

수소연료전지용 분리판 소재 및 제조공정기술

이창래, 양철남 | 재료연구소

[요약문]

분리판은 수소연료전지 스택을 구성하는 부품 중에서 가장 많은 수량이 사용되는 부품의 하나로서 연료전지의 출력밀도(powder density, W/L), 비출력(specific power, W/kg) 및 가격(\$/kWe)관점에서 가능한 저가의 소재 및 제조공정으로 경량/박형화가 이루어져야 하는 핵심부품이다. 이러한 저가의 경량/박형화 분리판 개발의 전제 조건은 연료전지 스택에서 요구하는 다양한 물성, 장기 수명 및 신뢰성을 나타내는 내구성을 만족해야 하는 것이다. 본고에서는 지금까지의 수소연료전지, 특히 고분자 전해질 연료전지를 중심으로 분리판에서 사용되는 소재 및 제조공정기술의 현황, 분리판 개발에서 요구되는 다양한 기술적인 요소 및 그 문제점을 중심으로 살펴봄으로써 고성능, 고내구성 분리판 소재 및 제조공정 개발의 발전방향에 대하여 고찰하였다.

1. 서론

화석에너지 자원의 고갈과 이들의 무분별한 사용에 따른 지구 온난화 등 심각한 지구환경 문제는 오래전부터 논란이 되어 왔지만 최근 신 고유가 시대에 진입하면서 새로운 에너지 자원에 대한 다양한 전망들이 제시되고 있다. 지속가능하고 환경 친화적인 새로운 에너지 대안으로 신재생에너지에 대한 관심이 초기에는 과학기술계에서 이제는 전 산업계 전반으로까지 확대되고 있다. 신에너지는 태양열, 태양광, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지(조력)와 같이 자연 상태에서 계속 제공되어 자원의 고갈을 걱정할 필요가 없는 재생 가능한 에너지, 수소에너지 및 연료전지와 같이 신기술을 이용하여 청정에너지로 전환할 수 있는 신에너지로 나눌 수 있다¹⁾. 신재생에너지 기술은 지구상에 존재하는 에너지 자원을 인간이 지금까지 이룬 산업기술을 접목하여 환경 친화적이고 이용 효율이 높은 에너지 자원으로 새롭게 전환하기 위하여 다양한 분야의 산업기술들이 유기적으로 융합되어야 하는 복합산업 기술이다. 이러한 측면에서 수소연료전지 기술은 지구상에 존재하는 화석에너지, 태양에너지, 바이오 에너지를 수소에너지 형태로 변환하여 인간이 이용하기 편리한 전기에너지로 전환하는 기술로서 도래할 수소경제시대 시나리오의 중심축 역할을 하고 있다. 본고에서는 수소연료전지 기술의 실용화를 대비한 관련 핵심 부품소재의 기술개발 현황을 살펴보고 관련 산업의 전개 발전 방향에 고찰해 보기 위한 관점에서 수소연료전지 핵심부품 중에서 재료 및 표면처리기술과 밀접한 관련이 있는 연료전지 분리판 소재 및 제조공정 기술 현황에 대하여 중점적으로 다루고자 한다.

2. 연료전지 시스템의 구성부품과 기능

수소연료전지는 수소와 산소의 전기화학적 반응으로 전기를 생산하는 발전 시스템으로 그림 1에 나타낸 것처럼 직접 전기를 생산하는 전지 본체인 스택(stack)과 그 스택의 운전을 보조하는 주변장치로 구성된다. 고분자 전해질

형 연료전지 (PEFC, polymer electrolyte fuel cell)의 핵심인 스택은 다시 전극 반응이 일어나는 장소를 제공하는 촉매, 반응 촉매층으로 반응가스를 공급하는 가스확산전극(GDE, gas diffusion electrode), 전기화학적 반응에 참여하는 전도성 이온을 가지고 있는 전해질막, 이들 요소들이 일체화된 막전극접합체 (MEA, membrane electrode assembly), 전극 내부로 반응 가스의 균일한 공급, 공급된 수소와 공기(산소)의 혼합 방지 역할과 전극반응으로 생성된 물의 외부 배출을 담당하는 분리판 등 각각의 고유 기능을 담당하는 다양한 부품소재로 구성되어 있다. 표 1은 PEFC 수소연료전지 발전시스템을 구성하는 핵심부품과 그 기능을 나타낸 것이다.

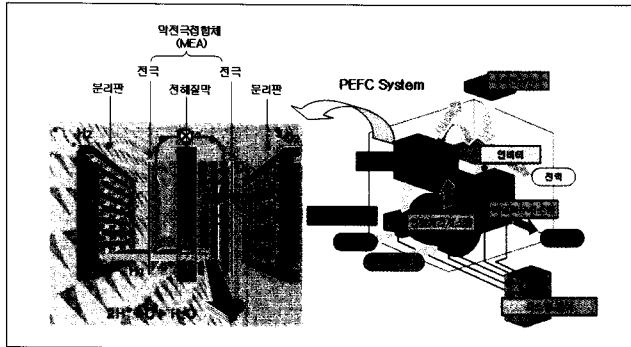


그림 1. 수소연료전지 시스템의 구성

표 1. 수소연료전지 시스템의 주요 구성부품 및 기능¹⁾

주요부품 및 기술	주요 기능
● 스택(stack)	연료전지 본체
<ul style="list-style-type: none"> 막전극접합체 (MEA, membrane electrode assembly) <ul style="list-style-type: none"> 가스확산전극 (GDE, gas diffusion electrode) <ul style="list-style-type: none"> 촉매층 (Catalyst layer) 가스확산층 (GDL, gas diffusion layer) <ul style="list-style-type: none"> 미세기공층 (MPL, microporous layer) Back layer 전해질막 (Membrane) 	전극과 전해질막의 일체화 촉매층과 GDL을 일체화 실질적인 전극반응이 일어나는 장소 가스(수소, 공기) 투과와 물의 원활한 배출, 촉매층 지지 촉매층과 carbon black layer 사이에서 전기적 접촉, 촉매층 지지 carbon paper나 clothes로 구성된 전도성 다공체
<ul style="list-style-type: none"> 분리판 (Bipolar plate, separator) 	반응가스의 혼합방지, 가스공급/물 배출 유로, 집전된 전기의 경로
<ul style="list-style-type: none"> 주변장치 (BOP, balance of plant) 	개질기 및 스택과 조립되어 연료전지 운전시 보조 역할을 수행하는 주변장치들
<ul style="list-style-type: none"> 조립/접합체 	가스의 집합/분배하는 출입구, 냉각수 패턴, 셀 조립구조 등 관련 기술
개질기 (Reformer)	탄화수소(연료)이용시 수소 제조/공급
운전조건/방법	개질기 및 스택의 운전기술
연료전지 시스템	개질기, 스택, 제어기기 등을 통합하는 기술

3. 분리판의 주요 역할과 기능적 요구사항

수소연료전지 본체(stack)를 구성하는 핵심 부품중 하나인 분리판은 그림 2에 나타난 것처럼 스택을 구성하는 단위 전지 셀에 각각 수소 및 산소를 공급하기 위해 한 면은 수소극, 반대 측면은 산소극과 직접 접촉하고 있어 수소, 산소가 투과되어 서로 섞이지 않는 치밀한 구조이어야 한다. 분리판은 크게 전도/통전, 배출, 분리 등 주요 3-4가지 기본적인 역할을 수행한다. 이러한 기능에 따라 요구되는 첫번째 사항으로는 연료전지 작동시 스택을 이루고 있는 각 전극에서 전극반응으로 생성/소모되는 전자가 통과하는 전기적 경로로서 기능을 수행하므로 분리판 소재는 전기적으로 양호한 전도성을 구비해야 한다. 분리판 소재의 전기저항 특성은 연료전지 성능에 밀접하게 영향을 미치므로 사용되는 분리판 소재의 전기저항, 특히 계면접촉저항은 연료전지에서 허용 수준이하로 낮아야 한다. 둘째 전극반응에 참여하는 반응가스(수소, 산소 또는 공기)를 공급하고 공기극에서 생성된 물을 외부로 배출하는 통로 역할을 수행한다. 전지 내부로 공급된 반응가스가 전극내부의 반응 장소(촉매)까지 균일하게 공급되도록 반응가스의 균일한 분포를 가지는 유로설계가 분리판에서는 중요하다. 또한 전극반응의 결과 공기극에서 생성된 물이 유로를 통하여 원활하게 외부로 배출할 수 있는 표면특성을 구비할 필요가 있다. 세번째는 안정성 관점에서 수소극과 공기극에 공급되는 반응가스의 혼합을 방지하는 분리(separator) 역할을 수행한다. 이러한 관점에서 분리판 소재의 가스 투과율은 중요한 요소로 특히 흑연(graphite)판 또는 carbon-polymer 복합체 소재를 이용한 분리판의 경우 어느 정도의 기공성을 가지므로 반드시 허용수준을 만족하도록 설계/제작되어야 한다. 그러나 금속 분리판의 경우 소재자체의 가스 투과로 인한 반응가스의 혼합은 무시할 수준으로 큰 문제가 되지 않지만 연료전지 운전조건에서 부식성 환경에 의한 소재의 부식문제로 결함이 발생할 경우 큰 문제가 야기되므로 고내식성의 금속 분리판 소재가 적용되어야 한다. 마지막으로 연료전지 운전시 계속적인 전극반응에 의한 내부 온도가 상승하므로 빠른 열전도 특성을 가져야 한다.

- ① 전류가 흘러가는 통로역할
- ② 반응가스(수소, 산소 또는 공기)의 공급과 물의 배출 통로
- ③ Anode 수소극 및 cathode 산소극에서 공급되는 각 가스의 혼합방지/셀 분리 역할
- ④ 냉각유로에 의한 열관리

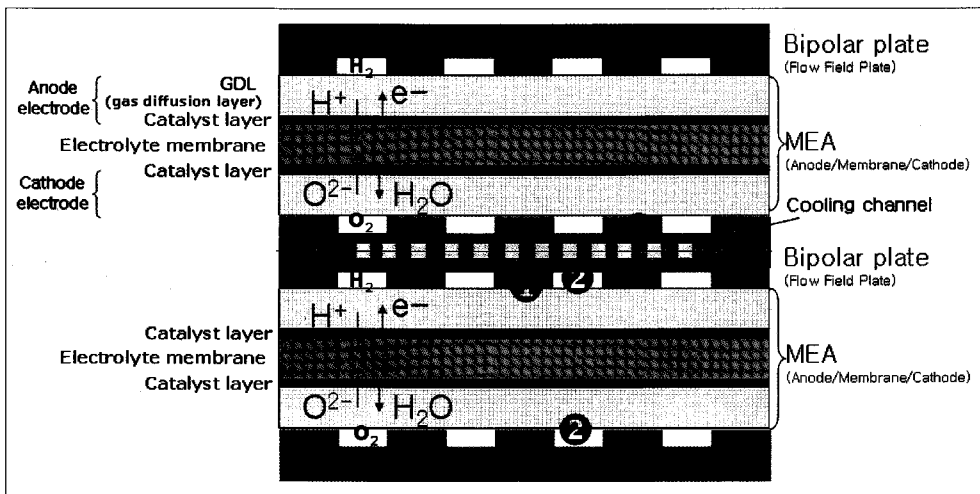


그림 2. 수소연료전지용 스택 내에서 분리판의 주요역할



4. 고분자 전해질 연료전지(PEFC)용 분리판

상업화를 대비한 수소연료전지용 분리판 소재는 연료전지 운전환경에서 고내식성과 기계적, 열적 안정성을 확보할 수 있어야 하고 전극과의 전기적 접촉계면을 가지므로 부식분위기 하에서 낮은 계면접촉저항성을 나타내어야 한다. 또한 실용화 관점에서는 저가의 대량생산이 가능한 소재 및 가공공정이 요구된다. 전기자동차나 가정용 연료전지에 적용되고 있는 PEFC용 분리판은 흑연(graphite) 판재가 초기에 적용되었다. 흑연 소재는 고내식성 및 양호한 전기전도성을 가지 있어 연료전지 운전환경에서 적합한 분리판 소재이다. 그러나 소재 자체가 기계적 충격이나 진동에 취약할 뿐만 아니라 분리판 상에 반응가스 공급 및 물 배출 유로, 냉각수 유로(fluid flow channel)를 CNC 밀링과 같은 기계 가공으로 제조하기 위해서는 어느 정도 두께 이상이 되어야만 분리판의 기계적 강도를 확보할 수 있다. 또한 소재는 어느 정도의 기공을 가지고 있어 반응가스의 투과성이 문제가 될 수 있으므로 분리판에 적용되는 흑연 소재에는 전기전도성을 유지하면서 가스투과성을 방지하도록 제조할 필요가 있다. 미국의 POCO사에서는 흑연 표면의 기공에 인산아연(zinc-phosphate, $Zn_3(PO_4)_2$) 수지를 함침(resin impregnation)하여 제조하고 있다^[2]. 이러한 소재의 분리판은 가스유로를 CNC 선반가공을 이용하여 제조하므로 가공단가가 높은 편이다. 이를 극복하기 위하여 실용화 관점에서 대량 생산이 가능한 탄소-폴리머 복합체(carbon-polymer composite)를 이용한 몰드형 복합소재 분리판 개발이 진행되어 왔다. 흑연 또는 복합소재 분리판은 두께를 얇게 할 경우 낮은 기계적 강도나 가스투과성의 문제가 여전히 남아 있어 추가적인 개선의 여지가 있다. 수송용 연료전지 분리판의 경우 외부의 충격이나 진동에 대한 기계적 강도와 가스 투과성의 안전문제가 중요한 기술적 요소이므로 이를 극복하기 위하여 금속소재 분리판이 도입되었다. 얇은 금속판재를 이용할 경우 가스유로를 연속 스탬핑(stamping) 가공공정으로 0.1mm 두께까지 대량으로 생산이 가능하므로 분리판의 단가를 낮출 수 있어 실용화에 대응할 수 있다. 표 2는 분리판의 기능 및 기술적 요구특성에 대응하여 사용되는 후보 소재들의 장단점을 나타낸 것이다. 그림 3은 PEFC 또는 DMFC용 분리판에 사용되고 있는 소재에 따른 제조공정 예를 간단히 정리하여 나타낸 것이다.

