

SOFC 단전지/스택 개발동향

이종호, 김주선, 이해원
 한국과학기술연구원 나노재료연구센터
 {jongho, joosun, hwlee}@kist.re.kr

1. SOFC 단전지/스택 개발동향

고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell)는 인산형, 용융탄산염형, 고분자형 등의 여러 연료전지 유형 중 에너지 효율이 가장 높고, 높은 운전온도로 인해 고가의 외부 개질장치 없이 LPG, LNG 등의 탄화가스를 직접 연료로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 자체적인 내부개질에 의해 다양한 연료사용이 가능하다고 알려져 있는 발전시스템이다. 또한 SOFC는 다른 유형의 연료전지 시스템에 비해 구조적 신뢰성을 가지는 모듈화가 용이하며, 낮은 소음과 진동으로 인하여 온 사이트 발전에 유리하다고 알려져 있다. 최근 들어선 SOFC 발전 시 발생하는 양질의 고온폐열을 가열공정에 사용하거나 열병합발전에 접목하여 열효율을 증가시킬 수 있다는 점 때문에 온 사이트발전 등의 중소형 발전시스템 뿐만 아니라 중대형 발전시스템으로도 각광받고 있다.

1.1 구성소재 개발동향

고체산화물 연료전지 또는 세라믹 연료전지는 고체산화물을 전해질로 사용하는 연료전지로서 여러 연료전지

유형 중 가장 높은 고온에서 작동되는 특성을 가진다. 일반적으로 고체산화물 연료전지를 구성하는 핵심 구성요소로는 크게 양극, 전해질, 음극, 분리판, 밀봉재로 나뉘어 지는데 각 구성성분들이 처한 물리화학적 환경과 전기화학적 장치 구성요소로서의 역할에 따라 다양한 요구조건들이 제시되고 있다. Table 1에는 각 구성요소들이 가져야하는 특성들을 정리해 놓았다.

한편 고체산화물 연료전지는 단전지, 스택 및 운전온도에 따라 다양한 종류가 개발되고 있다. 단전지는 구조적 지지체에 따라 전해질 지지형 및 전극지지형이 있으며, 전극 지지형에는 다시 양극지지형 및 음극지지형이 있다. 스택은 원통형 및 평판형으로 구분되며, 평판형은 다시 제조공정에 따라 평판일체형 및 평판분리형으로 나누어진다. 고체산화물 연료전지는 또한 응용분야에 따라 800-1000°C 부근에서 작동하는 고온형, 650-800°C에서 작동하는 중온형 그리고 650°C 이하에서 작동하는 저온형으로 나누어 개발되고 있다.

고체산화물 연료전지를 구분하는 가장 일반적인 방법은 스택의 형태에 의한 것으로 스택의 형태에 따라 사용되는 구성소재들의 종류도 각기 다르다. Table 2에는 이

Table 1. 고체산화물 연료전지 구성요소별 요구조건

구성요소	요구조건				
	전도성	안정성	화학적 반응	기공도	열팽창
전해질	높은 이온전도도 낮은 전자전도도	산화 및 환원분위기 하에서 화학적, 상, 형상, 치수 안정성	주위 구성부품과 화학반응이나 상호확산이 없을 것	치밀조직	주위 구성요소와 열팽창계수가 같을 것
양극	높은 이온전도도 높은 전자전도도			충분한 기공	
음극	높은 이온전도도 높은 전자전도도			충분한 기공	
분리판	낮은 이온전도도 높은 전자전도도			치밀조직	
밀봉재	낮은 이온전도도 낮은 전자전도도			치밀조직	

Table 2. 연료전지 유형에 따른 구성요소별 재료²⁾

구분	구성요소	구성소재	
원통형	단 전지식	지지관	Doped LaMnO ₃ , YSZ, CSZ
		전해질	10% Y ₂ O ₃ -ZrO ₂
		양극	10% SrO doped LaMnO ₃
		음극	Ni / YSZ
다 전지식	분리판	지지관	10% Mg doped LaCrO ₃
		전해질	CSZ
		양극	YSZ
		음극	LaCoO ₃ , Doped LaMnO ₃
평판형	분리판	지지관	Ni / YSZ
		전해질	NiAl, TiO ₂
		양극	YSZ
		음극	Doped LaMnO ₃
		밀봉재	Ni / YSZ
		밀봉재	Doped LaCrO ₃ 또는 금속재 유리 또는 결정화 유리

러한 다양한 구성소재들 중 현재 가장 널리 적용되고 있는 소재들을 위주로 정리하여 놓았다.

