

고분자 전해질 수소연료전지 스택모듈의 콤팩트화를 위한 분리판의 성형공정 해석

윤석일*, 최종인*, 김명환**, 조준현***

*한밭대학교 산학협력단, **한국자동차연구원, ***주식회사 넥스플러스

e-mail : mecha722@hanbat.ac.kr

Process analysis of bipolar plate for improving the compact stack module of proton exchange membrane fuel cell

Seok-Il Yoon*, Jong-In Choi*, Myong-Hwan Kim**, Joon-Hyeon Cho***

*Hanbat National University, **Korea Automotive Technology Institute,

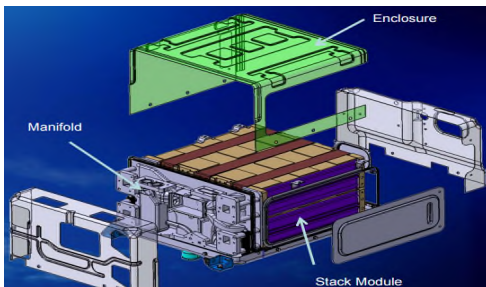
***NEXPLUS Inc.,

요약

본 연구는 친환경 미래자동차의 주력 기술인 고분자전해질방식의 수소연료전지의 소형화와 고성능화에 대한 연구이다. 수소차의 원가 및 성능에서 가장 큰 비중을 차지하는 스택의 고성능화 및 소형화는 향후 다양한 수소차의 본격 양산을 결정하는 가장 핵심적인 요소로 대두되고 있다. 이와 같은 수소차량의 스택 고성능화와 소형화는 단순히 스택이 작아지는 것만 의미하는 것이 아니라 핵심 부품인 전해질막, 전극, 분리판, 가스킷 등의 소재 사용량도 낮아지며, 원가 절감 효과가 나타나는 것을 의미한다. 이와 같은 콤팩트화는 단위 전지 셀의 피치 감소에 의해서 가능하며, 셀 피치의 65퍼센트를 차지하는 분리판의 최적설계가 핵심 연구 대상이 된다. 고분자 전해질막 방식은 스택의 출력 밀도를 높이기 위해, 물과 수소의 반응 면적을 높이면서도, 물배출이 용이한 분리판 유로 설계가 필수적이며, 단위 면적당 반응 면적을 최대한 증가시키는 S자형 유로가 나타나도록 유동해석과 성형해석의 최적화된 설계를 진행하여 반응면적을 27퍼센트 증가하는 효과를 가져옴을 확인할 수 있다. 이와 같은 S자 유로의 다공체분리판의 스탬핑 성형해석을 위해 해당 소재의 물성 평가와 이를 기반으로 외연적 적분기법을 기반으로 성형해석을 수행하여 패턴성형을 검증하였다. 스택의 소형화를 위한 차세대 기밀 공법으로는 기존의 EPDM고무 방식의 단점을 해결한 액상 실리콘방식의 인서트 사출의 도입이 필요하며, 이에 대한 기초 사출 성형 연구를 수행하여, 기존 방식과 그 결과를 비교하였고, 향후 상용화연구를 지속할 계획이다.

1. 서론

친환경 미래자동차의 주력 기술인 고분자전해질방식의 수소 연료 전지 기술이 날로 발전해 가고 있다. 수소연료전지 차량용 구동에는 약 100kW급 스택이 필요하며, 100kW급 스택은 약400개 이상의 연료전지 단위 스택이 1~2개 모듈 조합을 통해 구성된다.



