

고분자연료전지 상용화를 위한 양산형 복합체 분리판

고분자전해질 연료전지의 주요부품 중 하나인 분리판의 대량생산과 가격저감을 실현시킬 수 있는 탄소복합소재 및 몰딩기술 현황에 대해 논의하고자 한다.

분리판의 기능 및 요구특성

고분자전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)의 주요부품 중 하나인 분리판(bipolar plate)은 셀스택(cell stack)에 연료가스와 공기를 공급하고, 생성되는 물을 배출시키며, 얻어지는 전기를 전달하는 등의 주요 역할 뿐 아니라 스택을 기계적으로 지지하고 반응열을 배출하는 등의 부가적인 기능들도 동시에 수행해야 한다. 이와 같이 분리판 제작을 위해서는 동시에 수행해야 할 여러 기능들로 인해 그림 1에 나타낸 바와 같은 전기화학적, 기계 및 물리적 특성들이 다양하게 고려되어야 한다.



[그림 1] 고분자연료전지 분리판 설계인자

김정현

한국타이어(주) Fuel Cell 개발팀

kimjh@hankooktire.com

즉, 분리판은 높은 전기전도성 및 열전도도와 함께 내부식성 등의 높은 화학적 안정성도 갖추어야 한다. 더불어 기체나 냉매에 대한 밀폐성이 우수해야 하며 스택을 지지하는 역할을 위해 기계적 강도 또한 높아야 한다.

이러한 다양한 요구 특성들을 만족시킴과 동시에 양산성이 높아야 하며, 제조비용은 낮아야 한다. 현재 정부 주도의 시범보급 사업이 진행되고 있는 가정용 1 kW급 연료전지 시스템 1대 제작을 위해서는 50~80장 정도의 많은 분리판이 소요되므로 고 양산성과 저 제조비용은 고분자연료전지 상용화를 위해 필수적인 요소라 할 수 있다.

미국 에너지성(DOE)에서는 표 1에 나타낸 바와 같이 연료전지 자동차의 상용화를 실현시키기 위해 분리판이 갖추어야 할 특성 및 제조비용 목표를 연도별로 설정하여 제시하고 있다.¹⁾ 기체 투과도, 내부식성, 전기전도도, 굴곡강도 등의 물

성 목표 등과 함께 제시되고 있는 2015년도 kW 당 3달러의 가격 목표는 비록 연료전지 자동차 50만대 생산 기준으로 설정된 값이기는 하나 달성성이 쉽지 않아 보인다. 미 에너지성에서는 이 가격 목표가 현재의 경유 자동차 대비 연료전지 자동차가 가격경쟁력을 갖추기 위한 최소한의 목표라고 보고하였다.

양산을 위한 몰딩 분리판

과거 고분자전해질 연료전지의 연구개발 단계에서는 분리판의 요구물성을 손쉽게 만족시키기 위해 흑연판(graphite plate)을 주로 사용하였다. 흑연판은 화학적 안정성이 우수하고 전기전도성과 강도가 높아 연료전지용 분리판으로서 매우 적합한 소재이다. 하지만 분리판에는 그림 2에 나타낸 바와 같은 각종 매니폴드와 가스켓 홈



[그림 2] 연료전지 분리판 구조

[표 1] 연료전지 자동차용 분리판 특성 및 비용 DOE 목표

| Characteristics | Units | 2005 Status | 2010 Target | 2015 Target |
|--|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Cost | \$/kW | 10 | 5 | 3 |
| H ₂ Permeation Flux at 80°C & 3 atm | cm ³ /cm ² ·sec | < 2×10 ⁻⁶ | < 2×10 ⁻⁶ | < 2×10 ⁻⁶ |
| Corrosion | μA/cm ² | < 1 | < 1 | < 1 |
| Electrical Conductivity | S/cm | > 600 | > 100 | > 100 |
| Resistivity | Ω/cm ² | < 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| Flexural Strength | MPa | > 34 | > 25 | > 25 |

〈표 2〉 탄소복합체 및 금속재 분리판의 장단점 비교

| | 탄소복합체 분리판 | 금속재 분리판 |
|-------|----------------------------------|---|
| 장점 | · 우수한 내부식성 · 형상 변형이 적음 | · 높은 기계적 강도 · 컴팩트하게 제작가능 |
| 단점 | · 깨지기 쉬움 | · 금속이온 용출위험 있음 |
| 제조 방식 | · 열경화성 소재 압축성형 · 열가소성 소재 사출성형 | · STS판 스탬핑 · STS판 표면에 금도금 · 티타늄판 표면에 크롬도금 |

등이 형성돼 있어야 한다. 특히 가늘고 긴 홈들로 이루어지는 가스 및 냉매체 공급용 유동장(flow field)은 복잡한 형상을 하고 있어, 흑연판을 분리판으로 사용하기 위해 오랜 시간의 기계가공 공정을 거쳐야 한다.

