

# 유기 반도체 태양전지

유기 반도체 태양전지의 산업적인 역할과 실용화 과제

| 윤제정, 동향정보분석팀



미래선도기술 이슈분석보고서는 혁신형 중소기업 정보분석 지원사업의 일환으로 작성된 보고서로서, 유망 기술에 대한 이슈분석을 통해 국내 기업들이 자사에 적합한 사업아이템 발굴 기회를 극대화 하는데 목적이 있다. 이슈 분석 대상은 글로벌 동향 브리핑(GTB) 사업에서 축적한 약 10년간의 글로벌 모니터링 정보를 키워드 빈도분석 후 수요 조사를 통해 정하였다. 또한 국내외 연구개발동향, 산업동향 및 기술/실용화/과급효과 등의 측면에서의 이슈제기 및 분석을 해당분야 전문가와 공동으로 수행함으로써 수요자 중심의 보고서가 되도록 노력하였다.

## 2006 미래선도기술 이슈분석보고서

• 나노셀룰로오즈 보강 복합재료	• 광촉매 박막제조기술
• 차세대 하드디스크 HAMR	• 산업용 무선 필드버스
• 멀티페로익스(Multiferroics)	• P2P 네트워크
• 탄소나노튜브	• 센서네트워크 기술
• 휴대용 연료전지	• 온라인 게임
• 칩내장형 임베디드 기술	• 임베디드 기술
• 유전자 치료	• 심진 부동산소수점 연산기
• 열화학적 복합전환 공정	• 게임산업
• 자기 냉장고	• 나노소재를 이용한 전자소자
• 유기 반도체 태양전지	• 유기반도체(Organic Semiconductors)
• 충전기기용 나노절연재료	• 공기오염센서
• 무선 통신망간의 간섭	• 위성항법시스템 시험장(GATE)
• 이동통신-무선랜 통합망의 보안	• 위성항법시스템 소프트웨어 수신기
• 해외선진국 반도체장비 기술동향	• 광촉매의 성능 및 응용 기술 현황
• 동유럽의 VoIP 사업현황	• 해외 선진국의 DMB/DAB 기술동향
• 지능형 자동차에 사용되는 텔레매틱스 기술동향	• 신약개발을 위한 RNAi 제품 현황
• 주요 선진국의 냉동·공조 기술 현황	• 해외 선진국의 위성항법 시스템 기술 동향
• 영상진단기기 및 초음파영상진단기기 제품 현황	• 최근의 게임시장 동향
• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향	• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향

# Contents

<b>1</b>	<b>서론</b>	
	이슈 분석의 필요성	05
	이슈 분석의 범위	07
<b>2</b>	<b>본론</b>	
	유기반도체 태양전지	09
	국내외 연구개발 동향	11
<b>3</b>	<b>유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석</b>	
	이슈 제기	17
	에너지 시장에서 경쟁력 평가기준은 무엇인가?	18
	유기반도체 태양전지의 상업화에는 어떤 장점이 있는가?	19
	효율과 관련한 이슈들	20
	수명 이슈와 관련된 시장진입조건은 어떤가?	21
	가격 경쟁력은 있는가?	22
	기타 이슈들	26
	유기반도체 태양전지의 실용화 연구 등에 따른 파급효과는 무엇인가?	28
	제 3세대 태양전지란 무엇인가?	29
<b>4</b>	<b>결론</b>	30
	<b>참고 문헌</b>	32

---

# 서론

---

## 1

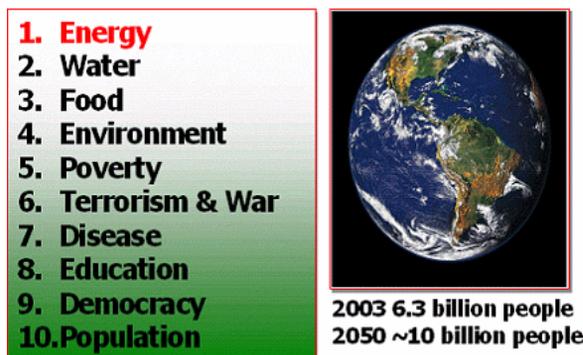
| 이슈 분석의 필요성

| 이슈 분석의 범위

# 1 서론

## | 이슈 분석의 필요성

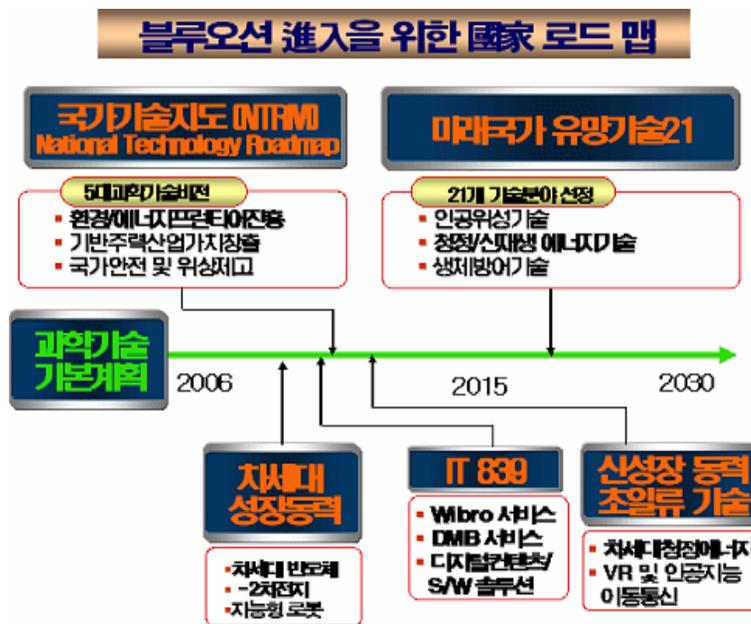
- 인류에 있어 미래의 에너지문제는 새로운 도전과 변혁의 강도 중 국운을 결정지을 만큼 중요한 문제임.
  - 최근 중동지역의 불안 및 석유자원고갈의 위기감 등이 형성시킨 고유가 시대와 교토 의정서의 기후변화 협약 발효, 지식의 보편화 시대를 맞아 에너지 수요의 절대적 증가, 신흥 BRICS 개도국들의 경제성장에 따른 폭발적인 에너지 수요등 기존의 에너지와 차원이 다른 청정무제한의 에너지가 요구되고 있으며 이러한 에너지의 근본적인 문제는 인구증가와 산업발전에 따른 문화생활영위에 있음을 알 수 있음.
- 그림 1과 같이 2005년 작고한 라이스대학의 스몰리교수(R.E.Smally, 1996년 노벨 화학상 수상)가 향후 50년간 인류의 10대 문제 중 첫 번째를 에너지문제로 분석함.
- 이러한 에너지 문제의 현실 및 대책과 방안들을 살펴보면, 우리나라 에너지 소모량의 2.3%( '04년 기준)만이 신재생에너지가 충당하고 있음. 그렇지만 2.3% 중 대부분이 폐기물처리나 바이오메스 등이어서 태양광 수소 연료전지 등의 연구개발이 시급함[1-3].
- 아래의 그림 2에 나타난 것과 같이 정부의 과학기술 로드맵(Road Map)으로 보면, 청정에너지원의 기술개발이 중요하게 다뤄짐을 알 수 있으나, 사실상 대부분이 태양열 및 태양광 주택 건설 등에 투자되고 있고 태양전지 원천기술 분야나 연구개발에 투자는 최근부터 임.