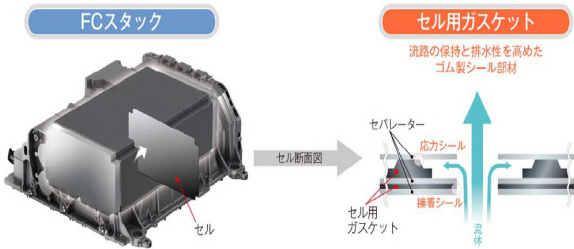
[그림 1] 현대 투산 수소 전기차의 스택 모듈

연료 전지차의 원가 및 성능에서 가장 큰 비중을 차지하는 스택의 고성능화 및 소형화는 향후 다양한 차종의 본격 양산 시 가장 핵심적인 요소로 대두되고 있다. 이와 같은 수소차량의 스택 고성능화와 소형화는 단순히 스택이 작아지는 것만 의미하는 것이 아니라 스택이 소형화됨으로 사용되는 주요 핵심부품인 전해질막, 전극, 분리판, 가스킷 등의 소재 사용량도 낮아지기 때문에 가격이 감소하는 효과가 나타나는 것을 의미한다.

이를 위해 스택 구조의 단순화, 소형화, 고성능 및 저가화 기술 개발을 위한 연구들이 진행되고 있지만, 아직 차량에 적용하기에는 기초 연구 단계이며, 특히 현대자동차는 220셀 정도를 한 모듈로 하여, 이를 2단 적층하여 차량용 스택을 제작하여 세계 최초로 연료전지 차량 양산을 시작하였으나, 향후 차종 다양화 및 본격 양산화에 대응하기 위해서는 부피 및 재료비 측면에 있어 제약이 있음이 보고되어 있다.

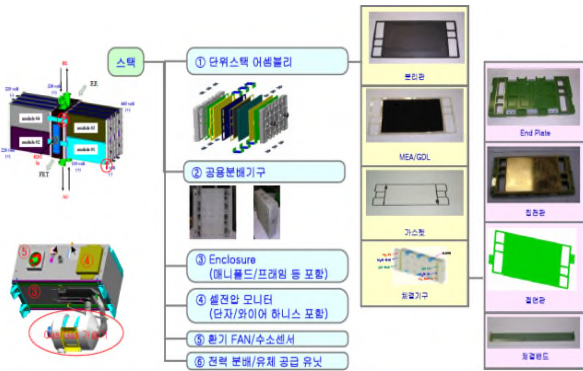
이에 대한 국제적인 기술 개발 동향을 살펴보면, 2014년에 출시된 도요타 미라이 연료전지차의 스택을 소형화할 수 있었던 것은 3D fine-mesh라는 새로운 분리판 기술과 수소,

산소 및 냉각수기밀성을 높여줄 수 있는 개스킷 소재를 개발 적용하였기 때문이며, 다공성 구조의 새로운 분리판 3D fine-mesh를 적용하여 기체 확산과 물 배출을 개선하여 스택 성능을 증가시킨 기술적 진보에 의해서 가능하였다.



[그림 2] 도요타 연료전지차에 적용된 스택 셀 기밀구조

현재 수소연료전지차에 대한 기술력은 국내 현대자동차와 일본 도요타가 독자적 기술을 가지고 있는 상태이며, 한국이 기술적 우위와 지속가능성을 확보하기 위해 고성능화 및 소형화, 부품의 독자 제조력 구축은 가장 중요한 사안이다.

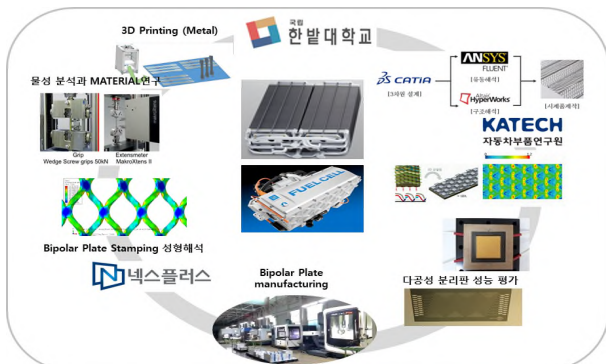


[그림 3] 연료전지 스택 부품 구성도

2. 연구 목표 및 연구 체계

2.1 연구 체계

본 연구를 위해 국립한밭대학교와 자동차부품연구원 (주)넥스플러스의 산학연 협력체제로 긴밀한 협조 연구를 진행하였다.



