

직접 메탄올 고분자 연료전지의 개발동향 및 전망

김동욱, 강영구 · 한국화학연구원

1. 서론

현재 전 세계적으로 에너지 소모량이 급증하고 주된 에너지원인 석유는 매장량이 한정되어 수십 년 내에 고갈될 것으로 예상됨에 따라 석유가격이 배럴당 100달러가 넘어서는 고유가 위기시대를 맞이하고 있다. 이러한 화석연료 사용의 급증은 경제적 위기를 초래할 뿐 아니라 환경문제도 유발한다. 즉, 발전소, 공장, 자동차 등에서 석유를 소비하는 과정에서 황산화물이나 질소산화물 등의 대기 오염물질이 발생하여 환경오염을 야기하거나 이산화탄소를 발생시켜 지구 온난화 문제를 일으킨다. 석유 자원의 고갈과 지구 환경 문제를 해결하기 위하여 미국의 유력 대통령 후보는 석유 의존도를 대폭 낮추고 신재생에너지 개발에 국가 차원의 노력을 기울이겠다는 공약을 발표하였고 다른 선진각국들도 석유를 대체하는 차세대 에너지 개발에 엄청난 연구개발비를 투입하고 있다. 우리나라에서도 2008년 8월에 대통령이 위원장인 국가에너지위원회에서 2008-2030년까지의 장기 에너지 전략인 국가에너지기본계획을 심의 확정하였다. 이 계획에 따르면 신재생에너지의 비중을 현재의 2.4%에서 2030년 11% 수준까지 끌어올리기 위하여 정부 연구개발 예산을 집중 투입할 것이라고 한다. 석유 한 방울 나지 않고 기타 부존자원이 매우 부족하여 재생 가능하며 친환경적인 대체에너지의 개발이 매우 시급한 우리나라의 현실에 비추어 장기적인 신재생에너지 개발 계획을 수립하여 범정부 차원에서 지원하는 것은 매우 시의적절하다고 하겠다.

연료전지는 수소나 메탄올 등을 연료물질로 사용하여 화학적 변환방식으로 전기에너지를 얻는 에너지 전환기이다. 연료전지는 기존의 열기관에 비하여 3-4배 높은 에너지 변환효율을 지니고 있고 전기를 얻는 과정에서 오염물질을 배출하지 않고 소음 등이 매우 낮아 환경 친화적인 청정에너지 기술이다. 연료전지는 1839년에 처음으로 제안된 이래 100여 년 이상 주목을 받지 못하다가 1960년대에 이르러 제미니 및 아폴로 등의 미국 우주선에 탑재되어 사용되었다. 그러나 그

당시의 연료전지는 매우 가격이 비싸고 제조 공정이 까다로운 관계로 산업적 응용가능성이 낮았다. 1980년대와 1990년대에 들어서 듀폰사의 나피온 등과 같이 수소이온전도성 및 화학안정성이 우수한 고분자 소재가 고체 전해질 막으로 적용되어 비용절감 및 성능향상이 이루어진 고분자 연료전지가 개발됨에 따라 산업적으로 크게 주목을 받기 시작하였다. 이에 미국, 일본을 비롯한 선진 각국들은 고성능의 고분자 연료전지를 개발하기 위하여 막대한 정부 예산을 투입하여 지원하고 있다[1,2].

특히, 메탄올을 연료로 사용하는 직접 메탄올 연료전지(direct methanol fuel cells)는 메탄올에서 수소를 분리하여 공기 중의 산소와 결합시켜 물을 생성시키는데 이 과정에서 생성된 전자를 전기에너지로 이용하는 차세대 에너지 기술이다. Figure 1에 메탄올 연료전지의 구조와 작동원리를 개략적으로 나타내었다. 연료극(산화극)에 공급된 메탄올이 산화하여 생성된 수소이온과 전자가 각각 전해질 막과 외부회로를 통하여 공기극(환원극)에 이송된 후 산소와의 반응에 의하여 물이 생성되는 화학반응을 통하여 전기에너지를 생성한다. 메탄올 연

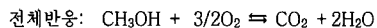
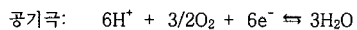
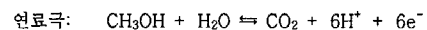
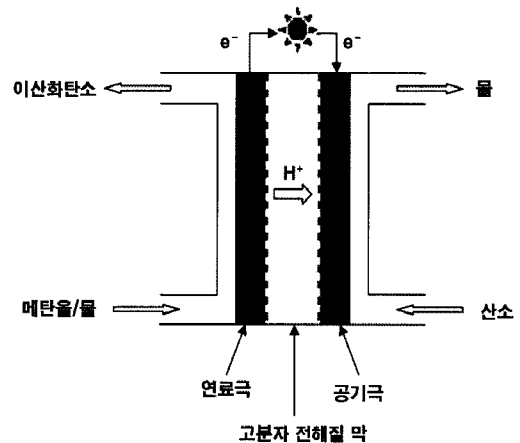


Figure 1. 직접 메탄올 연료전지의 구조 및 작동원리.



료전지는 수소연료와 비교하여 연료인 메탄올의 저장과 운반이 용이하며 부피당 에너지밀도가 높고, 리튬이온전지와 비교하여 정기적으로 충전할 필요없이 연료카트리지를 교체하는 것만으로 에너지를 얻을 수 있으며, 동일한 배터리 단위 면적당 리튬이온전지보다 큰 에너지 획득이 가능할 뿐 아니라 친환경적이라는 장점을 갖고 있어 휴대폰, 노트북, PDA, 캠코더 등의 휴대기기의 차세대 전원으로 산업계의 주목을 받고 있다.

이론적인 계산에 따르면 메탄올 1몰(약 32 g)로부터 얻어지는 전기에너지는 195 Wh에 해당하며 이는 1 W 출력의 휴대폰에 적용 시 약 200시간의 연속통화가 가능한 에너지이다. 그러나 메탄올 연료전지는 메탄올의 느린 산화반응(메탄올이 수소이온으로 변환하는 반응)으로 인하여 출력밀도가 작고 연료이용효율이 낮으며 메탄올 산화과정에서 발생하는 일산화탄소 발생으로 인하여 촉매피독현상이 일어나 성능저하가 일어나는 단점을 지니고 있어 실용적 이용을 위해서는 성능 개선을 위한 노력이 절실하다. 고분자 전해질 막은 연료극과 공기극 사이에 놓여져 연료극에서 생성된 수소이온을 공기극으로 수송하고 전자 및 메탄올, 물 등의 이동을 차단하는 기능을 담당하는 핵심 요소로서 메탄올 연료전지의 성능을 직접적으로 좌우한다. 이에 전 세계 연구그룹에서는 메탄올 연료전지의 성능을 극대화하기 위하여 제조공정이 간단하고 단가가 낮으며 수소이온전도성이 우수하고 메탄올 투과도가 낮으며 고온안정성 및 기계적강도가 우수한 고분자 전해질 막을 개발하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 본고에서는 휴대 정보기기용 차세대 전원으로 크게 주목을 받고 있는 직접 메탄올 고분자 연료전지의 산업동향 및 시장 전망, 그리고 핵심 부품인 고분자 전해질 막의 연구개발 현황에 대하여 논의하고자 한다.

2. 직접 메탄올 연료전지의 산업동향 및 시장전망

메탄올 연료전지는 듀폰사에서 개발한 나피온, 아사히글라스사의 플레미온과 같이 수소이온전도도가 높고 내구성이 우수한 불소화 고분자가 전해질 막으로 채용됨에 따라 큰 기술의 진보를 이루게 되었다. 즉, 고체 전해질 막을 사용하면 액체 전해질 시스템에 비하여 구동온도를 높일 수 있어 백금촉매의 활성을 높여 느린 메탄올의 산화반응을 촉진하게 됨에 따라 출력밀도 및 연료이용효율을 높일 수 있다. 또한, 고분자 전해질 막을 사용하면 전체 구동시스템의 간소화 및 경량화가 가능해진다. 최근 들어, 휴대폰, 노트북 PC, 디지털카메

라, PDA 등과 같이 전자기기들의 가정 및 사무실내 설치용에서 벗어나 휴대용으로 점차적으로 수요가 증가하고 있다. 이러한 이동용 기기의 효과적인 사용을 위해서는 장시간의 가동이 무엇보다도 요구되고 있어 현재 주로 사용되는 리튬이온전지보다 더 큰 에너지밀도를 지니는 차세대 휴대용 전원의 개발이 시급한 선결과제로 떠오르고 있다.