[그림 1] Humanity's Top 10 problems for next 50 years

자료: R. E. Smally 교수 강연자료

- 연간 35%의 급성장을 보이고 있는 전체적인 태양전지의 세계시장과 더불어 최근 OLED의 제조공정과 같이 대면적을 스�핀코팅(spin coating)법으로 쉽게 제작이 가능하고 유연한(flexible) 유기반도체 태양전지의 연구주류는 고효율 장수명에 있음.
- 고효율 달성을 위한 다각적인 연구노력으로 새로운 셀 디자인, 신물질 사용, 모폴로지 컨트롤, 물리적 현상의 이해 등을 통한 한계극복의 실마리가 풀리기 시작했음.
  - 예를 들어, 광전효과의 핵심인 엑시톤의 분리를 용이하게 할 수 있도록 P형과 N형 물질을 블렌딩(blending)하는 벌크헤테로접합 방식으로 계면의 면적을 획기적으로 증가시켜 효율을 대폭 증가시켰으며, 탠덤 셀(tandem Cell)등의 출현으로 실리콘 등의 무기반도체를 대신하는 유기반도체 태양전지가 고효율 저가격의 상용화 가능성이 크게 대두되고 있음.
  - 즉, 유기반도체 재료를 이용한 태양전지가 6%를 넘어서는 효율을 보이면서 상업화의 가능성에 바짝 접근하고 있으며, 이와 때를 같이하여 세계 각국에서 대규모 자금을 투입하여 집중 육성하고 있는 첨단 연구 분야로 상업화 가능성에 대한 이슈제기가 점차 활발해질 전망이다.

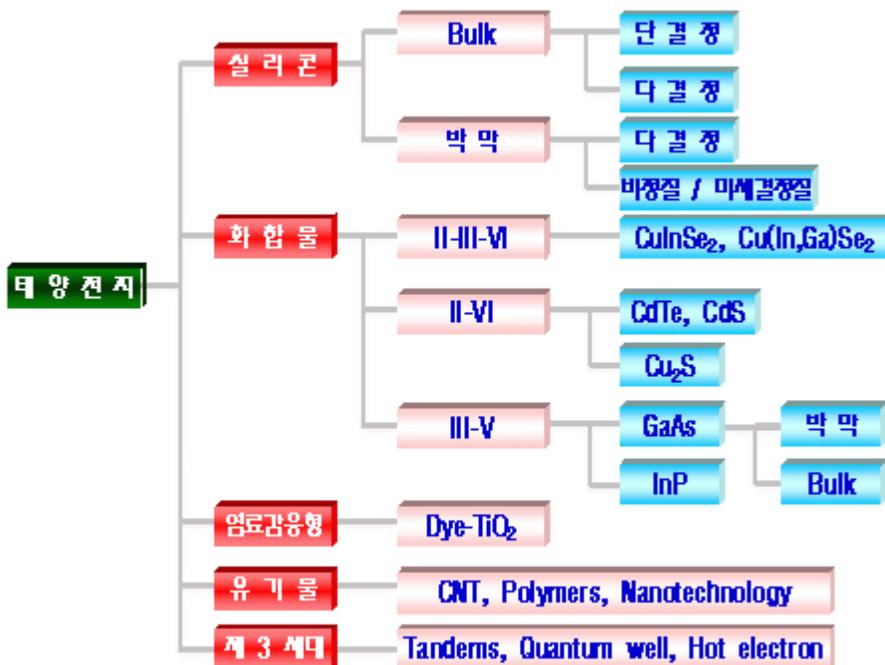


[그림 2] 과학기술 기본계획과 미래 기술개발 로드맵

# 1 서론

## |이슈 분석의 범위

- 유기반도체 태양전지로 분류되는 염료감응형 태양전지 (Dye-sensitized solar cell, DSSC)는 실용효율 20%의 달성이 가능한 고효율과 장수명, 그리고 발전단가가 낮은 장점 등으로 이미 스위스를 중심으로 전세계적으로 많이 연구되었고 이미 제품화되고 있음.
- 따라서 본 유기반도체 태양전지 이슈 분석에서는 염료감응형 태양전지분야와 무기반도체 태양전지는 제외하고, 아래 <그림 1-3>에서 보는 바와 같이 전도성 고분자로 대표되는 유기반도체 태양전지의 상업화의 성공요인에 대한 이슈를 중심으로 다루게 될 것임.
- 먼저, 유기반도체 태양전지의 간략한 원리를 비롯한 특성과 특허동향 등을 살펴보고 다음으로, 유기반도체 태양전지의 상업화는 가능할 것인가? 아니면 근본적인 한계가 있는 것인가? 라는 대명제를 중심으로 전개해나가면서 관련 이슈들을 다루고자 함.
  - 첫 번째로 에너지 시장에서의 판단 기준임과 동시에 상업화의 성공여부를 결정하는 유기반도체 태양전지의 효율과 관련된 이슈들을 분석하고, 다음으로 사용연한 또는 수명(life time)에 관한 이슈들을 다루고, 마지막으로 가격과 관련한 이슈들과 기타 정치경제 국제적인 이슈들을 다루고자 함.



[그림 3] 태양전지 재료별 분류 및 계통도

---

## 본론

---

# 2

- | 유기반도체 태양전지
- | 국내외 연구개발 동향

## 2 본론

### | 유기반도체 태양전지

#### 가. 개요

- 유기반도체 태양전지는 이중결합이 교대로 되어있는 PPV, PT 등 공액고분자와 CuPc, 페릴렌, 펜타센 등 감광성 저분자 그리고 PCBM등 C60유도체등 유기반도체 재료를 활용하는 구조의 셀임. 이러한 유기반도체 재료는 디자인이 가능하여 다양하게 합성이 가능하여 무한한 발전의 가능성을 가지고 있음.

#### 나. 주요 장점

- 유기반도체 재료는 약 16년의 짧은 역사를 가지고 있지만, 성장잠재력이 크고 응용분야도 유기레이저, 유기태양전지, 스피트로닉스, 바이오센서 등으로 이용하고 있음.
  - 이러한 재료를 가지고 구성한 유기반도체 태양전지의 장점으로는 저가격, 박막기판사용 가능, 반투명 구현이 가능하여 응용분야가 넓고, 대면적의 용이한 코팅기술로 공정이 무기질 태양전지에 비하여 단순하고, 라미네이션 패키지가 가능하며, 경제성과 기술적인 면에서 여러 가지 생산 장점을 보유하고 있음.
  - 그리고 제조기술에서는 reel to reel printing, dip coating, screen printing, spin coating, doctor blade법, off-set 그리고 flexography등이 있는데 어느 정도의 기술은 이미 전자 디스플레이 분야에서 확립해놓은 기술임.

[표 1] 대표적인 태양광 전지의 용도 및 분야[3]

분야	주요 용도
우주산업	인공위성 주요전원 공급원, 우주발전
통신산업	일반무선중계기, 마이크로회선, 방송중계국
안전시설	각종 항공운항과 관련한 안전관련 경보 및 지원시설
천문기상	각종 텔레미터, 텔레미터 중계국, 하천, 댐 텔레미터
해상시설	등대, 부표, 해상텔레미터
도로시설	도로 표시판, 터널등, 가로등, 긴급전화, 무인신호등
주변기기	계산기, 노트북, 태양광발전
농.수산업	배수펌프, 배양시스템, 온실
교구 등	휴대폰, 광검출기, 완구, 조도계, 교육기기
가전 등	형광등시스템, 주택용 태양광발전, 태양광에어콘, TV 등
자동차	태양광자동차, 충전스탠드, 전기자동차 보조전원

자료 출처: 참고문헌3

## 다. 용도 및 특성

- 한편, 태양전지의 용도로는 처음 만들어진 때보다 응용분야가 산업발달에 따라 확대되고 있으며, 표 1에 주요 용도를 나타낸 것과 같이 최초개발에서 현재까지 사용되고 있는 우주선의 에너지원 에서부터 생활필수품에 이르기까지 수 밀리와트에서 대전력까지 전원 공급 장치에 사용되고 있음.
- 특히 실질적인 한국전력의 전력선을 연결하기에 여러 가지 장애요인이 있는 벽오지의 전원공급원, 무인 등대 등 안전시설물의 전원 등에 보편적으로 쓰이고 있으며, 해수의 담수화에 필요한 전원의 상시 공급원, 전기자동차와 태양전지의 하이브리드 자동차, 연료전지의 연료생산을 위한 물분해 에너지원, 그리고 전천후 가전제품, 실험실습교구 및 미래형 주택의 건축자재 등 응용범위가 확대되고 있음[3].