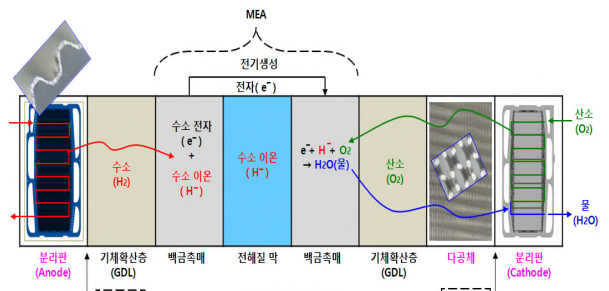
[그림 4] 본 연구의 체계

주)넥스플러스는 3차원 구조의 분리판을 미세구조로 성형하고 개발 금형의 평탄도 확보와 제품의 제조 기술 개발을 전

담하며, 연료전지 스택의 길이와 면적을 균일하게 유지하고, 반응 기체와 냉각수의 유동 및 차압을 안정적으로 유지하기 위한 유로형 분리판의 설계 검토와 물배출 유동 해석은 자동차부품연구원에서 핵심 역량을 확보하고, 분리판의 성형공정 해석시의 균일도와 크랙 발생 안정성 확보를 위한 스탬핑, 엠보싱 성형 해석은 한밭대학교 산학협력단에서 핵심 역량을 확보하였다. 다공체 분리판의 소형화와 치수 정밀도, 3차원 구조의 박판 다공성 분리판의 설계 및 개발을 위해선 유로 해석 및 성형 해석기술이 핵심이며, 기존 직선 유로형상은 유동이 층류형태로 나타나 해석이 용이하였지만 3차원 구조의 경우 난류 흐름이 형성되기 때문에 해석기술과 성형공정의 복합적인 검토가 중요하다. 본 산학연 클러스터 협업을 통한 기술 개발 체계를 구축하였다.

2.2 연구의 목표

■ 수소연료전지 스택을 소형화하기 위해서는 성능향상용 셀피치 감소와 분리판 기밀기술 개발이 필수적임



[그림 5] 단위전지(Cell) 구성도

① 셀피치 감소 : 셀피치는 스택을 구성하는 단위전지의 간격을 의미하며 셀피치가 낮아질 경우 스택 적층 두께가 감소하기 때문에 부피를 감소시켜 스택 소형화가 가능함

- 셀피치를 감소할 수 있는 방법은 단위전지를 구성하는 분리판(가스켓 포함), 전해질 막, 전극층, 기체확산층(GDL)의 두께를 저감시키는 것이 핵심임
- 단위전지 구성부품의 두께비율을 보면 분리판(가스켓 포함)이 65.3%(anode+cathode)로 가장 높음. 즉, 셀피치를 저감시키기 위해서는 분리판의 소재 두께 및 성형 후 두께를 최소화해야 가능함
- 3차원 구조 분리판의 연료전지 반응 표면적은 기존 직선유로 대비 2배 이상 증가하기 때문에 부식현상이 증가할 수 있어 접촉저항을 낮추기 위한 고내식성 소재 및 표면처리 기술의 조합이 요구됨

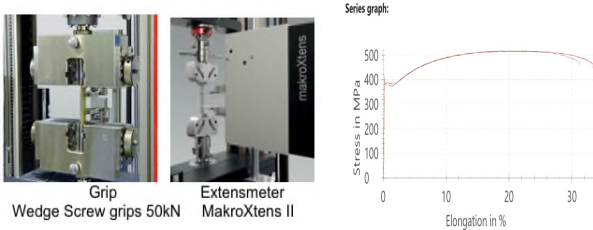
[표 1] 스택을 구성하는 단위전지의 셀피치

구성 부품	Anode			전해 질 막	Cathode			셀피치
	분리판	GDL	전극		전극	GDL	분리판	
두께 (mm)	0.5	0.3	0.01	0.02	0.01	0.3	0.7	1.84
두께비율 (%)	27.2	16.3	0.5	1.1	0.5	16.3	38.1	100

