한 건은 정기총회에서 토의 및 결정

**나. 학회 사무실 이전 관련**

- ① 현재 입주한 연구개발특구진흥재단과의 임대차 계약 종료(2015년 5월 17일)
- ② TBC(대덕테크비즈센터/미래부 건물)로의 이전과 이전으로 인한 추가 보증금을 기금에서 사용 승인(11,569,500원)
- ③ 올 상반기내로 TBC 이전하여 인센티브를 받아 1년간은 임대료와 보증금을 5:5의 비율로 진행  
※ TBC의 기본 임대료와 보증금의 비율은 8:2이며, 상반기내로 입주할 경우에 한하여 5:5로 1년간 진행가능

구분	호실	전용면적(m <sup>2</sup> )	공용면적(m <sup>2</sup> )	임대면적(m <sup>2</sup> )	면적당 임대료(원/m <sup>2</sup> )	보증금	월 임대료	월 관리비
재단 5:5	307호	32.4	24.3	56.7	5,128	14,538,000	162,980	실비 부과
TBC 5:5	802-2호	39.7	48.8	88.5	5,900	26,107,500	261,070	
TBC 8:2	802-2호	39.7	48.8	88.5	5,900	10,443,000	417,720	



## 임원, 운영위원 및 상임이사회 회의

일시: 2015. 6. 28 (일) 오후 1:20

장소: 제주 Bareve Hotel, Birch Hall (1F)

참석: 안태규, 인수일, 김경곤, 김용록, 김환규, 조대원, 손호진, 백진욱, 박태호, 이재성, 김종학, 김윤희, 구은혜

위임: 이기환, 이재준, 고민재, 최창식, 박원범

### 보고사항

#### 1. 2015년 사업계획

	행사명	일시 및 장소	비고
1 월	신임 임원 및 운영위원 회의	2014. 1. 14(수) 연구개발특구진흥재단	
	위촉장 발송		
2 월	RCP 3-4 호 발간		
3 월	광과학세계 52 호 발간		
	RCP 4-1 호 발간		
4 월	광생물학 콜로키움	2015. 4. 28(화) 전남대학교	전남대 김정일 교수 주관
	상임이사회 및 이사회		
6 월	광과학세계 53 호 발간		
	RCP 4-2 호 발간		
	KJFP 2015	2015. 6. 26(금)~6.28(일), 제주 빠레브 호텔	
	ICP 2015	2015. 6. 28(일)~7.3(금), 제주국제컨벤션센터	
7 월	광재료학 콜로키움	2015. 7. 15(수) 이화여자대학교	이화여대 유영민 교수 주관
8 월	광과학 아카데미	2015. 8. 24(월) 이화여자대학교	인하대 이완인 교수, 극동대 최창식 교수 주관
	정기학술대회	2015. 8. 25(화)~8. 26(수), 이화여자대학교	
	2015 유럽광생물학술대회	2015. 08. 31(월)~9. 4(수) Aveiro, Portugal	ESP-KSP 공동으로 한세션을 운영, 제주대 송필순 교수님 발표예정
9 월	RCP 4-3 호 발간		
	광과학세계 54 호 발간		
11 월	광화학 콜로키움		영남대 조대원 교수 주관
12 월	신·구 임원진 인수인계식	2014. 12.	
	송년회	2014. 12.	
	광과학세계 55 호 발간		
	RCP 4-4 호 발간		

## 2. 보고 사항

### 가. 지난 이사회 안건

- ①기존: 부회장 5인 이내 -> 변경: 부회장 5인~10인으로 변경 승인

### 나. 사무서장의 승인에 의해 법인으로 보는 단체 등록

- ①사업자번호: 318-82-60832
- ②전자세금계산서, 전자계산서 발급가능

### 다. 사무실 이전

- ①6월 17일 이전: 대전광역시 도룡동 386-2번지 대덕테크비즈센터(TBC) 8층 802-2호
- ②보증금 인상분은 기금에서 사용승인(11,569,500원)