## 2 본문

### | 국내외 연구개발 동향

#### 가. 개요

- 유기박막 또는 고분자 태양전지의 주요재료로 사용되는 유기반도체재료는 1970년대 에너지 위기 이후 많은 관심을 끌어왔는데 특히 도핑방법을 통해 전도도를 금속에 가깝게 향상시킬 수 있다는 것이 알려지면서 도핑농도의 조절로 전도도를 제어할 수 있어 다양한 응용분야에서 활발하게 연구되고 있음.
- 현재 실용화되어 있는 유기반도체재료로는 프린터용 유기 감 광재, 액정등 전자디바이스 및 OLED도 실용화 되고 있는 유기재료이며, 최근 OLED나 TFT 등 유기반도체 재료와 관련한 기술이 크게 발전하고 있어 유기반도체재료를 사용하고 있는 유기태양전지 기술도 크게 주목받고 있음[4,5].

#### 나. 국내외 연구동향

- 1992년 미국 캘리포니아 산타바바라대학(UCSB)의 히거 교수팀과 오스트리아 요하네스 케플러대학의 Sariciftci 교수팀이 전도성 고분자 복합재에서 광여기 전하이동 현상을 발표한 이래 선두그룹에서 연구하고 있으며, 특히 UCSB의 CPOS(Center for Polymers and Organic Solids) 에서 6-7%가 넘는 유기반도체 태양전지의 효율기술을 보유하고 있음.
- 한편, 영국 캠브리지 대학의 R.H. FRIEND 교수그룹과 미국 프린스턴대학의 FORREST 교수그룹, 아리조나대학의 ARMSTRONG 교수그룹, 그외 UCLA, MIT, 워싱턴대학 등이 있고, 스웨덴의 INGANAS 교수그룹, 일본 오사카대학의 YOSHINO 교수그룹 등에서 활발히 연구하고 있음[6-12].
- 한편, 국내의 경우 유기반도체 태양전지의 연구가 OLED와 TFT 등의 성장에 힘입어 점차 확대되고 활발해지고 있는데 인하대, 서울대, 부산대, 전남대, KAIST, 포항공대 등의 대학과 ETRI, 에너지기술연구원, 전기연구소등에서 연구를 수행하고 있음.
- 특히 미국에서는 아래의 <표 2-2>에서와 같이 신규 사업에 100만\$를 투입하는 등 2006년 대비 23.8%증가한 536,001,000\$의 예산을 연구분야에 책정해 놓고 있는 상태임.
- 즉, 유기물태양전지와 같은 새로운 태양전지연구에 DOE의 NREL에서 수백만 달러를 지원하고 제조단가를 획기적으로 줄일 수 있는 돌파구마련에 열중하고 있음. 이와 같이 선진국에서는 유기반도체 태양전지가 아주 유망한 대체에너지 기술로 평가하고 정부차원에서 육성지원하고 있음.

[표 2] 미 에너지부(DOE)의 2006년도 예산과 2007년 신청 예산

\$ in thousands		FY 2005 Conf. Approp.	FY 2006 Rescission	FY 2007 President's Request	Delta FY06-FY07	% increase
<b>Research</b>		<b>477,524</b>	<b>433,125</b>	<b>536,001</b>	<b>102,876</b>	<b>23.8%</b>
BAA*	Core Research	448,341	400,625	409,454	8,829	2.2%
S	Hydrogen	29,183	32,500	50,000	17,500	53.8%
S	Solar Energy Utilization			34,115	34,115	
S	Advanced Nuclear Energy Systems			12,432	12,432	
A	Ultrafast Science			10,000	10,000	
S	Mid-Scale Instrumentation			10,000	10,000	
S in FY05	Chemical Imaging			5,000	5,000	
A	Complex Systems/Emergent Behavior			5,000	5,000	

\* About \$10 million for X-ray and neutron scattering instrumentation within the core will be competed with mid-scale instrumentation in the same solicitation.

자료 출처: Office of Basic Energy Sciences, Office of Science, DOE USA, (2006)

#### 다. 특허 관련 동향

- 기술전쟁의 시대로 접어들면서 첨단기술의 독점적인 법적지위 확보를 위해 최근 특허의 출원 및 관련 분야가 날로 첨단화되고 있음.
- 표 3은 EP(European Patent Office) 유럽특허, US 미국특허, WO 국제특허 및 JP 일본공개특허 출원 상위 26개사의 유기반도체 특허출원 현황을 나타냈는데 전체 590건은 2004년 1월부터 10월 사이의 자료로 Eastman Kodark에서 75건으로 1위, SEL 61건, Siemens 35건 순임.
- 표 4는 표 3의 분야별로 분류한 자료임. 표 5는 2003년 출원 특허 중 유기재료와 관련된 항목을 출원한 상위24개를 재료별로 분류해놓은 것임.

[표 3] 2004년 유기반도체 재료관련 유럽, 미국, 국제 특허 현황

출원 관계사	계	EP	US	WO
Eastman Kodak	75	41	29	5
SEL	61	10	13	38
Siemens	35	8		27
Seiko Epson	33	20	13	
Idemitsu Kosan	31	6	4	21
Canon	29	6	8	15
Philips Electronics	26	14		12
Pioneer	25	11	7	7
CDT	24	13	2	9
Du Pont	24	8		16
3M Innovative Properties	20	11	4	5
Fujitsu	20	2	4	14
<b>Samsung SDI</b>	<b>17</b>	<b>6</b>	<b>11</b>	
Infineon Technologies	17	3	2	12
Covion Organic Semiconductors	17	8	1	8
Sony	16	11	1	4
Sanyo Electric	15	2	11	2
Fuji Photo Film	15	4	9	2
Elam-T	14	4	2	8
<b>LG Electronics</b>	<b>13</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>3</b>
Xerox	11	2	9	
Osram	11	4	5	2
Agfa Gevaert	11	2	4	5
<b>LG Philips LCD</b>	<b>10</b>		<b>10</b>	
Toyoda Jidoshokki	10	8		2
Philips IPS   Philips*	10			10
Total	590	209	154	227

자료 출처: Organic Semiconductor Patent Analysis, Cintelliq Ltd, 2005.

[표 4] 2004년 유기반도체 재료관련 분야별 특허출원 현황

출원 관계사	계	재료	패터닝	증착	기판	인캡슐레이션	기타
Eastman Kodak	75	17	2	11	1	1	43
SEL	61	10	1	1		11	38
Siemens	35	3	1	2	1	3	25
Seiko Epson	33	1	5	2		2	23
Idemitsu Kosan	31	22		1		1	7
Canon	29	22				2	5
Philips Electronics	26	7	1	2		4	12
Pioneer	25				1		24
CDT	24	15		1		2	6
Du Pont	24	19	2				3
3M Innovative Properties	20	5	6	3		1	5
Fujitsu	20	6	2				12
Covion Organic Semiconductors	17	15		1			1
Infineon Technologies	17	5	3		1		8
<b>Samsung SDI</b>	<b>17</b>	4	1			2	10
Sony	16	3		3			10
FujiPhoto Film	15	8	1				6
Sanyo Electric	15	1				5	9
Elam-T	14	12					2
<b>LG Electronics</b>	<b>13</b>	6					7
Agfa Gevaert	11	10					1
Osram	11		1		1	3	6
Xerox	11	6					5
Toyoda Jidoshokki	10					1	9
<b>LG Philips LCD</b>	<b>10</b>						10
Philips IPS   Philips*	10	2					8
Total	590	199	26	27	5	38	295

자료 출처: Organic Semiconductor Patent Analysis, Cintelliq Ltd, 2005.

