

고체산화물 연료전지용 분리판 소재

김도형, 전재호, 김승구, 전중환
 포항산업과학연구원 부품·신소재 연구센터
 {dhkim, jaeho, seunggoo, junjh}@rist.re.kr

1. 서 론

최근 고체산화물 연료전지(SOFC)의 분리판(또는 연결재; Separator or Interconnect) 재료는 기존의 세라믹재료 대신에 금속재료를 적용할 수 있게 되었다. 이는 전해질의 두께 감소, 구성요소의 특성향상 및 셀 디자인의 개선 등으로 인하여, 낮은 온도에서도 높은 전력 밀도의 전지성능이 가능해졌기 때문이다.¹⁻³⁾ SOFC 구성요소의 하나인 분리판은 기본적으로 한 셀의 연료극과 이웃하는 셀의 공기극을 전기적으로 연결하며, 공기극에 공급되는 공기와 연료극에 공급되는 연료가스를 물리적으로 차단하는 역할을 하여야 한다(Fig. 1). 본 글에서는 SOFC의 가동 환경에서 필요한 분리판 소재의 요구특성에 대하여 먼저 알아보고, 지금까지 개발되어 적용되고 있는 여러 가지 분리판의 특성과 연구개발 동향을 살펴보고자 하였다.

2. SOFC의 종류와 분리판

SOFC 스택은 통상 그 형태에 따라 원통형, 일체형, 평판형의 세 가지로 구분하기도 하고, 작동 온도에 따라

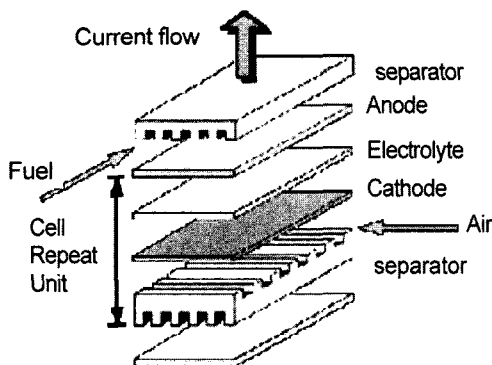


Fig. 1. SOFC 단전지의 구조

고온형과 중온형 그리고 저온형으로 구분하기도 한다. SOFC의 종류와 그 각각의 특징에 대하여서는 본 특집의 다른 글에서 찾아 볼 수 있을 것이므로 여기서는 상세한 설명을 생략하고 SOFC의 종류에 따른 분리판 사용 현황만을 간단히 살펴보면 대략 표 1과 같이 정리할 수 있다.

먼저 통상 800°C 이상에서 가동되는 HT-SOFC의 분리판으로서는 주로 LaCrO₃ 계의 세라믹이나 Cr계 합금(Ducralloy 등)이 많이 사용되고, 중온용(IT) 및 저온용(LT) 분리판으로서는 페라이트계 스테인레스 강판(Fe-Cr 합금)과 같은 금속분리판이 많이 사용되고 있다. 최근의 SOFC 연구개발 동향에서 가장 주목할 부분의 하나가 바로 스테인레스계 금속 분리판의 적용 노력이라고 할 수 있는데, 이러한 기술은 전해질 및 전극의 특성향상과 셀 디자인의 개선 등에 따른 SOFC 스택의 저온 작동화에 의해 뒷받침되어 SOFC의 경제성과 내구성 그리고 실용화 가능성을 대폭 향상시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다.

3. 분리판의 요구특성

SOFC용 분리판은 기본적으로 한 셀의 연료극과 이웃하는 셀의 공기극을 전기적으로 잘 연결하여야 한다. 또한 공기극에 공급되는 공기와 연료극에 공급되는 연료가스를 물리적으로 차단하는 역할을 하여야 한다. 셀과 셀을 전기적으로 연결한다는 의미에서 연결재(Interconnect)라고 부르기도 하고 셀과 셀을 물리적으로 분리한다는 의미에서 분리판(Separator)이라고 부르기도 한다. SOFC에 사용되는 분리판의 요구특성에 대하여 자세하게 살펴보면 다음과 같다.