1.2 제조공정 개발동향

고체산화물 연료전지는 그 형태에 따라 제조공정도 각기 다르다. 현재 상용화에 가장 근접한 형태는 원통형으로 1997년에 이미 100 kW급이 제작되어 시운전된바 있다. 원통형은 평판형에 비해 구조적으로 안정성을 가지며, 가스 밀봉이 요구되지 않는 장점이 있다. 그러나 원

Table 3. 원통형 고체산화물 연료전지 제조공정²⁾

구성요소	재료	두께 (μm)	제조공정			
			EVD	slurry 코팅	플라즈마용사	입출성형
지지관	CSZ	1200-2000				○
전해질	YSZ	40-150	○	○		
음극 (음극지지체)	Ni+YSZ	80-100	○	○	○	
양극 (양극지지체)	Ni+YSZ	~2000				○
세라믹분리판	(La,Sr)MnO ₃	150-200		○		
금속분리판	(La,Sr)MnO ₃	~2000				○
	(La,Sr)CrO ₃	85-100	○	○	○	
	NiAl	100-150	○			

Table 4. 평판형 고체산화물 연료전지 제조공정²⁾

구성요소	재료	두께 (μm)	제조공정					
			용사	slurry 코팅	Tape casting	스크린 인쇄	압축 성형	기계 가공
전해질 (전해질지지체)	YSZ	10-50	○	○	○	○		
음극 (음극지지체)	YSZ	250-500			○		○	
양극	Ni+YSZ	25-100	○	○	○	○		
세라믹분리판	Ni+YSZ	800-2000			○		○	
금속분리판	(La,Sr)MnO ₃	25-100	○	○	○	○		
	(La,Sr)CrO ₃	200-1000	○		○		○	
	고온내열합금	2000-6000	○					○

통형은 평판형에 비해 전력밀도가 낮고 제조단가가 비싸며 제조공정이 복잡하고 어렵다는 단점이 있다. 평판형은 모든 단전지 구성층을 한꺼번에 형성한 후 동시 소결하는 방법으로 제조되어 공정이 단순하다는 장점을 가지나 서로 다른 특성을 가진 재료들을 동시소결하는데 어려움이 있어 현재는 매우 제한적으로 연구 개발되고 있다. 연료전지 중에서 현재 가장 활발하게 연구되고 있는 형태는 구성층을 순차적으로 소결하는 평판분리형으로 성능과 제조의 어려움이 모두 중간수준인 스택이다. 평판분리형 연료전지는 현재 수 kW급의 스택을 제조할 수 있는 기술이 확립되어 상용화를 위한 기술개발이 이루어지고 있는 상황이다. Table 3, 4에는 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 고체산화물 연료전지의 제조공정을 유형별로 정리해 놓았다.

1.3 구성소재 발전방향

최근 들어 SOFC의 사용목적에 따라 보다 낮은 작동 온도를 필요로 하거나 보다 높은 내구성이 요구되어짐에 따라 기존에 적용되고 있는 소재들을 대체할 새로운 소재개발연구가 활발히 진행되고 있다.

1.3.1 전해질재료

가장 널리 이용되고 있는 이트리아 안정화 지르코니아 (YSZ)의 경우 800°C에서 이온전도도가 0.01S/cm 정도라 최근 개발되고 있는 중저온형 SOFC의 고체전해질로는 한계를 보이고 있어 새로운 대체전해질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 가장 활발히 연구되고 있는 전해질 재료는 CeO₂계 전해질로 Gd가 첨가된 세리아의 경우 800°C에서의 이온전도도는 8.3×10⁻² S/cm 정도이며 Sm가 첨가된 경우는 약 11.7×10⁻² S/cm로서

기존 지르코니아계 전해질의 경우보다 훨씬 높은 이온전도도를 나타내고 있다. 그러나 세리아계 전해질은 800°C에서의 경우 고체전해질로 사용가능한 산소분압 하한이 10^{-12} atm 정도이며 1000°C에서는 약 10^{-8} atm 정도로 알려져 있어 지르코니아계 전해질보다 좁은 전해질 영역 (electrolytic domain)을 가지고 있다. 그러나 환원분위기에서 나타나는 이러한 전자전도성에도 불구하고 세리아계 전해질이 가지는 높은 이온전도도 때문에 현재도 많은 연구의 대상이 되고 있으며 특히 최근 개발되고 있는 저온형 SOFC의 주 전해질 재료로 활용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 그 외에도 Bi_2O_3 계 전해질, LaGaO_3 계 전해질 등이 연구되고 있는데 Bi_2O_3 계 전해질은 좁은 상안정 영역에 의해, perovskite 구조의 LaGaO_3 계 전해질은 산소 분압이 높은 영역에서 보이는 정공(hole)에 의한 전도성 때문에 그 사용이 제한되고 있다.