### 라. 정기 학술대회

- ①개최규모: 150명~200명.
- ②일시: 8월 24~26일, 첫날(24일)은 광과학 아카데미, 장소: 이화여자대학교
- ③주최: 한국유기태양전지학회와 공동으로 추진
- ④운영위원장, 분야별 학술위원장의 초청연사 추천(5~6명) 예정
- ⑤Tetsuro Majima(일본 오사카대학교) 교수 기조강연 및 공로상 예정
- ⑥작년과 동일하게 학술대회 등록비에 연회비를 포함하여 받는 것으로 진행

### 마. ICP2015

- ①일시: 2015년 6월 28일(일)~7월 3일(금)
- ②장소: 제주 컨벤션센터
- ③홈페이지 구축: <http://www.icp2015.org/>
- ④조직책임자: 서강대학교 윤경병 교수

### 바. KJFP-2015

- ①일시: 2015년 6월 26일(금)~6월 28일(일),
- ②장소: 제주 빠레브호텔
- ③홈페이지 구축: <http://photos.or.kr/kjfp-2015/>
- ④조직책임자: 고려대학교 김환규 교수

### 사. 분야별 콜로키움

- ①광생물학 콜로키움: 전남대학교 김정일 교수 주관, 4월 28일 개최
- ②광재료학 콜로키움: 이화여자대학교 유영민 교수 주관, 7월 15일 개최 예정
- ③광화학 콜로키움: 영남대학교 조대원 교수 주관, 11월 중 개최 예정

### 아. 광과학세계

- ①기존 년 3회 발간에서 년4회 발간으로 복원(4/8/12월 발간→3/6/9/12월 발간)
- ②52호(2015년 3월호) 발간완료:
  - 광과학 동향: 1편, 재미있는 총설: 2편, 연구실 소개: 1편, 업체광고: 2편
- ③53호(2015년 6월호) 발간예정:
  - 광과학 동향: 2편, 재미있는 총설: 2편, 연구실 소개: 1편, 업체광고: 2편
- ④광고수주 현황

광고 기재	광고 처	금액
2015-1호 52호(3월)	고려대 김환규 교수 연구실	2,000,000
2015-1호 52호(3월)	플러스특허국제법률사무소	1,000,000
2015-1호 52호(3월)	ChemOptics(주)	2,000,000
2015-2호 53호(6월)	대주전자재료(주)	2,000,000
2015-2호 53호(6월)	한양대 김종만 교수 연구실	2,000,000
2015-2호 53호(6월)	라보텍(주)	500,000
2015-2호 54호(9월)	윤경병 교수 사업단	3,000,000
2015-2호 54호(9월)	이재성 교수 연구실	미정
2015-2호 54호(9월)	김중학 교수 연구실	미정

2015-4호 55호(12월)	이화여자대학교 윤주영 교수 연구실	2,000,000
광고예정 및 유치진행 중	성균관대학교 박남규 교수 연구실	2,000,000
	경희대학교 임상혁 교수 연구실	2,000,000
	한국화학연구원 석상일 박사	2,000,000

**자. RCP**

- ①3-4호(2014년 12월호): 원고 9편 발간완료, 4-1호(2015년 3월호): 원고 7편 발간완료
- ②4-2호(2015년 6월호): 현재까지는 5편 투고, 1편 더 투고예정으로 총 6편으로 발간 예정
- ③RCP의 투고 활성화를 위해 일본과 인도 쪽의 International Advisory Board Members로의 추가 및 적극적인 홍보 필요
- ④RCP 에디터로 인도 과학자 한명을 INVITE 하기로 하였고 좋은 사람 있으면 추천받고 있음

**차. 연회비**

- ①KJFP 2015, 정기학술대회에서 등록비와 함께 받을 예정
- ②현재까지 납부한 인원: 26명

**의결 및 토의사항****1. 안건****가. 학회 회칙 개정**

- ①기존분야 외 추가에 대한 논의는 추후 총회(이사회)에서 토의  
(광촉매-인공광합성(광에너지)-차세대 태양전지)
- ②기타 회칙 개정: 현재의 실정에 맞지 않는 회칙들은 김경곤 운영위원장이,  
추후 의결안건으로 올릴 예정





# 2015년 예산안 및 2014년 예결산

■ 2014년도 회계 결산(2014.01.01.~2014.12.31)