표 2. 연료전지 분리판 소재 및 기능적 요구특성 비교

요구특성 \ 소재	흑연판 (Graphite)	탄소-폴리머 복합소재 (C-Polymer Composite)	금속 소재 (Al, Ni, Ti, SS, Alloys)
기계적 안정성	충격/진동에 취약(brittle)	낮은 기계적 강도	양호한 특성 (강도, 충격, 진동)
열적 안정성	양호한 열전도성	낮은 열적 안정성(저온작동)	열팽창계수 상이 (표면처리시 주의 요함)
화학적 안정성	고내식성	고내식성	부식/산화 표면처리 요구 (코팅, 개질)
표면접촉저항성	낮음	상대적으로 높음 (폴리머 함량에 의존)	아주 높음 (표면절연산화물)
가스 투과성	투과성 위험	투과성 위험	비투과성
가공공정 용이성 (대량 생산성)	CNC 가공	몰드, 몰드-CNC 가공	다양한 가공성
단가 (소재/생산공정)	높음 (가공단가)	상대적으로 낮음	상대적으로 낮음

* SS : Stainless Steel (304, 316, 310 904L Austenitic SS, Ferritic SS)

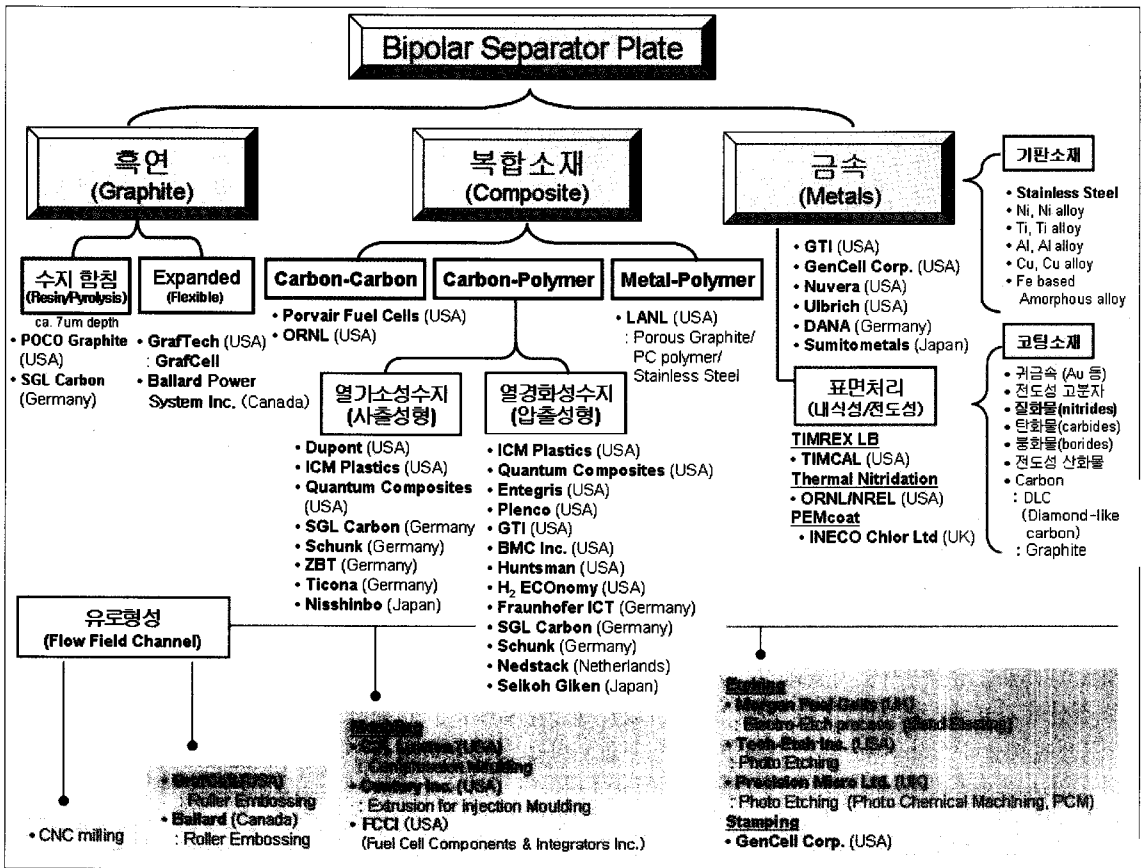


그림 3. PEFC용 분리판 소재에 따른 제조공정 및 개발업체 현황

4.1 분리판의 유로(Fluid Flow Channel) 구조

연료전지에서 원활한 가스공급 및 물 배출과 수소극 연료가스 및 공기극 산화가스의 혼합 방지 역할을 담당하는 분리판의 기본 유로구조의 유형은 크게 4 가지 정도로 나눌 수 있다. 각 유로구조의 형태 및 특징은 그림 4에 정리하였다.

- 돌기 매트릭스 유로구조 (Pin Matrix type, Waffle iron-like)^[3]
불연속적인 핀 형태의 돌기가 있는 유로구조는 물의 배출이 용이하지 않고 균일한 가스의 공급 및 배분을 하기 곤란한 특징 있다.
- 평행한 직선 유로구조 (Straight-Parallel type)^[4]
가스의 유로가 한 방향으로 평행하게 되어 있는 유로구조에서는 핀 구조와 같은 단점이 있다.
- 구불구불한 S형 유로구조 (Serpentine type, Continuous path)^[5]
뱀이 움직이는 형상처럼 구불구불한 S형 유로구조는 전극 전체 면적에 가스의 균일한 공급 및 배분을 하기 쉽 지 않지만 물의 배출 기능이 우수하고 가장 많이 사용되고 있는 구조이다. 단전지 시험이나 소형 스택에서 가장 흔히 이용되고 있다.
- 불연속 깎지모양 유로구조 (Interdigitated type, Discontinuous path)^[6]
가스의 유로 형태가 양손을 깎지 낀 모양처럼 생긴 것으로 유로가 서로 연결되어 있지 않으므로 공급된 가스는 다음 유로에 넘어가기 위해서는 전극의 GDL층을 통과해야 하므로 물의 배출이나 가스 공급의 균일한 분포를 얻



을 수 있는 장점이 있지만 유로 입구와 종단에서 아주 큰 압력차를 나타내므로 나타낸다. 이러한 불연속 유로 구조에서는 생성수를 원활히 배출하기 위해서는 공급되는 산화제 가스의 압력(약 5기압)이 상대적으로 높아야 한다^[6a]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 미국의 UTC사에서는 거의 상압하에서도 운전이 가능하도록 각지형 가스 유로구조 및 냉각유로를 구비한 다공성(2-3 μm pore, 30-35% 기공도) 분리판을 사용하여 반대편에 형성된 냉각 유로를 통하여 물이 배출 하도록 함으로써 압력차를 해결하는 방법을 제안하였다^[6b].

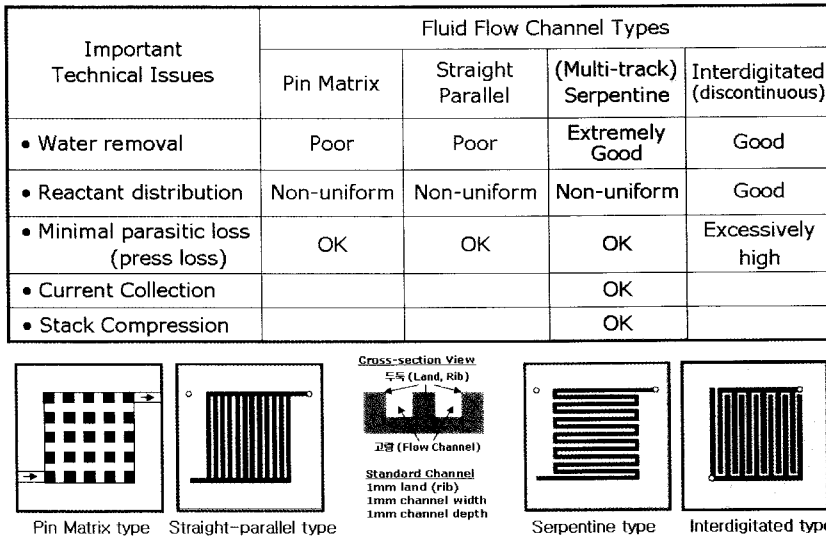


그림 4. 연료전지 분리판의 유로 기본구조 및 특징

분리판 기본 유로구조는 각 형태에 따라 장단점이 있으므로 실제 연료전지 분리판에서는 그대로 사용하지 않고 물의 배출과 균일한 반응가스의 공급에 적합하도록 기본 유로구조를 변형된 유로구조로 사용하는 것이 일반적이다. 전국내로 공급되는 반응가스 및 전류밀도 분포의 차이를 고려하여 가스 입구에서 배출구 방향으로 유로의 깊이와 폭이 감소하도록 유로를 설계한 분리판도 제안되고 있다^[7]. 최근에는 자연에 있는 구조물에서 유로구조를 본 뜬 biomimetic 유로구조^[8]를 갖는 분리판도 개발되고 있다. 이러한 유로구조는 연료전지 본체인 스택 모듈의 성능에 큰 영향을 미치므로 연료전지 스택모듈 제조사 마다 스택구조에 적합한 고유의 유로구조를 분리판에 이용하고 있지만 대부분 공개되지 않고 있다. 그림 5는 관련 특허에서 제안하고 있는 분리판 유로구조의 기본 형태를 변형한 다양한 분리판 구조의 한 일례를 보인 것이다. 기본 형태 유로를 변형한 다양한 분리판 유로구조 및 특징에 대해서는 관련 리뷰 문헌^[10]도 한 번 참고하기 바란다.