이러한 산업적 수요에 힘입어 휴대용 전자기기에 사용할 수 있도록 시스템의 소형 경량화가 이루어지고 진동과 충격에 강한 직접 메탄올 고분자 연료전지의 개발 및 시제품의 발표가 2000년대에 들어서면서 지속적으로 이루어지고 있다. 2004년 초 독일의 Small Fuel Cell AG 사가 산업기기 메이커 등 특정 고객을 대상으로 수백 개의 휴대기기용 연료전지를 출시한 것이 최초의 상업적 생산으로 기록되고 있다. 이어 노키아사는 2004년 7월 블루투스 헤드셋 테스트 모델에 연료전지를 사용하였는데, 이 제품은 2 ml의 메탄올로 연속통화 10시간 이상 연속대기 84시간 이용이 가능하여 리튬이온전지보다 2배의 긴 구동시간을 나타내었다.

미국에서는 모토로라사, MTI Micro Fuel Cells 사, Polyfuel 사, Ball Aerospace 사 등에서 연료전지의 핵심 소재와 시스템 개발, 그리고 상업화를 주도하고 있다. MTI Micro Fuel Cells 사는 휴대 전자기기용 메탄올 연료전지를 개발하는 MTI 사의 자회사로서 미국 Intermec 사의 RF-ID 태그 리더용으로 연료전지 시스템을 공급하고 있다. 이 회사는 2004년도에 모비온이라는 모델명의 직접 메탄올 연료전지 시스템을 장착한 휴대폰 시제품을 발표하였다. 이 제품은 100% 메탄올을 연료로 사용하므로 물을 공급하는 워터펌프 장치가 필요없어 시스템의 소형화가 가능하며 또한, 에너지 밀도를 극대화할

수 있는 장점을 지니고 있다(Figure 2). 또한, 이 회사는 군사용 연료전지를 개발하여 미군의 작전지역의 환경정보를 하루에 수 회 무선 전송하는 센서, 네트워크 기기의 전원으로 제공하고 있다. 예를 들면, 미군은 이라크 지역에서 작전지역 안의 건물에 출입하는 사람의 수나 폭격 후 화학공장 근처 오염도를 측정하는 센서 등 많은 센서를 작전지역내에 설치하고 있다. 이 개발품의 평균출력은 105 mW로서 1일 수 회 무선 송신하는 센서 기기에 사용하면 약 6개월 동안 연

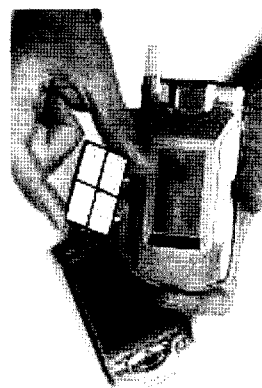


Figure 2. 미국 MTI Micro Fuel Cells 사에서 개발한 소형 메탄올 연료전지가 장착된 휴대폰 시제품.

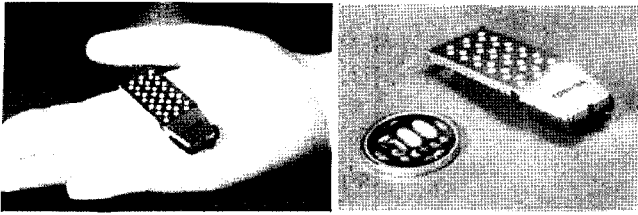


Figure 3. 일본 도시바사에서 개발한 소형 전자기기용 직접 메탄을 연료전지 시제품.

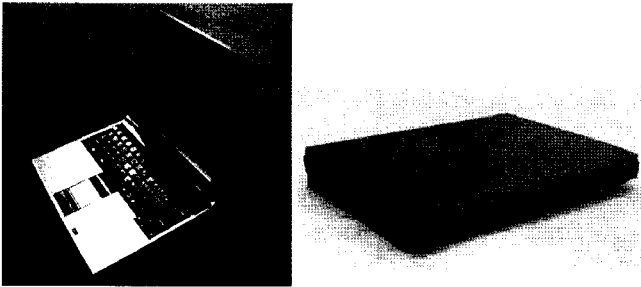


Figure 4. 일본 도시바사에서 개발한 메탄을 연료전지가 탑재된 노트북 시제품.

속 사용이 가능하다.

미국의 모토로라사는 메탄을 연료로 사용하는 1W급 소형 연료전지 시스템을 사용하는 이차전지 충전기 시제품의 개발을 발표하였다. 나피온 막의 메탄을 투과를 억제하기 위하여 시스템 내에서 메탄을 농도를 4%로 희석하여 사용하였으며 연료극에서의 배출액과 공기극에서 생성되는 물은 회수하여 재사용하는 시스템을 갖추었다. 또한, 이 회사는 마이크로개질기를 사용한 개질형 고체고분자 연료전지도 개발하고 있다.

일본에서는 도시바, NEC, 히타치, 샤프 등의 업체에서 소형 전자기기용 연료전지 개발을 주도하고 있다. 도시바는 휴대전화, 노트북, 휴대 게임기용 연료전지 개발에 주력하고 있으며, 휴대전화용의 경우 충전기 타입과 기기내장 타입의 두 종류를 개발하고 있다. Figure 3은 도시바사가 2004년에 개발한 소형 오디오 플레이어나 무선 헤드 세트 등의 소형 전자기기용에 사용할 수 있는 메탄을 연료전지 시스템을 나타내고 있다. 이 연료전지 시스템은 엄지 손가락만한 크기이고 전체 중량이 9 g 미만의 초소형 시스템으로서 0.1 W 출력을 나타내 종래 기술에 비하여 5배 정도의 고출력을 실현하고 있다. 내장 연료탱크에는 2 ml까지 연료가 들어가 소형 오디오 플레이어의 경우 최대 20시간의 구동이 가능하다. 또한, 도시바사는 2005년 9월에 MP3 플레이어를 최대 60시간까지 구동할 수 있는 메탄을 연료전지 시제품을 공개하였으며 2006년 CEATEC JAPAN 2006과 WPC TOKYO 2006에서 연료

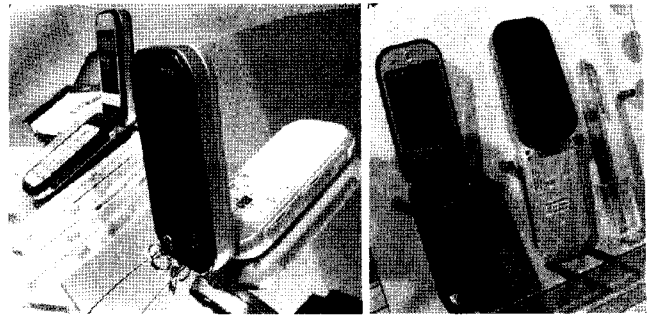


Figure 5. 일본 히타치사에서 발표한 연료전지가 내장된 휴대폰 시제품.

전지가 내장된 노트북 컴퓨터 시제품을 발표하였다. 본 제품은 나노구조제어에 의하여 막전극집합체의 성능을 향상시키는 기술을 적용하였으며 연료 및 물의 구동 시스템을 소형화 하였다(Figure 4).

일본 NEC 사는 노트북용 연료전지 개발에 주력하고 있으며 독자 개발방식으로 카본나노튜브를 이용해서 높은 발전 효율을 얻는 방향으로 연구 개발하고 있다. 이를 기반으로 농도 10% 메탄을 300 ml를 사용하여 최대 24 W 출력으로 약 5시간정도 노트북을 구동할 수 있는 연료전지 시제품을 제조하였다. 히타치사는 휴대폰용 연료전지 분야에 연구를 집중하고 있으며 충전기 타입과 내장형 타입 모두를 개발하고 있다. Figure 5에 히타치에서 개발한 연료전지가 내장된 휴대폰 시제품을 나타내었다. 이 제품은 크기 98 mm×50 mm×25 mm, 무게 150 g이며 내부에 연료를 3 ml까지 담을 수 있다.