이처럼 흑연판 기계가공 분리판은 가공비가 과다하고 제조시간이 길어 연료전지의 상용화 단계에서는 적용이 곤란하다. 연료전지의 상용화를 위해서는 제조비가 저렴하고 양산성이 높은 방식인 몰딩 방식으로 분리판을 대량 생산할 수 있어야 한다. 몰딩 방식으로 개발되어 온 분리판으로는 탄소복합체 성형판과 금속재 스탬핑(stamping)판이 있다. 표 2에 이 두 가지 방식의 분리판 장단점을 비교하여 나타내었다.²⁾

표 2에서 알 수 있듯이 금속재 분리판은 금속이온 용출에 의한 촉매오염 위험성이나 부식반응으로 인해 계면 전기저항이 증가할 수 있는 단점이 있음에도, 경박단소와 양산성에서의 장점이 크므로 주로 연료전지 자동차용으로 적용되고 있다. 반면 탄소복합체 분리판은 높은 화학적 안정성으로 인해 수명이 길고 연료전지 작동 환경에서의 내구성이 우수하므로 건물용 등 주로 정지형(stationary) 연료전지에 적용되고 있다.

복합체 분리판 소재 및 성형공정

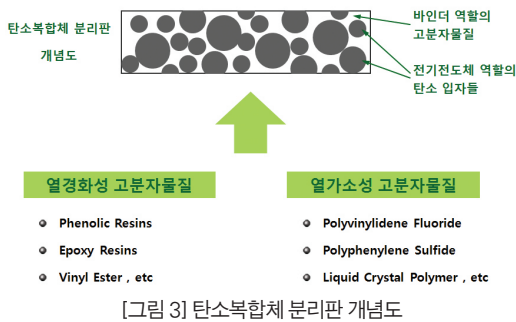
세계적으로 가장 활발히 산업화가 진행되고 있는 연료전지 분야 중의 하나가 건물용 고분자

전해질 연료전지이다. 건물용 고분자연료전지의 보급이 가장 활발히 이루어지고 있는 곳은 일본이다. 일본 정부는 가정용 연료전지인 에너팜(ENE FARM)의 보급 확대를 통해 건물용 연료전지 산업화를 주도하기 위해 노력하고 있다. 일본 내 여러 시스템 제작사들에서 생산된 가정용 연료전지에 에너팜이라는 단일 명칭을 부여하여 잠재 수요자들의 친밀도를 높이고자 하는 마케팅이 일본 정부 주도로 이루어지고 있다. 일본 내 가정용 연료전지 보급실적은 2011년도에만 약 10,000대가 달성되었고 2012년도에는 15,000여대가 계획돼 있다.

이러한 일본의 가정용 연료전지 에너팜 대부분은 몰딩공정으로 제조한 탄소복합체 분리판이 장착돼 있다. 일본 정부는 현재 300만 엔 정도인 에너팜 가격을 2020년도에 50만 엔으로 낮추기 위해, 60만대 대량보급계획 수립과 함께 분리판 등 주요 부품별로 상용화 실현을 위한 양산기술 개발 사업을 추진해왔다. 분리판은 상용화에 가장 적합한 형태로 탄소복합체 몰딩 분리판 제조기술이 개발되었고, 그 기술개발의 결실로 현재의 에너팜에 양산형 복합체 분리판이 장착될 수 있게 되었다.³⁾

따라서 본서에서는 현재의 국내 연료전지 산업화 촉진을 위해 보다 중요한 분야인 탄소복합체 분리판에 대해서 주로 논의하고자 한다.

탄소복합체 분리판 소재는 기본적으로, 결합재 역할을 하는 고분자(polymer) 물질과 전기 이동의 통로 역할을 하는 탄소입자들을 균질하게 혼합하여 원하는 디자인의 분리판 형상으로 몰딩이 가능하게끔 제조되어야 한다. 이렇게 제조된 소재로 성형공정을 거쳐 그림 3의 개념도에 나타낸 바와 같이 전기전도성 탄소입자들을 고분자 물질이 고정하고(binding) 있는 형태의 분리판이 완성된다.