1) Electrical conductivity: 무엇보다도 분리판은 SOFC

Table 1. SOFC Technology and Current Leading SOFC Developers⁵⁾

	Type	Interconnect	Electrolyte	Company & Institute
LT	planar	metal	-	Ceres Power/Imperial College(GB)
IT	planar	metal	thin	Delphi/BMW(US), ECN/InDEC(NL), FZJ(DE), HTceramics(CH), GE(US), Global Thermoelectric(CA), Tokyo Gas(JP), Riso/Halor Topsoe(DK)
HT	planar	metal	thick	Sulzer Hexis(CH), InDec(NL)
		ceramic	thick	MHI+CEPC(JP), SOFCo(US), Ztek(US), CFCL(AT)
	tubular	ceramic	-	SWPC(DE/US), Toto(JP), MHI+EPDC(JP)

가동 환경에서 반드시 높은 전기전도도를 유지하여야 한다. 보고에 의하면 SOFC 분리판으로 사용하기 위해서는 적어도 1Scm^{-1} 의 값을 가져야 한다고 한다.⁶⁾ 이 값은 SOFC 전해질로 널리 사용되는 YSZ가 800°C 에서 $2 \times 10^{-2}\text{Scm}^{-1}$ 인 것을 고려하면, 약 2 order 큰 값이다.

2) Thermal expansion coefficient: 분리판의 열팽창계수는 SOFC를 구성하는 전해질이나 전극과 비슷하여야 하는데, 이는 열 cycle시 발생하는 열응력을 최소화하기 위해서이다. 보통 분리판의 열팽창계수는 $10 - 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 가져야 한다고 알려져 있다. 참고로 YSZ의 경우 약 10-11, LSM은 10-12, LSCF는 약 $14 - 17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 값을 가진다.⁷⁾ 금속의 경우는 일반적으로 높은 열팽창계수를 가지기 때문에, SOFC용 금속 분리판 합금개발은 열팽창계수를 조절하는 연구가 반드시 필요하게 된다.

3) Oxidation resistance: SOFC 가동 환경에서 산소분압은 공기극 측에서 $10^{-4} \sim 10^{-0.7}\text{ atm}$, 연료극 측에서 $10^{-18} \sim 10^{-8}\text{ atm}$ 의 범위를 가진다.⁸⁾ 금속 분리판의 경우는 고온에서 표면에 산화물을 형성하기 때문에, 내산화성이 중요하다. 이는 분리판의 전기전도도와 밀접한 관계를 가지기 때문이다. 산화현상 뿐 아니라, 공급되는 가스의 성분에 따라 황화(Sulfidation), 탄화(Carburization)반응도 일어날 수 있기 때문에, 분리판은 우수한 내산화성, 내황화성 및 내탄화성 등의 특성을 가져야 한다.

4) Thermal conductivity: 분리판은 우수한 열전도성을 가져야 하는데, 특히 평판형 SOFC의 경우는 더욱 중요하다. 적어도 열전도성은 $5\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 이상의 값을 가져야 한다고 보고되어 있다.⁹⁾ 높은 열전도성을 가지는 분리판을 사용하면, 공기극에서 발생한 열을 흡열반응이 일어나는 연료극 쪽으로의 전달이 가능하게 된다. 이를 통해 연

료의 개질방식을 외부개질에서 내부개질 방식으로 변경이 용이해 진다. 이런 측면에서 볼 때 금속 분리판은 높은 열전도성을 가지기 때문에 유리하다고 말할 수 있다.

5) Manufacturability & Cost: 경제성 측면에서 분리판 자체의 가격 및 제조비용이 낮아야 하며, 상업적 대량 생산을 위해서는 가공도 용이해야 한다. 세라믹 분리판에 비하여 금속분리판은 가공성이 우수하고 비용이 매우 낮기 때문에 큰 장점을 가진다.

6) Mechanical strength: 분리판은 SOFC 가동온도에서 충분한 고온강도와 크리프 저항성을 가져야 한다. 특히 평판형 SOFC의 경우, 분리판은 구조 지지체 역할을 하기 때문에, 고온에서 장시간 동안 충분한 기계적 강도를 유지하여야 한다.

