

# 한국생산기술연구원 솔라시티센터의 고체산화물연료전지, 태양전지 및 리튬이차전지의 연구개발 현황

글 \_ 김호성 센터장  
한국생산기술연구원

## 1. 센터 개요

최근 지구 온난화에 따른 환경 및 자원문제를 근본적으로 해결하기 위해 녹색성장의 핵심기술인 신재생에너지 개발 및 보급사업을 범국가적으로 추진하고 있다. 이러한 범국가적 친환경 자원활용 대책 사업을 효율적으로 수행하고 지역의 특성화 산업을 효율적으로 육성하기 위해 한국생산기술연구원의 솔라시티센터는 광주광역시 지원을 받아 2008년 한국생산기술연구원 호남권기술실용화본부(본부장: 강창석 박사) 내에 약 2,000m<sup>2</sup>의 전용공간 신축 및 인프라 구축을 완료하여 2009년부터 태양광, 연료전지 및 이차전지 관련 연구개발 및 기업지원 업무를 본격적으로 착수하였다.

본 센터는 광주광역시와 호남권 지역을 중심으로 하여 전국에 이르는 신재생에너지 관련 중소기업의 연구개발 및 기업지원에 집중하고 있으며, 중소기업을 글로벌 핵심중견기업으로 육성하기 위해 약 100여명의 산학연관 지역 전문가들과 네트워크를 구축하여 신규 신재생에너지 사업을 기획하고 있으며, 기술개발 및 기업지원 사업을 활발하게 수행하고 있다. 본 센터는 지역의 신재생에너지 산업 육성을 위해 우선적으로 태양광, 연료전지 그리고 이차전지 중심으로 약 100여종의 장비 및 설비 인프라 구축이 진행되고 있으며, 차세대 고성능 소재/부품 및 셀

모듈의 상용화 기술 확보를 위한 원천성 핵심 소재/부품의 제조공정 기술개발 및 고품위 평가분석 기술 확보에 중점을 두고 있다. 또한 지역의 산학연간 기술교류 및 커뮤니티 활성화에 의해 급변하는 환경에 효율적으로 대처하고, 센터의 개방화 및 공동협력을 통해 지역의 기업 경쟁력을 향상시키는 허브 역할을 목표로 하고 있다.

본 센터에서 주로 연구되는 분야로서 저가 고효율의 실리콘박막 및 CIS계 박막 태양전지 제조 및 평가기술, 저가 고성능의 고체산화물연료전지의 셀 소재 합성 및 단위셀 제조기술, 그리고 차세대 고용량 리튬이차전지의 전극 소재와 고안전성의 분리막 제조공정 기술개발에 중점을 두고 있다. 호남권 상용화 기술 본부가 설립된 2003년 이후 최근 약 5년 동안 태양광, 연료전지 및 이차전지 관련 약 50여건의 특허를 확보하고 있으며, 핵심 원천 제조공정 기술 확보에 의해 기술이전 및 상용화 기술 개발을 위한 공동연구 사업이 보다 활성화 되는 추세에 있다.

## 2. 센터의 주요 인프라 구축 및 연구진 현황

본 센터에 구축된 장비는 주로 공용성의 평가분석 장비, 그리고 태양광, 연료전지 및 이차전지 관련 전문 제조공정 및 평가분석 장비로 분류되어 솔라시티센터와 지역내의 산학연이 유기적이며 효율적으로 구축 인프라를 활용될 수 있도록 운영되고 있다. 즉 공용성이 요구되는



Fig. 1. 슬라시티센터 전경.