1.3.2 양극재료

최근에는 기존 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ 의 장점을 가지면서 단점을 최소화할 수 있는 물질로 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ 또는 $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ 와 같은 물질이 제안되었으나 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ 는 열팽창계수가 YSZ와 많은 차이를 보이는 점이 $\text{Y}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$ 는 높은 산소이온 전도성에도 불구하고 낮은 전자전도성으로 인해 응용되고 있지 못하다. 또한 LaMnO_3 의 경우와 유사하게 La 위치에 저원자가 원소를 치환하여 전자전도성을 향상시킬 수 있으며 동시에 이온전도성도 향상시킬 수 있다고 알려진 LaCoO_3 가 양극재료로 연구된바 있으나 환원분위기에서의 안정성 및 전해질과의 반응성 그리고 다른 구성성분과의 커다란 열팽창계수차가 문제로 지적되고 있다. 한편 보다 낮은 온도에서 작동가능한 양극층을 구성하기 위해 양극층에 Pt과 같은 금속전도체를 첨가하거나 LaNiO_3 과 같이 좁더 큰 전자전도도를 갖는 재료가 연구된바 있으나 아직 만족할 만한 결과는 얻지 못하고 있다.

1.3.3 음극재료

Co는 Ni와 같은 전이금속으로 그 촉매특성이나 전기적 물성이 매우 유사하기 때문에 SOFC에서 사용할 수

있는 또 다른 금속재료로 인식되고 있다. 특히 Co는 Ni에 비하면 황에 대한 내성이 강해 최근 순수 수소가 아닌 탄화수소 가스를 연료로 사용하는 연구들에서 많이 사용되고 있다. 그러나 Co는 Ni보다 가격이 높아 경제성은 떨어지며 특히 산화전위가 Ni보다 높아 연료가스의 산화반응에 대한 활성이 Ni를 사용하는 경우보다 못하다. 한편 혼합전도체 산화물을 SOFC의 음극재료로 사용하기 위한 연구도 제안되었다. 혼합전도체는 산소이온과 전자 모두가 전도될 수 있으므로 전극과 가스 계면 전체에서 전기화학적 반응을 얻을 수 있어 분극저항을 줄일 것으로 예상하고 있으나 금속전극에 비해 떨어지는 전기전도도가 문제로 지적되고 있다. 한편 최근 들어 천연가스등의 탄화수소가스를 연료로 사용하기 위한 많은 연구들에서 기존의 Ni/YSZ cermet 음극을 사용하는 경우 탄소 증착 반응이 활발히 진행되어 성능이 급격히 감소하는 것으로 알려져 있어 Ni계 연료극에 oxide film(yttria-doped ceria, YDC)을 형성하거나 Ni 대신에 Cu계 연료극을 사용하여 탄소 증착을 줄이기 위한 연구가 진행되고 있다.

1.3.4 분리판재료

최근 들어선 금속 분리판 표면에 산화물을 코팅시켜 금속 분리판의 산화를 억제하고 고온 계면반응에 따른 연료전지의 성능저하를 감소시키려는 연구가 진행 중인데 코팅에 사용되는 산화물은 $(\text{LaSr})\text{CoO}_3$, $(\text{LaSr})\text{MnO}_3$, $(\text{LaSr})\text{CrO}_3$ 등의 복합산화물들이 주로 시도되고 있다. 한편 최근에는 700°C 이하의 낮은 온도에서 연료전지를 구동하기 위한 연구들이 많이 시도되고 있는데 이 경우 저가의 ferritic stainless steel을 사용하는 것이 가능하기 때문에 최근 저가의 분리판 재료에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

1.3.5 밀봉재 재료

최근 들어 자동차 보조전원용으로 SOFC를 활용하기 위한 연구들에선 급격한 열싸이클에 대한 요구조건이 심화되어 유리질만을 이용한 밀봉재 개발이 어려워 금속재질을 이용하거나 세라믹섬유와의 복합체 구성을 통해 한계를 극복하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