7) Chemical compatibility: 분리판은 이웃하는 공기극 및 연료극 재료와 고온에서 장시간 접촉하기 때문에, 화학적으로 안정하여야 하고 상호산화 반응이 없어야 한다. 접촉부위에서 원하지 않는 중간층이 형성되면 저항손실을 증가시키고, 분극손실을 유발하기 때문이다.¹⁰⁾

8) Thermochemical stability: Cr을 함유한 재료에서는 SOFC 작동 환경에서 표면에 휘발성의 Cr(VI)이 발생할 수 있다. 휘발성의 Cr(VI) 가스 종들은 공기극 쪽으로 확산하여 $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$ 로 환원하게 되는데, 석출된 $\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{s})$ 는 전지의 전기화학반응을 방해하여, 전지의 성능을 감소시키는 요인으로 작용한다.^{1,2)} 따라서 Cr 함유 금속 분리판의 경우는 휘발성의 Cr(VI) 가스 종들의 발생을 막을 수 있는 합금개발이나 표면처리 방법 등이 필요하게 된다.

4. 세라믹 분리판

SOFC용 세라믹 분리판 소재로서 가장 많이 연구된

재료의 하나는 Perovskite 구조를 갖는 란타늄크로마이트 (LaCrO₃)계 화합물이다. 이 재료는 연료극과 공기극 환경 모두에서 높은 전기전도도를 나타내며, 셀 구성요소들과의 열팽창계수의 적합성도 우수하고 적당한 정도의 안정성을 갖기 때문에 고온형 SOFC의 분리판 소재로서 가장 많이 사용되고 있다.⁸⁾ 그러나 이 재료는 또한 여러 가지 단점들을 갖고 있는데, 먼저 란타늄크로마이트 자체로는 공기 중 소결이 매우 어렵고 CrO₃ vapor의 증발 등에 의해 특성이 저하되는 문제점을 갖고 있다.³⁰⁾ 이러한 문제점의 해결을 위하여서는 칼슘(Ca) 이나 스트론튬(Sr) 등의 알칼리토금속을 첨가하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다.

Ca나 Sr 등을 치환한 란타늄크로마이트는 공기 중 소결이 가능할 뿐 아니라 산화분위기에서는 4가 크롬의 생성에 의해 전기전도도도 향상되는 결과를 얻는다. 그러나 환원분위기에서는 산소 공극의 생성에 수반하는 부피 변화가 발생하는데, Ca-doping의 경우 이 문제가 더 심각하여 평판형 SOFC에는 사용하지 못하고 주로 원통형 SOFC에만 적용되고 있다. Sr-doping의 경우는 이 문제가 상대적으로 덜하며 또한 Ti 나 Zr 등의 원소를 미량 첨가할 경우 부피 변화를 더욱 완화시킬 수 있기 때문에 고온용 평판형 SOFC의 경우에는 주로 Sr-doped LaCrO₃가 분리판 소재로 사용되고 있다.³⁰⁾

한편, 최근에는 앞서의 란타늄 화합물들의 단점을 극복하기 위하여 고온에서 보다 안정성이 높은 안정화 지르코니아(YSZ)를 분리판 소재로 사용하려는 시도도 이루어지고 있다(호주의 CFCL 사 등). 이 경우는 지르코니아 자체는 전기전도성을 갖지 않기 때문에 지르코니아 판은 분리판 역할만 하고 전기 연결재의 역할은 지르코니아 판에 낸 구멍에 금속을 삽입하는 방법으로 해결하고 있다.

5. 금속 분리판

앞에서 설명한 SOFC용 분리판의 여러 가지 요구특성에 비추어 볼 때, 금속 분리판은 세라믹 분리판에 비하여 가공성, 경제성, 전기전도성, 열전도성 측면에서 우수한 특성을 가진다. 그러나 금속 분리판은 고온에서 가동되는

SOFC의 산화분위기에서 표면에 산화물을 형성하기 때문에, 접촉저항이 시간이 지남에 따라 급격하게 증가하는 문제점을 갖고 있다. 이는 금속 분리판의 전기전도성이 금속 자체가 가지는 성질보다는 표면에 형성되는 산화물의 전기전도성에 의존하기 때문이다.