세입부				세출부			
항목		예산	실적	항목		예산	실적
회비	1. 정회원	1,000,000	750,000	행사비	1. 광과학회 학술대회 및 총회	10,000,000	19,547,624
	2. 온라인정회원 및 학생회원	700,000	480,000		2. 콜로키움	1,500,000	7,128,010
	3. 임원회비	6,000,000	5,040,000		소계	11,500,000	26,675,634
	4. 상임이사, 이사 회비	6,000,000	3,470,000	사무실	1. 사무실 임대보증금	2,000,000	
	5. 단체회원	300,000	100,000		2. 사무실가구, 집기 구입비	1,000,000	291,390
	6. 종신회원		210,915		소계	1,000,000	291,390
	소계	14,000,000	10,050,915	간행비	1. 학회 초록	550,000	
등록비	1. 학술대회	10,000,000	18,957,680		2. 광과학세계	1,650,000	2,350,000
	2. 콜로키움		5,920,750		3. 봉투, 위촉장	600,000	252,180
	소계	10,000,000	24,878,430		4. RCP	2,200,000	1,150,000
보조금	1. 사업단 공동주최 지원금	2,000,000	0	회의비	소계	5,000,000	3,752,180
	2. 학술대회 보조금	2,000,000	0		1. 이사회	1,000,000	224,860
	3. 콜로키움 보조금		5,757,000		2. 운영위원회	600,000	46,160
	4. KJFP 기여금	1,000,000	2,000,000	3. 각 위원회	600,000	90,500	
	5. 찬조금		0	소계	2,200,000	361,520	
	소계	5,000,000	7,757,000	운영비	1. 인건비	18,000,000	19,000,000
기타	1. 광고료	16,000,000	12,000,000		2. 금융수수료	1,200,000	582,535
	2. 기기전시	2,000,000	500,000		3. 전화, 통신비		792,190
	3. 접수입				4. 교통비	1,200,000	159,400
	4. 은행이자		9,408		5. 우편물, 택배비		534,930
	소계	18,000,000	12,509,408		6. 학회정보화	300,000	464,350
			7. 사무실임대료, 관리비		5,000,000	4,142,800	
			8. 잡손실		100,000	1,240	
			9. 광고수수비 혜택		1,000,000		
			10. 대전과총가입비		300,000	300,000	
			소계	27,100,000	25,977,445		
전기이월금		2,143,611	2,143,611	세출총액		46,800,000	57,058,169
세입총계		49,143,611	57,339,364	예상이월금(잔액)		2,343,611	281,195

■ 2015년도 세입 및 세출 예산표

세입부			세출부		
항목	예산	실적	항목	예산	실적
회비	1. 정회원	1,000,000	행사비	1. 광과학회 학술대회 및 총회	10,000,000
	2. 온라인정회원 및 학생회원	700,000		2. 콜로키움	3,500,000
	3. 임원회비	6,000,000		소계	13,500,000
	4. 상임이사, 이사 회비	6,000,000	사무실	1. 사무실 임대보증금	3,000,000
	5. 단체회원	300,000		2. 사무실가구, 집기 구입비	1,000,000
	6. 종신회원	100,000	소계	4,000,000	
	소계	14,100,000	간행비	1. 학회 초록	650,000
등록비	1. 학술대회	10,000,000		2. 광과학세계	2,600,000
	2. 콜로키움	3,000,000		3. 봉투, 위촉장	400,000
	소계	13,000,000		4. RCP	
보조금	1. 사업단 공동주최 지원금	2,000,000	소계	3,650,000	
	2. 학술대회 보조금	2,000,000	회의비	1. 이사회	500,000
	3. 콜로키움 보조금			2. 운영위원회	300,000
	4. KJFP 기여금	2,000,000		3. 각 위원회	300,000
	5. ICP 기여금	30,000,000	소계	1,100,000	
	5. 찬조금		운영비	1. 인건비	18,000,000
	소계	36,000,000		2. 금융수수료	1,500,000
기타	1. 광고료	20,000,000		3. 전화, 통신비	
	2. 기기전시	2,000,000		4. 교통비	1,200,000
	3. 잡수입			5. 우편물, 택배비	
	4. 은행이자	10,000		6. 학회정보화	300,000
	소계	22,010,000		7. 사무실임대료, 관리비	5,000,000
전기이월금	281,195	8. 잡손실		100,000	
세입총계	85,391,195	9. 광고수주비 혜택		1,000,000	
		10. 대전과총가입비		300,000	
		11. 기장 수수료		1,815,000	
		12. 세금		1,800,000	
		13 기타		500,000	
		소계	31,515,000		
		세출총액	53,765,000		
		예상이월금(잔액)	31,626,195		