Table 5. 해외 SOFC 관련 기업 및 연구기관 현황

기관 및 기업명	국 가	스택 구조		제품특성
		단전지 형태	분리판	
Siemens Westinghouse	미국	원통형(양극 지지형)	LaCrO ₃ Ni felt	220kW system 250kW FC/GT system
Ztek	미국	원반형(전해질 지지형)	-	가압 25kW module 250kW FC/GT system
Mitsubishi 중공업	일본	원통형(band cell 연결형)	NiAl/Al ₂ O ₃	가압 10kW module
Chubu 전력 Mitsubishi 중공업	일본	평판형 (Mono block layer built type)	LaSrCoO ₃	5kW module 25kW system
TOTO, Kyushu 전력	일본	원통형(양극 지지형)	LaCrO ₃	10W stack
Tokyo Gas	일본	평판형(음극 지지형)	Al ₂ O ₃ LaCrO ₃	1.5kW stack
Sulzer Hexis	스위스	평판형(전해질 지지형)	Cr ₅ Fe ₁ Y ₂ O ₃	1kW급 system
SOFCo	미국	평판형(음극지지형)	LaCrO ₃	2kW급 stack
Honeywell/GE	미국	평판형(음극 지지형)	금속	500W system
TMI	미국	평판형(전극 지지형)	금속	500W system
Ceramic Fuel Cell	호주	평판형(전해질 지지형)	CrFeY ₂ O ₃	1kW 스택
Riso 연구소	덴마크	평판형(음극 지지형)	La(Sr)Cr(V)O ₃	0.5kW stack
Julich 연구소	독일	평판형(음극 지지형)	Cr ₅ Fe ₁ Y ₂ O ₃	10-cell (10×10cm ²) stack

2. 국내외 관련 산업현황

2.1 국외 관련 연구기관 및 기업 소개

외국의 경우 SOFC 시스템의 경제성을 확보하기 위한 연구개발은 주로 기업체와 연구소들이 진행시키고 있으며 SOFC의 성능향상 연구는 대학팀들이 참여하고 있다. 그러나 현재 대학팀들의 연구는 기업체나 연구소와의 별다른 연계 없이 독자적으로 진행되는 경우가 많으며 주로 소재개발연구에 치중하고 있다.

- 미국은 2000년 들어 DOE 주관의 SECA (Solid state Energy Conversion Alliance) 프로그램을 통해 2010년 SOFC의 상용화를 목적으로 한 범국가적인 사업을 시작하였다. SECA에서는 GE, Delphi 등 산업체와 PNNL, ANL, ORNL 등의 국립연구소들이 컨소시엄을 형성해 대부분의 연구역량을 가정용, 자동차 보조전원용 등으로 활용 가능한 kW급 평판형 SOFC를 개발하는데 집중하고 있다. 이들은 단전지의 대면적화, 구성요소의 박막화를 통한 소재비 절감과 부품의 양산공정을 통한 시스템의 경제성 확보에 집중하고 있다. SOFC의 성능향상을 위한 기술개발은 Georgia Tech, Florida, Utah 대학 등 대학팀들 위주로 진행되고 있는데 주로 저온작동을 위한 새로운 신소재개발에 치중하고 있다.
- 일본에서도 산학연 협력체제로 SOFC의 상용화를 위한

과제를 진행시키고 있으며 특히 발전업체나 전기회사가 적극적으로 참여하고 있다. 일본의 경우도 현재 AIST와 동북대 등 연구소, 대학팀들 위주로 저온작동을 위한 평판형 소재개발연구를 진행시키고 있는데 특히 고체전해질 개발에 강점을 가지고 있어 지금까지 많은 새로운 고체전해질 후보물질들에 대해 보고하고 있다.

- 유럽에서는 중소형 발전시스템에 적합한 평판형 SOFC 개발에 주력하고 있으며 현재 스위스의 Sulzer-Hexis사를 선두로 스택의 경제성을 확보하기 위한 소재 및 공정개발에 주력하고 있다. 스택의 저온작동을 위한 소재 및 공정개발 연구는 독일의 Karlsruhe 대학과 스위스의 ETH에서 진행시키고 있는데 특히 ETH의 경우 나노재료를 전해질로 활용하기 위한 연구를 진행하고 있다. SOFC 개발을 선도하고 있는 이러한 대표적인 국외 기업 및 연구기관들을 선별해 Table 5에 정리해 놓았다.