고온에서 금속의 산화반응은 일반적으로 포물선법칙 ($\Delta m = K_p \cdot t^{1/2}$)을 따른다. 여기서 Δm 은 시간 t 에서 단위 면적당 무게 증가량이고, K_p 는 parabolic rate constant 이다. 물론 Δm 은 산화 스케일의 두께로 표현될 수도 있다. 이 경우 산화물의 ASR(Area Specific Resistance) 값은 다음과 같은 관계식을 가지는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾

$$ASR = 2 \frac{\sqrt{K_p t}}{\sigma_o} T \exp\left(\frac{-0.5E_{ox} + E_{co}}{kT}\right) \quad (1)$$

식(1)을 살펴보면, 일정온도(T)에서 일정시간(t) 노출한 산화물의 저항은 우선 속도상수인 K_p ^{0.5}에 비례하고, 두 번째는 산화물 고유의 성질(σ , E_{ox} , E_{co})과 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 금속 분리판이 높은 전기전도도를 가지려면, 낮은 K_p 값을 가져야 하는데, 이는 표면에 형성되는 산화물의 두께가 작고, 조직이 치밀하며 안정적이어야 함을 의미한다. 이를 만족하는 대표적인 산화물이 바로 Cr₂O₃, Al₂O₃, SiO₂ 등이다. 그런데 Al₂O₃와 SiO₂ 산화물은 Cr₂O₃ 산화물 보다 전기저항이 매우 높기 때문에,¹²⁾ 대부분의 SOFC용 금속 분리판은 Cr₂O₃-former 합금을 사용한다.

그러나 Cr₂O₃-former 합금이 가지는 고질적인 문제점이 있는데, 바로 SOFC 가동 환경에서 Cr₂O₃는 휘발성의 Cr(VI)를 만든다는 것이다.^{1,2)} 온도와 가스의 분압에 따라 CrO₃(g)와 2CrO₂(OH)2(g) 등의 다양한 휘발성의 Cr(VI)가 형성되고 이들 Cr(VI) 가스 종들은 공기극에서 Cr₂O₃(s)로 환원하면서 공기극/전해질 계면에 석출하게 되는데, 이러한 Cr₂O₃(s)는 SOFC 가동에 필요한 산소의 환원을 가로막는다. 즉 전지의 정상적인 전기화학반응을 방해하여 전지의 성능을 감소시키는 요인으로 작용하는 것이다. 더 나아가서 Cr₂O₃(s)는 LSM과 같은 공기극 재료와 반응하여 (Cr_{1-y}Mn_y)O_{1.5δ} 같은 산화물을 형성하여, 공기극 재료인 perovskite 고유의 전기화학적 특성에 악영향을 준다.¹⁾ 따라서 Cr₂O₃-former 합금을 금속 분리판

Table 2. Comparison of Key Properties of Different Alloy Groups for SOFC Applications¹³⁾

Alloys	Matrix structure	TEC _{25-800°C} (×10 ⁻⁶ /K)	Mechanical strengths	Manufacturability	Cost
CrBA	BCC	11 - 12.5	◎	×	×
FeBSA	FCC	15 - 20	◎	△	△○
NiBSA	FCC	14 - 19	◎	△	△
Ferritic STS	BCC	11.5 - 14	△	○	◎
Austenitic SRS	FCC	18 - 20	○	◎	○

으로 사용하기 위해서는 Cr(VI)의 발생을 방지하는 연구가 필수적이라 할 수 있다.

Table 2는 SOFC용 금속 분리판의 소재로 사용될 수 있는 여러 가지 합금들의 기본 특성을 비교한 것이다.¹³⁾ 이들 합금들은 열팽창계수, 기계적 특성, 가공성, 경제성 등의 측면에서 장단점을 가지기 때문에 사용 환경 및 목적에 맞게 적용할 필요가 있다. 금속 분리판 소재로서 사용이 검토되고 있는 이들 합금들의 특성과 연구동향을 좀 더 상세히 살펴보면 다음과 같다.

5.1 Cr-base alloys

앞서 설명하였듯이 Cr계 합금은 고온에서 안정한 Cr₂O₃ 산화물을 형성하기 때문에 SOFC용 금속 분리판으로 개발되어 왔다. 또한 Cr계 합금은, Table 2에서 볼 수 있듯이, 열팽창계수가 SOFC를 구성하는 다른 세라믹 재료와 유사하며, 고온에서의 기계적 성질이 우수한 장점을 가진다. Cr계 합금개발 연구는 Cr₂O₃ 산화물의 밀착성을 증가시키고, 성장속도를 낮출 수 있는 합금을 개발하는 쪽으로 진행되어 왔다. 이러한 목표를 만족시키기 위하여, 대부분의 Cr계 합금에는 Y, La, Ce, Zr 같은 원소를 ODS 형태로 첨가하게 된다. 대표적인 Cr계 합금인 Cr-5Fe-1Y₂O₃와 Cr-0.4La₂O₃ 등이 이런 배경에서 개발되었다고 볼 수 있다.