국내에서는 삼성종합기술원, 삼성전자, 삼성 SDI, LG화학 등의 대기업과 한국에너지기술연구원, 한국화학연구원, 한국과학기술원 등의 정부출연연구기관 및 대학 등에서 활발한 연구개발 및 시제품 개발을 시도하고 있다. 삼성전자는 2006년 말 삼성종합기술원과 함께 세계 최초로 노트북용 1200 Wh급 대용량 연료전지를 개발하고 노트북 센스에 장착했다고 발표하였다. 이 연료전지의 용량은 1 L 급 대형 연료카트리지를 사용하여 노트북을 약 한 달간(주 5회, 하루 8시간 사용 기준) 사용할 수 있는 수준으로 세계 최고의 경쟁력을 갖췄다(Figure 6). 이번에 개발된 메탄을 연료전지는 노트북에 직접 장착하는 일체형으로서 최대 출력 20 W가 가능하며 소음도 획기적으로 줄여 일반 노트북 PC와 비슷한 수준까지 낮췄다. 아울러 삼성전자, 삼성 SDI, 삼성종합기술원은 공동연구를 통하여 약 100 ml(종이컵 1잔 용량)의 연료카트리지가 장착된 소형 연료전지 시스템도 함께 개발하여 노트북 PC를 약 15시간 연속 구동할 수 있는 시제품도 개발하였다.

삼성 SDI는 2006년 초에 삼성종합기술원과의 공동연구를

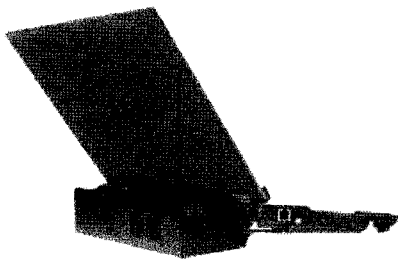


Figure 6. 삼성전사에서 개발한 대용량 연료 전지를 장착한 노트북 PC의 시제품.

통하여 메탄을 20 ml를 사용하는 소형 연료전지를 개발하여 출력 5 W 급 PMP를 최대 4시간 연속 구동하는데 성공하여 기존 리튬이온전지보다 4배 이상 늘어난 구동

시간을 확보하였다(Figure 7). 또한, 9 ml 급 연료 용량을 사용하여 출력 1.3 W 급 PDA를 8시간 동안 사용할 수 있는 시스템과 휴대폰 충전용 외장형 연료전지의 개발도 함께 발표하였다. 본 연료전지 시스템은 메탄올의 투과도를 최소화하기 위하여 부분 불소화 막에 프로톤 전도성 무기 층을 복합화시킨 하이브리드 막으로 메탄올 투과도를 나피온 대비 30% 억제시킨 신규의 고분자 전해질 막을 사용하여 단위 셀당 출력을 최대 60 mW/cm²까지 높였다. 또한, 막전극집합체간의 연결에 수평 구조 방식을 사용함으로써 전체 연료전지 시스템을 소형화하였고 그 동안 소음의 원인이었던 연료공급 펌프 장비를 없애고 무펌프 방식의 연료공급시스템을 채용하여 소음을 최소화하였다. 또한, 휴대폰 충전용 연료전지 개발에도 많은 노력을 기울여 제품의 신뢰성과 공정기술을 확보하여 조만간 상용화 할 계획이다.

LG 화학은 최근 3년 동안 국책과제인 휴대형 연료전지 개발 프로젝트를 수행하고 있으며 특히, 연료전지의 핵심부분은 막전극집합체의 성능 향상 및 가격절감을 위한 연구개발에 중점을 두고 있어 연료전지의 조기 상용화를 서두르고 있다.

휴대 정보기기용 차세대 연료전지 시장은 휴대폰, 노트북 등의 제품발전 양상, 경쟁관계에 있는 리튬이온전지의 기술 발전 수준 등 다양한 요인에 의하여 조기 상업화 및 시장확대 여부가 결정될 것이다. 하지만 자동차 등의 수송용이나 주

택 및 산업의 발전용 연료전지에 비하여 휴대기기용 메탄올 연료전지의 시장전망은 매우 밝다고 할 수 있다. 왜냐하면, 휴대용 연료전지의 경우 연료공급을 위한 인프라 구축이 거의 필요없고 휴대용 전자기기의 고성능화

에 따라 전력소모가 급증하여 기존의 리튬이온전지로는 해결할 수 없는 상황까지 진행되고 있어 신뢰도, 소형화 및 가격 등의 선결과제만 해결된다면 휴대기기용 메탄올 연료전지 시장은 급속히 확대될 것으로 전망된다.

휴대용 연료전지의 세계 생산량은 2004년에 5,000대 정도의 이동용 비상 충전기로 시작하여 2013년에 10억 대 이상으로 급증할 것으로 전망되고 있다(미국 Allied Business Intelligence, 2004). 또한, 2005년도 NanoMarkets LLC Report(Micro Power Source: Opportunities from Fuel Cells and Batteries for Mobile Applications, 2005)에 따르면 휴대용 메탄올 연료전지의 세계 시장 규모는 2012년에 26억 달러에 달할 정도로 크게 확대될 것으로 예측되고 있다. 그리고 The Estimation of Merrill Lynch Report에 따르면 휴대용 연료전지의 국내 시장규모는 2010년에 최대 1조원 정도에 이를 것으로 전망하고 있다. 특히, 노트북용 연료전지의 경우 신뢰성 확보 및 저가격화가 이루어지면 2010년에 국내 시장 규모가 3,600억 원에 이를 것으로 예측되고 있다. 한편, 일본 노무라 연구소에 발간한 전망보고서에 따르면 세계 연료전지 시장은 2010년 7,000억 원, 2015년에 2조 4,000억 원으로 연평균 300%의 급성장이 예상된다.

3. 고분자 전해질 막의 요구 특성

앞서 언급하였듯이 직접 메탄올 연료전지의 조기 상용화를 위해서는 핵심 요소인 고분자 전해질 막의 고성능화 및 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 고분자 전해질 막에 요구되는 특성은 (1) 0.1 S/cm 이상의 높은 수소이온전도도 (2) 10⁶ mol/min · cm 이하의 낮은 메탄올 투과율 (3) 높은 화학안정성 및 기계적 강도(특히 80 °C 이상의 고온에서) (4) 80-120 °C의 고온 작동 (5) 낮은 루테튬 촉매의 투과도 (6) 낮은 가격(10달러/kW 이하)이다. 일반적으로 메탄올 연료전지에 많이 쓰이는 듀폰사의 나피온 막은 가격이 비싸고(600-1200 달러/m²) 메탄올 투과도가 높으며 루테튬 촉매의 투과도가 높은 단점을 지니고 있어 이를 개선하기 위한 노력이 절실하다. 특히, 연료극에서 백금과 함께 공촉매로 사용되는 루테튬이 고분자 전해질막을 투과하여 공기극에서 침착하는 문제는 최근까지 간과되었다. 그러나 최근 연구결과에 따르면 루테튬의 투과를 확인하였으며 이러한 루테튬의 투과 및 공기극에의 침착은 연료전지의 성능을 떨어뜨리는 요인으로 작용하므로 이에 대한 해결책이 필요하다. 지금부터 직접 메탄올 연료전지용 고분자 전해질막에 요구되는 특성

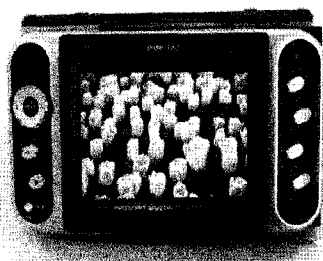


Figure 7. 삼성 SDI에서 개발한 20 ml 급 메탄올 연료전지를 장착한 PMP 시제품.

가운데 중요한 수소이온전도도와 메탄을 투과도에 관하여 구체적으로 알아보겠다.