[표 5] 2003년 상위 25개사 재료별 특허분류

재료별 관계사별	Alkyl	Hydrogen	Aromatic	Carbon	Halogen	Hydrocarbon	Alkoxy	Nitrogen	Cyano	Amino	Ito	Arylene	Copolymer	Nitro	Divalent	Phenyl	Alkaline	Cycloalkyl	Alkali	Iridium	Alkenyl	Sulfur	Anthracene	Heteroaryl	Arylalkyl	Boron	Aryloxy	Carbazole	Polystyrene	Thiophene	Platinum	Oxammonialkyl	Methyl	Perylene	Naphthalene	Polystyrene	Chelate	Methyldiene																		
Xerox	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o				o							o																																			
Toyo	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o				o					o	o														o																					
Toray	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o				o		o					o					o																														
TDK	o									o							o																			o																				
Seiko				o	o	o	o				o																										o																			
Sumitomo	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o			o	o	o								o				o		o	o																										
Sony	o	o	o			o			o		o			o						o	o	o															o																			
SEL	o	o	o	o	o	o	o	o				o								o	o	o										o	o	o								o														
Sanyo				o	o	o					o						o																												o											
Mitsui	o	o	o	o	o	o	o	o		o	o					o								o		o		o																												
Mitsubishi	o	o		o	o	o		o		o					o	o	o			o	o	o					o																				o									
Merck				o	o	o							o																				o																							
Matsushita	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o				o		o					o	o					o						o	o														o								
Konica	o	o	o	o	o	o	o	o	o			o	o	o							o						o	o					o	o																						
Kodak	o	o	o	o		o			o	o				o																																			o	o						
JSR	o	o	o	o		o			o	o				o		o																																			o					
Idemitsu	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o			o	o	o	o						o																																		
Fujitsu	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o				o							o	o																													o					
Fuji	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o				o							o	o																														o				
Dupont	o	o	o	o			o			o												o								o																										
Covion	o	o	o	o	o	o															o																																			
CDT	o	o	o	o	o	o	o	o					o	o	o							o	o					o	o																								o			
Canon	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o				o	o							o	o					o	o																								o			
3M				o	o	o				o																																														

자료 출처: Organic Semiconductor Patent Analysis, Cintelliq Ltd, 2005.

## 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

### 3

- | 이슈 제기
- | 에너지 시장에서 경쟁력 평가기준은 무엇인가?
- | 유기반도체 태양전지의 상업화에는 어떤 장점이 있는가?
- | 효율과 관련한 이슈들
- | 수명 이슈와 관련된 시장진입조건은 어떤가?
- | 가격 경쟁력은 있는가?
- | 기타 이슈들
- | 유기반도체 태양전지의 실용화 연구 등에 따른 파급효과는 무엇인가?
- | 제 3세대 태양전지란 무엇인가?

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

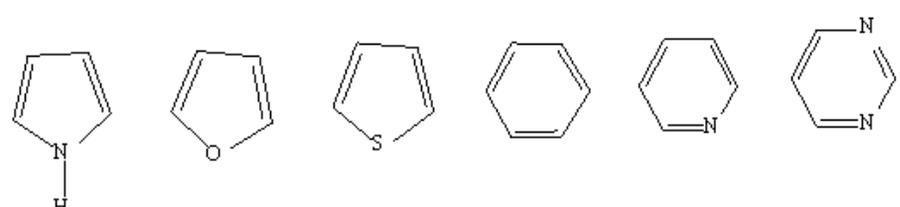
#### |이슈제기

- 현재 무기태양전지는 고효율, 장수명을 장점으로, 생산단가가 고가라는 단점을 가지고 있는 반면, 유기태양전지는 저효율, 짧은 수명이 단점이고 생산단가가 저가라는 장점을 지니고 있음.
- 그래서, 태양광 전지의 연구방향과 추세는 저가격과 고효율의 구현으로 실용화 가능성에 한층 근접해가고 있음. 이러한 성장의 배경에는 유기반도체의 연구성과에 힘입은 바가 큼. 표 6에 도너와 억셉터의 상대적인 비교를 나타내었음.
- 접합계면의 확대를 통해 엑시톤의 분리를 효율적으로 증가시킨 도너와 억셉터 헤테로 접합구조 및 제3세대 태양전지로 일컬어지는 고효율 목적의 탠덤구조 등의 연구 성과임[13,14,38].
- 유기반도체 태양전지의 상용화를 위한 당면과제들을 첫째, 에너지시장에서의 경쟁력 평가기준은 무엇인가? 둘째, 유기태양전지의 상업화에는 어떤 장점이 있는가? 셋째, 성능(효율), 수명 및 가격 등의 기술적인 이슈, 마지막으로 기타분야로 정치 경제 국제적인 이슈 제3세대 태양전지 등으로 서술함[13,15-21].

[표 6] 도너(N-type)와 억셉터(P-type) 상대적 비교[38]

N-type $\pi$ -donating (or $\pi$ -expressive)	P-type $\pi$ -accepting (or $\pi$ -deficient)
* Electron-rich hetroaromatic	* Electron-poor hetroaromatic
* Electron-transporting	
* Electrical conductor by a P-doping	* Electrical conductor by a N-doping
* Oxidation	* Reduction



자료 출처: 참고문헌38

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

|에너지 시장에서 경쟁력 평가기준은 무엇인가?

- 에너지에서 가장 중요한 요소인 효율(성능)
- 내구성을 포함한 사용 년한(수명)
- 와트당 생산단가(경제성)등 임. 즉 가격경쟁력, 적절한 효율과 수명이 태양전지 시장의 성공조건이자 이윤창출 극대화의 조건임.

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

| 유기반도체 태양전지의 상업화에는 어떤 장점이 있는가?

- 유연성(flexible)과 반투명성 구현이 가능함.
- reel to reel 공정과 같은 연속 공정이 가능하여 대량생산이 용이함.
- 다양한 디바이스의 집적화가 쉬움.
- 기존의 태양전지에 비해 경비의 대폭절감이 가능함.
- 환경친화성이 큼.

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

#### | 효율과 관련한 이슈들

- 고효율 달성이 가능할 것인가?, 아니면 근본적인 한계가 있는 것인가?
  - 고효율 구현을 위한 이슈로는 어떤 것들이 있는가?
- 그림 4는 NREL에서 측정한 최고효율의 태양전지 데이터와 예측자료임. 위와 같은 효율 관련 예측에서도 알 수 있듯이 고효율은 태양전지의 에너지 생산 극대화와 비용최소화의 근본적인 문제이자 필수조건임.
- 낮은 효율의 전지는 같은 양의 에너지 출력을 위해서 보다 더 큰 면적의 전지가 요구됨. 고효율의 저가격 구현이 모든 태양전지 연구 분야의 핵심으로 아래에 열거한 하나하나의 고효율 구현과 더불어 장수명의 저가격 실현을 위한 매우 중요한 변수임[15-17,22,23].
- 광 안정성에 대한 이론과 열화 메카니즘 연구
  - 유기물의 내에서 캐리어 이동도( Carrier Mobility) 향상 방법
  - 유기물의 광 에너지 밴드 조절로 태양광 흡수 최적화
  - 유기반도체 물질을 이용한 박막형 태양전지의 제조법
  - 유기태양전지 디바이스 디자인 연구
  - 모폴로지 컨트롤 등 박막형성의 기술적 노하우
  - 제3세대 태양전지 구현을 위한 이론적 실질적 연구