② 스택 셀 기밀 기술(Sealing technology) : 스택 셀을 구성하는 요소부품 (3차원 분리판, MEA(막전극접합체), GDL(기체확산층), 분리판, 개스킷)의 부피 저감을 통한 셀피치 감소는 스택의 소형화를 위해 필수적이나, 셀 내 기밀 및 셀 간 기밀 유지가 뒷받침되어야 한다. 또한, 스택 양산을 위한 셀 조립기술 증대와 수소, 공기 및 냉각수 누출 방지를 보다 효과적으로 할 수 있는 셀 부품 일체화 기술이 필요함

3. 연구 결과

3.1 분리판 재료의 물성 평가 및 Constitutive model 구축
 해당 재료의 비선형 물성에 대한 Constitutive Equation을 비선형 Stress-Strain Curve로 구축하였고, 이를 유한요소 해석에 반영하여 ABAQUS Material Lib.구동 처리하였다.

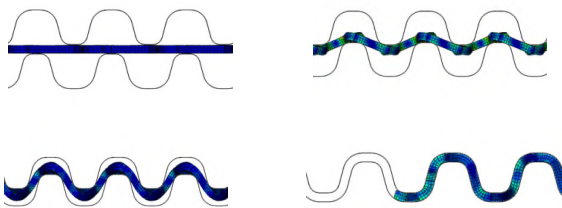


[그림 6] 분리판 재료 물성 평가

3.2 다공체 분리판의 설계 검증용 스탬핑 해석

수소연료전지스택용 다공체의 설계 및 성형 지원을 위한 HYPERWORK CAE TOOL과 비선형전문해석용 S/W ABAQUS를 기반으로 ① CAE MODEL구축과 ② 해석 프로세스, ③ 해석 결과의 PLOT과 분석등을 수행하였다.

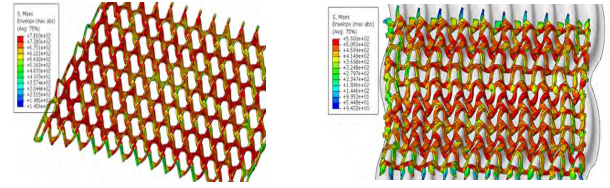
- Blank 피어싱 모델
- 펀치와 다이를 모델링하기 위한 RIGID BODY 모델 구성
- EMBOSSING성형 공정을 Solving하기 위한 외연적 적분 방식의 해석을 통해 다공체 분리판 성형공정의 해석을 수행하였다.



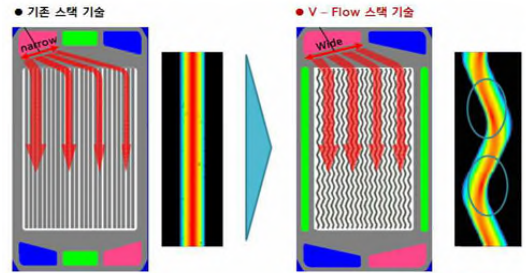
[그림 7] EMBOSSING 성형 해석 (TIME STEP별 결과)

3.3 반응 밀도 개선용 분리판디자인의 스탬핑 해석

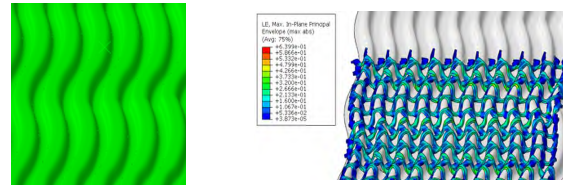
3차원 구조 분리판의 연료전지 반응 표면적을 개선하기 위해 S자형 유로형 다공체분리판을 설계하여 이의 성형 해석을 수행하였다.