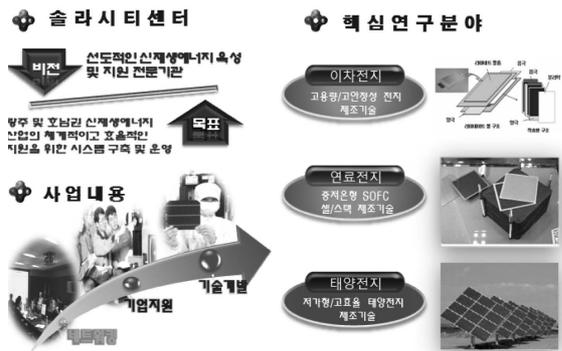


Fig. 2. 센터의 기능과 핵심연구 분야

소재분야의 특성평가 장비로서 SEM, XRD, BET, ICP, FT-IR 등 30여종의 평가 분석 장치가 운영되고 있으며, 태양전지의 경우 CIS계 박막태양전지 제조시스템, CSOG 흡수층 제조장치, PECVD 및 ICP-CVD 등 약 10여종의 핵심 제조장비, Solar Simulator (박막형, 벌크형), 분광 응답측정시스템, 계면특성평가 시스템 등 약 20여종의 평가분석 장비를 확보하고 있다. 그리고 친환경 고효율 고체산화물연료전지의 상용화 연구개발을 위한 핵심소재의 화학적 합성장치, 전극 제조를 위한 테이프캐스팅 장비 및 소성로, 셀 조립장비 및 평가장비 등 약 30여종의 주요 제조공정 장비를 구축하고 있다. 그리고 차세대 고용량 고안정성의 리튬이차전지 전극 및 분리막 소재를 개발하기 위해 약 30m<sup>2</sup>의 드라이 룸을 구축하였으며, 고용량 전극 소재의 합성 및 전극/셀 제조공정 장치, 그리고 소재/부품의 물성 평가 및 셀/전지의 전기화학특성 평가장비 등 약 20여종의 인프라를 구축하고 있다.

본 센터에 구축된 인프라 장비의 특성을 살펴보면, 순

수한 연구개발 제조공정 장비 인프라에 비해, 기업지원을 위한 공용성 및 전문 소재/셀 분석평가 장비에 우선하여 인프라 구축이 실시 되었으며, 그 비율이 약 60~70% 수준에 이르고 있다. 특히 태양광 관련 인프라의 경우, 지역에 소재하는 태양광 셀/모듈 시스템 제조 전문 중소기업들이 효율적으로 센터를 활용 할 수 있도록 연구원과의 커뮤니티 및 네트워킹을 구축하고 있으며, 최근 호남권 광역 선도사업을 통해 태양광 관련 기업지원 및 인력양성 사업을 활발하게 수행하고 있다. 그리고 차세대 고체산화물연료전지 및 고용량 리튬이차전지의 경우는 상용화 원천 제조기술을 확보하여 기술이전에 의한 신규 산업육성 및 기술고도화에 의한 기업경쟁력 강화를 준비하고 있다.

본 센터의 주요 연구진은 김호성 박사(센터장)와 장덕례 박사, 김정철 박사, 부성재 박사, 정채환박사, 이호재 박사로 주로 태양광(재료, 물리, 전자) 및 전지(화학계열) 전문가로 구성되어 있다. 그 외 나노집적센터의 최범호 박사, 김태원박사, 이종호박사, 박중운박사와 동력부품센터의 오익현박사, 차현록 박사 등이 태양전지, 연료전지 그리고 이차전지 관련 사업에 참여하고 있다.

### 3. 센터의 대표적 연구사례 (고체산화물연료전지, 이차전지, 태양광 분야)

본 센터에서는 주로 태양광, 연료전지, 이차전지 분야에 대한 연구개발 및 기업지원업무를 수행하고 있으며, 본 원고에서는 세라믹 소재를 응용하는 에너지 변환장치로서 연료전지(고체산화물연료전지, SOFC), 태양전지(저가 고효율 CIS계), 그리고 이차전지(고용량 리튬이온전지) 분야에 대한 대표적인 연구개발 사례 및 연구개발 방향에 대해 소개한다.