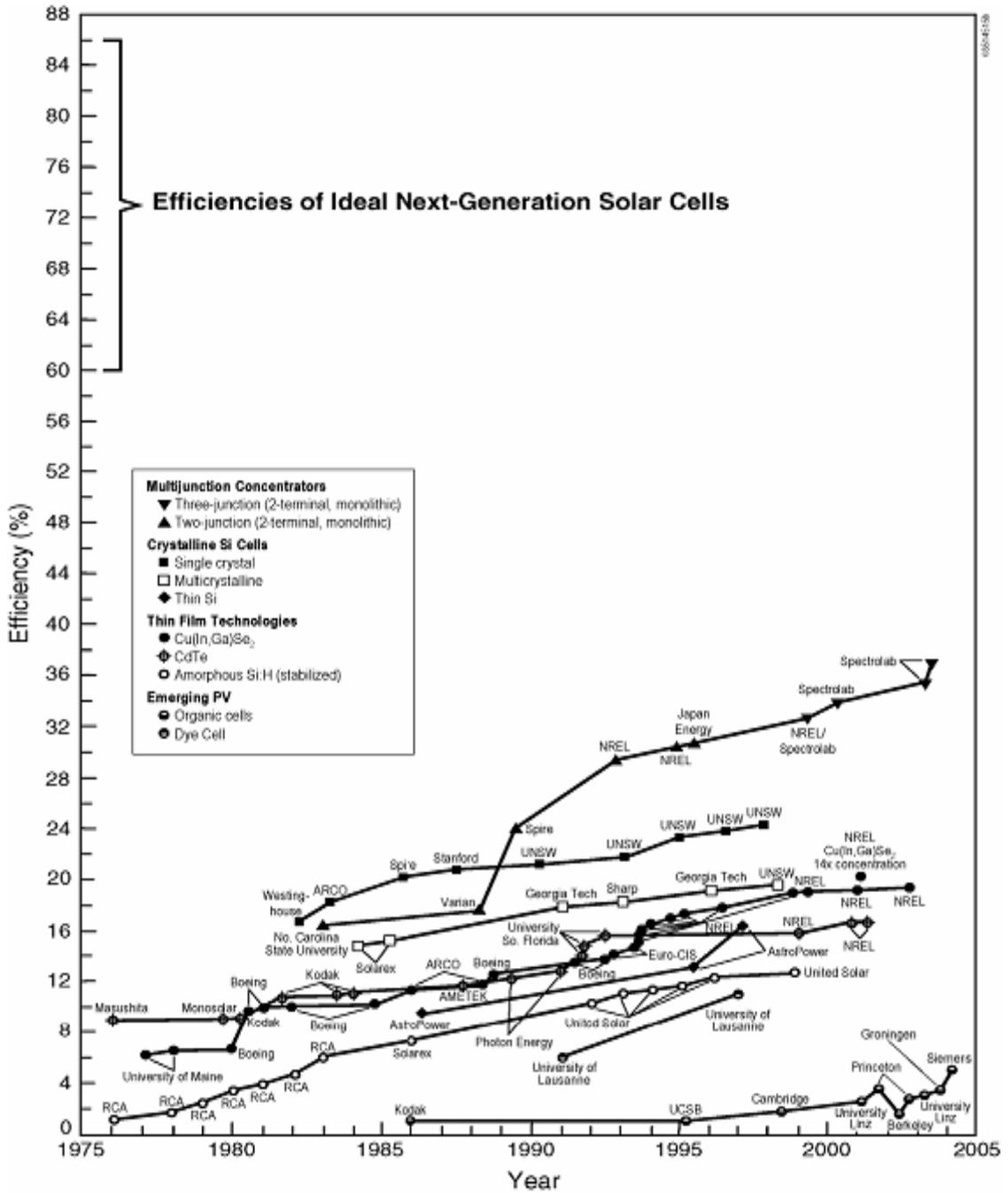
#### 가. 유기반도체 태양전지의 시장진입 효율 경계조건은 얼마나 되는가?

- 유기반도체 태양전지의 시장진입을 위한 효율의 경계조건으로 먼저 디바이스 효율 10%와 모듈의 효율 5%가 시장진입 가치의 경계선으로 여겨지고 있음.
- 한편, 짧은 유기반도체 역사에 비해 비약적인 효율의 증가에 관한 연구결과들이 나오고 있으나, 현재 사용되고 있는 실리콘 태양전지나 화합물반도체 태양전지 등과 비교해볼 때 무기태양전지에 비해 아직까지는 유기반도체 태양전지가 낮은 효율을 보이고 있음 [15,16]

#### 나. 광 안정성에 대한 이론과 열화 메커니즘에 대한 대책은 있는가?

- 유기태양전지는 유기물 본래의 광 안정성이 문제가 있음. <그림 3-2>와 같이 태양 스펙트럼의 구성은 5%의 자외선(UV), 43%의 가시광(Vis) 및 52%(IR)로 구성되어 있어 필연적으로 장기간 햇빛에 노출로 인한 광산화(photo-oxidation) 등으로 변색과 열화가 진행되어 효율저하의 문제가 있음.
- 이에, 광안정의 특성을 지닌 폴리티오펜계와 폴리플루로렌계 물질이 최근 연구/응용되고 있으며, 유기반도체 재료를 분해, 변색 등 열화에 직접적인 원인인 자외선을 차단하는 필름 부착으로 열화차단 및 억제 가능함[15-17,24].

[그림 4] NREL에서 측정한 최고효율 데이터와 예측자료



다. 유기물 내에서 캐리어 이동도( Carrier Mobility) 향상 대안은 있는가?

- 유기 태양전지의 낮은 효율의 원인 중 하나는 벌크 상태에서 유기물내의 캐리어 (전자와 정공)의 이동 속도가 느리다는 것. 유기물은 무기물에 비해 분자구조 면에서나 결정구조에서 차이가 큼. 이러한 차이는 계면의 상태, 결정면, 분자사슬간의 결합으로 이동도를 제한하는 요인으로 알려져 있음.
- 표 7에 주요 유기반도체 재료의 전기적 특성을 나타냈음. 캐리어의 이동속도를 개선하기 위해서는 유기층 내에서 정공의 이동도에 비해 상대적으로 낮은 전자의 이동도를 높이는 것임.
- 이를 위해 고분자 사슬과 사슬 사이의 상호작용 연구의 필요성과 분자 배향 등 박막 형성시 모폴로지 개선을 통한 효율향상 방법, 금속전극과 유기물 층간의 계면 간 접합문제와 스핀코팅을 위한 고분자와 용매간의 농도, 박막형성 후 열처리 등 어닐링등 유기물간의 계면 현상 연구로 문제점을 극복할 수 있음.
  - 예로서, 전극과 유기물층간의 계면 저항을 줄이기 위한 버퍼층 삽입과 메탈전극대신 유기계의 전극을 사용하여 전하의 원활한 주입을 위한 연구가 행해지고 있음[22,23].
  - 한편, 유기반도체 태양전지에서 70%이상의 스펙트럼영역에서 고효율의 외부양자 효율을 보여주어 낮은 캐리어 이동도는 무기반도체와 비교해볼 때 소자의 성능을 제한하는 한계가 아님을 증명해 준 것임[15-17].