4.2 분리판 후보소재 및 공정의 선정기준

실용적인 연료전지용 분리판 개발에 있어서 첫 번째 단계는 어떤 재료가 분리판 소재가 가장 적합하기를 결정하는 문제일 것이다. 분리판에 적용 가능한 소재는 먼저 그 역할과 기능적 요소에 부합되는 물성기준을 만족해야 하고 또한 실용화 관점에서 시장의 요구에 대응할 수 있도록 공정상 대량생산이 가능하고 가격을 낮출 수 있어야 한다. 따라서 연료전지용 분리판 소재는 그림 6에서와 같이 물성, 가격 및 제조공정 면에서 요구되는 요소들을 모두 만족할 수 있어야 한다. 성능 향상을 위한 기술적 측면에서는 분리판 소재의 중량 및 부피 감소와 더불어 계면저항을 낮출 수 있는 방안이 강구되어야 한다. 또한 시장에서 요구하는 가격을 만족하기 위해서는 대량 제조공정 설계 기술 개발, 내구성 향상을 위한 퇴화저동 및 퇴화완화 전략이나 기술개발이 중요하다. 분리판의 중량이나 부피감소를 위해서는 경량 소재

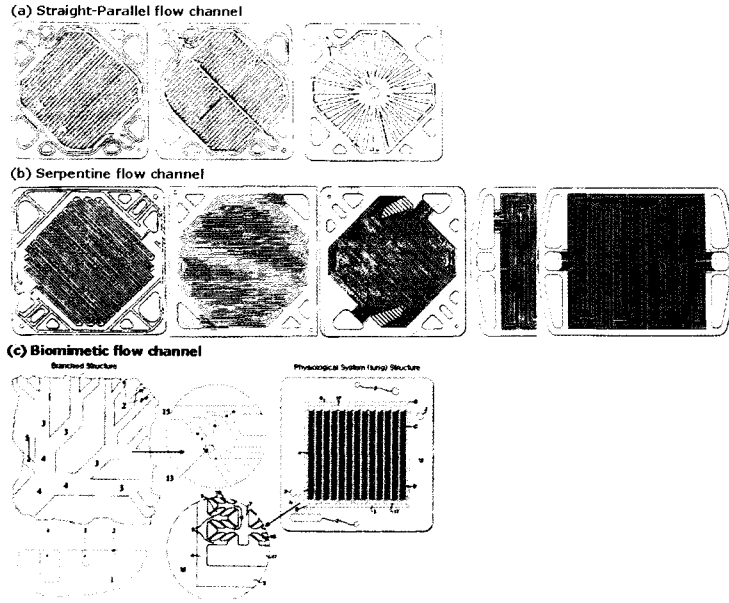


그림 5. 다양한 가스/생각수의 유로 구조를 구비한 PEFC용 분리판. (a) Straight-Parallel Flow Field^(a), (b) Serpentine Flow Field^{(b),(c)} (c) Biomimetic Flow Field^(a)

를 이용하거나 두께를 감소시킬 필요가 있다. 연료전지 분리판 개발에 있어서 적절한 소재를 선정하기 위해서는 몇 가지 요구사항을 만족할 필요가 있다. 분리판 적용 소재는 분리판에서 요구하는 기능에 부합되는 물리적, 화학적 물성을 만족하는 것이 중요하다. 표3과 4는 PEFC용 분리판의 주요 기능에 따라 요구되는 기본 물성 및 소재들의 특징을 각각 정리한 것이다.

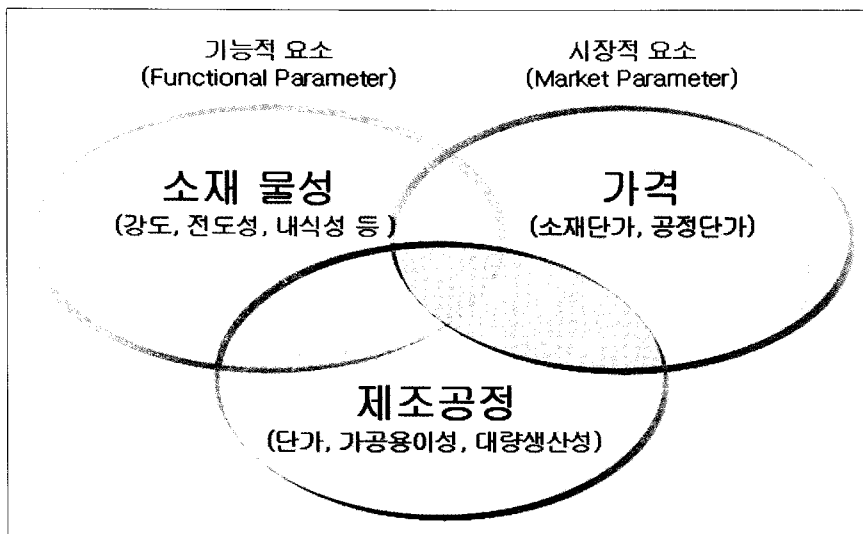


그림 6. 분리판 소재 선정의 기준 요소

표 3. PEFC용 분리판의 기능에 따라 요구되는 분리판 소재의 물리적, 화학적 물성^[11]

주요 기능 및 요구사항		재료의 물리적 / 화학적 물성		
주요 기능	• 연료/산화제의 균일한 공급/혼합방지	• H ₂ 가스 투과도 (H ₂ gas permeability)	$< 2 \times 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}$ @ 80°C, 3atm, ($< 0.1 \text{ mA}/\text{cm}^2$)	
	• 잔류가스/물의 원활한 배출	• 친수성/소수성 (Hydrophilic/Hydrophobic property) 표면 : 접촉각(Contact angle)		
		• 내식성 (Corrosion resistance)	$< 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (@ 0.1V, H ₂ anode) (@ 0.6V, Air cathode) in 80°C, pH 3, 1mM H ₂ SO ₄ /2ppm F ⁻ solution	
	• 전기 전도 통로	• 전기전도성 (Electrical conductivity)		
		• 부피 전기전도성 (Bulk conductivity)		$> 100 \text{ S}/\text{cm}$ (ASTM C-661, F76-86)
		• 계면접촉저항 (Interfacial contact resistivity)		$< 10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (@100~150N/cm ²)
• 열 배출/관리	• 열전도성 (Thermal conductivity)		$\geq 20 \text{ W}/\text{mK}$ ^[11c]	
• 스택 내의 개별 셀 분리/지지	• 압축강도 (Compressive strength)		$> 1.54 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (22 lb/in ²) ^[11b] $> 50 \text{ MPa}$ (for graphite)	
	• 굽힘강도 (Flexural strength)		$> 25 \text{ MPa}$ (for graphite)	
	• 변형률 (Flexibility)		3~5% deflection @mid-span	
기타 요구 사항	• 고출력밀도 스택에 부합되는 경량박형 소재 적용	• 밀도 (Density)	$< 5 \text{ g}/\text{cm}^3$	
		• 두께 (Thickness)	$< 1 \text{ L}/\text{kW}$ (Stack Volume)	
		• 중량 (Weight)	$< 0.4 \text{ kg}/\text{kW}$	
	• 고내식성 표면처리 소재 적용	• 열팽창계수 (Thermal expansion coefficient, TEC)		모재와 유사한 열팽창계수를 갖는 코팅 소재 사용
	• 가공 정밀도	• 평활도 (Surface finish)		$< 50 \mu\text{m}$ (limit) ^[11b]
		• 두께 공차 (Tolerance)		$< 50 \mu\text{m}$ (limit) ^[11b]
• 단가 (Cost)	• 재료 및 제조공정 단가		$< 10 \text{ US}\$/\text{kW}$ (@500,000 stack/year)	
	• 가공 용이성 (Manufacturability)		대량생산에 의한 제조공정 단가 저감	
• 재료의 재생성 (Recyclability)	• 재활용성 재료 이용			

표 4. PEFC용 분리판 후보소재 및 특징^[12]

기판소재	특징	표면코팅소재
비금속 • Graphite (non-porous)	○ 장점 - 양호한 전기전도성 - 낮은 계면접촉저항 - 열적 안정성 - 양호한 내식성 - 낮은 밀도 ○ 단점 - 소재 단가가 높음 - 충격/진동에 취약(brittle)	

기판소재		특징	표면코팅소재	
비금속	<ul style="list-style-type: none"> Graphite (non-porous) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 박형화 곤란 (thick) ○ 제조공정 (가스유로) <ul style="list-style-type: none"> - 고가의 기계가공(CNC)공정 		
	<ul style="list-style-type: none"> Composite <ul style="list-style-type: none"> - Carbon-Carbon - Carbon-Polymer 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 낮은 계면접촉저항 - 양호한 내식성 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 상대적으로 낮은 전기전도성 - 가스 침투성 ○ 제조공정 (가스유로) <ul style="list-style-type: none"> - 몰딩 일체화 공정 - 몰딩(판재)/CNC 이원가공 		
금속	<ul style="list-style-type: none"> Stainless Steel Al alloy Ti alloy Ni alloy Cu alloy Amorphous alloy 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 높은 열 및 전기 전도성 - 큰 기계적 강도 - 소재 재생성(recyclable) - 얇은 박형화 가능 - 가스 비침투성 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 비전도성 표면산화/부식 - 높은 계면접촉저항 - 전극/고분자전해질막 오염 - 추가적인 표면처리 필요 ○ 제조공정 (가스유로) <ul style="list-style-type: none"> - 생산공정 자유도 높음 : CNC 선반가공, 스탬핑,포밍, 다이포징, 에칭 등 	비금속	<ul style="list-style-type: none"> 흑연(Graphite) DLC (diamond-like carbon) 전도성 고분자
			금속	<ul style="list-style-type: none"> 귀금속(Au, Ag 등) 붕화물(Borides) 탄화물(Carbides) 질화물(Nitrides) 전도성 산화물 (Oxides) Cladding

4.2.1 두께 및 중량

연료전지 본체모듈(stack module)에서 가장 많이 사용되는 핵심 부품중 하나인 분리판의 두께는 스택의 중량과 체적당 출력밀도(power density, W/L, W/kg)에 미치는 영향은 아주 큰 편이다. 따라서 분리판에 적용하는 소재는 요구되는 기계적 강도 등의 다양한 물성을 충분히 만족하면서 경량/박막 형태로 제조 가능해야 한다. 흑연 소재 분리판의 경우 4mm 두께일 때 50kW급 스택에서 전체의 중량의 거의 80%를 차지하지만^[13] 두께를 1mm로 낮출 경우 스택의 부피는 약 50%, 전체 시스템의 부피는 약 10% 정도 감소시킬 수 있는 것으로 분석되고 있다.(그림 7참조) 현재 흑연 소재 분리판의 경우 두께는 기술적으로 대략 1~1.5mm 정도 수준까지 근접하고 있지만 기계적 강도가 취약(brittle)하고, 상대적으로 큰 가스투과도로 인하여 통상 2~5mm정도의 두께가 주로 이용되고 있다. 그러나 금속소재 분리판의 경우에는 흑연 소재와 같은 단점이 없기 때문에 0.1mm 두께까지 제조가 가능한 실정이다^[12-14]. 연료전지 시스템의 중량 및 부피당 출력밀도만을 고려할 경우 분리판 소재는 경량 박형화가 가능한 금속 소재가 적합하다.

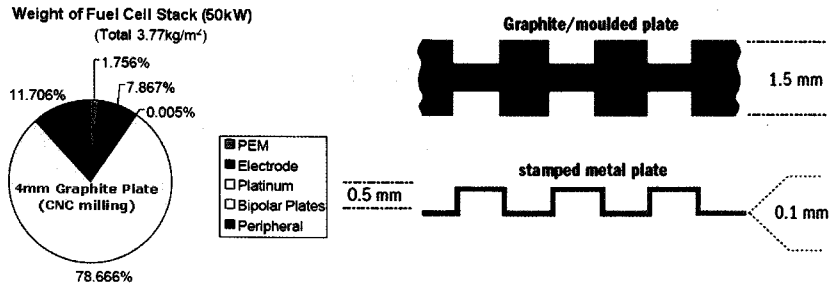


그림 7. PEFC 스택 구성 핵심부품들의 중량 비율 및 분리판 두께^[13]

4.2.2 열 및 전기 전도성

연료전지 스택 내에서 전극반응으로 발생하는 열의 효과적인 제어는 부품의 내구성이나 성능제어에 중요한 요소이므로 분리판 소재의 열전도성은 중요한 물성중 하나이다. 그림 8에서 알 수 있는 것처럼 스테인레스강(stainless steel, 이하 SS)과 같은 금속소재의 열전도성은 흑연이나 몰드형 복합소재보다 낮기 때문에 유리하지 않다. 흑연 소재의 경우 60-400W/mK 정도의 열전도성을 가지는 반면에 SS의 경우 12-44W/mK 범위이다. 전기전도성은 흑연소재의 경우 10mΩcm² 내외로 2010년 미국에너지성(Department of Energy, DOE) 목표 값을 만족하지만 금속소재의 경우 연료전지 운전환경에서 비전도성 표면 산화물이 형성되므로 높은 계면접촉저항을 나타낸다. 따라서 금속 소재의 경우 전도성을 확보하기 위한 별도의 표면처리가 요구되므로 분리판의 제조단가를 높이는 요인이 된다.