3.1. 수소이온전도도

수소이온들의 고분자 전해질 막의 투과는 연료극에 생성된 수소이온의 고분자막으로의 흡수, 연료극에서 공기극으로의 전해질막내에서의 수소이온의 농도 차에 의한 전파, 그리고 공기극으로의 수소이온의 배출이라는 일련의 과정으로 이루어진다. 수소이온전도를 설명하기 위하여 두 종류의 메커니즘이 일반적으로 받아들여지고 있다. 첫째는 수소이온 호핑 방식으로서 수소이온이 전해질 막 내의 하나의 수화된 이온 ($\text{SO}_3\text{H}_3\text{O}^+$)에서 다른 이온으로 호핑하는 방식으로 수소이온이 전도된다고 설명한다. 다른 하나는 electro-osmotic drag에 의한 수소이온 전이방식으로서 전해질 막 내에서 수화된 물 ($\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_x$)에 결합된 수소이온이 다른 수화된 물에 이끌려서 전이된다고 설명한다. 수소이온전도도를 올리기 위하여 가장 많이 사용하는 방식이 첨가물을 넣어 복합 전해질 막을 제조하는 방식이다. 예를 들면, 폴리아닐린은 전도성 고분자로서 나피온 막의 수소이온전도도를 향상시키는데 매우 유망한 첨가제이다. 수소이온전도도를 높이기 위하여 많이 쓰이는 첨가제를 정리하면 다음과 같다[3].

- ① 전도성 첨가제 : 전도성 고분자 폴리아닐린(특히 폴리아닐린은 메탄올투과도를 떨어뜨리는 좋은 효과도 함께 나타낸다.)
- ② 산 첨가제 : molybdophosphoric acid, phosphotungstic acid, silicotungstic acid
- ③ 물 함유 증가제 : zirconium phosphate
- ④ 기타 첨가제 : hydroxyapatite, zeolite

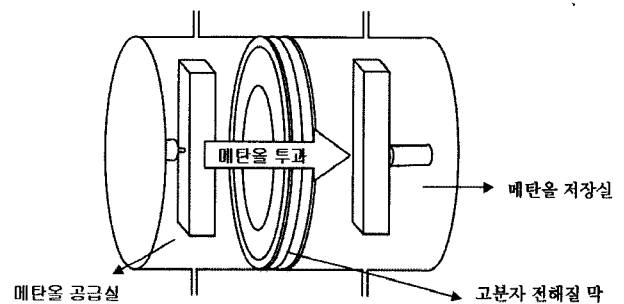
수소이온전도도는 보통 전기화학적 임피던스 분석기로 측정한다. 임피던스 분석기는 넓은 주파수 영역대에서 교류전류를 가하여 전해질 막의 저항을 임피던스의 실수 값으로부터 구하여 이온전도도를 측정한다. 수소이온전도도 측정법에는 2전극법(two-electrode method)과 4전극법(four-electrode method)이 있다. 전해질 막의 투과전류를 측정하는 2전극법에서는 접촉저항 때문에 낮은 주파수 영역대에서 임피던스 측정값의 주파수 의존성이 매우 크므로 일반적으로 전해질 막의 표면전류 특성을 측정하는 4전극법이 보다 선호하여 사용된다. 하지만 2전극법이 실제 연료전지 시스템에서의 수소이온 전도방향과 같은 방향의 이온전도도를 측정하므로 좀 더 연료전지 특성 평가에 적합한 방법으로 판단된다. 그래서 2전극법으로 투과

전도도 특성을 측정하고자할 경우에는 높은 주파수 영역대에서 측정하여 오차를 줄이는 방식을 사용하기도 한다.

3.2. 메탄을 투과도

메탄올이 연료극에서 공기극으로 투과되면 연료 효율이 낮아지고 공기극에서의 메탄을 산화로 인하여 전극 간의 전압차가 낮아지는 문제가 발생하여 전체적인 연료전지 성능 저하를 야기한다. 이에 따라 나피온 막의 메탄올 투과 문제를 완화시키기 위하여 물을 섞어서 메탄올의 농도를 매우 낮추거나 혹은 낮은 온도에서 구동하는 방식을 취하기도 한다. 만약 메탄올 투과를 획기적으로 차단할 수 있는 고분자 전해질 막이 개발된다면 고농도(혹은 100%)의 메탄올을 사용하여 단위 부피당 에너지 밀도를 높일 수 있어 시스템의 소형 경량화 및 구동시간 증대를 이룰 수 있다. 따라서 수많은 연구자들이 나피온 막 등과 같은 고분자 전해질 막의 메탄올 투과를 낮추기 위한 연구를 진행하였으며 자세한 것은 4절을 참고하기 바란다.

메탄올 투과도 측정을 위하여 대부분의 연구자들은 고분자 전해질 막이 샌드위치처럼 가운데 끼여 있고 막 양쪽에 메탄올 공급실과 투과된 메탄올의 저장실이 있는 확산 셀 시스템을 사용한다(Figure 8). 메탄올 공급실에는 물을 섞어 적당한 농도(1-5 M)의 메탄올을 공급하고 고분자 전해질 막을 통하여 메탄올 저장실로 투과된 메탄올의 농도를 시간대별로 기체크로마토그래피 등으로 측정하여 단위 시간당 메탄올 투과도를 계산한다.



$$C_B(t) = \frac{AP}{V_B L} C_A (t - t_0)$$

- P: 메탄올 투과도
- C_B : 메탄올 저장실의 메탄올 농도
- A: 고분자 전해질 막의 면적
- V_B : 메탄올 저장실의 부피
- L: 고분자 전해질 막의 두께
- C_A : 메탄올 공급실의 메탄올 농도
- t: 투과 소요 시간

Figure 8. 메탄올 투과도 측정을 위한 확산 셀 시스템의 개략도.

4. 직접 메탄을 연료전지용 고분자 전해질 막의 개발 동향

4.1. 불소화 고분자 전해질 막

4.1.1. 나피온 막

듀폰사에서 개발하고 시판하는 나피온 막은 메탄을 연료전지 및 고분자막 연료전지용 전해질 막으로 가장 널리 연구되고 사용되고 있다. 나피온 막은 연료전지 시스템에서 6만 시간 이상 수명을 지닐 만큼 내구성이 우수하고 0.1 S/cm에 이를 만큼 높은 수소이온전도도와 산화안정성을 지니고 있다. 나피온은 테트라플루오로에틸렌(CF₂=CF₂)과 삼산화황(SO₃)과의 반응으로 얻어진 화합물에 헥사플루오로프로필렌옥시드를 반응시켜 핵심 단량체인 perfluoro-sulfonylfluoride-ethylpropyl-vinylether를 제조한다. 이 단량체와 불소화 에틸렌 단량체를 공중합시켜 Figure 9의 일반식을 지니는 나피온을 제조한다[4]. 이때 단량체들 간의 공중합도와 술폰산기를 지니는 단량체의 함량을 달리 함에 의하여 Nafion® 112, 1135, 115, 117 등 분자량 및 이온화도가 다른 여러 종류의 나피온이 만들어져 시판되고 있다.

나피온에서 소수성인 폴리테트라플루오로에틸렌 백본이 열안정성 및 내화학성을 부여하고 친수성인 술폰산기를 말단에 지니는 과불소화 측쇄는 친수성 영역을 형성하여 수소이온전도성을 부여한다. 즉, 불소원자가 지니는 소수성에 의하여 만들어진 소수성 영역과 측쇄 말단의 술폰산기가 형성하는 친수성 영역 간의 미세 상분리가 일어나 만들어진 친수성 채널을 통하여 수소이온이 전해질 막내에서 전도되며 상대습도 34-100%, 구동온도 80 °C에서 0.09-0.12 S/cm의 높은 수소이온전도도를 나타낸다. 그러나 나피온은 높은 메탄을 투과 및 루테튬 측매 투과 현상을 나타내며, 가격이 비싸고 높은 습윤 조건과 80 °C 이하의 비교적 낮은 온도에서만 구동이 가능한 단점을 지니고 있다. 이 가운데 특히 메탄을 투과도가 가장 심각한 문제를 야기하므로 고분자 연료전지에 많

이 쓰이는 Nafion® 112 대신에 비교적 낮은 수소이온전도도에 불구하고 막이 두꺼워(178 μm) 메탄을 투과도를 낮출 수 있는 Nafion® 117을 일반적으로 메탄을 연료전지에 사용한다. 일반적으로 나피온의 equivalent weight(EW, 1몰의 이온기 당 고분자의 그램수)가 높을수록 그리고 막이 두꺼울수록 메탄을 투과도가 낮아지는 경향을 보인다. 한편, 2005년에 듀폰사는 메탄을 연료전지에의 적용을 목표로 기존보다 출력밀도(power density)가 20% 증대하였고 내구성이 두 배 향상되었으며 촉매 사용량을 획기적으로 감소시킨 막전극집합체 Gen IV의 개발을 발표하였다.