\*학회 사정에 따라서 다소 변경될 수 있습니다.

■ 발전 기금 관리 및 현황 (2015. 1. 1 기준)

총계	67,699,208원	
학회발전 기금	43,679,431원	14,538,000원
	하나은행, 660-910174-80211	사무실 임대 보증금
종신회비 기금	9,481,777원 (하나은행, 660-910174-79211)	

❖ 2015년 한국광화학회 임원

<p>• 회장 김환규 (고려대 신소재화학과)</p>	
<p>• 고문 송필순 (제주대 생명공학부) 정진 (서울대 응용생물화학부) 윤민중 (충남대 화학생화학부) 홍영남 (서울대학교 생명과학부) 김인수 (경북대 생명공학부) 윤웅찬 (부산대 화학과) 한태룡 (경희대 유전공학부) 채규호 (전남대 응용화학공학부) 이진범 (동의대 분자생물학과) 윤경병 (서강대 화학과) 이재성 (포항공대 화학화공과) 이춘환 (부산대 분자생물학과)</p> <p>• 부회장 (*수석) *박훤범 (수원대 생명공학과) 이완인 (인하대 화학과) 김용록 (연세대 화학과) 신은주 (순천대 기초의화학부) 박승민 (경희대 화학과) 강영수 (서강대 화학과)</p> <p>• 감사 최원용 (포항공대 환경공학부) 이기환 (공주대 화학과)</p>	<p>• 기금위원장 황광진 (홍익대 바이오화학공학과)</p> <p>• 학술위원장 (광화학) 주태하 (포항공대 화학과) (광생물) 김정일 (전남대 응용생물공학부) (광재료) 김종만 (한양대 화학공학과) (광촉매) 백진욱 (한국화학연구원) (태양광) 김종학 (연세대 화학공학과) (광과학스쿨) 최창식 (극동대 한약발효학과)</p> <p>• 광과학세계 편집위원장 고민재 (한국과학기술연구원)</p> <p>• RCP 편집위원장 김용록 (연세대 화학과)</p> <p>• 국제협력위원장 윤주영 (이화여대 화학과) 김상규 (KAIST 화학과) 김윤희 (경상대 화학과)</p> <p>• 운영위원장 김경곤 (이화여대 분자생명과)</p>

❖ 2015년 한국광화학회 운영위원

<p>• 운영위원장 김경곤 (이화여대 분자생명과)</p>	
<p>• 총무기획 운영위원 부성희 (경희대 유전공학과)</p> <p>• 학술운영위원 (광화학) 안태규 (성균관대 에너지과학과) (광화학) 유영민 (경희대 정보전자신소재공학과) (광생물) 배기호 (연세대 생명과학기술학부) (광생물) 정광환 (서강대 생명과학과) (광재료) 황성주 (이화여대 화학과) (광재료) 서민철 (경희대 정보디스플레이학과) (광촉매) 박현웅 (경북대 에너지공학부) (광촉매) 인수일 (DGIST 에너지시스템공학과) (태양광) 임상혁 (경희대 화학공학과) (태양광) 정현석 (성균관대 신소재공학부) (광과학스쿨) 조대원(영남대 화학생화학부)</p>	<p>• RCP 편집운영위원 박현웅 (경북대 에너지공학부)</p> <p>• 국제협력위원 박태호 (포항공대 화학공학과)</p> <p>• 국제운영위원 이정현 (대주전자재료(주))</p> <p>• 광과학세계 편집운영위원 (광화학) 김정호 (인하대 화학과) (광생물) 서필준 (전북대 화학과) (광재료) 손호진 (고려대 신소재화학부) (광촉매) 이재상 (고려대 건축사회환경공학부) (태양광) 김진영 (한국과학기술연구원)</p>