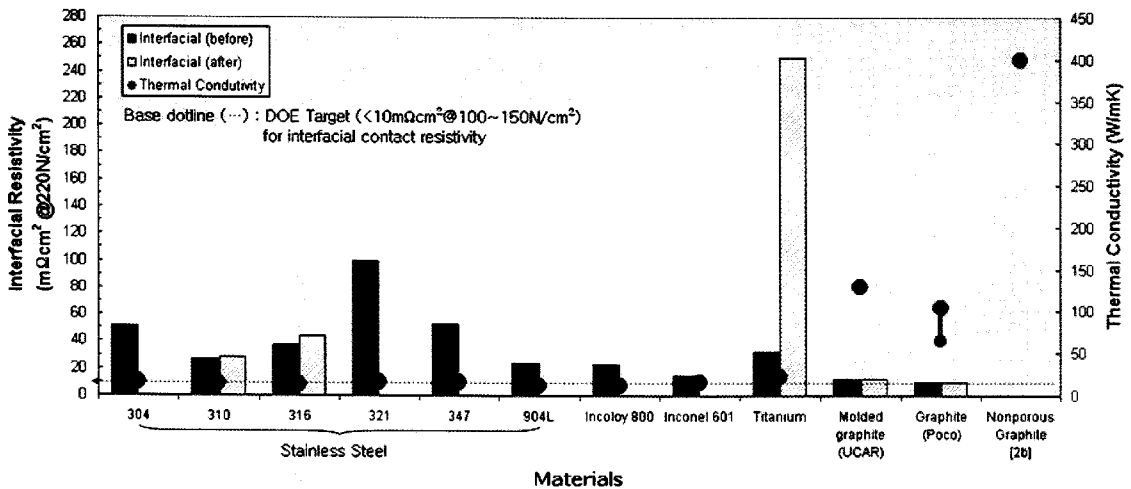


그림 8. 분리판 소재의 열전도도 및 분극시험(1300h@0.7A/cm²) 전후의 계면저항^[12, 15]

4.2.3 내식성

흑연과 같은 비금속 소재와 달리 금속소재 분리판의 경우에 연료전지 작동환경에서 표면에 비전도성 산화물이 형성 되면 전기 전도 통로 역할을 수행하는 기능적인 면에서 문제가 된다. 특히 SS나 Ti와 같이 비전도성의 부동태 피막이 쉽게 형성하는 소재는 계면저항이 급격히 증가하는 문제가 있다^[15]. 소재 표면에 형성되는 부동태 피막은 내식성과 계면접촉저항성에 상반된 특성(trade-off) 관계를 가진다. 부동태 피막층이 형성되면 소재 구성 성분의 용해반응이

억제되어 내식성 증대시키는 효과가 있지만 계면접촉저항을 증가시켜 분리판의 주요 기능중 하나인 전기 전도 특성을 저하시키는 요인이다. 따라서 금속소재 분리판 개발에 있어서는 내식성과 전기전도성을 동시에 확보하는 것이 중요한 기술적 사항이다. 일반적으로는 금속소재 분리판 표면에 전도성의 금속이나 비금속 코팅 등으로 표면처리를 하는 방안이 있다. 다른 하나는 분리판에서 요구하는 기능에 맞도록 새로운 합금소재를 설계/제조하는 것이다. 일본의 Sumitomo 금속에서는 Honda와 공동으로 연료전지 자동차용 스택(Honda FC stack)에 적용할 새로운 금속 분리판 합금을 개발하였다^[6]. 이 합금은 그림 9에 나타낸 것처럼 SS 모재 내부에 탄화물나 붕화물과 같은 전도성의 석출물을 균일하게 분산시킨 소재이다. 표면을 산성용액에서 에칭 처리공정으로 석출물이 표면에 노출되도록 유도한 후 알칼리 중화처리 함으로서 표면에 형성된 부동태 피막층이 내식성 향상에 기여함과 동시에 돌출된 전도성 석출물에 의해 전기 전도 통로 역할을 수행하도록 설계하였다.

PEFC용 금속 분리판에 적용할 후보소재들의 내식성에 대한 사전평가는 PEFC 운전조건 환경을 고려하여 70~80 °C, H₂SO₄/2ppm F⁻ (pH 3) 수용액에서 전기화학적 분극시험법을 주로 사용한다^[17, 18b]. 이러한 모사시험용액은 PEFC에서 Nafion 전해질막이 술폰산기(-SO₃H)를 가지고 있어 80°C, 100% 가습조건에서 Nafion membrane의 pH가 3 정도이고 전해질 막의 퇴화로 인한 소량의 F⁻이온의 될 경우를 고려한 것이다. DOE에서는 분리판 소재의 내식성의 목표 값을 다음과 같이 제시하고 있다. 표 5는 2010년 DOE 목표 값 대비 다양한 분리판 후보 소재들의 주요 물성을 비교하여 나타낸 것이다.

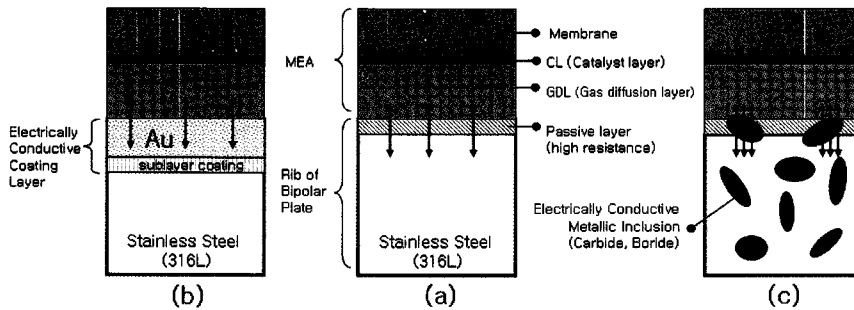


그림 9. 금속 분리판 표면에서 접촉저항 및 내식성 개선 방안. (a) 부동태 피막 형성 표면, (b) 전도성 코팅처리 표면 (c) 전도성 석출물 노출 부동태 표면

표 5. PEFC용 분리판 소재의 2010 DOE 목표 값 및 후보소재들의 물성^[18]

Materials		Electrical Conductivity (S/cm)	Contact Resistance (mΩ · cm ²)	Corrosion Rate (μA/cm ²) (μm/year)		H ₂ Permeability (cm ³ /cm ² · sec)	Flexural Strength (MPa)	Flexibility (% deflection @ mid-span)
DOE Target ^[11d] (2007 October revision)		2010 year > 100	10	< 1		< 2x10 ⁻⁶	> 25	3~5
Graphite	POCO graphite		8-15	< 10	< 15		15.85	
Composite	Carbon composite ^[18b]	200-300	12	6				
Metals	Austenitic SS	304	100	10				
		310	42					
		316	50-150	100-150	< 100			
		317	147	20-40				
		321	190					



Materials		Electrical Conductivity (S/cm)	^a Contact Resistance (m.Ω · cm ²)	^b Corrosion Rate		^d Hydrogen Permeability (cm ² /cm ² · sec)	Flexural Strength (MPa)	Flexibility (% deflection @ mid-span)	
				(μA/cm ²)	(um/year)				
Metals	Austenitic SS	347	100						
		349™	110	10					
		904L	40-135	10-20					
	Ferritic SS	434	150	100-200					
		436	100	20-60					
		441	100	60-300					
		444	100	20-50					
		446	200	8-20					
		Duplex 2205	130						
		Incoloy 800	37						
	Inconel 601	20							
	Amorphous alloys	Fe ₄₁ Cr ₁₈ Mo ₁₄ Y ₂ C ₁₅ B ₆ N ₄	10	5-36					
		Fe ₄₁ Cr ₁₈ Mo ₁₄ Y ₂ C ₁₅ B ₆ N ₄	15	100-182					
	Titanium	Ti	50		< 100				
	Aluminium	Al			250				
Al alloy	Al5052			1100					
Ni alloys	Ni-P			< 30					
	Ni-50Cr	50							
Cu alloys	C-17200			0.3					
^c Coatings	Polymers	304/PPy	800	1					
		304/PPy	800	0.1					
	Metals	316L/Au	5(>10nm Au)	5.65					
		316/Zr	150-1000		< 100				
	Nitrides	316/ZrN	150-1000						
		316/TiN	40						
		316/CrNCr ₂ N	10						
		349™/CrNCr ₂ N	10	< 10					
		446/CrNCr ₂ N	6-40						
		Ni-50Cr/CrNCr ₂ N	< 20						

(주) a) Contact resistance @ 140N/cm² (ca. 100-150N/cm² range) ; 실질적인 Contact 저항은 연료전지 환경에서 부식 실험 후의 접촉저항 값이 중요.
 b) Corrosion rate : @ 0.1V Hz (anode) & 0.6V Air (cathode), 1mM~1M HzSO₄/2ppm F (pH 3), 70-80°C ; ASTM G5
 e) M1/M2 : Substrate Materials (M1)/Coating Materials(M2)
 * Transportation System : 현재의 자동차 엔진용 수명(5000h) 상당, 외부환경 (-40°C~40°C) 작동 Stationary/Distributed System : >40,000h, 외부환경 (-35~40°C)

4.2.4 소재 및 가공공정 비용

DOE Target	2005	2010	2015	비고
Cost (\$/kW)	10	5	3	500,000 stack/year

연료전지용 분리판 소재 및 공정단계는 연료전지의 실용화 관점에서 중요한 기술적 기준요소 중 하나이다. 연료전지 자동차용 PEFC용 분리판 가격에 대한 DOE의 2010년 목표는 \$5/kW 이지만 현재 개발 또는 실증 스택에 주로 사용되는 흑연소재 분리판은 소재 가격이나 가공비 면에서 시장에서 요구하는 수준보다 상당히 고가이다. 분리판으로 사용되는 소재의 두께, 전기전도도, 중량, 열전도도, 단가 등의 항목을 기준으로 흑연과 금속소재의 비교 분석한 DOE 보고서^[19]에 따르면 금속이 그렇게 유리하지 않는 결과를 나타내고 있다. 표 6에서 알 수 있는 것처럼 흑연소재 분리판(3.74mm 두께)이 가격면(23-40%)이나 중량면에서 316SS 금속 분리판(1mm 두께)보다 더 유리한 편이다. 그러나 금속분리판 소재는 흑연 소재와 달리 가공두께에 대한 높은 flexibility를 가지 있어 두께를 0.1mm까지 낮추는 것이 가능하므로 저렴한 가공공정을 채택할 경우 흑연소재 보다 낮은 가격으로 제조하는 것이 가능하다.

4.3 분리판 소재

4.3.1 흑연판(Graphite)

일반적으로 사용되고 있는 흑연 분리판소재는 주로 두 가지 형태가 사용되고 있다. 전통적으로는 흑연소재내의 기공을 통한 가스의 침투를 방지하기 위하여 표면에 약 7 μ m 깊이로 수지 함침이나 Pyrolytic 열처리 함침처리가 되어 있는 흑연판재를 사용한다. 이러한 연료전지 분리판용 흑연 소재로는 높은 전기 및 열적 전도성, 낮은 접촉저항성, 우수한 내식성 및 가공의 용이성이 내는 POCO Graphite(미국), SGL Carbon(독일) 등의 제품이 있다. 흑연소재 분리판은 주로 CNC 밀링공정으로 유로가공이 이루어진다. 다른 하나는 GraphTech(미국)의 GRAFCELL 같은 flexible graphite 소재를 분리판으로 사용하는 것이다. Flexible graphite는 천연흑연(natural graphite)를 intercalation 공정이나 열처리 공정으로 제조된 것으로 흑연소재의 층간거리가 약 80배 정도 큰 편으로 분리판 제조시 원하는 밀도로 압축하여 사용 할 수 있다. 현재 flexible graphite를 이용한 분리판은 DOE의 가격 목표값을 충족할 뿐만 아니라 아주 낮은 접촉저항과 밀도(1g/cm³)를 나타내며 우수한 실링특성을 보이고 있다. 단점으로는 다른 분리판 소재에 비하여 상대적으로 기계적 강도가 취약하고 높은 가스 침투특성을 나타낸다.

표 6. PEFC 연료전지용 금속 분리판 및 Graphite 분리판 가격 비교^[19]

Plate Type		Graphite	Metallic	
			316 SS	904 SS
기판소재 단가	US\$/plate	2.24	2.22	5.42
	US\$/m ²	37	37	90
가공공정 단가	US\$/plate	0.51	1.07	1.07
	US\$/m ²	8	18	18
표면처리 단가	US\$/plate	No	3.79	3.79
	US\$/m ²	No	63	63
전체 단가	US\$/plate	2.75	7.08	10.31
	US\$/m ²	46	117	171
분리판단가/스택 (US\$/kW)		21	53	78
중량 (kg)		179	228	225

※ 500,000 unit (50kW)/year ; Graphite (3.75mm thick, 603cm²), Metallic (1mm thickness, 603cm²)

4.3.2 복합소재(Composites)^[13b]

고가의 흑연소재 분리판을 대체하기 위한 일환으로 값싼 탄소 복합소재 분리판이 개발되고 있다. 복합소재 분리판은 탄소소재의 결합제로 첨가되는 폴리머 수지가 최종 상태에서 탄소 형태로 남아 있느냐 아니면 폴리머 상태로 남아



있는가에 따라 Carbon-Carbon 복합소재와 Carbon-폴리머 복합소재로 크게 구별된다.

