

차량용 연료전지 상용화의 핵심기술, 멤브레인

현재, 청정 에너지로의 전환에서 수소가 핵심적인 역할을 하는 데에는 의심의 여지가 없습니다. 또한 수소산업의 주요 다운스트림 애플리케이션인 연료전지의 기술 성숙도는 나날이 향상되고 있습니다. 이는 고어에서도 예외가 아닙니다. 수소는 지속가능한 저탄소 에너지 시스템을 구현한다는 고어의 글로벌 비전에서 가장 핵심적인 요소입니다. 특히 수소의 중요성이 대두되고 있는 운송부문은 새로운 에너지원으로서 수소를 빠르게 도입하고 있습니다.

수소의 잠재성을 실현하는 데 필수적인 요소 중 하나가 바로 PEM(양성자 교환막) 연료전지 스택인데, 연료전지 스택 및 시스템의 성능과 신뢰성을 빠르게 개선하여 수소차 상용화를 가속화하려면 고도의 멤브레인 기술력이 필요합니다.

현재 운송산업의 탄소배출 감축에 기여할 수 있는 두 가지 기술은 바로 수소차와 배터리 전기차입니다.

3~5분에 불과한 충전시간, 400마일 이상의 주행거리, 그리고 빠르게 확장되고 있는 수소 인프라를 바탕으로, 수소차는 엄청난 모멘텀을 보이며 미래 모빌리티의 새로운 가능성을 제시하고 있습니다.

연료전지 기술에는 여러 가지가 있는데, 그 중에서도 PEM 연료전지는 차량용 애플리케이션에 다양한 가능성을 제공합니다. 그럼, PEM 연료전지 스택이 어떠한 장점을 가지고 있는지, 그리고 왜 훌륭한 차량용 솔루션인지에 대해 알아보겠습니다.

SOFC(고체산화물 연료전지) 및 DMFC(직접 메탄올 연료전지)와 비교했을 때,

PEM 연료전지는 높은 출력밀도, 낮은 중량/부피, 폭넓은 작동 온도의 이점이 있으며, 예열이 필요하지 않습니다. (그림 1)

따라서 자동차 회사들이 승용/상용차에서 장거리용 화물차까지, 보다 포괄적인 연료전지 기반의 제품을 선보일 수 있게 합니다.

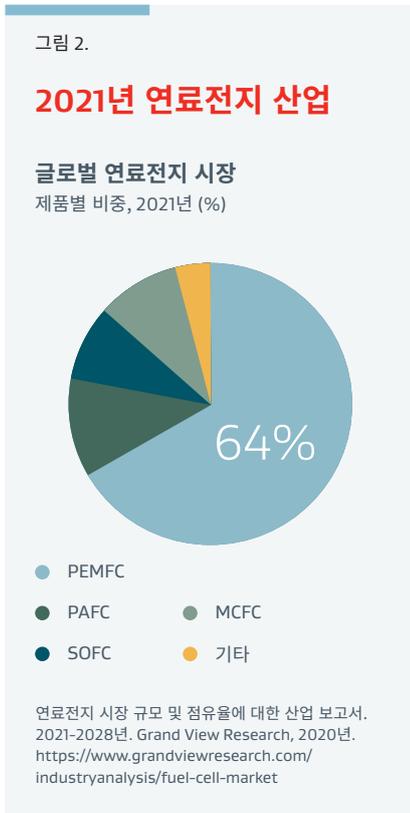
그림 1.

연료전지 애플리케이션의 최근 발전 동향



연료전지 소재 발전에 대한 고찰: 전극 및 전해질, Wiley Online Library, 2022년, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/er.7635>

이렇게 우수한 다목적성 덕분에 PEM 연료전지 스택 및 시스템은 전체 연료전지 시장의 64%를 차지하고 있습니다. (그림 2)



PEM 연료전지 기술의 잠재적인 이점을 고려하면 자동차 기업들이 투자를 할 수밖에 없습니다. 그러나 규모의 경제를 실현하기 위해서는 경제성과 경쟁력을 겸비한 기술이 필요합니다. 연료전지 스택 엔지니어들은 멤브레인 기술 전문기업과 협업하여 함께 PEM, 스택 및 시스템을 최적화해야만 기술을 광범위하게 사용할 수 있고, 수소차 상용화를 위한 다음의 세 가지 니즈를 충족할 수 있습니다:

- **신뢰할 수 있는 성능**
PEM의 출력 밀도/내구특성 및 스택/시스템에서의 성능 최적화를 위한 멤브레인 기술 활용방법에 대한 전문성
- **기술 지원**
차량의 개발 목표 달성을 위한 사용 적합형(fit-for-use) 솔루션 및 전문 기술 제공