◆ 2015년 한국광과학회 상임이사

<p>강만구 (한국전자통신연구원)                  강상욱 (고려대 신소재화학과)                  강정구 (KAIST 신소재공학과)                  권오식 (플러스국제특허법률사무소)                  김동호 (연세대 화학과)                  김은경 (연세대 화공생명공학과)                  김종승 (고려대 화학과)                  문상진 (한국화학연구원)                  박남규 (성균관대 화학공학과)                  박수영 (서울대 재료공학과)                  박승민 (경희대 화학과)                  박찬범 (KAIST 신소재공학과)                  박충모 (서울대 화학과)</p>	<p>석상일 (한국화학연구원)                  이광섭 (한남대 신소재공학과)                  이재준 (건국대 응용화학과)                  이형중 (Chemoptics)                  이희우 (서강대 화공생명공학과)                  임종찬 (대주전자재료)                  임 찬 (건국대 화학과)                  정대홍 (서울대 화학교육과)                  장수익 (충북대 물리생화학과)                  정영식 (한국화학연구원)                  정영호 (기초과학지원연구원)                  조대원 (건국대 태양전지연구소)                  최길주 (KAIST 생명과학과)                  허남희 (서강대 화학과)</p>
---	---

◆ 2015년 한국광과학회 이사

<p>강태종 (대구대 화학응용화학과)                  김동욱 (한국화학연구원)                  김동원 (한양대 화학공학과)                  김민균 (서울대 농생명공학부)                  김정묵 (전남대 식물생명공학부)                  문용환 (부산대 생명과학부)                  민병권 (KIST 청정에너지센터)                  백경희 (고려대 생명과학부)                  백남섭 (한국전자통신연구원)                  안성수 (가천대 바이오나노학과)</p>	<p>오상호 (연대의대 피부과)                  이상열 (경상대 생명과학부)                  장세복 (부산대 분자생물학과)                  전용석 (UNIST 친환경에너지공학부)                  전현식 (경남과기대 한약자원학부)                  정대성 (중앙대 화학공학과)                  주명중 (고려대 신소재화학과)                  최승주 (국방과학연구소)                  하정현 (한국기초지원연구원)                  허윤강 (충남대 식물분자생물학)                  허정석 (충남대 화학과)</p>
---	--

❖ 2015년 RCP(Rapid Communication in Photoscience) 편집위원장

• RCP 총괄 편집위원장

김용록 (연세대 화학과)

• 편집위원장

(광화학) 박승민 (경희대 화학과)  
 (광생물) 최길주 (KAIST 생명과학과)  
 (광재료) 이완인 (인하대 화학과)  
 (광촉매) 최원용 (포항공대 환경공학과)  
 (태양광) 박남규 (성균관대 화학공학과)

2015년 광과학세계 편집위원

• 광과학세계 편집위원장

고민재 (한국과학기술연구원)

• 편집위원

(광화학) 김정호 (인하대 화학과)  
 (광생물) 서필준 (전북대 화학과)  
 (광재료) 손호진 (고려대 신소재화학과)  
 (광촉매) 이재상 (고려대 건축사회환경공학부)  
 (태양광) 김진영 (한국과학기술연구원)



**2015 Rapid Communication in Photoscience (RCP) 투고 안내**

**1. 논문범위(주제)**

photochemistry, photobiology, photomaterials, photocatalyst, photovoltaic materials and process, photoactive biomolecules, photoinduced electron (charge) and energy transfer, photomedicine, photographic chemistry, photomorphogenesis, photomovement, singlet oxygen in chemistry, biology, and medicine, photonics, quantum dot and nanophotonics, photoreception, photochromic materials and molecular switches, photosensitization, photosynthesis, phototechnology, spectroscopy, ultraviolet radiation effects, and vision.

**2. 투고방법**

가. 제출방법 : RCP 홈페이지(<http://www.rcp.or.kr>)를 통해 연중 상시 제출

나. 작성요령 : Feature Article, Review Article 또는 Highlight 및 Communication

3 pages 이내(원칙: 2 pages) 논문 투고, 포맷은 RCP홈페이지에서 다운 가능하다.