일자형 유로 S자형 유로
 [그림 8] 다공체 성능 개선용 신규 디자인 검증



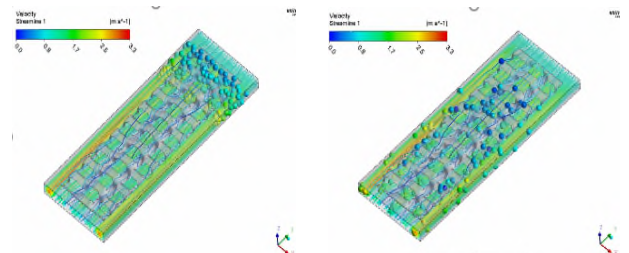
※ 직선유로 대비 확산 성능 개선



[그림 9] 반응 밀도 개선 분리판의 스탬핑 해석

3.4 분리판의 유로 해석(Computational fluid dynamics)

다공체 분리판 유로의 성능 예측을 위한 유동해석을 FLUENT를 이용하여 진행하였다. GDL In-Plane의 유속이 빠를수록 유선 형상이 복잡한 난류 형태가 나타나며, 이는 결과적으로 물 배출 및 가스주입에 유리한 조건이 될 것으로 기대되며, 난류도가 심할수록 압력강하가 발생하여, 최적의 교차점이 존재하는 것을 확인하였으며, 이에 대해선 추가적인 연구를 수행할 계획이다.



[그림 10] 분리판 유동 해석 결과 (유동장 가시화)

3.5 액상 실리콘고무(LSR)인서트 사출기술

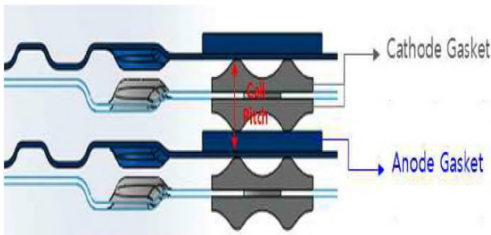
현재 수소전지스택용 기밀성 기술은 EPDM고무 가스켓을 사용하고 있으며 수소연료전지용 스택 분리판의 성형 공정 및 조립 과정은 그림14와 같은 제조 프로세스로 구성되고 있다.

[표 2] EPDM 분리판 가스켓 공정 및 조립 과정

구분	프레스성형	가스켓(사출)	다공판	코팅	접합/검사
명상					
내용	트랜스퍼 연속 성형 (Anode/Cathode분리판)	고무 사출 (Anode/Cathode분리판)	피어싱 성형	Au코팅	접합: 분리판+다공판 검사: 접촉저항, 기밀, 전수 등

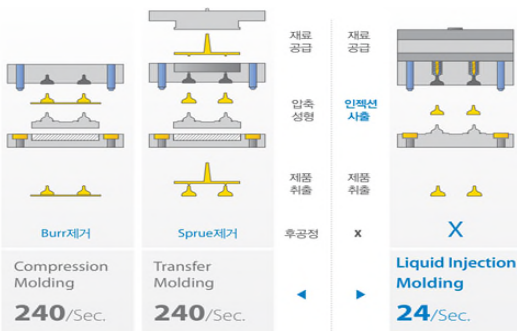
현재의 제조프로세스 상 EPDM 소재의 기밀방식은 하기와 같은 문제점을 갖고 있으며, 이를 개선하기 위한 방식으로 액상실리콘방식의 기밀 솔루션을 제안하고자 한다.