ORNL(Oak Ridge National Lab. US)에서 개발된 Carbon-Carbon 복합소재 제조공정 기술^[86]을 이용하여 Porvair Fuel Cells Inc (미국)에서는 시간당 300판 이상의 복합소재 분리판을 제조할 수 있는 생산체계를 갖추고 있다. 이 복합소재는 그림 10a에서와 같이 카본섬유 및 페놀수지 혼합 슬러리 몰딩, 가스유로 형성 프레스 공정 및 고온(1350~1500℃)에서 chemical-vapor infiltration (CVI) 공정을 통하여 제조한다. 고온의 CVI 공정에서 메탄을 혼합가스 처리를 하면 혼합 슬러리에 첨가된 탄소섬유 표면에 탄소성분이 형성되고 또한 페놀수지 결합제도 Pyrolytic 탄화에 의하여 Carbon-Carbon 복합소재가 얻어진다. 이러한 Carbon-Carbon 복합소재는 Carbon-Polymer 복합소재와 달리 폴리머 수지를 함유하고 있지 않기 때문에 보다 고온에서 사용할 수 있는 장점이 있지만 몰딩공정에서 부피수축으로 수치변화가 발생하고, 또한 여러 단계의 공정을 거치기 때문에 시간이 많이 소요되는 고온에서 이루어지는 공정이므로 제조공정 단가가 비싼 편이다. 관련 업체에서 충분한 물량(>1 million unit/year)을 제조하는 대량 양산 단계에서는 10 US\$/kW 의 분리판 단가를 맞출 수 있다고 얘기하고 있다.

표 7. Carbon-polymer 복합소재 분리판 제조공정 및 구성 물질

Plate Type	소재/업체	비율(%)	비고
탄소소재	<ul style="list-style-type: none"> Graphite (natural, synthetic) Non-graphite carbon black 	>80	전기 전도성
보강제 (Reinforce)	<ul style="list-style-type: none"> Glass fiber Graphite fiber KEVLAR 		기계적 강도
결합제 수지 (Binder resin)	<ul style="list-style-type: none"> 열경화성 (thermoset) <ul style="list-style-type: none"> Epoxy resin : 낮은 점도, 화학적 안정성 Phenolic resin : 저가, Post-curing 필요 Vinylester : 빠른 공정, 낮은 열적 안정성 (hydrolysis >100℃) 		압축성형 (Compression Moulding)
	※ 개발업체 이용 폴리머 수지 <ul style="list-style-type: none"> Vinyl Ester : BMC Inc (US), Phenolic : Plenco (US), Seikoh Giken (JP), SGL Carbon AG (DE)-Sigracet BBP4 		
	<ul style="list-style-type: none"> 열가소성 (thermoplastic) <ul style="list-style-type: none"> PVDF : 화학적 안정성, 소수성, 고가, 높은 점도 Polypropylene (PP) : 저가, 공정성 양호 Polyethylene (PE) : 저가, 공정성 양호 Polyphenylene : 열적 안정성 (softening ~ 200℃) <ul style="list-style-type: none"> Polyphenylene sulfide (PPS) : 고가, 열적 안정성(230℃), 낮은 점도 Liquid crystal polymer (LCP) : 고가, 높은 열적 안정성, 낮은 점도 		연속사출성형 (Continuous Injection Moulding)
	※ 개발업체 이용 폴리머 수지 <ul style="list-style-type: none"> PP : SGL Carbon AG (DE) Sigracet PPG86, PVDE : GTI (US)-Graphite 함량 (93%) PPS : Tonica EP (DE)-End plate composite LCP : Tonica EP (DE) Vetra-Graphite 함량 (85%), Dupont (US) T8-D 분리판 Zenite LCP 이용 		

Carbon-polymer 복합소재는 다양한 탄소소재에 열경화성(thermoset)이나 열가소성(thermoplastic) 폴리머 수지 결합제를 첨가하여 사출성형(inject moulding, IM)이나 압축성형(compression moulding, CM), 슬러리 성형(slurry moulding, SM), 이송성형(transfer moulding, TM) 공정 등을 이용하여 판상의 복합소재 또는 유로형성 복합소재 분리판을 제조 한다(그림 10 참고). 판상의 복합소재는 추가적인 CNC 밀링, 방전가공(Electric Discharge Machining, EDM), Photo Mask/Sand Blasting 공정 등의 후속 유로가공 등의 공정이 필요하다. 고온 공정에서 제조되는 Carbon-Carbon 복합소재와 달리 첨가된 폴리머 수지가 그대로 남아 있는 상대적인 저온에서 단일공정으로 신속하게 제조할 수 있으므로 제조공정 비용단가가 크게 낮출 수 있어 가볍고 얇은 저가의 분리판의 생산이 가능하다. 그러나 이러한 복합소재의 가장 큰 단점은 첨가되어 있는 폴리머 수지로 인하여 Carbon-Carbon 복합소재에 비하여 상대적으로 낮은 전기전도성을 나타낸다. 전기전도성이나 표면접촉저항성은 탄소소재와 폴리머 수지의 비율(전형적으로 50~200 μ m Graphite 60~80% 함량)에 의존하므로 탄소소재의 함량이 높을수록 크게 향상시킬 수 있다. 연료전지 분리판의 요구되는 물성 가운데 소재의 체적 전기전도성(bulk conductivity)보다는 계면접촉저항성(interfacial contact resistivity)이 훨씬 더 중요한 요소이다. IM 공정으로 제조된 복합소재 분리판 표면은 일반적으로 폴리머 수지함량 높은 복합소재 표면층이 형성되어 계면접촉저항을 증가하는 경향이 있다. SGL Carbon AG에서는 IM 공정후 abrasive blasting 후처리 공정을 도입하여 표면층을 제거하고 있다^[20]. Carbon-polymer 복합소재는 금속에 비하여 체적 전기전도성은 낮은 편이지만 계면접촉저항이 상대적으로 양호한 편이다. 이러한 이유는 금속의 경우 연료전지 환경에서 표면에 비전도성의 산화물 피막층을 형성하기 때문이다. 따라서 carbon-polymer 복합소재의 낮은 계면접촉저항은 체적 전기저항 요소를 충분히 상쇄할 수 있다.

결합제인 폴리머 수지의 점도와 같은 특성은 탄소소재의 함량이나 제조공정의 선택에 중요한 영향을 미친다. 표 7은 carbon-polymer 복합소재 분리판 개발 업체들이 사용하고 있는 구성 물질 및 제조공정들을 요약한 것이다. 낮은 점도를 갖는 폴리머 수지 결합제를 사용할 경우 탄소 소재의 함량을 크게 높여 최종 복합소재 분리판의 열적, 전기적 전도성을 크게 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 연속사출성형이 가능하므로 제조공정 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다. 미국 GTI(Gas Technology Inc.)에서는 carbon black과 열가소성 PVDF(polyvinylidene-fluoride) 복합소재의 전기전도성을 2.4S/cm²에서 탄소의 함량을 93%까지 증가시켜 300S/cm²까지 향상시켰다. 또한, 독일의 Tonica EP(Tonica Engineering Polymer)와 SGL carbon은 점도가 낮은 열가소성의 LCP(liquid crystal polymer)를 사용하여 탄소의 함량을 85%까지 증가시켰다. LCP는 고가이지만 점도가 낮아 높은 탄소 소재의 함량에서도 연속사출성형이 가능할 뿐만 아니라 강한 결합 특성을 가지고 있어 단단하고 치수 및 화학적 안정성이 다른 비정질 열가소성 수지보다 우수하여 복합소재 분리판 제조에 이용되고 있다.

4.3.3 금속(Metals)

금속 분리판 후보소재로 주로 스테인리스강을 이용하는 것을 가장 많이 고려하고 있다. 금속소재를 채택할 경우 흑연소재나 탄소 복합소재에 비하여 가스의 투과성에 대한 염려가 없고 내식성이나 전기 및 열적 전도성이 확보할 수 있을 뿐만 아니라 충분한 기계적 강도를 유지하면서도 분리판의 두께를 0.1mm까지 줄일 수 있어 중량이나 가격적인 면에서 유리해지는 측면이 있다. 그러나 고품질의 금속 분리판을 제조하기 위해서는 추가적인 코팅 표면처리가 필요할 경우 생산비용이 증가하는 요소가 있으므로 전체적인 가격을 고려해서 판단해야 한다.

- 알루미늄(Al) : 소재 자체의 가격이 저렴할 뿐만 아니라 밀도가 낮고 가공이 용이하지만 나쁜 내식성으로 인하여 전기접촉저항성이 증가하므로 추가적인 적절한 코팅처리가 필요하다. 일례로 Al6061 소재의 경우 에칭 공정 후 무전해 Ni 코팅처리하거나 추가적으로 PVD법으로 CrN 또는 TiN 코팅 처리하여 제조한다.
- 타이타늄(Ti) : 알루미늄과 마찬가지로 낮은 밀도와 표면 산화 피막층 형성에 의한 우수한 내식성을 보이지만 비전도성 피막에 의한 접촉저항성이 증가와 소재 자체가 가격이 고가라는 단점이 있다.
- 니켈(Ni) : 니켈 자체는 연료전지 운전환경에서 내식 피막층을 형성하지 않기 때문에 심각한 이온 용출반응이



일어날 수 있어 내식성 피막을 형성하는 원소인 크롬(Cr)이 첨가된 Ni-50Cr이나 Inconel 같은 합금강을 사용할 수 있지만 이러한 소재는 가격이 너무 높아 실용성이 없다.

- 스테인리스강 (Stainless Steel, SS) : 다른 금속소재들에 비하여 기계적강도, 접촉저항성, 내식성, 가격면 등에서 채택 가능성이 가장 높은 금속소재이다. PEFC나 MCFC용 금속 분리판 소재로는 주로 오스테나이트 계 스테인리스강 (austenitic stainless steel)이 사용되고 있다(표8 참고). 아래 5절에서 다루겠지만 참고로 650°C 이상의 고온에서 작동하는 SOFC용 금속 분리판 소재로는 Cr 함량이 높은 주로 페라이트 계 스테인리스강 (ferritic stainless steel)이 주로 사용되고 있다. 상업용 SS는 우수한 기계적 강도와 내식성을 나타내지만 Cr 함량이 낮은 SS는 연료전지 환경에서는 요구되는 충분한 내식성($<1\mu\text{A}/\text{cm}^2$)을 확보할 수 없다. SS349와 같이 Cr 함량이 높은 SS를 사용할 경우 양호한 내식성과 낮은 전기접촉저항을 보이지만 Cr 함량의 증가는 분리판 소재의 가격 상승 요인이 된다. 분리판의 가격을 낮추기 위해서는 Cr 함량이 높은 고가의 소재를 사용보다는 저 Cr 함량 SS에 질화처리와 같은 금속코팅 표면처리 공정을 도입하는 것이 성능이나 비용적인 면에서 적절한 전략 일수 있다.

표 8. PEFC용 금속 분리판 후보소재로서 오스테나이트 스테인리스강의 조성

Type AISI	Composition (%) ²⁾							사용 예 (Ref.)
	Cr	Ni	Mn	Si	C	Mo	Others	
304	18-20	8-10.5	2.0	1.0	0.08			15a
304L	18-20	8-12	2.0	1.0	0.03			
310	24-26	19-22	2.0	1.5	0.25			15
316	16-18	10-14	2.0	1.0	0.08	2.0-3.0		15
316L	16-18	10-14	2.0	1.0	0.03	2.0-3.0		22a
321	17-19	9-12	2.0	1.0	0.08		Ti 0.7 max	15a
347	17-19	9-13	2.0	1.0	0.08		Nb+Ta 1.0 max	15a
348	17-19	9-13	2.0	1.0	0.08		Nb+Ta 1.0 max (Ta 0.1, Ca 0.2 max)	
349	23	14.5	1.5	1.4	0.05		Nb 0.4	22
904L	19-23	23-28	2.0	1.0	0.02	4.5	Cu 1.2	15,22

4.4 분리판의 유로형성 및 제조 공정

연료전지용 분리판은 연료전지 본체인 스택 모듈에 가장 많이 들어가는 핵심 부품 중 하나이므로 고가의 연료전지 시스템을 실용화를 위해서는 분리판의 가격을 낮출 수 있는 제조공정을 채택하는 것은 중요한 기술적 사항이다. 저가의 고성능 분리판 개발은 소재의 물성, 소재 및 제조공정의 가격을 사전에 충분히 고려하여 대량 양산화가 가능한 공정이 채택되어야 한다. 분리판 소재는 물성적인 면에서 고내식성 및 낮은 계면 접촉저항 등이 확보되어도 가격적인 면에서 고가의 소재는 상업적인 실용화를 위해서는 도입되기 어렵다. 또한 소재 물성이나 가격이 만족스럽더라도 적용할 수 있는 제조공정이 대량 생산성/양산성에 부합되어야 하며 기존의 생산 단가가 획기적으로 낮출 수 있는 저렴한 공정을 이용할 수 있는 소재가 타당하다. 분리판 개발에서 핵심기술로는 분리판에서 요구되는 물성을 만족할 수 있는 새로운 소재 개발을 위한 신소재기술, 유로구조 설계 및 형성기술, 접합기술, 표면처리 기술 등이 있다.