#### 3.1. 고체산화물연료전지 기술개발

##### 3.1.1. 나노 스케일의 고체전해질 소재합성과 박막전해질 제조 기술

중 저온에서 SOFC의 출력성능을 향상시키기 위해서



Fig. 3. 센터 내 SOFC 및 태양광 인프라 현황.

는 고체전해질의 이온전도성 향상 및 전해질 층의 박막화가 요구된다. 또한 이를 위해 고이온 전도성 전해질 분말의 나노화 및 이를 적용한 슬러리(잉크) 분산기술과 테이프캐스팅 제조기술에 대한 연구를 진행 중에 있다. 고이온 전도성의 나노급 고체전해질을 합성하기 위해 반응장치 및 반응조건의 최적화, 그리고 소재의 구성에 따른 소재의 물성 분석 및 전기화학적 특성 등에 대해 연구개발 중에 있다.

**3.1.2. 고성능 공기극 소재합성 및 전극제조 기술개발**

SOFC의 공기극은 높은 산소환원 촉매 기능과 전도성을 요구하고 있으며, 실제 셀의 경우 공기극 소재(LSCF)는 이온전도성 소재(YSZ)와 혼합되어 다공성 미세구조를 형성하므로 연료극에 비해 공기극은 전자 전도성이 크게 저하되어 전기화학반응이 제한되는 특성을 가지게 된다. 따라서 전자전도성이 높은 공기극 소재의 조성을 확보하기 위해 합성공정 조건의 최적화 연구를 진행 중에 있다. 그리고 공기극 소재는 전해질 소재와의 반응성과 열적특성에서 적절하게 조합되어야 하므로 단위셀 제조시 공기극 소결온도 및 열팽창계수 인자에 대한 디자

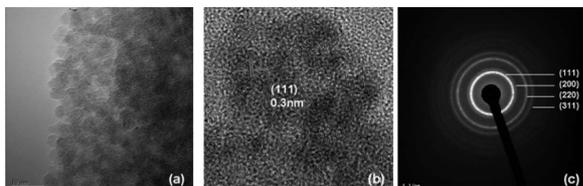


Fig. 4. 합성 고체전해질 분말(ScSZ계)의 TEM 관찰.

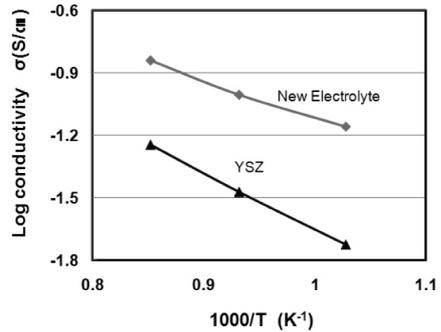


Fig. 5. 합성 신고체전해질 소재의 이온전도도 평가.

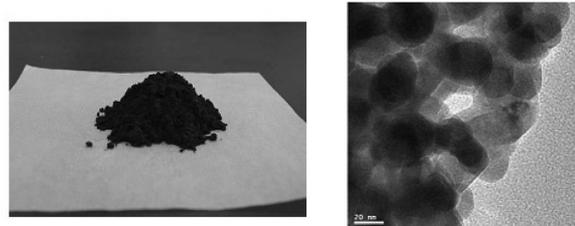


Fig. 6. 합성 공기극 소재의 TEM 관찰.

인 최적화 연구가 필요하다.

**3.1.3. 테이프캐스팅 및 동시소성에 의한 고성능 단위셀 제조기술**

저가 고효율의 연료전지 생산을 위해서는 습식법의 연속생산 공법이 매우 유리하기 때문에 테이프캐스팅 및 동시소성 공법에 의한 연료극지지체형 전해질 조립체 및 단위셀 제조에 대한 연구를 집중적으로 수행하고 있다. 즉 고이온전도성 전해질 소재(ScSZ계) 및 고성능 공기극 소재(LSCF)를 사용하고, 테이프캐스팅 공법에 의해 박막전해질(5μm)과 연료극을 제조하는 저가 고수율의 단위셀 제조 공법에 대한 연구를 수행 중에 있다. 특히 중저온에서 고출력 특성을 발휘 할 수 있도록 공기극의 소재와 전해질의 반응성 및 계면제어 기술(GDC buffer layer)에 대한 연구개발도 진행되고 있다.