이때 바인더(binder)로 적용되는 고분자 물질로 열경화성(thermosetting)을 사용할 경우에는 주로 압축성형(compression molding), 열가소성(thermoplastic)을 사용할 경우에는 사출성형(injection molding) 방식이 주로 활용된다. 열경화성 소재의 경우, 열가소성 소재에 비해 보다 높은 열 및 화학적 안정성으로 인해 분리판에 우수한 물성과 넓은 적용범위를 제공하나, 열경화성 소재의 특성상 경화(curing)에 필요한 시간이 추가로 소요되고 소재의 재활용(recycle)이 어렵다는 단점이 있다.

바인더로 열가소성 물질을 적용할 경우에는 주로 사출성형 방식을 사용하여 경화공정 없이 짧은 제조시간(process cycle time)으로 생산성을 극대화시킬 수 있는 장점이 있다. 더불어 소재의 재활용이 용이하여 보다 친환경적인(environment-friendly) 분리판 제조방식이라고 할 수 있다.

하지만 분리판의 요구 전기전도도를 만족시키기 위해서는 다량의 전도성 충전재를 첨가해야 하는데, 이 경우 사출성형을 성공하기 위한 소재의 유동성 확보가 매우 어려운 과제로 대두된다.

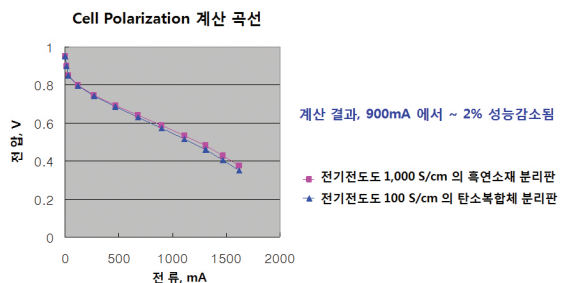
한편 이러한 탄소복합체로 기존의 흑연판 소재의 분리판을 대체할 경우 필연적으로 전기전도도 감소를 피할 수 없다. 흑연판의 경우 500~1,000 S/cm 범위의 전기전도도를 갖는데, 탄소

복합체의 경우 100 S/cm 정도이므로 1/5~1/10 수준으로 전기전도도가 하락하게 되어 연료전지 성능 감소가 우려된다. **그림 4**는 전기전도도 1,000 S/cm의 흑연소재 분리판을 1/10 수준인 100 S/cm의 탄소복합체 분리판으로 대체할 경우의 연료전지 성능감소를 이론적으로 계산해 본 결과를 나타낸 것이다.

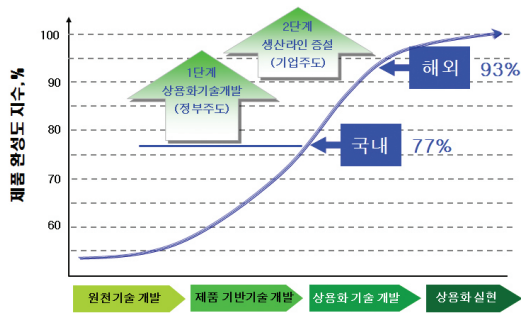
이론적 계산 결과, 저 전류밀도 구간에서는 성능감소가 매우 작게 예상되어졌고, 고 전류밀도 구간에서도 성능감소가 그다지 크지 않아 900 mA에서 약 2% 정도의 성능감소가 계산되어졌다. 따라서, 100 S/cm 정도의 전기전도도를 갖는 탄소복합체는 분리판 소재로 충분히 적용 가능하다고 판단된다.