다. 문의처 : 사무장 구은혜 (☎042-867-5007)

**3. 발간 및 투고 마감일**

발간호수 및 발간일	논문 투고 마감일 (예정)
RCP 4-1호 (3월 31일)	2015년 2월 20일(금)
RCP 4-2호 (6월 30일)	2015년 5월 22일(금)
RCP 4-3호 (9월 30일)	2015년 8월 21일(목)
RCP 4-4 호 (12월 31일)	2015년 11월 27일(금)



**2014 Rapid Communication in Photoscience (RCP) 투고 논문**

Volume 3, No.1 March 2014

**Review article**

- 1 Photoinduced Electron- and Energy-Transfer Processes in Supramolecules using Imide Compounds  
Mamoru Fujitsuka\* and Tetsuro Majima\*

**Communications**

- 16 Fabrication and Characterization of Dye-sensitized Solar Cells based on Anodic Titanium Oxide Nanotube Arrays Sensitized with Heteroleptic Ruthenium Dyes  
Chien-Hung Shen, Yu-Cheng Chang, Po-Ting Wu and Eric Wei-Guang Diao\*
- 20 Sol-Gel Derived Nitrogen-Doped TiO<sub>2</sub> Photoanodes for Highly Efficient Dye-Sensitized Solar Cells  
Sang Gyun Kim<sup>§</sup>, Myung Jong Ju<sup>§</sup>, In Taek Choi, Won Seok Choi, and Hwan Kyu Kim\*
- 25 Temperature determines post-harvest quality of spinach leaves after gamma irradiation  
Jin-Hong Kim\*, Ji Hong Kim, Min Hee Lee, Jin Kyu Kim, and Byung Yeoup Chung\*

**Communications**

- 28 Antisense expression of a staygreen gene (SGR) delays leaf senescence in creeping bentgrass  
Ok-Jin Hwang<sup>1</sup>, Yun-Jeong Han<sup>1</sup>, Nam-Chon Paek<sup>2</sup>, and Jeong-Il Kim<sup>1,\*</sup>
- 32 Fabrication of Electrochromic Devices Using Double Layer Conducting Polymers for Infrared Transmittance Control  
Jin Kyu Kim<sup>1</sup>, Jong Kwan Koh<sup>1</sup>, Bumsoo Kim<sup>2</sup>, Seok wooJeon<sup>2</sup>, Joonmo Ahn<sup>3</sup>, Jong Hak Kim<sup>1,\*</sup>
- 35 NiFeOx co-catalyzed BiVO<sub>4</sub> photoanode for improved photoelectrochemical water splitting  
Jin Hyun Kim<sup>a</sup>, HyunJoon Kang<sup>a</sup>, Ganesan Magesh<sup>b</sup> and Jae Sung Lee<sup>b,\*</sup>
- 38 On-Off Type Mechanofluorochromism of a Novel Fluorescent Amorphous Molecular Material, *N*-{4-[Bis(4-methylphenyl)amino]benzylidene}aniline  
Satoshi Manabe, Eisuke Nagata and Hideyuki Nakano\*

**Review article**

- 42 Molecular Wire World Having Metal Complexes

Chang-Shik Choi

**Communications**

- 48 Coculture of Schwann Cells and Neuronal Cells for Myelination in Rat

Ji-Young Kim,<sup>1</sup> Chang-Shik Choi,<sup>2\*</sup> and Seong-Karp Hong<sup>3\*</sup>

- 50 Rotaxane Based on Bis-Porphyrin Threaded onto Bis-Viologen Macrocycle

Eun Ju Shin

- 53 Shade Avoidance and the Regulation of Leaf Inclination in Rice

Juhee Shin<sup>1</sup>, and Phun Bum Park<sup>1,\*</sup>

- 56 SWNTs-catalyzed solar hydrogen production

Young Kwang Kim<sup>§</sup>, Gulzar Khan<sup>§</sup>, Hye Won Jeong<sup>§§</sup>, and Hyunwoong Park<sup>§§\*</sup>