4.1.2. 기타 상업화된 불소계 전해질 막

다우케미컬사는 비닐렌기를 지니는 테트라플루오로에틸렌을 공중합하여 과불소화 술폰산 고분자 전해질막을 개발하였다. 이 고분자는 나피온에 비하여 짧은 측쇄를 지녔으며 800 EW 전해질 막의 비전도도는 0.2 Ω⁻¹cm⁻¹로 측정되었으며, 메탄을 투과도는 나피온 막에 비하여 우수한 특성을 보였다. 1987년 캐나다의 벤처회사 Ballard 사가 다우케미컬사의 고분자 전해질 막에 전극촉매로 퍼플루오로카본산막 성분을 수소이온 전도체재료로 함유시켜 제작한 메탄을 연료전지의 성능을 평가한 결과 나피온을 사용한 경우보다 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다[5,6].

독일의 3P-Energy 사는 과불소화술폰산 고분자 막을 개발하였다. 이 3P 막은 나피온보다 20배 낮은 메탄을투과도를 보여 매우 고농도의 메탄을 사용할 수 있어 높은 출력밀도를 나타낼 수 있었다. 그 외의 상업화된 불소계 고분자 전해질 막으로는 아사히글라스의 flemion 막, 아사히케세이사의 aciplex, 그리고 폴리테트라플루오로에틸렌 다공질막에 퍼플루오로카본술폰산 고분자를 복합시킨 gore & associates 막이 있다. 이들 가운데 gore & associates 막이 20-30 μm 두께로 가장 얇은 것으로 알려져 있다.

나피온이나 다우막, 혹은 플레미온막과 같은 과불소화술폰산막을 전해질 막으로 사용하는 경우 수소이온전도도를 높이기 위해서는 전해질 막을 높은 습윤 상태로 유지시켜야 한다. 이것은 메탄을 투과를 높이는 결과를 초래하며 고온에서의 수분 증발로 인한 수소이온전도의 급감문제로 인하여 고온 구동이 어려운 문제를 야기한다. 이러한 과불소화술폰산 막의 문제점을 해결하기 위하여 다음에 설명하는 과불소화 복합막을 제조하는 시도가 진행되었다.

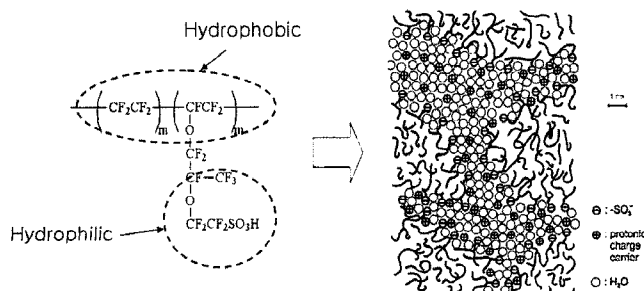


Figure 9. 듀폰사의 나피온의 구조식 및 나피온 막의 미세상구조.

4.1.3. 유무기 복합 전해질 막

메탄을 투과를 억제하고 고온에서의 수분보유도와 안정성을 높이기 위하여 지르코늄, 실리카, 산화티타늄 등의 무기 산화물이나 molybdophosphoric acid, phosphotungstic acid 등의 무기산을 도입하여 복합막을 제조하는 시도가 이어지고 있다. 나피온-지르코늄 복합 전해질 막은 나피온 압출 필름에 지르코늄 포스페이트를 함침하여 제조하며, 불용성 지르코늄 포스페이트는 나피온 막의 기공 사이에 포집된 상태로 존재하게 된다. 나피온-지르코늄 복합막은 150 °C까지 안정하며 최대출력밀도 380 mW/cm²(산소 공급 시)의 특성을 나타내었다. 지르코늄 포스페이트는 나피온 막의 고온에서의 수분 함유량을 유지시켜주어 고온 구동 특성이 크게 향상되었다. 막 저항은 고온으로 갈수록 감소하여 90 °C에서 0.12 Ωcm²로부터 140~150 °C에서 0.08 Ωcm²로 감소하였다. 또한, 120~150 °C 구동온도에서 이 복합막을 채용한 메탄올 연료전지의 OCV(open circuit voltage)는 0.86을 기록하였다. 또한, 이 복합 전해질 막은 100% 상대습도와 상온 조건에서 10⁻² S/cm 정도의 수소이온전도도를 나타내었다[7].

실리카 또한 나피온 막의 개질에 많이 사용되었다. 나피온-실리카 복합막은 실리카 입자나 dithenylsilicate를 사용하거나 테트라에틸오르소실리케이트(TEOS)에 의한 졸겔 반응법을 사용하여 제조한다. 나피온-실리카 복합막은 100 °C 이상의 고온에서 높은 수분 함유량을 유지하여 비교적 우수한 고온 구동 특성을 보여주었으며, 순수 나피온 막에 비하여 낮은 메탄올 투과도를 나타내었다. 그러나 실리카 함침량이 많아질수록 기계적 강도가 떨어져 부서지기 쉬운 특성을 보이는 단점을 나타내었다. 대부분의 실리카 복합막은 0.01-0.03 S/cm의 수소이온전도도와 1.5×10⁻⁷ cm²/s의 메탄올 투과도를

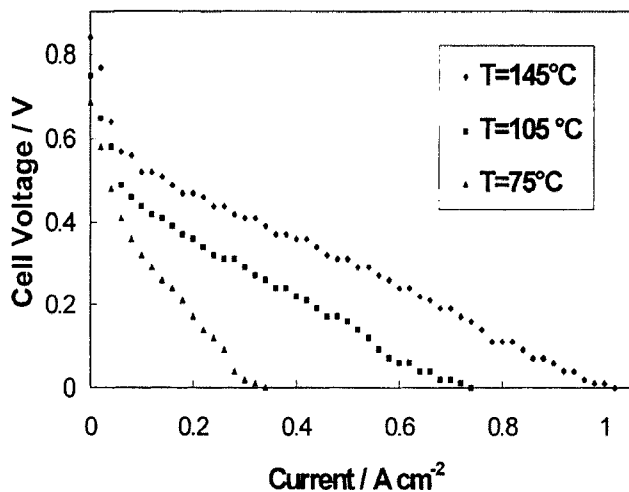
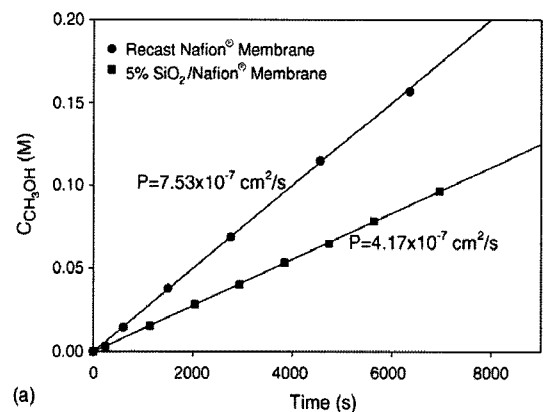


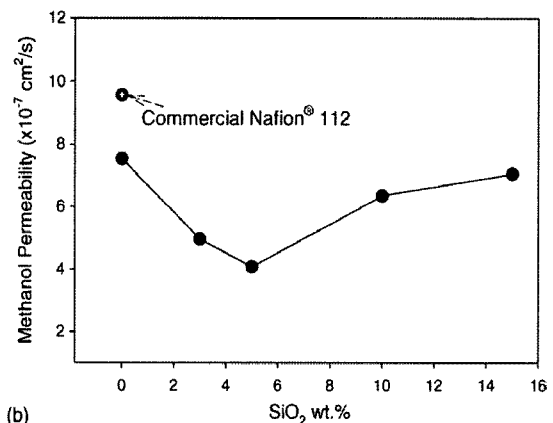
Figure 10. 나피온-실리카 복합 전해질막을 사용한 메탄올 연료전지 셀의 구동온도에 따른 전류-전압 특성 그래프(공기 주입 조건).