- **안정적인 공급망**
일관된 품질이 확보된 대량 생산을 가능하게 하는 연료전지 부품 및 소재의 안정적인 공급망 유지

신뢰할 수 있는 성능



수소를 에너지로 변환하는 연료전지 내에서 PEM은 공기(산소)와 수소를 분리하고, 애노드에서 캐소드로 양성자를 운반하며, 셀 내부에서 쇼트(short-circuiting)를 방지하는 역할을 한다는 점에서 필수적인 구성요소입니다. 차량용 연료전지 스택의 PEM이 고온 저습 환경에서 뛰어난 성능을 제공하고 안정적으로 사용되려면, 높은 이온 전도도(및 그로 인한 우수한 출력밀도), 화학적 열화 및 기계적 강도, 그리고 낮은 가스 투과성을 보유해야 합니다.

PEM이 얇을수록 막의 저항이 저감하고 물의 이동이 원활하며, 특히 상대습도가 낮은 영역에서 성능 향상을 기대할 수 있습니다. 반면에, 얇은 PEM은 기계적 특성에 영향을 미쳐 연료전지의 수명이 저하될 수 있습니다.

또한 PEM이 얇아지면 가스 크로스오버가 증가하고, 이로 인해 연료 효율이 낮아질 뿐만 아니라 화학적 열화를 가속화하는 유해 라디칼(radicals) 농도가 증가하여 제품 수명이 단축될 수 있습니다.

이러한 트레이드오프는 PEM을 연신된 폴리테트라 플루오로에틸렌(ePTFE)으로 강화하면 크게 줄일 수 있습니다.

차량용 연료전지 스택의 PEM이 고온 및 건조할 수 있는 환경에서 뛰어난 성능을 제공하고 안정적으로 사용되기 위해서는 높은 이온 전도도(및 그로 인한 우수한 출력밀도), 화학적 열화 및 기계적 강도, 그리고 낮은 가스 투과성을 보유해야 합니다.

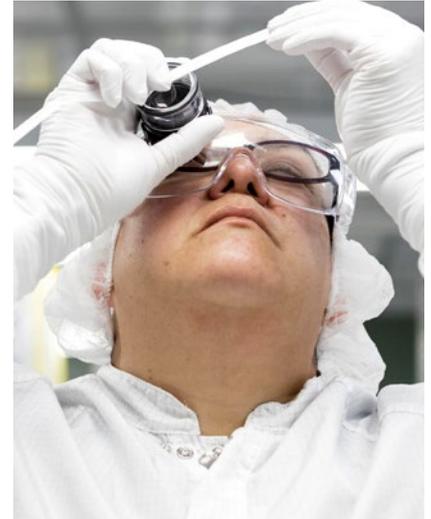
수 십 년 간의 소재 엔지니어링 경험을 바탕으로 개발된 고어의 강화 PEM 기술은 고도로 설계된 ePTFE, 고성능 이오노머 및 화학적 열화를 방지하기 위해 독점적으로 개발된 멤브레인 첨가제가 한데 결합된 결과물로, 특정 애플리케이션의 요구사항에 적합한 낮은 저항과 고내구성의 특징을 갖게 됩니다.(그림 3)

최종 애플리케이션의 성능과 비용을 최적화하려면, PEM 소재/설계뿐만 아니라 연료전지 스택 및 시스템 사이의 상호작용과 트레이드오프를 이해하기 위한 포괄적인 관점에서의 지속적인 R&D 활동이 수반되어야 합니다.

있는, 기술력과 지식을 겸비한 PEM 전문기업이 필요합니다.

부품 공급사라면 자사 부품을 사용할 때 발생할 수 있는 성능 차원의 트레이드오프 및 연료전지 스택/시스템 내 다른 부품과의 상호작용에 대해 깊은 전문성을 보유하고 있어야 합니다.

PEM과 관련하여 고어는 자체 개발된 독보적인 모델링 방법과 연료전지 실제 작동 조건에 의거하고, 다양한 구동조건 등을 고려한 테스트 기법을 바탕으로, 이러한 상호작용에 대한 심도 있는 이해를 자랑하며, 제품 설계의 가속화를 지원하고 있습니다.