- 59 Synthesis and Spectroscopic Analysis of *Trans*-A<sub>2</sub>B<sub>2</sub> Metallo-Porphyrin Derivatives as Heterojunction Modulator for Organic Solar Cell

Yea-sel Jeon and Kwang-Jin Hwang\*

**Communications**

- 61 D-A-D type molecules based on dibenzophosphole-chalcogenides and triphenylamine moieties  
Shunsuke Iijima, Keichi Hori, Takuya Nakashima and Tsuyoshi Kawai\*
- 64 Deuterium-labeling Toward Robust Function of Organic Molecules: Enhanced Photo-stability of Partially Deuterated 1', 3', 3'-Trimethyl-6-nitrospiro[2H-1-benzopyran-2, 2'-indoline]  
Yuji Kawanishi <sup>†\*</sup>, Kyoko Inoue<sup>†</sup>, Shin-ichi Ohta<sup>†</sup>, and Akira Miyazawa <sup>†</sup>
- 67 DNA Length Dependent Photocurrent of Diketopyrrolopyrrole Aggregates Constructed with DNA  
Mitsunobu Nakamura,\* Koji Tsuto, Tadao Takada, and Kazushige Yamana
- 70 Photocatalytic Oxidation of 2-Mercaptoethanol to Disulfide using Sb(V)-, P(V)-, and Ge(IV)-porphyrin Complexes  
Tsutomu Shiragami\*, Dai Onitsuka, Jin Matsumoto and Masahide Yasuda
- 73 Photochemical synthesis of diphenylphenanthrenes, and the photophysical and photochemical properties studied by emission and transient absorption measurements  
Minoru Yamaji,<sup>§\*</sup> Yuuma Hakoda,<sup>†</sup> Ami Horimoto<sup>†</sup> and Hideki Okamoto<sup>†\*</sup>
- 76 Preparation of fluorescent nucleic acids generating unique emission by primer extension reaction using pyrene-labeled deoxyuridine triphosphate derivatives  
Tadao Takada,\* Yosuke Tanimizu, Mitsunobu Nakamura, and Kazushige Yamana\*
- 79 Regulation of DNzyme function by hypoxic irradiation that induces one-electron reduction of 2-oxoalkyl group on thymine base  
Hiroshi Kanezaki, Sei-ichi Nishimoto and Kazuhito Tanabe\*
- 81 Relaxation Process of the Photoexcited State and Singlet Oxygen Generating Activity of Water-soluble meso-Phenanthrylporphyrin in a DNA Microenvironment  
Kazutaka Hirakawa,<sup>\*,§,†</sup> Yusuke Ito,<sup>§</sup> Takashi Yamada,<sup>§</sup> and Shigetoshi Okazaki<sup>†</sup>
- 85 Solvent effect on the excited state of stilbene dendrimers bearing phenylacetylene groups  
Yoshinobu Nishimura<sup>\*</sup> and Tatsuo Arai<sup>\*</sup>



## 회원 동정

- 한국과학기술연구원 (KIST) 고민재 박사  
Scientific Reports 편집위원 선임 (2015.6)



## 관련 학술회의 안내

- 한국광과학회 제1회 광과학 아카데미
  - 일시: 2015년 7월 24일
  - 장소: 이화여자대학교
  - 홈페이지: <http://photos.or.kr>
- 한국광과학회-한국유기태양전지학회 공동 학술대회
  - 일시: 2015년 7월 25일~26일
  - 장소: 이화여자대학교
  - 홈페이지: <http://photos.or.kr>
- European Society for Photobiology 2015 Congress
  - 일시: 2015년 8월 31일~9월 4일
  - 장소: Aveiro (Portugal)
  - 홈페이지: <http://aveiro2015.photobiology.eu/programme>
- 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems
  - 일시: 2015년 9월 27일~10월 3일
  - 장소: Dubrovnik, Croatia
  - 홈페이지: <http://www.dubrovnik2015.sdewes.org/>



**학회  
연회비  
안내**

- **온라인 납부(신용카드):** 학회 홈페이지(<http://photos.or.kr>)에서 회원가입 후 로그인, 회원안내>회비 온라인 결제
- **계좌이체:** 학회 홈페이지(<http://photos.or.kr>)에서 회원가입 후, 아래의 통장으로 계좌이체
  - 하나은행, 670-910009-61704, 예금주: 한국광과학회
  - ※ 연회비에 대해서 전자계산서의 발급이 가능합니다. 필요하신 경우에는 납부 후, 학회메일([photos@photos.or.kr](mailto:photos@photos.or.kr))로 사업자등록증을 송부바랍니다.