**3.1.4. 신 성형공법에 의한 저가형 연료극지지체 및 단위셀 제조기술**

고체산화물연료전지의 상용화 실현을 위해서는 혁신

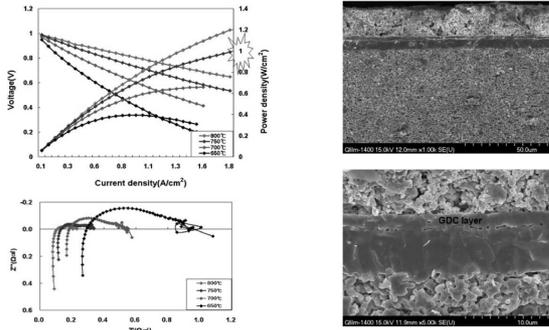


Fig. 7. 고성능 SOFC 단위셀 제조 및 성능평가 기술.

적인 코스트 다운 기술개발이 요구된다. 본 센터에서는 세계 최대용량의 전류와 압력을 인가할 수 있는 대용량 방전플라즈마 소결장비 및 Lab. Scale 장비가 구축되어 있을 뿐 아니라 핵심 공정기술을 보유하고 있다. 따라서 방전플라즈마 소결공법(SPS)을 SOFC 단위전지의 연료극지지체 제조에 적용 할 경우, 기존의 tape-casting 공정에서 필요한 슬러리 제조, casting 된 전극의 절단, 적층 및 라미네이션 공정 등이 불필요하게 되고 소결 시간도 매우 짧아 기존 전기로에 의한 소결공정에 비해 약 1/10 수준 이하가 되기 때문에 SOFC 단위전지의 제조원가를 과격적으로 다운 시킬 수 있는 공정이 될 수 있을 것으로 판단된다. 더욱이 SPS 공법에 의해 세라믹 복합소재로 구성된 SOFC 대면적 단위전지를 소결 할 경우, 휨 현상 및 상호 응력에 의한 균열발생 문제를 보다 쉽게 제어 할 수 있는 고유 특성이 있어 매우 매력적인 제조 수단이 될 수 있을 것으로 예상된다.

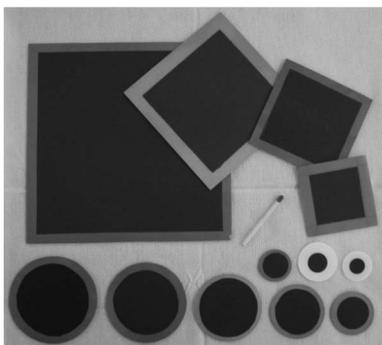


Fig. 8. 평판형 대면적 SOFC 단위셀의 제조기술.

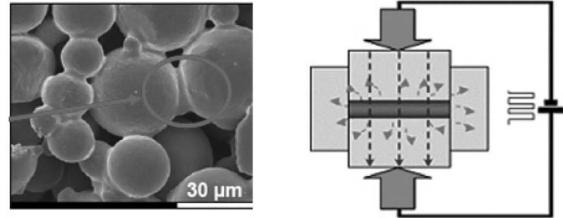


Fig. 9. 플라즈마소결공법에 의한 SOFC 연료극 제조기술 개발.