[표 7] 유기반도체 재료의 전기적 특성

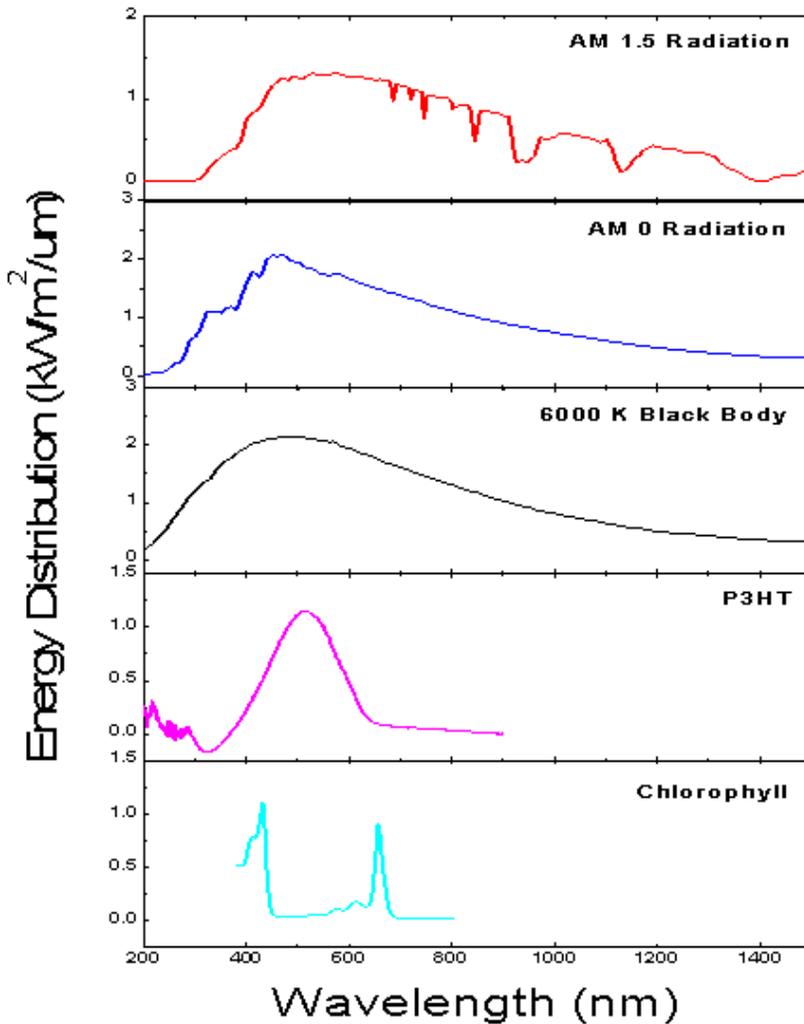
재 료	증착기술	전도도 (S/cm)	이동도 (cm <sup>2</sup> /Vs)	Ref.
polyacetylene	전구체	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	26
polythiophene	전기적 증합	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-5</sup>	27
polyhexylthiophene	LB법	4x10 <sup>-7</sup>	7x10 <sup>-7</sup>	28
polyalkylthiophene	스핀코팅	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-5</sup>	29
poly(DOT)3	스핀코팅	상동	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-3</sup>	30
polythienylenevinylene	전구체	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-3</sup>	31
polyphenylenevilinee	전구체	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	32
Tm diphthalocyanine	진공증착	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-2</sup>	33
fullerene(n-type)	진공증착	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-2</sup>	34
TCNQ(n-type)	진공증착	10 <sup>-10</sup> -10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-10</sup> -10 <sup>-4</sup>	35

자료 출처: 참고문헌 25

라. 태양광 흡수 최적화는 가능한가?

- 태양광의 스펙트럼을 분석해보면, 5%의 UV, 43% 가시광 영역, 52% 적외선 영역으로 지상에 도달하지만, 유기물의 광에너지 밴드 갭이 커 대부분의 유기 태양전지에 사용되는 물질은 태양광 스펙트럼을 충분히 흡수할 수 있는 파장대를 가지고 있지 않아, 광감응성 태양전지(Dye Sensitized-Solar Cell)에서처럼 밴드 갭이 큰 TiO<sub>2</sub>를 유기계 염료인 N3을 화학 흡착시켜 UV 영역의 밴드갭을 가지고 있는 TiO<sub>2</sub>를 가시광의 염료의 흡수대로 확대하여 효율향상을 통해 최근 10%를 넘는 효율을 보이고 있음.
- 현재 가장 많이 사용되고 있는 PPV계는 태양광의 일부만을 흡수함. 따라서 광 흡수율이 좋은 작은 밴드 갭의 도너(Donor) 물질 개발과 제3세대 태양전지 개념의 하나인 텐덤 셀 구조로 최대의 광흡수를 통한 고효율의 태양전지 제작으로 6%대의 효율이 보고되고 있음 [24,36].

[그림 5] 태양광 스펙트럼과 P3HT 및 Chlorophyll의 흡수스펙트럼



### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

#### |수명 이슈와 관련된 시장진입 조건은 어떤가?

- 수명은 유기반도체 태양전지에 있어서 두 번째로 중요한 요인임. 저가격의 디바이스 구현은 3~5년의 수명(3000~5000 구동시간)이 시장 진입 수치임.
- 고분자 재료를 근간으로 한 수명 실험에서 약 20%의 효율 감소는 처음 1000시간에 일어났고, 50%의 효율에 이르렀을 때의 시간은 2000시간 이었음.
- 이러한 수명측정 실험은 고온조건으로 열화인자를 가속시켜 측정하는 방법으로 유기태양전지나 OLED 분야에서 응용되기는 하지만 여전히 유기반도체 태양전지의 수명측정 방법으로서의 문제점을 가지고 있음.
- 광원 조건, UV조사, 화석연료와 관련된 환경인자들을 고려해서 수명과 관련한 추가적 실험 및 보완이 필요하며, UV차단 필터 등의 활용으로 장수명의 안정성 구현이 가능함 [15-17,37].

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

#### | 가격 경쟁력은 있는가?

- 경제성을 바탕으로 유기반도체 태양전지의 기술적인 실현을 위한 필요조건은 저렴한 재료를 사용하여 대면적의 디바이스를 대량으로 생산하는 것임.
  - 어떻게 이와 같은 목표를 달성할 수 있을 것인가는 유기반도체 태양전지의 사용재료가 용액공정이 가능하다는 데서 찾을 수 있음.
  - 용액공정이란 사용재료를 유기 용매 등을 이용하여 액체화하여 스펀코팅등과 같은 방법을 사용하여 가능함. 또한 요구되는 물성에 맞는 재료의 디자인과 합성이 가능하다는 점임.
  - 예를 들어 실리콘 웨이퍼 생산의 경우, 30cm짜리 웨이퍼를 기준으로 연간 최고 생산량은 약 88,000m<sup>2</sup> 이지만, 유기반도체재료의 경우 off-set과 같은 기기가 사용 가능하므로 초당 15M를 생산할 수 있어 동일면적의 생산량을 1~10시간이면 가능하게 됨.
  - 지속적인 제조기술의 발전과 패키지나 기판 등의 재료가격을 포함하여 와트당 US 1\$ 보다 훨씬 저가의 실현이 가능함[15-17].