회 장	100만원	부 회 장	50만원
상 임 이 사	20만원	이 사	10만원
운 영 위 원	5만원	정 회 원	5만원
온 라인 정 회 원	2만원	학 생	2만원
단 체 회 원	10만원		

\* 2015년까지 온라인정회원은 2만원으로 한시적 할인

**연회비  
납부자**

직 위	성 함	금 액
임원	강영수	50만원
임원	김경곤	20만원
정회원	김동하	5만원
상임이사	김동호	20만원
임원	김윤희	20만원
임원	김정일	20만원
임원	김종학	20만원
임원	김환규	100만원
임원	박승민	50만원
운영위원	박태호	5만원
임원	백진욱	17만원
운영위원	손호진	5만원
임원	신은주	50만원
운영위원	안태규	5만원
운영위원	유영민	5만원
임원	윤경병	20만원
상임이사	이광섭	20만원
임원	이기환	20만원
운영위원	이재상	5만원
임원	이재성	20만원
운영위원	임상혁	5만원
운영위원	정광환	5만원
상임이사	정영식	20만원
상임이사	조대원	5만원
상임이사	최길주	20만원
임원	최원용	20만원
운영위원	황성주	5만원

2015년 6월 30일까지 납부기준.  
 종신회원은 연회비에서 3만원 차감됩니다.  
 순서는 가나다순.

*Thank  
You*

## 소식지 투고 안내

본 학회는 소식지 '광과학세계'를 연4회 발간하고 있습니다.  
많은 투고 부탁드립니다. 광과학세계를 주변에 전하고 싶으신 분들은  
주소 및 이메일 주소를 학회 사무실로 알려주시기 바랍니다.

### 투고 내용

1. 광과학과 관련된 최신의 연구동향
2. 관련 학술대회 : 국내외 광과학과 관련된 학술대회
2. 회원 동정: 한국광과학회 회원의 축하할만한 소식
3. 독자의 소리: 학회 발전 및 개선 방안 등에 관한 내용
4. 연구센터, 연구단, 연구실 소개

### 광고모집 안내

광고 종류	광고 비용
전면광고 / 앞표지(칼라)	3,000,000원
전면광고 / 뒤표지(칼라)	2,000,000원
전면광고 / 목차 앞(칼라)	2,000,000원
양면광고 / 앞뒤쪽 내지 2-3p(칼라)	1,500,000원
신업체 신기술 소개(칼라)	2,000,000원
우수 연구단(연구실) 소개(흑백)	2,000,000원
내지 광고(흑백)	페이지에 따라 가격상이

\* 비 고: 본 게재료는 1회당 비용입니다.

\* 사이즈: 모든 광고의 최소 사이즈는 220mm x 307mm  
입니다.

\* 원고접수처: 원고는 이메일을 통해서 받고 있습니다.  
(photos@photos.or.kr)

\* 전자세금계산서: 필요하신 경우에는 광고료를 납부 후,  
학회메일(photos@photos.or.kr)로 사업자등록증을  
송부바랍니다.

### 학회 연락처

#### The Korean society of Photoscience

802-2, Daedeuk Tech-Biz Center(TBC),  
593 beon-gil, Daedeokdae-ro,  
Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea  
Tel:+82-42-867-5007, Fax:+82-42-867-5008  
E-mail: photos@photos.or.kr  
homepage: <http://www.photos.or.kr>

#### 한국광과학회

대전광역시 유성구 대덕대로 593 대덕테크비즈센터(TBC)  
802-2호 (우)305-340  
Tel: 042-867-5007, Fax: 042-867-5008  
E-mail: photos@photos.or.kr  
homepage: <http://www.photos.or.kr>