2.2 국내 관련 연구기관 및 기업 소개

국내에서는 선진기술국들에서 진행되고 있는 SOFC 스택의 상용화를 위한 경제성, 안정성 확보차원의 연구개발은 진행되고 있지 못하며 상용화 수준의 대형 단전지를 제조, 평가하는 연구나 밀봉재, 분리판등 스택구성에 필요한 부품을 개발하는 연구도 아직 초보단계에 있다.

Table 6. 국내의 SOFC 관련 기업 및 연구기관 현황

기관 및 기업명	제조공정 및 개발내용
전력연구원	- 음극지지형 평판형 단전지 제작 (10×10cm ²) - 음극(압축성형), 전해질(슬러리코팅), 양극(프린팅) - 전해질 두께 15-20μm, 운전온도 650-800°C - 200W급 SOFC 스택 개발
요업기술원	- 소형 전해질지지형 단전지 제작 - 작동온도 800°C - SOFC 소재(전해질, 전극, 밀봉재) 개발
에너지기술연구원	- 음극지지제형 원통형셀 및 금속연결재 제작 (150 cm ² , L = 25cm) - 음극지지판(압출성형), 전해질(슬러리코팅), 양극(슬러리코팅) - 전해질 두께 20μm, 운전온도 700-900°C - 100W급원통형 스택개발
KIST/쌍용	- 전해질지지형 평판형 단전지 제작 (10×10cm ²) - 전해질(테이프캐스팅), 음극(프린팅), 양극(프린팅) - 작동온도 800-900°C - 100W급 스택 개발
KIST/현대자동차	- 음극지지형 평판형 단전지 제작, 양산공정 개발 (10×10cm ²) - 음극(압축성형), 전해질(프린팅), 양극(프린팅) - 전해질 두께 5-15μm, 운전온도 650-800°C - 300W급 SOFC 스택 개발

현재 국내에는 한국과학기술연구원, 한국에너지기술연구원, 전력연구원 등이 대표적인 연구기관으로, 한국과학기술연구원의 경우 현대자동차와 함께 10×10 cm 크기의 단전지에 기반한 하이브리드 자동차용 kW급 SOFC 스택 개발을 추진 중이며 한국에너지기술연구원의 경우 소형 원통형 SOFC 스택으로 수송기기 및 산업용 보조전원 장치 및 가스터빈과의 하이브리드 대형복합발전 시스템 개발에 주력하고 있다. 한편 전력연구원에서는 평판형 SOFC를 사용하여 가정용 kW급 시스템개발을 추진 중이며 그밖에 서울대, 연세대, 포항공대, KAIST 등에서 일부 학문적인 관점에서 소규모 연구가 진행되고 있다.

Table 6에서 보듯이 SOFC 상용화를 위한 국내의 기술개발 노력은 몇몇 대학과 출연연구소들 위주로 진행되어 왔으며 최근 들어서야 범국가적인 관심이 높아지면서 현대자동차와 포항제철 등 대기업들이 스택의 경제성을 고려한 대형 단전지를 제조하거나 밀봉재, 분리판 등 스택구성 부품들의 경제성, 안정성을 확보하기 위한 투자를 시작했다. 그러나 아직까지 이러한 노력들은 초보 단계에 머물러 Table 7에서 보듯이 SOFC 관련 핵심기술에 대한 국내의 수준차는 여전히 큰 실정이다.