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

#### | 기타 이슈들

#### 가. 한국의 유기반도체 태양전지의 미래는 밝은가?

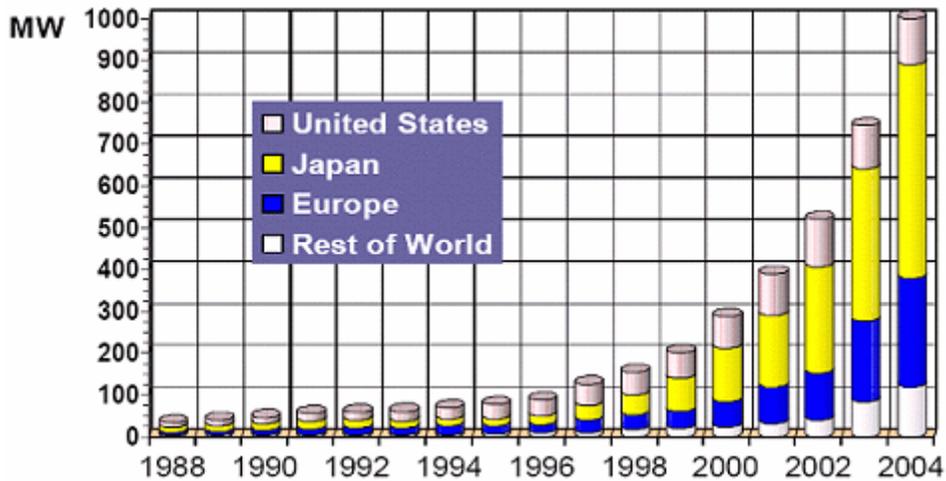
- 유기반도체 태양전지는 기술의 중요도 및 기여도가 큰 공공성을 가지고 있음. 우리나라는 세계최고의 기술력과 생산인프라를 보유하고 있는 반도체, LCD 및 OLED 디스플레이 강국으로 유기반도체 태양전지 기술과 유사하여 기술개발에 따른 산업화에 필요한 인프라를 활용할 수 있어 매우 유리한 위치에 있음.
- 따라서 우리나라에서 유기반도체 태양전지는 반도체 강국의 제2의 대안이 될 수 있음. 이는 기존의 인프라와 연구역량의 축적으로 유기반도체에 적용이 용이할 뿐만 아니라, 유기 반도체의 과급효과가 클 뿐만 아니라 1990부터 본격적인 전도성 고분자의 연구가 시작되었고, 세계 각국에서 대규모 연구개발을 수행하고 있지만 무엇보다도 비교적 짧은 역사가 말해 주듯이 세계 리딩 그룹과의 기술격차도 크지 않음.
- 특히 신기술 개발 시 고부가가치의 상품 개발 선점으로 블루 오션(Blue- Ocean) 진입이 가능함. 즉, 현재 고유가에 한국은 그저 따라가야만 하는 입장이지만 미래에는 에너지 종주국 및 수출국의 위업을 달성해야 함. 결국 청정에너지 태양광을 이용한 유기반도체 태양전지를 비롯한 대체에너지에 의한 안정하고 경제성 있는 에너지자원 확보와 공급으로 선진국의 반열에 서서 세계시장에 기술과 제품을 수출할 수 있는 기술력을 확보해야 함[3].

#### 나. 국제적인 이슈는 무엇인가?

- 그림 6은 연평균 35%이상의 성장세를 보이고 있는 태양전지 시장의 추세를 보여주고 있음. 한편, 국제에너지기구 IEA의 2000년 보고서에 의하면 집중적인 연구개발 투자로 전 세계 에너지의 상당부분을 태양광 발전과 연료전지가 충당하여 21세기 에너지 시장을 주도할 것으로 예측함.
- 한편 저가격의 경제성 확보를 위해 신에너지 기술은 선진국에서 범국가적 차원에서 추진해오고 있는데, 미국의 경우 에너지성 DOE의 National Photovoltaic Program, 일본은 뉴선샤인 계획으로 유럽에서는 JOULE 프로그램에 이어 Framework 프로그램의 이름으로 차세대 태양전지 기술개발에 집중투자를 하고 있음.
  - 예로부터 첨단기술은 각국 정보기관을 중심으로 보호관리 및 스파이 활동은 한 국가의 운명을 좌우할 만큼 전쟁과 비유되고 있음. 이러한 맥락에서 볼 때, 유기반도체 태양전지는 첨단 기술 분야로 선진국에서 기술이전을 기피하고 특히 등의 장벽 때문에 자체적인 개발이 필수적임.

다. 정치 경제적인 이슈는 무엇인가?

- 신재생에너지의 연구개발 및 보급이 국가의 미래를 좌우할 만큼 중요한 문제 중의 하나로 갈수록 그 중요성이 커지고 있음. 이렇듯 에너지 대량소비국인 우리나라의 국가경쟁력 향상을 위해 환경 친화적 새로운 에너지원인 태양광 전지의 개발은 절실함.
- 특히 고효율 저가격의 달성가능성이 가장 큰 유기태양전지는 반도체 강국의 제2의 대안이 될 것임. 특히 유기 반도체의 과급효과가 커 각국에서 대규모 연구를 수행하고 있으나 무엇보다도 1990년부터 본격적인 전도성 고분자의 연구가 시작되어 선진국과 기술격차도 크지 않으며 기술개발 시 고부가가치의 블루 오션 진입이 가능하고, 기술의 공공성이 큰 장점을 가지고 있음[22,23].



[그림 6] 태양전지 시장 증가추세

자료 출처 : European Commission meeting Dec. 2004.

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

| 유기반도체 태양전지의 실용화 연구등에 따른 파급효과는 무엇인가?

- 유기 반도체 태양전지의 제작기술 및 새로운 특성평가기술 등과 관련한 신산업창출과 그에 따른 고부가가치의 고용창출 효과가 기대됨.
- 유기 반도체 태양전지의 구동원리 등 물리적 해석 및 구조 디자인 등 유기 반도체관련 기초학문 기반 구축 및 연구영역심화 확대가 예상됨.
- 제3세대 태양전지의 개념과 같은 새로운 구조 새로운 재료의 유기 반도체 효율향상과 응용분야 확대 및 보편화 등 기술 발전 속도 가속이 예상됨.
- 유기물 반도체에 대한 지식 및 노하우를 바탕으로 연구 인력양성을 통한 인재 풀 육성 및 기술이전 수출 등 사업이 가능할 것임.
- 유기 반도체 태양전지는 파급효과가 큰 종합학문으로 고분자공학, 천문학, 수학, 물리학, 화학, 전자기학, 지리학, 건축학 및 건축공학 등 퓨전테크놀러지로 학문의 융합 및 파생 등의 새로운 형태의 인터페이스 학문이 탄생할 것임.
- 국제 인적 인프라 및 물적 인프라 연계구축 등을 통한 세계에너지자원 활용과 분배에 있어서 평화수호자적 기여할 것이며, 공동연구 및 기술이전 등에 있어서 주도적 역할로 국제위상 강화가 기대됨.

### 3 유기반도체 태양전지의 산업적 역할과 실용화 이슈분석

#### | 제3세대 태양전지란 무엇인가?

- 표 8은 주요 태양전지 기술에 대한 세대별 실제 및 예측자료임. 제3세대 태양전지는 Queisser와 Shockley가 제시한 이론적인 효율 한계 값인 32%를 뛰어넘을 수 있는 차세대 태양전지로 Martin Green (university of south Wales)교수가 제안한 것으로 다음과 같이 분류할 수 있음.
  - 저가의 Multi-gap 텐덤 셀
  - hot electron converters : 추출, 수집, hot carrier 이용  
Impact ionization/Multiple exciton generation(MEG)
  - Thermophotonic 태양전지
  - Intermediate band 태양전지
  - Quantum dot 태양전지
  - Down conversion and upconversion of incident photons (M. green & P. Wuerfel)

[표 8] 주요 태양전지 기술에 대한 세대별 실제 및 예측자료

PV Technology	PV Generation	Forecast time from market acceptance to decline
Silicon Crystalline	1	1970-2020
Silicon Amorphous	2	1983-2025
Silicon Thin Film	2	2001-2050
CdTe	2	1995-2010
CIS/CIGS other 3/5, 2/4/6	2	2000-2050
DSC	3	2003-2055
DSC - hybrid	3+	2015-2100
Organic - hybrid	3+	2015-2100
Biological	4	2030-2100+

자료 출처: Sustainable Technologies International Pty Ltd, An invited paper presented at the First International Conference on Energy Efficiency and Conservation Hong Kong on 15 January 2003

- 한편, 제3세대 태양전지에 관한 유익한 참고서적으로는 M. Green, "Third Generation Photovoltaics". Springer, 2003 와 A. Marti and A. Luque, "Next Generation Photovoltaics", Inst. of Physics Series in Optics and Optoelectronics, 2002 등이 있음.