를 나타내었다[8]. Antonucci 등은 Nafion[®] Ionomer(5% wt/wt, Aldrich)를 3% 실리카(wt/wt, Aerosil 200)와 섞은 액으로부터 필름을 캐스팅하여 나피온-실리카 복합막을 제조하였다[9]. 이 복합막을 사용한 연료전지 셀의 특성을 평가한 결과 고온에서 높은 함유율을 유지하는 덕분에 145 °C의 구동온도에서 최대출력밀도는 산소 공급 시 240 mW/cm²를, 공기 공급 시 150 mW/cm²를 나타내었다. 메탄올 투과도는 2 M 메탄올 농도에서 4×10⁻⁶ mol/min·cm를 나타내었다. 공기 주입 조건에서 OCV는 75 °C에서의 0.69 V와 105 °C에서의 0.75 V에 비하여 145 °C에서 0.82 V로 크게 향상된 특성을 보였다(Figure 10).

한편, Jiang 등은 TEOS를 사용한 졸겔법으로 실리카를 함유한 나피온-실리카 복합막을 제조하였다. 이 실리카를 5% 함유한 복합막의 경우 20 °C, 1 M 메탄올 농도 조건에서 4.17×10⁻⁷ cm²/s의 메탄올 투과도를 보여 나피온의 9.7×10⁻⁷ cm²/s보다 절반 이하의 낮은 메탄올 투과도를 나타내었다(Figure 11). 또한, 10% 실리카를 함유한 복합막의 경우 나피온 막보다 약간 낮은 수소이온전도도를 보였다[10].



(a)



(b)

Figure 11. 나피온-실리카 복합 전해질막의 메탄올 투과도 특성 평가 그래프.

Dimitrova 등은 molybdophosphoric acid를 첨가하여 나피온 복합막을 제조하였으며 수소이온전도는 2배 이상 향상되었으나 메탄을 투과도 또한 약간 증가하는 특성을 보임을 발표하였다[11].

4.1.4. 배리어 막 코팅 복합 전해질 막

나피온 막의 메탄을 투과도를 낮추고 고온 안정성을 향상시키기 위하여 나피온 막 표면에 얇게 배리어 막을 코팅하는 방식이 다수의 연구자에 의하여 시도되었다. Tang 등은 음전하를 띄는 약 1.8 nm 정도 크기의 팔라디움 입자와 양전하를 띄는 polydiallyldimethylammonium chloride(PDDA)를 다층박막자기조립법(layer-by-layer self-assembly)으로 1-5 층의 다층박막을 나피온 막에 코팅하였다[12]. 5층의 다층박막이 코팅된 복합 막의 경우 수소이온전도도는 0.081 S/cm로 순수한 나피온에 비하여 약간 감소하였으나, 메탄을 투과도는 나피온에 비하여 무려 100배 정도 감소하는 우수한 특성을

보였다(Figure 12).

한국화학연구원의 김동욱, 강영구 등은 다층박막자기조립법으로 메탄을 배리어 막을 나피온에 코팅하는 연구 결과들을 최근에 발표하였다. 음전하를 띄는 클레이 입자와 양전하를 띄는 고분자 간의 20층의 다층 박막을 나피온 막에 코팅하여 수소이온전도도는 거의 감소시키지 않으면서 메탄을 투과도를 절반이하로 떨어뜨리는 효과를 나타냄을 발표하였다(Figure 13). 클레이 입자는 두께 1 나노미터, 지름 수백 나노미터의 크기를 가지는 매우 넓은 판상 형태의 나노 입자로서 나피온 박막 위에 가지런하게 쌓이는 방식으로 코팅되어 메탄을 투과도를 낮추는데 기여하였다[13]. 또한, 양전하를 띄는 aminated poly(ethersulfone)(APES)와 음전하를 띄는 sulfonated poly(ethersulfone)(SPES)을 합성하여 이들로부터 다층자기조립박막을 나피온 막 표면에 형성하였다[14](Figure 14). 10층의 APES/SPES 자기조립박막으로 코팅된 나피온 복합막의 경우 순수한 나피온에 비하여 수소이온전도도는 0.081 S/cm에서 0.060 S/cm로 약간 감소한 반면에 메탄을 투과도

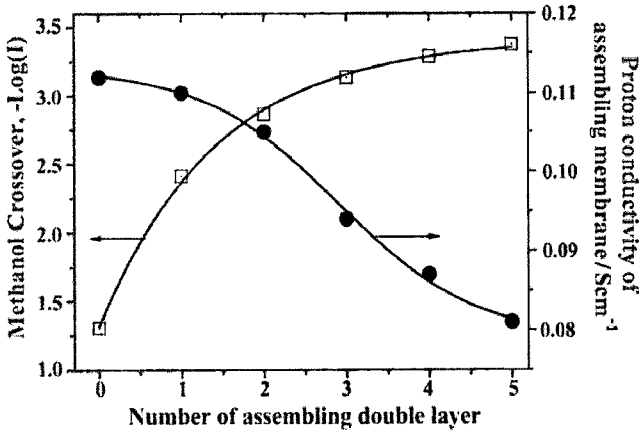


Figure 12. 팔라디움 입자와 PDDA의 다층박막 수에 따른 나피온 복합막의 메탄을 투과도와 수소이온전도도의 특성 변화 그래프.

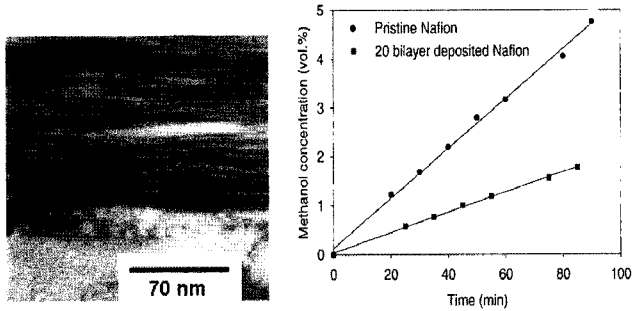


Figure 13. 클레이 입자와 양전하 고분자간의 다층박막 배리어 막이 코팅된 나피온 복합막의 투과전자현미경 사진 및 메탄을 투과도 특성 평가 그래프.

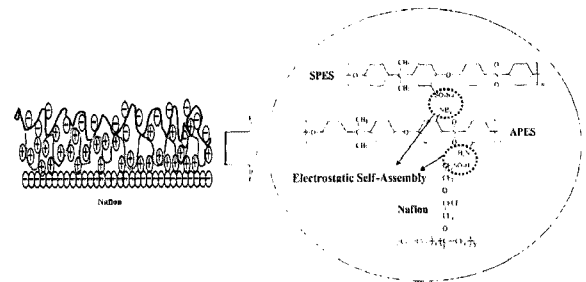


Figure 14. 나피온 막 표면에 코팅된 APES/SPES 다층자기조립박막의 모식도.

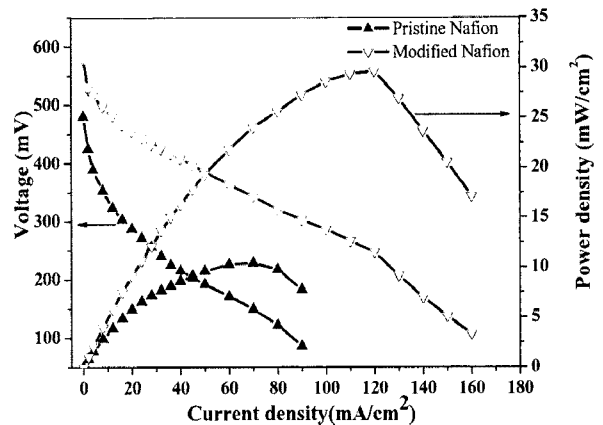
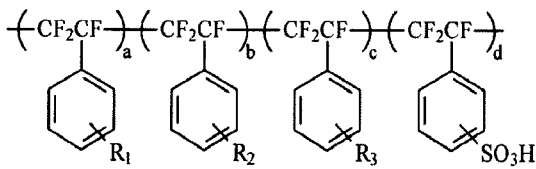


Figure 15. APES/SPES 10층 자기조립박막이 코팅된 나피온 복합막을 사용한 메탄을 연료전지 셀의 전류-전압 특성 그래프(30 °C, 5M 메탄을 농도 조건).