Table 7. 핵심기술 분야의 국내외 수준비교

기술분류	개발목표	핵심기술	선진국 대비%
구성소재 합성기술	전해질/전극 소재 양산화	· 초미립, 고순도 분말 합성기술 · 경제성있는 양산공정 기술 · 순도, 입도분포 등 품질관리 기술	30
소재물성 향상/신소재 개발기술	700°C이하 저온 작동용 신소재 개발 및 소재물성 향상	· 전도도 향상, 분극감소를 통한 성능향상기술 · 전극/전해질 계면구조, 전극 미세구조제어기술 · 저온 작동을 위한 대체 전해질/전극 개발	40
단전지 제조기술	100-400cm ² 단전지 (0.4W/cm ² at 700°C) 성능감소 0.5%/1000시간	· 전극, 전해질 기판의 대면적화 기술 · 대면적 박막전해질 코팅기술 · 연속공정 및 동시소결 기술 · 경제성있는 단전지 제조공정기술	50
밀봉재	열적싸이클, 분위기 안정성 (고온, 환원, 수증기)	· 열팽창, 열변형 제어기술 · 열싸이클 안정화 기술 · Wettability 제어기술 · 고온내구성, 내부식성 향상기술 · 대면적 밀봉재 제조기술	30
분리판	저가의 금속 재료, 수명 > 10,000 시간	· 저가의 내열금속 소재개발 · 저가금속소재의 내산화성 향상기술 · 분리판 표면가공 및 표면처리기술 · 열팽창계수 일치화 기술	40
집전/밀봉 기술		· 대면적 단전지 적층기술 · 대면적 스택 밀봉기술 · 대면적 단전지 집전기술	30
스택설계 및 제조기술	kW급 스택모듈 제조 (600-700°C)	· 경제성있는 대형스택 제조공정기술 · 장기안정성/열싸이클 안정성 확보 · 대형스택의 신뢰성 향상기술	50

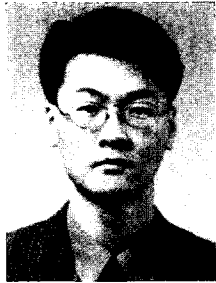
3. 결 론

고체산화물 연료전지(SOFC) 단전지나 스택용 소재개발은 구성재료가 모두 고체라는 것과 재료를 고온에서 이용한다는 두가지 관점에서 요구조건에 맞게 개발되어야 한다. 또한 재료 단독으로 개발되기 보다는 이용형태인 연료전지 스택의 디자인 및 제조공정기술을 고려하여 개발되어야 한다. 특히 최근들어 SOFC의 작동온도를 낮추려는 경향과 자동차용으로의 응용에 필요한 열싸이클에 대한 요구조건이 까다로워지면서 재료개발 문제는 더욱 복잡해지고 있는 추세이다. 사용온도의 저온화는 저가의 금속재를 구성부품으로 사용할 수 있어 경제성을 높일 수 있는 반면 금속의 부식방지 문제가 새로이 대두되고 있으며 낮은 작동온도로 인한 전기화학적 활

성유지 문제가 또한 고려되어야 할 것이다. 또한 다양한 연료수요에 대한 대비가 있어야 할 것이며 따라서 전체적으로는 고온고체전기화학, 촉매과학, 부식방지과학 등 다양한 기술적 학문적 관점에서 SOFC 재료개발에 필요한 새로운 전략을 짜낼 필요가 있을 것이다.

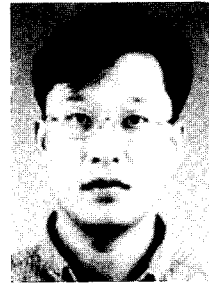
참고자료

1. 최병현, "고체산화물 연료전지 TRM", 산자부 (2003).
2. 고체산화물 연료전지 개발현황 및 전망, 요업기술원 (2002).
3. 연료전지 국가과학기술지도, 과기부 (2002).
4. 차세대 청정발전 연료전지 기술개발사업 타당성 조사 및 세부기획보고서, KISTEP (2001).
5. 산업자원부 전지 roadmap (2001).



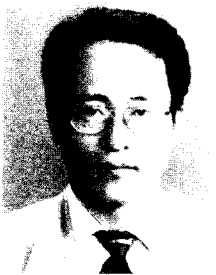
이종호

- 1988년 서울대학교 무기재료공학과 졸업
- 1990년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 1994년 서울대학교 무기재료공학과 박사
- 1994년 서울대학교 RETCAM, Post Doc.
- 1995년 독일 TU-Darmstadt, 전기화학 연구소 연구원
- 1998년 KIST 나노재료연구센터, 선임, 책임연구원
- 현재



김주선

- 1990년 연세대학교 요업공학과 졸업
- 1992년 KAIST 재료공학과 석사
- 1998년 KAIST 재료공학과 박사
- 1998년 U. Pennsylvania, 연수연구원
- 1999년 KAIST 계면공학연구센터
- 2000년 연수연구원
- 2000년 KIST 나노재료연구센터
- 현재 선임연구원



이해원

- 1980년 서울대학교 요업공학과 졸업
- 1982년 서울대학교 요업공학과 석사
- 1990년 U. Florida 재료공학과 박사
- 1990년 美 Keramont Advanced Materials Corp., R&D Manager
- 1992년 KIST 나노재료연구센터
- 현재 선임, 책임연구원