Plansee Company의¹⁴⁾ Cr-5Fe-1Y₂O₃는 원래 1000°C 정도의 고온에서 작동되는 평판형 SOFC의 세라믹 분리판을 대체하기 위하여 개발되었는데, 장기 안정성에 문제가 있어 사용에 한계가 있다. 따라서 작동온도가 800°C 이하의 온도에서 적용을 하여야 하지만, Cr-5Fe-1Y₂O₃를 800°C 이하의 중온 SOFC용 금속 분리판으로 사용하는 경우는 거의 없다. 왜냐하면 IT-SOFC의 온도범위(650 - 800°C)에서는, 가공성이 나쁘고 가격이 비싼 Cr계 합금 대신에 Fe계나 Ni계 합금을 적용할 수 있기 때문이다.

5.2 Ni-base alloys

이미 기존에 상업적으로 사용되고 있는 Ni계 합금이 SOFC용 금속 분리판으로도 적용되어 연구되고 있다. Ni계 초합금인 Haynes 230, Inconel 625, Inconel 718 등을 가지고 실험한 결과를 살펴보면, Haynes 230이 가장 높은 전기전도성을 보여주는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 이는 Haynes 230의 산화거동과 관련이 있는데, Haynes 230 합금이 가장 작은 산화성장 속도를 가지기 때문이다. 또한 표면에 형성된 산화물은 스피넬 상인 Mn_{1+δ}Cr₂δO_{4-λ}과 Cr₂O₃상으로 구성되는데, Cr₂MnO₄의 산화물 형태는 스케일의 전기저항을 크게 낮추는데 기여하는 것으로 알려져 있다. 하지만 Haynes 230 합금도 800°C 공기분위기에서 10,000시간 노출하였을 때, ASR이 1.1Ωcm²정도의 값을 보이는데, 이는 4년의 SOFC 요구 수명을 충분히 만족시키지는 못하기 때문에 사용에 한계가 있음을 보여주는 결과이다.

5.3 Fe-base alloys

SOFC용 금속 분리판으로 검토되는 Fe계 합금은, Fe와 Cr을 기본으로 하는 Ferritic Fe-Cr 합금을 의미한다. 현재 개발 또는 사용되고 있는 Ferritic Fe-Cr 합금에서 Cr의 농도는 보통 17-26 wt%의 범위에 있다. 내산화성이 충분한 Cr₂O₃를 안정적으로 형성시키기 위해서는 Cr농도가 적어도 17 wt%이상이 되어야 하며,¹⁶⁾ 인성과 열팽창계수를 고려하여 Cr농도를 약 26 wt% 이하로 조절하기 때문이다.¹³⁾ 그리고 이외에 Y, La, Ce, Zr, Ti 등의 미량원소를 첨가하는 것이 중요한데, 이들 원소들은 표면에 형성되는 Cr₂O₃ 산화물의 성장 기구를 제어하게 된다. 즉 내산화성 및 전기전도성을 증가시키기 위하여 산화물의 구성, 조직, 밀착성, 성장속도 등을 조절하는 것이다.

지금까지 개발된 대표적인 Ferritic Fe-Cr 합금에는

Table 3. Area Specific Resistance(Ωcm^2) of STS430, ZMG232 and Crofer22^{19,20)}

Test conditions	STS430	ZMG232	Crofer22
750°C×1000h in Air	0.11	0.025	-
800°C×2000h in Air	-	0.04	0.01

Hitachi Metals에서 개발한 ZMG232와¹⁷⁾ ThyssenKrupp에서 개발한 Crofer22¹⁸⁾가 있다. ZMG232는 22%의 Cr를 함유하고, 0.04%의 La과 0.22%의 Zr를 첨가한 Ferritic Fe-22Cr 합금이다. ZMG232의 특징을 간단하게 살펴보면, 열팽창계수가 $12.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 이며, 700 - 1000°C의 온도범위에서 기존의 STS430 보다 우수한 내산화성과 전기전도성을 보인다고 보고하고 있다. 이는 산화분위에서 표면에 형성되는 산화물의 조직이 치밀하고 밀착성이 높으며, 전기전도성이 우수한 구조를 가지기 때문이라고 한다.