---

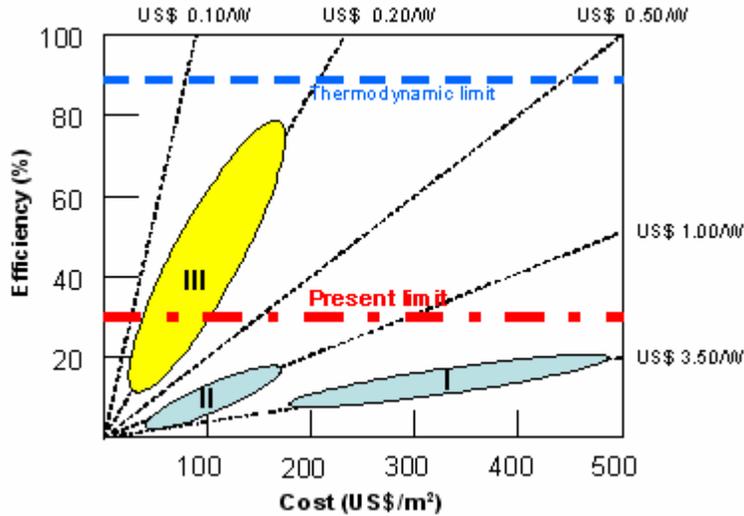
## 결론

---

# 4

## 4 결론

- 유기반도체 재료의 특징은 박막형성이 용이하고 가볍고 유연하며 비선형 광학 특성을 보유하고 있음. 따라서 반도체성질, 높은 분극 특성, 상온에서 가공 용이, 대면적의 구조를 쉽게 제조할 수 있어 높은 생산성 및 경제적이라는 장점을 가지고 있음. 또한 다양한 합성방법 및 새로운 구조나 기능을 가진 화합물을 디자인하고 합성해낼 수 있어 초박막 기능성 전지전자소자 및 유기양자 소자 등 광전소자 연구개발의 속도 및 깊이를 더하고 있음.
- 이에, <그림 4-1>에서 보는바와 같이 새로운 개념의 제 3세대 태양 전지의 구현으로 Q-S 한계인 32%를 뛰어넘는 효율달성의 가능성을 비롯해서, 구체적인 유기반도체 태양전지의 손실분석에 의한 다이오드의 불안정성과 재료의 순도문제가 해결된다면, 디바이스 효율 10%와 모듈 효율 5%의 시장진입조건 달성은 단기간에 무난할 것임.



[그림 7] 세대별 태양전지에 따른 가격 및 효율 그래프

- 또한, 고효율을 달성하기 위한 신재료의 요구, 즉 밴드 갭이 작은 흡수체를 이용하여  $I_{sc}$ 를 개선시킬 수 있고, 분자조합을 통해 전자적 에너지레벨을 조화시키면  $V_{oc}$ 를 향상시켜 결국, 고효율 디자인이 가능하게 될 것임.
- 이를 통하여 매년 급성장을 보이고 있는 태양전지시장에서 제2의 반도체 강국 대안으로 유기태양전지가 큰 비중의 수출품목으로 21세기 에너지 시장의 블루오션을 선점하고 에너지 선진국으로서 지식기반사회의 요구에 따른 청정 에너지수요에 주도적으로 대응하게 될 것임.

## 참고문헌

1. 과학기술부, 한국과학기술정보연구원, 재생에너지 풍력발전. 태양전지. 조력발전 시설의 발전동향 분석, (2005)
2. 산자부전기위원회, 대한전기학회, 전력산업 경쟁력 강화를 위한정책포럼, (2005)
3. 윤경훈, 태양광기술현황, (2004)
4. 특허청, 한국발명진흥회 2004년도 PM 보고서 유기반도체 재료, (2004)
5. 문상진, 김희주, 유기태양전지의 기술현황과 전망, 공업화학전망, 제8권, 제2호(2005)
6. J. L. Bredas, R. Silbey, D. S. Boudreaux, and R. R. Chance, *J. Am. Chem. Soc.* 105, 6555 (1983).
7. R.-I. Sugimoto, S. Takeda, H. B. Gu, and K. Yoshino, *Chemistry Express* 1, 635 (1986)
8. N. S. Sariciftci, L. Smilowitz, A. J. Heeger, and F. Wudl, *Science*, 256, 1474 (1992)
9. C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, J. C. Hummelen, *Adv. Funct. Mater.* 11, 15, (2001).
10. S. E. Shaheen, C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, F. Padinger, T. Fromherz, and J. C. Hummelen, *Appl. Phys. Lett.* 78, 841 (2001)
11. J. SCHN, C. Kloc, E. Bucher and B. Batlogg, *Nature (London)* 403, 408 (2000)
12. M. A. Green, Solar cells: Operating Principles, Technology, and System Applications, (Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ (1982)
13. C. J. Brabec, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 83, 273 (2004)
14. G. Yu, J. Gao, J. C. Hummelen, F. Wudl, A. J. Heeger, *Science*, 270, 1789 (1995)
15. C. J. Brabec, J. H. P. Schilinsky, and C. Waldauf, *MRS Bulletin*, January 50 (2005)
16. K. P. Jayadevan and T. Y. Tseng, *J. Nanoscience and Nnotechnology*, 5, 1768, (2005)
17. J. R. Sheats, *J. Mater. Res*, 19, 1974 (2004)
18. S. Kirchmeyer and K. Reuter, *J. Mater. Chem.*, 15, 2077 (2005)
19. H. Jia, S.Gowrisanker, G.K. Pant, *J. Vac. Sci. Technol. A* 24(4), 1228 (2006)
20. H. Spanggaard, F.C. krebs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 83, 125 (2004)
21. S. R. Forrest, *Nature*, 428, 911 (2004)
22. 이광희, 유기복합재 유기태양전지에 관한 산자부 최종연구보고서 (2002)
23. 이창희, 다층박막 유기태양전지에 관한 산자부 최종연구보고서 (2003)
24. J.-J. Yun, et.al, *Appl. Phys. Lett.* 87, 123102-1 (2005)

25. J. H. Burroughes, C. A. Jones, R. H. Friend, *Nature(London)* 335, 137 (1988)
26. A. Tsumura, H. Koezuka, Y. Ando, *Synth. Met.* 25 11 (1988)
27. J. Paloheimo, P. Kuivalainen, H. Stubb, Vuorimaa, P. Yli-Lahti, *Appl. Phys. Lett.* 56 1157 (1990)
28. A. Assadi, C. Svensson, M Willander, O. Inganas, *Appl. Phys. Lett.* 53 195 (1988)
29. A. R. Brown, D. M. De Leeuw, E. E. Havinga, A. pomp, *Synth. Met.* 68 65 (1994)
30. H. Fuchiami, A. Tsumura, H. Koezuka, *Appl. Phys. Lett.* 63 1372 (1993)
31. K. Pichler, C.P. Jarrett, R. H. Friend, B. Ratier, A. Moliton, *J. Appl. Phys.* 77 3523 (1995)
32. G. Guillaud, M. Al Sadoun, M. Maitrot, J. Simon, M. Bouvet, *Chem. Phys. Lett.* 167 503 (1990)
33. K. Hoshimono, S. Fujimori, S. Fujita, Jpn, *J. Appl. Phys., Part 2* 32 1070 (1993)
34. A. R. Brown, D.M. de Leeuw, X. J. Lous, E. E. Havinga, *Synth. Met.* 66, 257 (1994)
35. F. Garnier, *Chem. Phys.*, 282, 253 (1998)
36. J. Xue, et al, *Appl. Phys. Lett.* 23, 5757 (2004)
37. S. Chuller, P. Schilinsky, J. Hauch and C. J. Brabec, *Appl. Phys. A* 79, 37 (2004)
38. B.-K. Choi, PhD. thesis, Tokyo Institute of Technology (2001)

## 저자소개

### ▶윤 제 정

- 공학 박사
- 광주전남 나노재료 연구회 초대회장
- 현, University of California Santabarbara Post-doc.
- Conference report:수소생산 및 저장에 관한 국제 심포지움, 등

### ▶한국과학기술정보연구원 동향정보분석팀