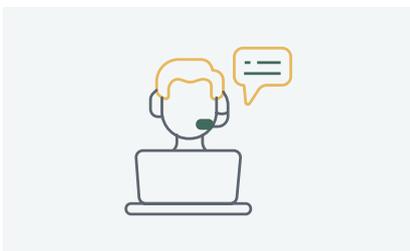
특히, 선도적인 PEM 공급사라면 실제 작동 조건에 준한 (또는 in-situ) 전기화학 분석을 수행하여 소재 변경으로 인해 시간이 지나면 발생할 수 있는 성능 저하 및/또는 전력 손실의 원인을 파악할 수 있어야 합니다.

그림 3.

PEM 비교

	단위	일반 PEM	GORE-SELECT® 멤브레인
두께	μm	25	15
프로톤 레지스터스 (Proton resistance)	mohm*cm ²	150	< 80
가속 스트레스 테스트 시 화학적 내구	Relative	1x	> 10x
가속 스트레스 테스트 시 기계적 내구	Relative	1x	10x
가스 투과성	mA/cm ² /MPa	17	30

기술 지원



PEM의 연구·개발, 생산, 상용화 단계를 거치다 보면 새롭고 기존과는 다른 제품 요구사항이 등장합니다. 자동차 기업의 특수한 애플리케이션 니즈를 충족하기 위해서는 이를 지원할 수

특히, 선도적인 PEM 공급사라면 실제 작동 조건에 준한 전기화학 분석을 수행하여 소재 변경으로 인해 시간이 지나면 발생할 수 있는 성능 저하 및/또는 출력 손실의 원인을 파악할 수 있어야 합니다. 또한 자동차 기업의 협력사는 현장에서 회수된 MEA/PEM 스택의 고장 모드(failure mode) 및 메커니즘을 진단하기 위한 연료전지 사후 분석이 가능한 툴을 보유하고 있어야 합니다.

또한 복잡한 문제를 해결하는 데 필요한 표면 분석, 발열/기계/화학 특성 정의, 화학 분석, 미세구조 분석 등 전 세계를 아우르는 포괄적인 분석 리소스가 뒷받침되어야 진정한 기술 지원이라고 할 수 있습니다.

안정적인 공급망



자동차 기업들이 연료전지 양산 단계로 이동하는 상황에서, PEM 제조사는 일관된 고성능과 높은 수율을 보장하는 동시에 제품 비용과 품질 리스크를 최소화해야 합니다. 원자재의 일관성 및 멤브레인 정밀 코팅 기술을 보유한 PEM

공급사는 셀 간 격차를 최소화함으로써 일관되고 탁월한 품질의 제품을 공급할 수 있습니다. (그림 4)

이에 따라 연료전지 스택 제조사들은 셀 내 및 셀 간 성능 편차를 정밀하게 제어할 수 있게 되어 스택 수율 확대, 비용 절감 및 스택 수명 연장의 효과를 누릴 수 있습니다.

원자재 공급도 중요한 고려사항입니다. 폭넓은 R&D 협업 및 협력사와의 굳건한 파트너십을 통해 오랜 기간에 걸쳐 검증된, 안정적인 원자재 공급망을 확보한 PEM 제조사는 소수에 지나지 않습니다.

게다가 고성능 PEM을 업계의 수요를 충족할 만큼 대량 공급할 수 있는 기업을 찾기란 더욱 어렵습니다. 고어는 이러한 역량이 성공의 핵심요소임을 인식, 독보적인 ePTFE 강화막에 대한 전문성과 글로벌 자원망을 활용하여 공급/공정 안정성 및 양산에서의 일관된 품질을 기하고 있습니다.

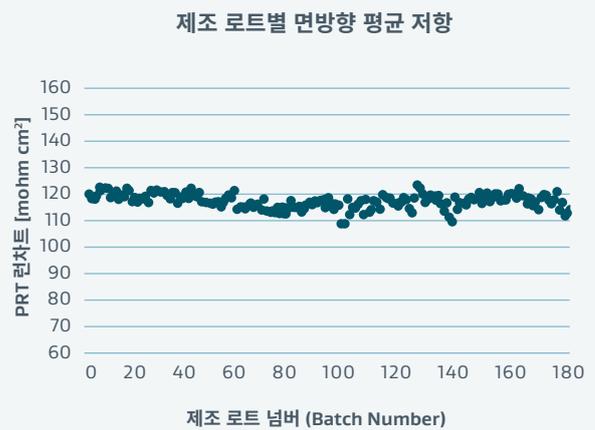
고어는 독보적인 ePTFE 강화막에 대한 전문성과 글로벌 자원망을 활용하여 공급/공정 안정성 및 양산에서의 일관된 품질을 기하고 있습니다.

그림 4.