한편 ThyssenKrupp에서 개발한 Crofer22는 원래 자동차 APU(Auxiliary Power Unit)용으로 개발된 Ferritic Fe-Cr 합금이다. Crofer22의 특징을 살펴보면, Cr의 증발을 최소화하고, 열팽창계수를 낮추기 위하여 0.08%의 La를 포함하고 있다. 여기에 Mn과 Ti를 미량 첨가하여, 고온의 산화분위에서 산화물 구조를 상층의 MnCr_2O_4 와 하층의 Cr_2O_3 형태로 형성시킨다. 여기서 스피넬 구조의 비절연성 MnCr_2O_4 산화물은 Cr의 증발을 방지하는 기능도 가진다. 또한, Table 3에 나타낸 바와 같이 Crofer22는 ZMG232 보다도 전기전도도 특성이 우수한 것으로 알려져 있다.^{19,20)}

5.4 Perovskite coating

SOFC용 금속 분리판의 개발과 관련하여 신 합금의 개발과 함께 빼 놓을 수 없는 중요한 연구 방향의 하나는 표면 코팅기술이다. 표면 코팅은 앞에서 설명한 금속 분리판 소재들의 고온 특성, 즉 내산화성과 전기전도성 등을 향상시키기 위하여 이용되는데 코팅물질로서는 기존의 공기극 재료인 LSM, LSC, LSCF 등을 많이 사용하며 코팅방법으로는 Spray pyrolysis^{21,22)} PVD,²³⁾ 용사,^{24,25)} Slurry coating,^{26,28)} EPD²⁹⁾ 등 다양한 기술이 적용되고 있다.

그러나 Perovskite 세라믹 코팅은 고온에서 장시간 노

출하였을 때, 기판과 코팅층간의 계면반응 문제, 코팅층을 통한 내부 산화 문제 등이 발생할 가능성이 있다. 특히 계면에 형성되는 산화물이 전기전도도를 저하시키는 절연성 산화물이면 금속 분리판의 저항을 증가시켜 전지의 성능 저하를 초래하게 된다. 따라서 보다 우수한 성능을 갖는 코팅층을 얻기 위하여 코팅층의 성분과 미세조직을 제어하고 이에 필요한 적절한 코팅 공정을 개발하려는 연구가 많이 이루어지고 있다.

6. 요약

가동온도가 800°C 이하인 평판형 SOFC에서는 기존의 세라믹 분리판 대신에 금속 분리판이 적용될 가능성이 높아지고 있다. 금속 분리판은 가공성 및 경제성 등이 세라믹 분리판 보다 우수하여 SOFC의 실용화를 앞당기는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 금속 분리판의 적용을 위하여서는 아직 해결되어야만 할 문제점들이 남아 있는데, 표면 산화층의 형성에 따른 접촉 저항의 증가와 합금 성분 중의 Cr의 증발에 의한 전극 열화의 문제 등이 대표적인 그것이다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 SOFC용 분리판의 요구특성에 적합한 신합금의 개발과 고기능 표면 코팅 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

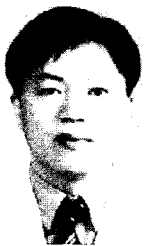
참고문헌

1. H. Tu, U. Stimming, *J. Power Sources*, **127**, 284 (2004).
2. A. Webber, E. I. Tiffée, *J. Power Sources*, **127**, 273 (2004).
3. N. P. Brandon, S. Skinner, B. C. H. Steele, *Annu. Rev. Mater. Res.*, **33**, 183 (2003).
4. 한중희, 윤성필, 김승구, *공업화학전망*, **3**(4), 10 (2000).
5. F. Tietz, *Materials Sci. Forum*, **426-432**, 4465 (2003).
6. N. Q. Minh et al, Proc. 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, AICE, New York, **13**, 256 (1990).
7. H. Ullmann, N. Trofimenko, F. Tietz, D. Stover, A. A. Khanlou, *Solid State Ionics*, **138**, 79 (2000).
8. W. Z. Zhu, S. C. Deevi, *Mater. Sci. & Eng.*, **A348**, 227 (2003).
9. H. Tsuneizumi, Proc. International Fuel Cell Conference,

NEDO, Tokyo, Japan (1992).