- ① EPDM 소재의 압축응력(기밀) 및 성형성 불량으로 인한 스택 소형화의 애로 문제 유발. 분리판의 셀피치 두께와 기밀문제는 반비례 관계임. 기존 EPDM 소재의 압축응력(기밀) 및 성형성 불량으로 인하여 각 제조사에서 소재 변경 검토가 지속적으로 개발되고 있는 상황임.
- ② 생산성 문제 : EPDM Gasket RIM성형공정으로 인한 Cycle time 증가로 인한 스택 생산량의 증량에 걸림돌이 되고 있음.



[그림 11] 분리판 가스켓 압축 전 조립도

그림 16에서는 액상실리콘 사출공법을 타 공법과 비교 성형-제조상의 장점을 기술하였다.



[그림 12] LSR 사출성형의 생산성 비교

[표 3] 액상 실리콘 사출 공정 비교

구분	EPDM 고무 사출성형	실리콘계열 사출성형
사출 재료 및 공정	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고무사출 (RIM성형공정) 칭량 → 배합 → 숙성 → 예비성형 → 성형 → Finishing... 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실리콘 사출(LSR성형공정) 칭량공급 → 혼합 → 플런저 투입 → 성형 (Insert 사출) → 탈형

EPDM 가스켓의 단점을 보완한 LSR (액상 실리콘고무)의 기밀 기술에 대한 기초 연구 결과 하기와 같은 기술적 장점을 기대할 수 있으며, 이에 대한 상용화 연구를 지속할 계획이다.

- ① 짧은 제조 공정과 사이클 타임의 단축을 통한 생산성 향상과 제조 원가 절감
- ② 수소연료전지 스택의 초박형 분리판을 구현하는 저점도의 액상 성형 공정 구현
- ③ 셀피치 감소를 통한 스택소형화로 수소연료전지차의 상용화를 가속화와 100kW/L에서 고성능화, 소형화를 통한 세단형, 보급형 수소차 사용화에 기여
- ④ 다공성 분리판 평가용 셀 설계 및 Pitch별 영향성을 분석하면, Pitch 1.0 → 4.0의 증가할수록 전극으로의 기체 확산이 원활하지 않아 성능이 낮으며, Pitch가 너무 좁을 경우 물배출의 유동 저항이 발생함.

4. 연구 결과 고찰 및 결론

수소차량의 스택 고성능화와 콤팩트화는 단위 전지 셀의 피치 감소에 의해서 가능하며, 셀 피치의 65퍼센트를 차지하는 분리판의 최적설계가 필수적이며, 스택의 출력 밀도를 높이기 위해, 물과 수소의 반응 면적을 높이면서도, 물배출이 용이한 분리판 유로 설계를 제안하였다. 단위 면적당 반응 면적을 최대한 증가시키는 S자형 유로가 나타나도록 유동해석과 성형해석의 최적화된 설계로서, 반응면적을 27퍼센트 증가하는 효과를 가져옴을 확인할 수 있다. 스택의 소형화를 위한 차세대 기밀 공법으로는 액상 실리콘방식의 인서트 사출공법에 대한 기초사출 성형 연구를 수행하여, 기존 방식과 그 결과를 비교하였고, 향후 상용화연구를 수행할 계획이다.

[참고문헌]

- [1] Xia Zhang, Oh Jung Kwon, and Byeong Soo Oh, "A Design of the cooling channel in the bipolar plate of PEMFC using experimental design method", KSAE, Vol.23, No.5 pp 545-552 2015
- [2] Young sung Kim and Cheol Kim, "Optimization of automotive PEMFC bipolar plates considering heat transfer and thermal loads", KSAE, Vol.23, No.1, pp34-40, 2015
- [3] Kyung don Kim, Sung il Kim, Im mo Kong, and Min soo Kim, "Development of a PEMFC system for vehicle application", KSAE, Conference, 2012
- [4] ABAQUS, Theory guide
- [5] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, "The finite element method", Vol.1&2, 1989
- [6] HYPERWORK, User Manual
- [7] AUTODESK MOLDFLOW, Manual