Matrix, serpentine, linear 또는 interdigitated channel 등 요구되는 다양한 유로형태에 따라 가공이 용이하고 공정 단가가 저렴한 제조공정을 선택할 필요가 있다. 전통적인 흑연소재 분리판의 경우에는 주로 CNC 밀링공정이 가장 많이 이용되어 왔다. 이 공정에는 많은 시간이 소요되고 또한 가공단가가 높아 대량 생산에 적합하지 않으므로 이러한 단점을 개선할 수 있는 다른 대안들이 제안되고 있다. Ballard(캐나다)에서는 팽창흑연(extended graphite) 소재의

경우 Roller Embossing 공정으로 유로를 형성한 후 후처리로 수지를 함침하여 분리판을 제조하기도 한다^[23]. 이러한 Roller Embossing 공정으로 이용한 유로형성은 GrafTech- GrafCell(미국)의 팽창흑연 분리판에서도 또한 이용되고 있다^[24]. Morgan Fuel Cell(영국)에서는 마킹 된 소재기판에 air-abrasive 샌드 블라스팅(sand blasting) 공정처리^[25] 함으로써 200 μ m 깊이까지 복잡한 유로형상이 가능한 에칭공정(Electro-Etch)을 이용하여 나뭇잎 줄기 패턴, 혈액 공급이나 폐의 공기 공급구조와 유사한 branched 구조의 형상 유로를 갖는 biomimetic 분리판을 제조하였다^[26]. 이 공정을 이용할 경우 CNC 밀링공정에 비하여 제조공정 단가가 저렴할 뿐만 아니라 30배 정도 빠른 가공속도를 얻을 수 있는 장점이 있다. Carbon-polymer 복합소재는 판재를 만들어 흑연 판재와 동일한 유로 형성 공정을 이용하여 분리판을 제작할 수도 있지만 그림 10에 나타낸 것처럼 압축성형이나 사출성형 공정에서 바로 유로형성이 가능한 일체화 몰딩공정을 이용할 경우 저가의 생산이 가능하다.

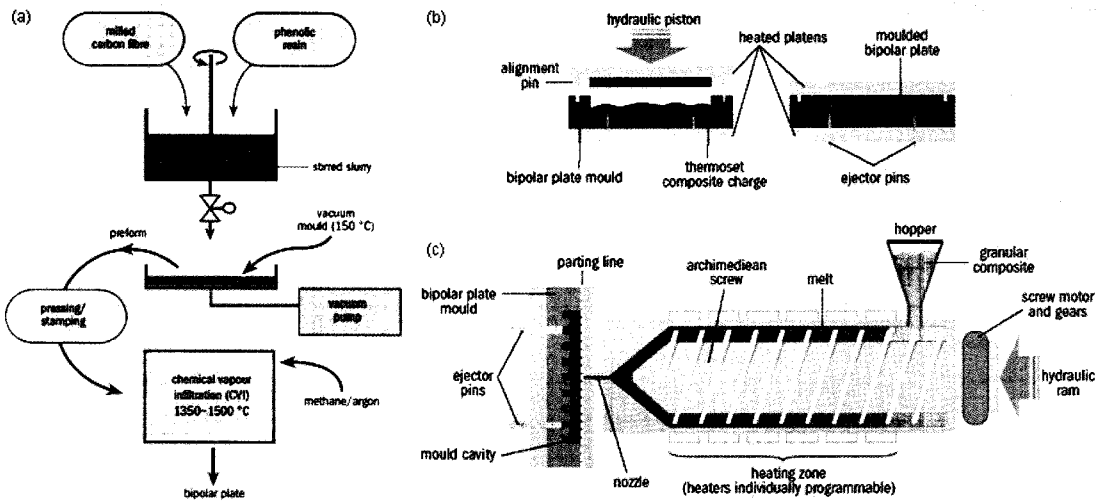


그림 10. 복합소재 분리판 제조공정^[13b]. (a) Slurry Moulding/CVI process for carbon-carbon composite (b) Compression moulding, (c) Injection moulding

다른 소재에 비하여 가공에 대한 충분한 기계적 강도를 가지는 금속 소재의 경우에는 표 9에 나타낸 것처럼 얇은 금속판을 사용하여 다양한 가공공정이 적용될 수 있다. 금속 분리판의 유로형성 가공에는 CNC milling, Stamping/Embossing^[27], Hydroforming^[28], Extrusion^[29d], Etching, LIGA-Electroforming^[30], 등 다양한 가공공정들을 채택하여 반응가스 및 냉각 유로를 가공하고 있다. 유로 형성공정에 따라서 추가적인 후속공정인 접합공정으로는 Brazing^[29a], Press Welding^[28], Laser Welding^[29b, c] 공정이 도입되기도 한다. 그림 11에 나타낸 것처럼 미국의 Tech-Etch와 영국의 Precision Miro Ltd에서는 Photoetching(Photochemical Machining, PCM) 공정으로 이용하여 정밀도가 높은 SS 및 Ti 금속 분리판을 제조하고 있다. 저가 금속 분리판 공정으로 Brazing이나 Stamping/Embossing 공정도 제안되고 있다. 미국의 GenCell Corp.에서는 연속적인 Roller type Stamping 공정으로 유로 형성 및 Eyeletting 또는 Laser Welding 후속 접합공정을 이용하여 저가의 PEMFC/DMFC 및 MCFC/SOFC용 금속 분리판을 제조하고 있다^[27]. 그러나 Stamping/Embossing 공정은 값싸고 빠른 공정이지만 가공할 수 있는 유로 깊이가 제한적이며 또한 과잉의 Embossing 공정은 분리판 손상을 초래할 수 있는 단점이 있다^[13b]. 실질적으로 분리판의 제조공정 결정단계에서 소재 종류, 가공 용이성 및 공정단가 등을 충분히 고려하여 다양한 제조공정 중에서 효율적인 공정을 채택할 필요가 있다.

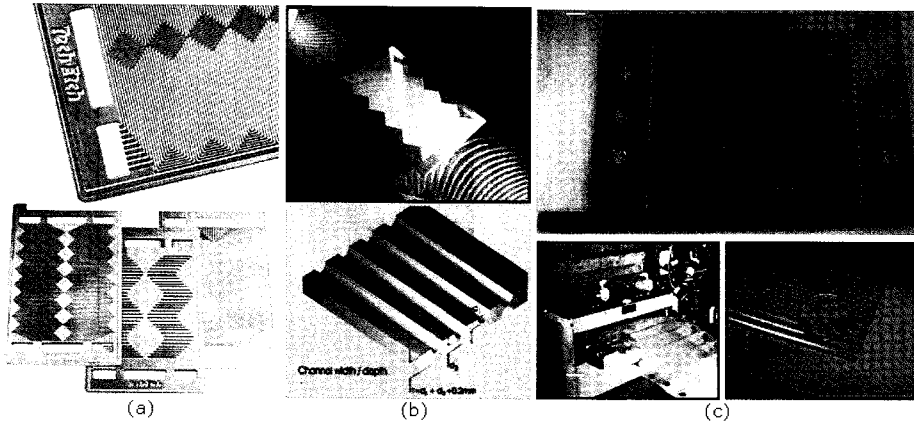


그림 11. 금속 분리판 제조공정. (a) Photo etching (Tech-Etch, Inc., US), (b) Photo Chemical Machining (PCM) (Precision Micro Ltd., UK) and (c) Stamping (GenCell Corp., US)

표 9. 분리판 소재별 적용 가능한 제조공정

Forming Processes		Graphite	Composite			Metallic
			Carbon-Carbon	Carbon-Polymer		
				Thermoset	Thermoplastic	
• Moulding	Slurry moulding		○			
	Compression moulding			⊙	○	
	Injection moulding				⊙	
• Machining	Pressing/stamping (preform)		○			
	Post-molding/CNC milling			○	○	
	CNC milling	⊙	○	○	○	○
	EDM (Electric Discharge Machining)			○	○	
	Stamping/Embossing					⊙
	Roller Embossing/Resin Impregnation	○ (Expanded Graphite)				○
	Powder Metal Forging					○
	Die Forging/Casting : Extrusion					○
	Investment Casting					○
	Hydroforming/Press Welding					○
• Etching	Physical	Sand blasting	○			⊙
		Water jet				
	Chemical etching					
	Electrochemical etching					
	Photoetching					
• LIGA process-Electroforming						○
• Joining : Brazing, Laser Welding, Press Welding etc.						⊙
• Protective Coating (additive)						⊙

4.5 금속 분리판 표면처리 기술

연료전지 스택에 금속 분리판을 적용할 경우 발생하는 낮은 내식성 및 산화에 따른 계면접촉저항성 등의 단점을 보완하기 위하여 고내식성과 전도성을 갖는 보호 피막층에 대한 다양한 코팅소재 및 표면처리 방법이 제안되어 왔다. 금속 분리판용 코팅소재는 분리판에서 일반적으로 요구하는 기본특성의 만족뿐만 아니라 코팅 층과 모재간의 계면 밀착성, 열팽창계수 등의 계면특성에 미치는 요소도 아주 중요한 기술적 사항이다. 금속 분리판의 표면처리 소재, 공정 기술 및 평가기술에 대한 내용은 다음 기회에 본지에서 다시 상세히 다룰 예정이다.

○ 일반적인 요구특성

- 전기적 특성: 높은 전기전도성 및 GDL과의 낮은 계면접촉저항
- 화학적 특성: 우수한 내식성 및 낮은 이온 용출 (고분자막 및 전극촉매의 오염 방지)
- 단가: 낮은 코팅 및 표면처리 공정단가 및 공정 적용 용이성

○ 계면 밀착성

부풀림(blistering), 균열, 핀홀(pinhole) 등의 결함이 없는 코팅 층과 금속 모재 기관간의 치밀한 밀착성을 유지할 필요가 있다.

○ 열팽창계수(thermal expansion coefficient, TEC)

연료전지 운전의 온도조건에서 금속모재와 코팅층간의 열팽창 계수의 차이는 코팅 층의 층 분리(delamination)에 심각한 영향을 미치는 요소이다.

5. 고온형 연료전지(MCFC, SOFC)용 분리판

고온(약 650°C 이상)에서 작동하는 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, 이하 MCFC)이나 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC)에서 분리판(Bipolar Plate)은 소재의 열적/화학적 안정성, 우수한 Creep 특성, 다른 인접소재와의 열팽창계수의 적합성이 중요한 기술적 요소이다. 금속소재를 사용할 경우 일반적으로 분리판에 요구되는 전극과의 균일한 접촉특성 및 계면접촉저항 요소 뿐만 아니라 고온부식(산화)이나 Cr 성분의 증발에 의한 전극/전해질 오염 방지 등이 특히 요구된다. 표 10은 고온에서 작동하는 MCFC 및 SOFC용 분리판 소재 및 기술적 특징을 요약한 것이다.