### 3.2. 저기형 고효율 태양전지 기술개발

#### 3.2.1. 전자빔 조사를 이용한 저기형 CSOG(Crystalline Silicon on Glass)부품 상용화 및 태양전지 제조 공정 기술개발

태양전지의 대면적화에 따라서 소요되는 폴리실리콘, 잉곳 등 원재료량이 증가하며 이는 태양전지 가격상승의 주된 원인이 되고 있어 실리콘 벌크의 두께를 최소화(박형화)하는 방향으로 많은 연구개발이 이루어졌으나, 125  $\mu\text{m}$  이하로 최소화하는데 공정상 많은 어려움이 따르고 있다. 이에 최근 다결정 실리콘 박막을 이용한 태양전지는 유리/세라믹 등 저기형 기판위에 빛을 흡수하는 최소한의 두께로 (50 $\mu\text{m}$  이내) 실리콘층을 형성하여 태양전지를 제조하는, 저가와 고효율화를 동시에 고려한 신개념 태양전지 Concept이 제안되고 있다. 본 과제에서는 비정질 태양전지처럼 Glass 기판을 사용하지만 비정질 실리콘 박막태양전지의 p-i-n접합구조가 아니라 Glass 위의 실리콘을 결정화시킴으로써 단결정 실리콘태양전지와 같이 p-n접합 구조를 형성할 수가 있기 때문에 개방전압이 높아지고, 결정질의 장점인 전하의 확산 거리를 증가 시켜 변환효율을 실리콘 박막 태양전지 보다 50% 이상 높을 수가 있으며, 또한 결정화과정에서 이온주입 후, 고온 열처리공정 없이 E-Beam에 의하여 결정화되기 때문에 확산공정을 생략할 수 있을 뿐 아니라, 확산공정에서 발생하는 산화막(PSG, BSG)을 제거하는 공정이 생략되기 때문에 공정단가를 훨씬 줄일수 있고, 공정시간(TAT: Turn Around Time)을 단축할수 있어서 제품경쟁력을 강화할 수 있다.

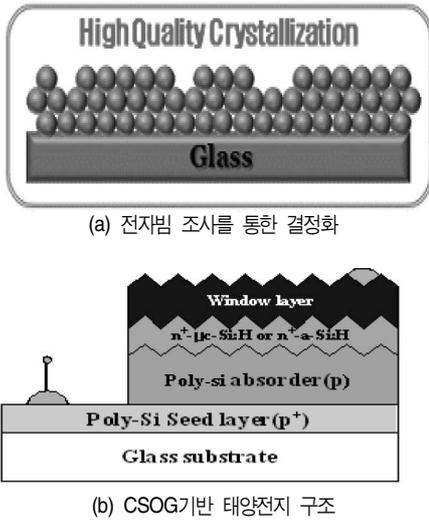


Fig. 9. 전자빔조사를 통한 결정화(a)와 CSOG기반 태양전지 구조(b).

### 3.2.2. 저가 고효율 나노구조기반의 태양전지 소재/부품 기술개발

평판형 구조의 태양전지에서 흡수가 되는 층의 나노구조(나노와이어, 나노콘 등)의 형상을 제어함으로써 텍스처 공정이 불필요하고 Aspect ratio의 조절을 통한 나노양자점 효과를 얻는 고효율 태양전지에 대한 연구개발을 진행하고 있다. 기존 실리콘 기판과 대조적으로 유리기판 위에 Seed layer층을 형성한 후 나노구조를 성장시킴에 있어, Hydrogen radical CVD를 이용한 고밀도 플라즈마에 의해 메탈과의 VLS(vapor-liquid-solid) growth를 통해 성장시킨다. 나노구조의 태양전지의 이론적인

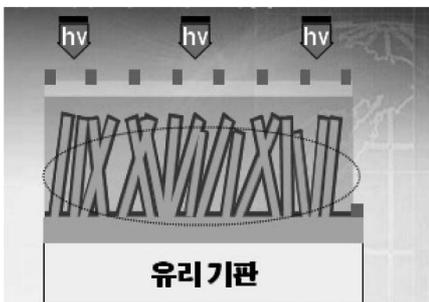


Fig. 11. 나노와이어를 이용한 저가형 고효율 태양전지 구조

효율한계는 약 30%까지 보고 있으며, 국외에서는 나노와이어에서 약 10%의 효율을 달성하고 있다.