10. S. P. S. Badwal, *Solid State Ionics*, **143**, 39 (2001).
11. P. Y. Hou, K. Huang, W. T. Bakker, Proc. 6th International Sym. on SOFC, Hawaii, 978 (1999).
12. G. V. Samsonov, The oxide handbook, IFI/Plenum Data company, New York (1982).
13. Z. G. Yang, J. W. Stevenson, P. Singh, *Adv. Materials & Processes*, **34** (2003).
14. E. I. Tiffie et al, *Phy. Chem.* **949**(4), 978 (1990).
15. B. C. H. Steels, *Solid State Ionics*, **134**, 3 (2000).
16. W. Z. Zhu, S. C. Deevi, *Mater. Research Bulletin*, **38**, 957 (2003).
17. T. Uehara, T. Ohno, A. Toji, 5th European SOFC Forum, Switzerland, **1**, 281 (2002).
18. H. Ralf, H. Winfried, Q. W. Josef, ThyssenKrupp Techforum, **20** (2003).
19. J. P. Albellan, F. Tietz, V. Shemet, A. Gil, T. Ladwein, L. Singheiser, W. J. Quadackers, 5th European SOFC Forum, Switzerland, **1**, 248 (2002).
20. M. Ueda, H. Taimatsu, 4th European SOFC Forum, Switzerland, **2**, 837 (2000).
21. T. Brylewski, M. Nanko, T. Maruyama, K. Przybylski,

- Solid State Ionics*, **143**, 131 (2001).
22. A. Furuaki, H. Konno, R.F uruichi, *J.Maters. Sci.*, **30**, 2829 (1995).
23. N. Oishi, T. Namikawa, Y. Yamazaki, *Sur. & Coat. Tech.*, **132**, 58 (2000).
24. W. J. Quadackers, H. Greiner, M. Hansel, A. attananik, A. S. Khanna, W. Mallener, *Solid State Ionics*, **91**, 55 (1996).
25. C. Gindorf, K. Hilpert, L. Singheiser, Proc. 7th International Sym. on SOFC(SOFCVII), Japan, 793 (2001).
26. K. Honegger, A. Plas, R. Diethelm, W. Glatz, Proc. 7th International Sym. on SOFC(SOFCVII), Japan, 803 (2001).
27. T. Brylewski, K. Przybylski, J. Morgiel, *Materials Chemistry & Physics*, **81**, 434 (2003).
28. Y. Yoo, M. Dauga, Proc. 7th International Sym. on SOFC(SOFCVII), Japan, 837 (2001).
29. S. P Jiang, J. P. Zhang, X. G. Zheng, *J. European Ceramic Soc.*, **22**, 361 (2002).
30. H. Yokokawa, N. Sakai, T. Horita, and K. Yamaji, *Fuel Cells*, **1**(2), 117-31 (2001).



김도형

- 1983년 서울대학교 무기재료공학과
- 1985년 KAIST 재료공학과 석사
- 1992년 KAIST 재료공학과 박사
- 1985년 포항산업과학연구원 책임연구원 ~현재



김승구

- 1988년 연세대학교 요업공학과
- 1990년 연세대학교 요업공학과 석사
- 1998년 연세대학교 세라믹공학과 박사
- 1988년 KIST Post Doc.
- 2000년
- 2001년 CALTECH Post Doc.
- 2004년
- 2004년 포항산업과학연구원 연구원 ~현재



전재호

- 1987년 서울대학교 금속공학과
- 1992년 포항공과대학교 재료·금속공학과 석사
- 2003년 포항공과대학교 신소재공학과 박사
- 1992년 포항산업과학연구원 책임연구원 ~현재



전중환

- 1983년 서울대학교 금속공학과
- 1985년 서울대학교 금속공학과 석사
- 1988년 서울대학교 금속공학과 박사
- 1988년 포항산업과학연구원 책임연구원 ~현재