분리판 상용화 추진전략

국내에서는 2004년도부터 본격적으로 정부 주도의 탄소복합체 분리판 기술개발 사업이 진행되기 시작하였다. 한국타이어가 주관하고 한국에너지기술연구원, 자동차부품연구원, KAIST, 경희대 등 7개 학연산 기관이 참여한 산업자원부의 “고분자연료전지용 분리판 국산화 기술개발” 사업을 통해 분리판 관련 기반기술 개발이 체계적으로 이루어진 바 있다.⁴⁾



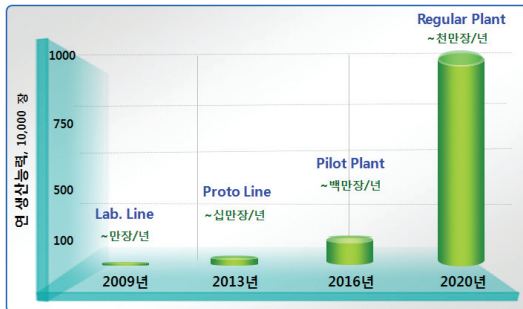
[그림 4] 분리판 전기전도도 감소에 따른 연료전지 성능감소 계산 결과



[그림 5] 탄소복합체 분리판 기술 국내의 수준 비교



[그림 6] 3~10kW급 고분자연료전지용 양산형 탄소복합체 분리판



[그림 7] 연료전지 분리판 생산능력 확장계획

상기 기술개발사업에서는 압축분리판과 사출 분리판에 대한 개발이 동시에 이루어져 소재 및 공정에 관한 원천기술 확보와 동시에 기반기술 관련된 국내외 특허들의 등록이 이루어졌었다.

현재 국내의 탄소복합체 분리판 기술 수준은 양산기술과 생산능력까지 고려할 때, 선진 최고 기술 대비 약 80% 수준으로 추정된다. 그림 5에 해외 선진기술에 대비한 국내 기술 수준을 추정하여 나타내 보았다.

국내의 탄소복합체 분리판 관련하여 원천기

술과 제품 기반기술은 선진업체 대비하여 상당 수준으로 확보되어져 있는 것으로 판단된다. 하지만 양산기술, 생산경험 및 생산설비의 확보가 매우 취약하여 국가적으로 상용화 기술개발 필요성이 강하게 대두되었다.

이에 따라 분리판 양산기술과 설비를 개발하여 고성능이면서도 가격이 저감된 탄소복합체 분리판 공급체계를 구축하기 위한 지식경제부 “연료전지 분리판 상용화 기술개발 과제”가 한국타이어 주관으로 9개 학연산 기관이 협력하여 현재 수행 중에 있다. 이는 한국에너지기술평가원이 전담하는 신재생에너지 전략기술개발사업의 일환으로 추진되고 있으며 2012년도 말에 완료될 예정이다.

상기 상용화 기술개발 과제는 기 개발된 제품 원천기술을 기반으로 하여 성능은 높이면서도 가격은 저감시킬 수 있는 양산 관련 요소기술들을 개발하는 것이 목표이다. 1차년도인 2010년에는 1~3 kW급 고분자연료전지에 적용이 가능한 양산형 탄소복합체 분리판 개발이 이루어졌고, 2차년도인 2011년에는 그림 6에 나타난 바와 같이 3~10 kW급에 적용이 가능한 양산형 복합체 분리판 개발이 진행되었다.

양산형 복합체 분리판의 성능 및 가격 측면에서의 경쟁력 향상을 위해서는 상용화 기술개발과 함께 제품 생산능력(production capacity) 확대도 동시에 이루어져야 할 것으로 판단된다. 단 지속적인 생산능력 확대를 통해 품질과 가격 경쟁력을 동시에 확보할 수 있어야만 진정한 양산형 분리판 공급체계(supply chain)가 이루어졌다고 할 수 있을 것이다.

한국타이어는 현재 수행 중에 있는 고분자연료전지 분리판 상용화 기술개발 과제를 성공적으로 종료시킴과 동시에, 그림 7에 나타난 바와 같이 시장 환경변화에 대응하여 순차적으로 생산능

력을 확보할 수 있도록 착실한 준비와 최선의 노력을 다하고 있다.

후기

본 연구의 일부는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다. (No. 2009T100200844)

참고문헌

1. Adrianowycz, Orest., "Next Generation

Bipolar Plates for Automotive PEM Fuel Cells", DOE Hydrogen Program Review, 2008, Project ID FC28.

2. Mitsuda, K., Maeda, H., Matsumura, M., and Urushibata, H., "Technical Issues on Polymer Electrolyte Fuel Cells", 15th World Hydrogen Energy Conference, 2004, 01PL-02.

3. "그린홈 보급 촉진을 위한 건물용 연료전지 분리판 상용화기술개발" 지식경제부 연구기획 최종보고서, 2009.

4. "고분자연료전지용 분리판 국산화 기술개발", 산업자원부 기술개발 최종보고서, 2004-N-FC12-P-05, 2007. 