SOFC에서는 분리판이라는 용어보다는 연결재(interconnect)라는 용어가 주로 사용되어 왔다. 이것은 초기에 개발된 공기극 지지 원통 튜브형(cathode supported cylindrical tubular type) SOFC의 연료전지 셀 구조의 형태에 기인한다. 그림 12와 같은 원통형 셀에서는 구조상 반응가스의 공급이 관 내부와 외부로 분리되어 공급되기 때문에 별도의 분리 기능은 필요 없고 단지 튜브형 셀의 아노드(anode)와 인접셀의 캐소드(cathode)를 전기적으로 연결하는 통전 기능만 요구되기 때문에 연결재(interconnect)라는 용어가 사용되었다. 이러한 원통 튜브형 구조는 1998년 Siemens가 Westinghouse로부터 관련 발전분야를 인수 합병하여 Siemens Westinghouse Power Corp.^[43a]으로 출범하면서 HPD(hig power density) 평판 튜브형(flat tubular type, 2004년) 및 Delta 튜브형(delta tubular type, 2005년)으로 발전하여 왔다. 고온(800-1100°C)에서 작동하는 튜브형 SOFC에서는 금속 소재를 사용할 수 없기 때문에 고가의 lanthanum chromite (Doped-LaCrO₃, 80-100 μ m)계 세라믹 연결재가 사용되고 있지만 최근에는 상대적으로 낮은 중온(650-750°C)에서 작동되는 고체산화물 전해질이 개발되면서 그림 13(b)와 같이 금속소재가 이용가능한 평판형(planar type) SOFC 개발이 가능하였다. 평판형의 경우에는 전기적 통전기능과 동시에 반응가스의 분리 공급 기능에 요구되므로 연결재(interconnect) 용어보다는 분리판(bipolar plate)이 더 적절한 용어이다. 금속 연결재(분리판) 소재로는 ferrite stainless steel (독일 ThyssenKrupp AG의 Crofer 22 APU, 또는 일본 Hitach Metals의 ZMG232) 등 주로 22% Cr 합금강이 사용되고 있다. 고온용 세라믹 연결재는 전지 셀 제조과정에



표 10. 고온작동 연료전지 (MCFC 및 SOFC)용 분리판 소재 및 특징

고온형 FCs	소재	기술적 이슈/문제점
MCFC (650°C) ^[31]	<ul style="list-style-type: none"> Austenite SS - 310S - 316L Ni-based Alloy 	<p>고온산화부식/접촉저항</p> <ul style="list-style-type: none"> Wet seal : Al coating (Alumization) Anode side : Ni coating
SOFC (700~1000°C) ^[32]	<ul style="list-style-type: none"> HT (High Temp. 900~1000°C) Operating - 전도성 세라믹 (Perovskite) : doped Lanthanum Chromites (LaCrO₃) ※ dopant : Mg, Sr, Ca, Al 등 ex La(Mg)CrO₃ ceramic : Westinghouse 	<ul style="list-style-type: none"> Fabrication process : <ul style="list-style-type: none"> - Power Sintering - EVD (electrochemical vapor deposition) - APS (Atmospheric Plasma Spraying) 고온 열적안정성 : TEC^[33] <ul style="list-style-type: none"> - YSZ : $10.3 \times 10^{-6}/K$ - LaCrO₃ : $6.7 \times 10^{-6}/K$ (orthorhombic) : $9.2 \times 10^{-6}/K$ (rhombohedral)
	<ul style="list-style-type: none"> HT (High Temp. ~950°C) Operating - High-Cr based Alloy (Cr₅Fe₁Y₂O₃) : oxide dispersion-strengthened (ODS) alloy ex Ducrolloy (94%Cr-5%Fe-1% Y₂O₃)^[34,35] : Plansee AG (Austria) & Siemens AG (Germany) 공동개발 	<ul style="list-style-type: none"> 고가 소재 (고 Cr 함량) 고온산화(부식)로 인한 계면접촉 저항 증가
	<ul style="list-style-type: none"> IT (Intermediate Temp. 650~800°C) Operating - Ni-based Superalloy ex Hayness 230 (Ni-22% Cr) : Haynes International Inc. Inconel 625, Inconel 718 - Ferritic Fe-Cr alloy (12~30% Cr contents) ex 409SS (Fe-11.7%Cr-0.5%Ti) 430SS (Fe-17%Cr) 434SS (Fe-17%Cr-1% Mo-1%Si) 441SS (Fe-21% Cr) 446SS (Fe-23~30%Cr) ODS alloy IT-10, IT-11, IT-14 (Fe-22%Cr-(1~10%)Mo-rare earth oxide) : Plansee AG (Reutte, Austria) ZMG232 (Fe-22%Cr-Mn(Ni/Al/Zr/La)) : Hitachi Metal Ltd (Japan) E-brite (Fe-27% Cr) : Alleghaney Ludlum Crofer22 APU (Fe-22~24%Cr-Mn(La/Ti)) : JS-3, Forschungszentrum Julich 개발 /Thyssen Krupp VDM (Werdohl, Germany) 상업화 	<ul style="list-style-type: none"> Ferritic SS 사용 이유^[34, 36] <ol style="list-style-type: none"> 인접소재와 열팽창계수의 접합성 (Thermal Expansion Coefficient) <ul style="list-style-type: none"> -TEC = $11.4 \times 10^{-6}/K$ (430SS) -TEC = $12 \times 10^{-6}/K$ (LSM cathode) 상대적으로 저렴한 가격 우수한 가공성 Cr 증발로 인한 전극/전해질오염^[37] : CoCr₂O₄ 형성 (LaCoO₃ cathode)^[36] MnCr₂O₄ 형성 (LSM cathode) NiCr₂O₄ 형성 (Ni-YSZ Anode)^[34] Cr 증발/오염 방지대책 <ol style="list-style-type: none"> Cr free-ferritic steel 사용 Conductive Oxide Coating^[38] <ul style="list-style-type: none"> - doped LaCrO₃ coating^[39-40] : (La,Sr)CrO₃ perovskite (Vacuum Plasma Spraying, VPS) - (La,Sr)FeO₃ perovskite^[41] (Atmospheric Plasma Spraying, APS) - (Mn,Co)₃O₄ spinel : MnCo₂O₄^[35-36] : Sputtering, Screen Printing - MCrAlO_x (M=Ti,Co, Mn)^[42] (large area filtered arc PVD) <p>※ TEC = $11.7 \times 10^{-6}/K$ (MnCo₂O₄)^[36] $8.9 \times 10^{-6}/K$ (MnCoCrO₄) $5.3 \times 10^{-6}/K$ (MnCr₂O₄) $5.5 \times 10^{-6}/K$ (Cr₂O₃)</p>

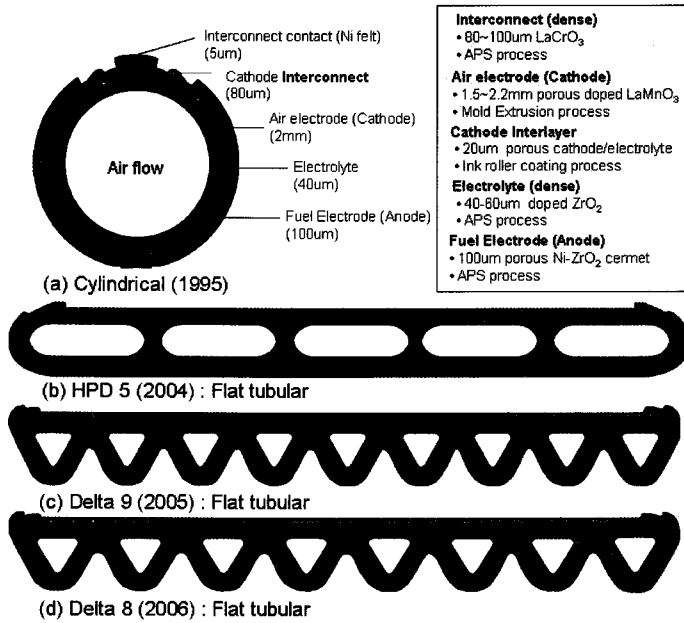


그림 12. Siemens-Westinghouse SOFC 셀 구조^[43b]

서 직접 셀에 함께 코팅/소결하지만 평판형 금속 연결재(분리판)는 PEFC와 같은 저온형 연료전지와 마찬가지로 구조적 지지체 및 가스유로 기능이 함께 구비되도록 개별적인 공정으로 설계/제작할 수 있는 특징이 있다.

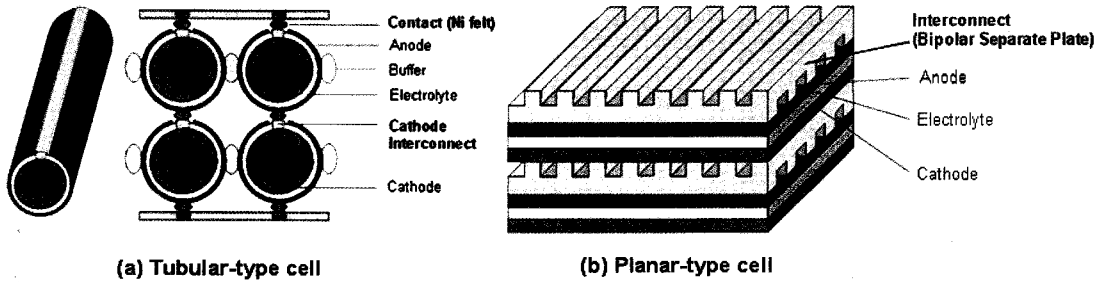


그림 13. SOFC 셀 형태에 따른 연결재의 구성^[43c]

6. 맺음말

이상에서 살펴본 바와 같이 연료전지용 분리판은 연료전지 본체인 스택을 구성하는 핵심부품으로 스택의 용량에 따라 많은 수량의 분리판이 사용된다. 연료전지 스택의 성능은 전극반응이 일어나는 전극/MEA 자체 성능뿐만 아니라 반응가스의 공급/분리, 반응 생성물의 배출, 통전 기능 등을 담당하는 분리판의 유로구조 및 소재의 밀도(중량/부피), 두께, 내식성, 열/전기전도성, 다양한 표면 특성과 밀접한 관련성이 있다. 따라서 고내식성 및 고전도 표면특성을 갖는 분리판 소재의 연구개발이 중요한 기술적 요소이다. 또한 상업적 실용화를 위해서는 시장에서 요구하는 가격을



만족하기 위해 가능한 값싼 소재를 활용하여 연료전지에서 요구하는 물성을 충분히 만족하도록 하면서도 저가의 대량 생산 공정이 가능한 공정개발도 필요하다. 분리판 소재는 촉매, 전극, 전해질 GDL, MEA, BOP 등 연료전지의 다른 부품소재와 달리 스택 시스템의 의존성이 가장 큰 부품소재중 하나이다. 특히 분리판의 유로구조는 스택 개발 업체에서 외부 노출을 꺼려하는 경향이 크고 기술적으로도 스택 시스템에 적합하도록 분리판을 설계해야 하기 때문에 스택 제조업체에서는 소재나 제조공정은 외부의 협력으로 받지만 대부분 시스템과 함께 개발하고 있다. 따라서 실용화를 대비한 시장의 접근성을 높이기 위해서는 상업용 연료전지 분리판 개발은 독자적인 분리판 개발 보다는 시스템 개발업체와 상호 보완적인 협력관계 아래서 진행할 필요가 있다.

❁ 참고 문헌

- [1] 이창래, 양철남, 문성모, 정용수, “수소경제시대 실현을 위한 고분자 연료전지용 부품·소재 기술”, 전기전자재료학회지, 20(4), 26-38(2007).
- [2] John C. Amphlett, Brant A. Peppley, Ela Halliop, Aamir Sadiqm “The Effect of Anode Flow Characteristics and Temperature on the Performance of a Direct Methanol Fuel Cell”, J. Power Sources, 96(1), 204-213(2001).
- [3] a) C. A. Resier et al. (International Fuel Cell Corporation, US), US Patent No. 4,769,297(1988.09.26) Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell Stack Water Management System.
b) C. A. Reiser et al. (International Fuel Cell Corporation, US), US Patent No. 4,826,742(1989.05.02) Water and Heat Management in Solid Polymer Fuel Cell Stack.
- [4] a) A. Pollegri et al. (Oronzio de Nora Impianti Elettrochimici S.p.A., IT), US Patent No. 4,197,178(1980, 04.08) Bipolar Separator for Electrochemical Cells and Method of Preparation Thereof.
b) R. J. Lawrance et al. (General Electric Company, US), US Patent No. 4210512(1980. 07.01) Electrolysis Cell with Controlled Anolyte Flow Distribution.
- [5] a) N. E. Vanderborgh et al. (DOE, US), US Patent No. 4,973,530(1990.11.27), Fuel Cell Water Transport ; Single-track Serpentine.
b) D. S. Watkins, et al. (Her Majesty the Queen, Canada), US Patent No. 4,988,583(1991.01.29), Novel Fuel Cell Fluid Field Plate ; Single-track Serpentine.
c) D. S. Watkins et al. (Her Majesty the Queen in right of Canada), US Patent No. 5,108,849 (1992.04.28), Fuel Cell Flow Plate ; Multi-track Serpentine.
- [6] a) M. S. Wilson (Los Alamos NL, US), US No. 5,641,586(1997.06.24), Fuel Cell with Interdigitated Porous Flow-Field.
b) Jung S. Yi et al. (UTC Fuel Cell LLC), US Patent No. 6,780,533(2004.08.24) Fuel Cell Having Interdigitated Flow Channels and Water Transport Plates.
- [7] Y. Fujii et al. (Honda Motor Co Ltd, JP), US Patent No. 6,048,633(2000.04.11) Fuel Cell Stack. ; JP 4,205,774 (2008.10.24) 燃料電池.
- [8] a) H. H. Voss et al. (Ballard Power System Inc., Canada), US Patent No. 5,230,966(1993.07.27) Coolant Flow Field Plate for Electrochemical Fuel Cells.
- [9] a) J. C. Boff et al. (Margan Crucible Company, GB), WO02/065566 A1P(2002.08.22) Flow Field Plate Geometries.
b) J. C. Boff et al. (Margan Crucible Company, GB), WO03/081692 A2P(2003.10.02) Flow Field Plate.