는 $1.74 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 에서 $3.81 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 78% 감소하였다. 이 나피온 복합막을 사용하여 메탄올 연료전지 셀의 특성을 평가한 결과 30 °C, 5 M 메탄올 농도 조건에서 최대출력밀도는 순수 나피온 막에 비하여 2.8배 향상된 특성을 보임을 확인하였다(Figure 15).

4.1.5. 부분 불소화 고분자 전해질 막

Ballard 사는 술폰산기가 벤젠환에 치환된 α,β,β -트리플루오로스티렌과 알킬, 할로젠, CF=CF₂, CN 등이 벤젠환에 치환된 α,β,β -트리플루오로스티렌 단량체들간의 공중합체를 제조하여 부분불소화 고분자 전해질 막 BAM 막을 개발하였다(Figure 16). 백분의 불소화를 통하여 알킬 백분의 경우 생성될 수 있는 하이드로퍼옥시드의 생성을 막을 수 있어 내구성을 향상시켰다. BAM 막은 나피온 막과 같은 과불소화 고분자막에 비하여 우수한 성능 및 장기 안정성을 지니고 있으나 합성 공정이 복잡하여 단가가 매우 비싸며 또한 단량체의 확보 또한 용이하지 않은 단점을 지니고 있다[15].



R₁, R₂, R₃ = alkyls, halogens, OR, CF=CF₂, CN, NO₂, OH

Figure 16. BAM 막의 화학구조식.

4.2. 비불소계 고분자 전해질 막

4.2.1. 술폰화 폴리포스파젠

술폰화 폴리포스파젠은 매우 높은 열안정성과 내화학적성을 지니고 메탄올 투과도가 낮아 직접 메탄올 연료전지용 고분자 전해질 막으로의 응용 가능성이 높다(Figure 17). 일반적으로

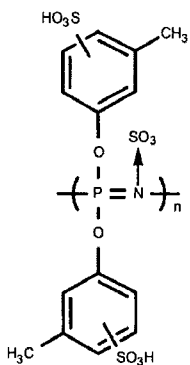


Figure 17. 술폰화 폴리포스파젠의 화학구조식.

포스파젠 골격에 술폰산기를 도입하는 경우 술폰화도 제어가 어려우며 특히 술폰화도를 높일 경우 물에서 용해되는 현상을 보인다. 따라서 일반적으로 술폰화 폴리포스파젠을 합성한 후 벤조페논 등의 광개시제로 광 가교를 도입하여 제조된 가교 술폰화 폴리포스파젠을 고분자 전해질 막으로 사용한다. 이와 같은 방식으로 얻어진 가교된 sulfonated poly[bis(3-methylphenoxy)

phosphazene]의 경우 Nafion[®]117보다 30% 정도 낮은 수소이온전도도를 나타내지만 30 °C, 1 M 메탄올 농도에서 $1.6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 메탄올 투과도를 나타내어 나피온 막의 $6.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 보다 수십배 낮은 특성을 나타내었다[16]. 또한, 이 고분자 전해질 막은 제조 단가가 낮고 우수한 기계적 강도를 나타내며 높은 내화학적성을 보인다.

4.2.2. 술폰화 폴리에테르에테르케톤(sPEEK)

폴리에테르에테르케톤(Figure 18) 합성이 용이하며 넓은 온도범위에서 내화학적성이 우수하며 에테르기의 전자공여특성으로 인하여 술폰화 반응이 용이하여 적절한 수소이온전도도 확보가 가능한 장점을 지니고 있다. 약 38% 술폰화가 이루어진 sPEEK를 10% 농도로 디메틸포름아미드에 녹인 용액으로부터 캐스팅하여 얻은 sPEEK 막은 25 °C, 2 M 메탄올 농도조건에서 $2.03 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 메탄올 투과도를 나타내어 나피온 막보다 우수한 특성을 나타내었다[17]. 일반적으로 술폰화도가 높아질수록 sPEEK의 내구성은 떨어진다. 이에 기계적 물성 및 안정성을 향상시키기 위하여 diazobicyclooctane이나 아미노피리딘과 같은 지방족 혹은 고리형 디아민을 가교제로 사용하여 가교화된 술폰화 폴리에테르에테르케톤을 제조하기도 한다.

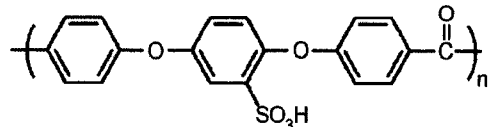


Figure 18. 술폰화 폴리에테르에테르케톤(sPEEK)의 화학구조식.

4.2.3. 폴리에테르술폰

폴리에테르술폰은 합성이 용이하고 대량생산이 가능하여 제조단가가 낮으며 에테르기의 전자공여성 특성에 의하여 폴리술폰 백분의 술폰화가 용이하여 적당한 수소이온전도도를 갖도록 제조할 수 있는 여러 좋은 특성을 지니고 있다. 미국 Los Alamos National Lab과 버지니아폴리텍 연구실에서는 bi-phenol을 기반으로 하는 폴리에테르술폰막 BPSH-40과 폴리에테르벤조니트릴 전해질 막 6FCN-35를 합성 개발하였다[18](Figure 19). 6FCN-35는 4,4'-hexafluoroisopropylidene-diphenol(6F), 2,6-dichlorobenzonitrile, 그리고 3,3'-disulfonate-4,4'-dichlorodiphenylsulfone을 염기 조건하에서 NMP를 용매로 사용하여 200 °C에 방향족 핵치환반응과 축중합반응에 의하여 합성된다. BPSH-40과 6FCN-35는 나피온 막보다 이온교환 성능이 우수하여 함수율이 높은 반면 메탄올 투과도는 오히

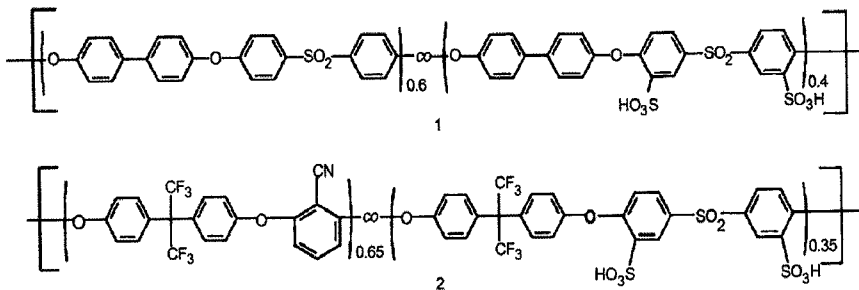


Figure 19. 1: BPSH-40 과 2: 6FCN-35의 화학구조식.

러 나피온에 비하여 절반이하로 낮은 특성을 보인다. 즉, 30 °C, 0.5 M 메탄을 농도 조건에서 BPSH-40과 6FCN-35의 메탄을 투과도는 각각 $8.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 과 $8.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ 으로 나피온의 $1.67 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ 에 비하여 낮은 특성을 보여서 전체적인 선택도(selectivity)는 나피온 대비 약 50% 향상된 특성을 보였다.

미국 Air Force 연구실에서는 poly(arylene thioether sulfone)(sPTES)의 개발을 발표하였다[19]. 이 고분자 전해질 막은 제조단가가 낮으며 내화학성 및 열안정성이 우수하고 0.1 S/cm 이상의 높은 수소이온 전도성을 지니고 있으며(65 °C, 상대습도 85% 조건) 연료전지 성능 시험결과 나피온에 비견할 정도의 성능을 나타내었으며 높은 온도에서도 합수율을 유지하는 등의 우수한 성능을 나타내었다.