### 3.2.3. 고효율 Tandem 구조의 CIS계 박막태양전지 요소 원천기술개발

CIS계 박막태양전지의 저가화를 위하여 유리기판을 사용하여 기존 Evaporation방식에 비해 대면적과 생산시간이 빠른 Sputtering법을 이용한 방식이 각광을 받고 있다. CIS계의 고효율화를 위해서는 CIS의 화합물 조성비를 위한 결정화 공정이 핵심공정으로 대부분 RTP(Rapid Thermal Process)에 의해 휘발성이 강한 Se, S를 보충해 주면서 진행되고 있으나, 결정화 공정후 CIS흡수층의 표면조도가 높아 후공정 제어가 쉽지 않다. 또한 CIS계에서 Ga, In, Zn, Al 등을 첨가하여 다양한 밴드갭을 갖는 흡수층을 만들수가 있어 기존의 Single junction이 아닌 Top/bottom셀구조를 갖는 Tandem구조로서 고효율화를 이룰수 있다. 이때 Top/bottom셀을 연결하기 위한 Tunneling junction이 중요하며, 이에 따라 효율차이가 많이 날수 있다. 30%가 넘는 이론적인 효율을 기대할수 있어 향후 실리콘 벌크를 대체할수 있는 고효율 셀로 양산화가 가능한 분야이다.

## 3.3. 차세대 고용량 이차전지 기술개발

### 3.3.1. 고용량, 고안전성 리튬이차전지용 전극소재 기술

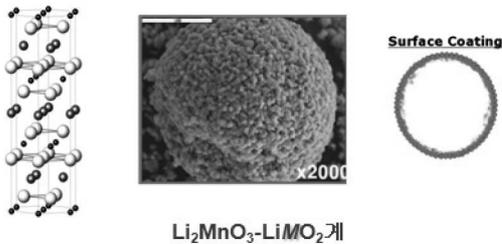
- EV/HEV용 고용량 리튬이차전지용 양극소재로서 기



Fig. 12. 고효율 Tandem 구조를 갖는 CIS계 박막태양전지 구조 및 개발 계획.

존  $\text{LiCoO}_2$  소재를 대체할 수 있는 신규 양극소재로서 고전압, 고용량의 리튬 망간 rich계 복합 산화물( $\text{Li}_2\text{MnO}_3\text{-LiMO}_2$ ) 및 고안전성의 인산염계 소재( $\text{LiMePO}_4$ ) 등이 검토되고 있으며, 고전압 충방전 조건에 따른 소재의 상 변화에 기인한 활물질 입자표면 손상, 전해액 분해 및 산소 가스 발생, 저율특성 등 여러가지 기술적인 문제점을 극복 할 수 있는 신소재 개발에 중점을 두고 있다.

- 본 센터에서는 이러한 고용량 저가 망간 리치계 복합 산화물 및 인산염계 양극소재에 주목하여 보다 고용량 고안전성의 리튬이차전지용 양극소재 복합산화물을 개발 하는데 주력하고 있다.



- √  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ 계 소재 합성, 고용체 형성/표면처리
- √  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$  소재의 전기화학적 활성화 방안 착안
- √ 방전전압의 평탄성, 사이클 및 저온 특성 개선

Fig. 13. 차세대 고용량 리튬이차전지 전극소재 개발 방안.

### ●● 김호성 박사



- 소 속 : 한국생산기술연구원, 슬라시티센터, 수석연구원/센터장
- 2005년 삼성종합기술원, Advanced Materials Team, 수석연구원
- 2000년 도후쿠 대학(Tohoku University, Japan), 응용화학과 박사
- E-mail : hosung42@kitech.re.kr
- 연구분야 : 연료전지, 리튬이차전지, 태양전지 등 에너지 발전 및 저장 시스템의 소재 합성 및 전극 제조공정, 셀/모듈의 전기화학 평가