- c) J. C. Boff et al. (Morgan Crucible Company, GB), US Patent No. 7,067,213(2006.06.27) Flow Field Plate Geometries.
- d) J. C. Boff et al. (Morgan Crucible Company, GB), WO04/001874 A2(2004.03.11) Flow Field plate geometries
- [10] X. Li, I. Sabir, "Review of Bipolar Plates in PEM Fuel Cells: Flow-field Designs", *Int. J. Hydrogen Energy*, 30(4), 359-371 (2005).
- [11] a) A. Hermann, T. Chaudhuri and P. Spagnol, "Bipolar Plates for PEM Fuel Cells-A Review". *Int. J. Hydrogen Energy*, 30(12), 1297-1302(2005).
- b) V. Mehta, J. S. Copper, "Review and Analysis of PEM Fuel Cell Design and Manufacturing", *J. Power Source*, 114(1), 32-53(2003).
- c) J. S. Cooper, "Design Analysis of PEMFC Bipolar Plates Considering Stack Manufacturing and Environment Impact", *J. Power Sources*, 129(2), 152-169(2004).
- d) DOE's Offices of Energy Efficiency and Renewable Energy(EERE), Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program : Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan (2005-2015), (October 2007 revision) ; Technical Target, Page 3.4-12.
- [12] E. J. Carlson, "Cost Analysis of Fuel Cell Stack/Systems" in *Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies*, FY 2003 Progress Report, (2003) pp. 1-4.
- [13] a) H. Tsuchiya, O. Kobayashi, "Mass Production Cost of PEM Fuel Cell by Learning Curve", *Int. J. Hydrogen Energy*, 29(10), 985-990(2004).
- b) D. Brett and N. Bradon, "Bipolar Plates: the Lungs of the PEM Fuel Cell", *Fuel Cell Review*, 2(1), 15-23(2005).
- [14] M. P. Brady, B. Yang, H. Wang, J. A. Turner, K. L. More, M. Wilson, and G. Garzon, "The Formation of Protective Nitride Surface for PEM Fuel Cell Metallic Bipolar Plates", *JOM*, 58(8), 50-57(2006).
- [15] a) D. P. Davies, P. L. Adcock, M. Turpin, and S. J. Rowen, "Bipolar Plate Materials for Solid Polymer Fuel Cells", *J. Appl. Electrochem.*, 30(1), 101-105(2000).
- b) D. P. Davies, P. L. Adcock, M. Turpin and S. J. Rowen, "Stainless Steel as a Bipolar Plate Material for Solid Polymer Fuel Cells", *J. Power Sources*, 86, 237-242(2000).
- [16] Y. Tarutani et al. (Sumitomo Metal Industries, Ltd. JP), US Patent No. 6,379,476(2002.04.30) Stainless Steel Product for Producing Polymer Electrode Fuel Cell.
- [17] M. P. Brady, K. Weisbrod, I. Paulauskas, R. A. Buchanan, K. L. More, H. Wang, M. Wilson, F. Garzon, L. R. Walker, "Preferential Thermal Nitridation to form Pin-hole Free Cr-nitrides to Protect Proton Exchange Membrane Fuel Cell Metallic Bipolar Plates", *Scripta Materialia*, 50(7), 1017-1022(2004).
- [18] a) N. de las Heras, E. P. L. Roberts, R. Langton, and D. R. Hodgson, "A Review of Metal Separator Plate Materials Suitable Automotive PEM Fuel Cells", *Energy Environ. Sci.*, 2, 206-214(2009).
- b) T. M. Besman, J. W. Klett and J. J. Henry, "Carbon Composite Bipolar Plate for PEM Fuel Cells", National Laboratory R&D Meeting on DOE Fuel Cells for Transportation Program, Pacific Northwest National Laboratory, June 7-8 (2000). ; (<http://www.pnl.gov/microcats/ottreview/ottmeeting/14-Besman.pdf>).
- [19] E. J. Carlson, P. Kopf, J. Sinha, S. Sriramulu, Y. Yang, J. Targoff, "PEM Fuel Cell Cost Status-2005", 2005 Fuel Cell Seminar, Palm Springs, CA, Nov. 14-18, 2005.
- [20] a) A. Muller, P. Kauraneun, A. von Ganski, B. Hell, "Injection Moulding of Graphite Composite Bipolar

- Plates”, J. Power Sources, 154, 467–471 (2006).
- b) V. Trapp, M. Leib, R. Hengl, T. Yamanoto (SGL Carbon AG, DE), US Patent No. 6,706,437 (2004. 03. 16) Bipolar Plates for Fuel Cell Stacks.
- [21] a) NACE Corrosion Engineer's Reference Book, R. S. Treseder (ed.), NACE, (1980) p.137.
b) http://en.wikipedia.org/wiki/Stainless_steel
- [22] a) H. Wang, M. A. Sweikart, J. A. Turner, “Stainless Steel as Bipolar Plate Material for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells”, J. Power Source, 115, 243–251 (2003).
b) H. Wang, G. Teeter, J. Turner, “Investigation of a Duplex Stainless Steel as Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Bipolar Plate Material”, J. Electrochem. Soc., 152(3), B99–B104 (2005).
- [23] a) D. P. Wilkinson et al. (Ballard Power Systems Inc., Canada), US Patent No. 5,521,018, (1996) Embossed Fluid Flow Field Plate for Electrochemical Fuel Cells.
b) D. P. Wilkinson et al. (Ballard Power Systems Inc., Canada), US Patent No. 5,527,363 (1996.06.18) Methode of Fabricating and Embossed Fluid Flow Plate.
c) P. R. Gibb (Ballard Power Systems Inc., Canada), WO00/041,260 A2P (2000. 07. 13) Fuel Cell Fluid Flow Filed Plated Methods of Making Fuel Cell Flow Filed Plates.
- [24] a) R. A. Meruri et al. UCAR Carbon Technology Corp.), US Patent 6,037,074 (2000. 03. 14) Flexible Graphite Composite for Use in the Form of a Fuel Cell Flow Field Plate.
b) J. H. Klug (GraffTech Inc. US), US Patent 6,604,457 (2003. 08. 12) Process and Apparatus for Embossing Graphite Articles.
- [25] S. J. Rowen et al. (Loughborough Univ. Innovations Limited), WO01/004,982 (2001. 01. 18) Flow Filed Plates.
- [26] a) Chapman Alan Robert, Mellor Ian Michael. Development of Biomimetic Flow Field Plates for PEM fuel cells. 8th Grove Fuel Cell Symposium, September 24–26 2003, London, UK.
b) J. C. Boff et al. (Morgan Crucible Company, UK), WO02/065,566 (2002. 08. 22) Flow Field Plate Geometries.
c) M. C. Turpin et al. (Morgan Crucible Company, UK), WO03/081,692 (2003. 10. 02) Flow Field Plate.
- [27] a) J. P. Allen (GenCell Corporation, US), US Patent No. 6,777,126 (2004. 08. 17) Fuel Cell Bipolar Separator Plate and Current Collector Assembly and Method of Manufacture.
b) J. P. Allen (GenCell Corporation, US), US Patent No. 7,279,016 (2007. 10. 09) Fuel Cell Bipolar Separator Plate and Current Collector Assembly and Method of Manufacture.
- [28] a) M. Koc and S. Mahabunphachai, “Feasibility Investigations on a Novel Micro-manufacturing Process for Fabrication of Fuel Cell Bipolar Plates : Internal Pressure-assisted Embossing of Micro-channels with In-die Mechanical Bonding”, J. Power Sources, 172(2), 725–733 (2007).
b) S. Mahabunphachai and M. Koc, “Fabrication of Micro-channel Arrays on Thin Metallic Sheet Using Internal Fluid Pressure : Investigations on Size Effects and Development of Design Guidelines”, J. Power Sources, 175(1), 363–371 (2008).
- [29] a) J. K. Neutzler (General Motor Corporation, US), US Patent No. 5,776,624 (1998. 07. 07) Brazed Bipolar Plates for Fuel Cells
b) H. Schlag (General Motor Corporation, US), US Patent 7,009,136 (2006. 03. 07) Method of Fabricating a Bipolar Plate Assembly.
c) K. E. Newman et al. (General Motor Corporation, US), US Patent 2005/02552892 A1 (2005. 11. 17)

- Laser Welding of Conductive Coated Metallic Bipolar Plates ; WO05/120764(2005. 12. 22) Laser Welding of Conductive Coated Metallic Bipolar Plates.
- d) P. E. Krajewski (General Motor Corporation, US), US Patent 2005/0164070 A1(2005. 07. 28) Extruded Bipolar Plates.
- [30] S.-J. Lee, Y.-P. Chen, C.-H. Huang, "Electroforming of Metallic Bipolar Plates with Micro-featured Flow Field", *J. Power Sources*, 145, 369-375(2005).
- [31] Brian C. H. Steele and A. Heinzl, "Materials for Fuel Cell Technologies", *Nature*, 414, 345-352(2001).
- [32] a) K. Hilpert et al, "Interconnects", in W. Vielstich et al (eds) *Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications*, Volume 4, Part 8, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester(2003) pp.1037-1054.
- b) Z. Yang et al., "Selection and Evaluation of Heat-Resistance Alloy for SOFC Interconnect Applications", *J. Electrochem. Soc.*, 150(9), A1188-A1201(2003).
- c) J. W. Fergus, "Metallic Interconnects for Solid Oxide Fuel Cells", *Materials Science and Engineering A*, 397, 271-283(2005).
- [33] J. Schoonman, J. P. Dekker, J. W. Broers, "Electrochemical Vapor Deposition of Stabilized Zirconia and Interconnection Materials for Solid Oxide Fuel Cells", *Solid State Ionics*, 46, 299-308(1991).
- [34] Brandon, N. P. 2004 *Fuel Cells: Materials in: Buschow K H J, Cahn R W, Flemings M C, Ilschner B, Kramer E J, Mahajan S(eds) Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Volume 1. Elsevier, Oxford, p. 1-5.
- [35] S. P. S. Badwal et al. Ceramic Fuel Cell Ltd, AU), US Patent 5,942,349(1999. 08. 24) Fuel Cell Interconnect Device.
- [36] X. Chen et al, "Protective Coating on Stainless Steel Interconnector for SOFCs : Oxidation Kinetic and Electrical Properties", Lawrence Berkeley National Lab, Paper LBNL 55541(2004).
- [37] Hilpert, D. Das, M. Miller, D.H. Peck, R. Weiss, "Chromium Vapour Species over SOFC Interconnect Materials and Their Potential for Degradation Processes", *J. Electrochem. Soc.*, 143, 3642-3647(1996).
- [38] M. Stanislawski et al., "Reduction of Chromium Vaporization from SOFC Interconnectors by Highly Effective Coatings", *J. Power Sources*, 164, 578-589(2007).
- [39] G. Schiller et al., "Vacuum Plasma Sprayed Protective Layers for Solid Oxide Fuel Cell Application", *J. Adv. Mater.*, 32, 3-8(2000).
- [40] L. R. Pederson et al., "Application of Vacuum Deposition Method to Solid Oxide Fuel Cells", *Vacuum*, 80(10), 1066-1083(2006).
- [41] C. J. Fu et al, "Evaluation of lanthanum Ferrite Coated Interconnect for Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cells", *Thin Solid Films*, 516, 1857-1863(2008).
- [42] P. Gannon et al., "Advanced PVD Protective Coating for SOFC Interconnects", *Int. J. Hydrogen Energy*, 33, 3991-4000(2008).
- [43] a) K. Hassmann, "SOFC Power Plats, the Siemens-Westinghouse Approach" *Fuel Cells*, 1(1), 78-84(2001).
- b) K. Huang, "Development of Delta_Type SOFC at Siemens Stationary Fuel Cells", 2007 Fuel Cell Seminar, San Antonio, Texas, October 15-19.
- c) <http://www.aki.che.tohoku.ac.jp/~koyama/html/research/SOFC.html>



이 창 래

- 재료연구소 전기화학연구그룹 선임연구원
- 관심분야 : 전지 및 연료전지 부품소재 기술,
에어로젤 다공성재료, 에너지변환용
전도성 고분자 및 탄소재료
- E-mail : changlee@kims.re.kr



양 철 남

- 재료연구소 전기화학연구그룹 선임연구원
- 관심분야 : 연료전지 스택 및 제조공정, 연료전지
시스템, 전기자동차용 배터리
- E-mail : ycnam19@kims.re.kr