5. 결론

본 고를 통하여 메탄을 고분자 연료전지의 개발동향과 전망, 그리고 핵심 요소인 고분자 전해질 막의 연구동향에 관하여 개괄적으로 살펴보았다. 점차적으로 휴대용 전자기기가 고성능화가 되고 장시간의 구동이 요구됨에 따라 현재 사용되고 있는 리튬이온전지나 리튬폴리머전지로는 한계를 보이게 되었다. 따라서 소형 경량화가 가능하고 단위부피당 에너지밀도가 높으며 무공해 청정에너지원인 직접 메탄을 연료전지는 차세대 휴대용 전원장치로의 응용 가능성이 매우 높으며 시장 전망 또한 매우 밝다. 현재 메탄을 연료전지의 시제품이 속속 나오고 있지만 아직까지는 완성된 기술이 아니며 핵심 요소 특히 고분자 전해질 막의 성능에 대한 개선이 무엇보다도 절실하다. 현재 듀폰사의 나피온 막이 높은 수소이온전도성, 우수한 내화학성 등의 탁월한 성능을 지니고 있어 메탄을 연료전지용 고분자 전해질막으로 표준적으로 채택되고 있다. 그러나 나피온 막의 높은 메탄을 투과 현상은 심각한 연료전지 출력 저하 및 연료 효율 저하를 야기한다. 또

한, 80 °C 이상의 고온에서의 탈수현상으로 인하여 수소이온전도도가 급감하는 문제 및 복잡한 제조공정으로 인한 고가의 제조단가 또한 시급히 해결해야 할 과제이다. 이러한 나피온 막의 단점을 보완하고자 무기산화물이나 무기산을 복합화하여 제조함으로써 고온안정성 및 메탄을 투과 억제 효과를 달성하고자 하는 연구들이 많이 시도되고 있다. 또한, 나피온 막

표면에 얇은 배리어 막을 코팅하는 간단한 방식으로 메탄을 투과를 억제하는 연구 또한, 다양하게 진행되고 있다. 한편, 제조 단가가 나피온과 같은 과불소화 술폰산 막보다 훨씬 저렴한 유기 고분자-폴리포스파젠, 폴리에테르에테르케톤, 폴리에테르술폰 등을 사용하여 나피온 막과 유사한 혹은 우수한 수소이온전도도, 메탄을 투과도, 기계적 안정성, 내화학성, 고온안정성을 달성하고자 세계적인 연구 그룹을 비롯한 많은 연구자들이 폭 넓게 연구를 진행하고 있다. 이 중 가교화된 술폰화 폴리포스파젠과 폴리에테르술폰계 고분자를 사용한 연구에서 향후 나피온을 대체할 만한 성능을 지니는 고분자 전해질 막이 개발될 것으로 전망되고 있다.

2005년도에 미국 에너지성은 휴대전원용 연료전지의 상업화를 2010년쯤에 가능할 것으로 전망하고 그때까지 달성해야 할 성능목표를 다음과 같이 제시하였다. (1) 출력밀도 100 W/l (2) 에너지 밀도 1000 Wh/l (3) 수명 5000 시간 (4) 가격 3달러/W. 이 목표를 달성하기 위해서는 현재의 기술수준보다 훨씬 업그레이드된 기술이 요구된다. 미국, 일본, 유럽의 정부 및 기업들은 연료전지의 성능을 개선하고자 오래 전부터 많은 연구인력 및 연구개발비를 투입하여 속속 고성능화 및 경량화된 연료전지 시스템을 개발하고 이를 채용한 시제품을 발표하고 있다. 국내에서도 삼성전자, 삼성 SDI, LG 화학 등의 대기업과 정부출연연구원, 그리고 대학연구소에서 최근 들어 집중적인 연구가 진행되고 있다. 특히, 국내의 삼성전자 등에서 세계최고 수준의 성능을 자랑하는 연료전지 시스템을 개발하고 이를 채택한 노트북 PC, PDA, 휴대폰 등의 휴대 정보기기 시제품을 발표하고 있는 등 국내에서도 연료전지의 상업화에 가속도를 내고 있다. 일본 도시바, NEC, 미국 MTI 사, Polyfuel 사 등 세계 유수 기업에서도 이에 뒤질세라 주도권을 잡기 위한 치열한 경쟁을 벌이고 있다. 메탄을 연료전지는 이제 기술 시험 단계를 넘어서 이제 상용화 단계로 접어든 것으로 분석되며 앞으로 연료전지는 리튬계열 전지를 대체 혹은 병행하여 휴대용 전원장치로 사용될 것에

의문의 여지가 없다. 따라서 앞으로 막대한 미래시장 창출과 선점을 위하여 소재기술 전문가로부터 시스템 전문가에 이르기까지 다양한 분야의 전문가 그룹들 간의 유기적인 협력연구가 매우 중요하며 연구개발 지원 및 관련 제도 개선을 위한 정부의 노력 또한 매우 절실하다.

참고문헌

1. 이창현, 홍영택, 이재홍, 박호범, 한동완, 이영무, *고분자과학과 기술*, **15**(5), 578 (2004).
2. 김상경, 백동현, *고분자과학과 기술*, **15**(5), 598 (2004).
3. V. Neburchilov, J. Martin, H. Wang, J. Zhang, *J. Power Source*, **169**, 221 (2007).
4. K. D. Kreuer, *J. Membr. Sci.*, **185**, 29 (2001).
5. O. Savadogo, *J. New Mater. Electrochem. Syst.*, **1**, 47 (1998).
6. A. Kuver, K. Potje-Kamloth, *Electrochim. Acta*, **43**, 2527 (1998).
7. G. Vaivars, T. Mokrani, N. Hendricks, V. Linkov, *J. Solid State Electrochem.*, **8**(11), 882 (2004).
8. N. W. Deluca, Y. A. Elabd, *J. Polym. Sci.: Part B, Polym. Phys.*, **44**, 2201 (2006).
9. P. L. Antonucci, A. S. Arico, P. Creti, E. Ramunni, V. Antonucci, *Solid State Ionics*, **125**, 431 (1999).
10. R. C. Jiang, H. R. Kunz, J. M. Fenton, *J. Membr. Sci.*, **272**, 116, (2006).
11. P. Dimitrova, K. A. Friedrich, U. Stimming, B. Vogt, *Solid State Ionics*, **150**, 115 (2002).
12. H. Tang, M. Pan, S. Jiang, Z. Wan, R. Yuan, *Colloids Surf. A.: Physicochem. Eng. Aspects*, **262**, 65 (2005).
13. D. W. Kim, H. S. Choi, C. Lee, A. Blumstein, Y. Kang, *Electrochimica Acta*, **50**, 659 (2004).
14. J. Ok, D. W. Kim, C. Lee, W. C. Choi, S. Cho, Y. Kang, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **29**, 842 (2008).
15. M. A. Hickner, H. Chassemi, Y. S. Kim, B. R. Einsla, J. E. McGrath, *Chem. Rev.*, **104**, 4587 (2004).
16. Q. Guo, P. N. Pintauro, H. Tang, S. O'Connor, *J. Membr. Sci.*, **154**, 175 (1999).
17. L. Li, J. Zhang, Y. Wang, *J. Mater. Sci. Lett.*, **22**, 1595 (2003).
18. Y. S. Kim, M. J. Summer, W. L. Harrison, J. S. Siffle, J. E. McGrath, B. S. Pivovar, *J. Electrochem. Soc.*, **151**, A2150 (2004).
19. F. Lufrano, G. Squadrito, A. Patti, E. Passalacqua, *J. Appl. Polym. Sci.*, **77**, 1250 (2000).

● 김 동 욱 -----

- 1991. 서울대학교 섬유공학과 졸업
- 1993. 서울대학교 섬유고분자공학과(석사)
- 1998. 서울대학교 섬유고분자공학과(박사)
- 1998-1999. 한국과학기술연구원 위촉연구원
- 1999-2002. Univ. Mass. Lowell 방문연구원
- 2002-현재. 한국화학연구원 화학소재연구단 책임연구원

● 강 영 구 -----

- 1984. 서강대학교 화학과 졸업
- 1986. 서강대학교 화학과(석사)
- 1997. Texas A&M University 화학과(박사)
- 1986-1991. 한국화학연구원 화학소재연구단 연구원
- 1997-현재. 한국화학연구원 화학소재연구단 책임연구원