180 로트에 대한 고어 PEM 양산 데이터



- 테스트 조건: 23°C 50% RH
- 표준편차: 0.3
- 180 로트



- 테스트 조건: 36°C 50% RH
- 표준편차: 3.2
- 180 로트

화물 운송 그 이상을 위한 연료전지 기술의 상용화

현재 연료전지 기술은 수소 승용차를 대상으로 효과적으로 개발, 적용 및 테스트되고 있습니다. 여기서 얻은 발전된 기술과 지식 덕분에 PEM 기술의 이점이 여타 교통 분야에도 적용될 수 있기에, 이는 매우 좋은 소식입니다. 연료전지 기술을 화물 운송용으로도 상용화할 수 있는 기반이 되는 것입니다.

상용 애플리케이션을 위한 연료전지 시스템 개발사들은 현재 고어의 PEM 기술 발전을 바탕으로 자사의 기술을 확장하기 위한 유사한 협업 모델을 모색하고 있습니다.

여기에는 확실한 이점이 존재합니다. 청정 수소 연료로 달리는 트럭은 보다 가벼운 연료전지 스택을 사용할 수 있어, 페이로드 및 효율성 개선 효과를 누릴 수 있고, 그 결과 경쟁이 치열한 해당 산업에서 핵심 성과지표인 총 소유비용 (TCO)을 절감할 수 있습니다.

결국 연료전지 스택 엔지니어들은 멤브레인 기술 전문기업과 협업해야 수소차 상용화를 위한 PEM, 스택 및 시스템 차원의 세 가지 니즈, 즉 신뢰할 수 있는 성능, 전문적인 기술 지원, 안정적인 공급망을 확보할 수 있습니다. 이를 통해 모든 유형의 자동차 기업들이 수소 중심의 미래에 대비할 수 있습니다.



저자소개:

Simon Cleghorn
E scleghorn@wlgore.com

Simon Cleghorn 박사는 W. L. Gore & Associates의 Global Product Specialist이자, 연료전지 및 기타 애플리케이션용 PEM 분야에서 25년에 달하는 경험을 쌓아온 전기화학자입니다.

고어 및 GORE-SELECT® 멤브레인에 대해 보다 자세한 내용이 궁금하시면 <https://kr.gore.com/alt-energy>를 방문해 주십시오.

W. L. Gore & Associates, Ltd.

고어(W. L. Gore & Associates)는 산업의 변화를 주도하고 삶의 질 향상에 기여하는 글로벌 소재 과학 기업입니다. 창립 이래 우주 공간에서부터 전 세계의 최고봉, 나아가 인체 내부에 이르기까지 까다로운 환경 조건에서의 복잡한 기술적 문제를 해결해 왔습니다. 고어에는 전 세계 12,000명 이상의 직원이 근무하고 있으며, 연 매출은 약 45억 달러에 달합니다.

보다 자세한 정보가 궁금하시면 <https://kr.gore.com>을 방문해 주십시오.

산업용으로만 사용이 가능합니다. 식품, 약품, 화장품 또는 의료기기의 제조, 처리, 포장 공정 용도로는 사용할 수 없습니다.

본 문서에 기재된 모든 기술정보 및 권고사항은 고어의 경험 및/또는 테스트 결과에 따른 것입니다. 고어는 본 정보가 사실이라는 신념 하에 공유하고 있으나, 이에 대한 법적 책임은 지지 않습니다. 제품의 성능평가는 제품의 작동과 관련된 모든 데이터가 있을 때 가능하므로, 특정 애플리케이션에 대한 적합성 및 유용성에 대한 별도 검증을 권고 드립니다. 상기 정보는 변경될 수 있으며 제품 스펙으로 사용될 수 없습니다. 본 제품은 고어의 약관에 의거하여 판매됩니다.

W. L. Gore & Associates는 ISO 9001 인증을 획득하였습니다.

GORE, GORE-SELECT, Together, improving life and designs are trademarks of W. L. Gore & Associates. ©2022 W. L. Gore & Associates, Inc.

INTERNATIONAL CONTACTS

호주	+61 2 9473 6800	일본	+81 3 6746 2570	남아공	+55 11 5502 7800
중국	+86 21 5172 8299	한국	+82 2 393 3411	대만	+886 2 2173 7799
EMEA	+49 89 4612 2211	멕시코	+52 81 8288 1283	미국	+1 410 506 7812
인도	+91 22 6768 7000	싱가포르	+65 6733 2882		

W. L. Gore & Associates, Inc.

서울 중구 통일로2길 16 AIA타워 17층 고어코리아

T +82 2 393 3411 F +82 2 393 1285 E performancesolutions@wlgore.com

gore.com/alt-energy

