

고분자 연료전지 시스템의 전산설계 및 해석

Computer-Aided Design and Analysis of
Polymer Electrolyte Fuel Cells

한국에너지기술연구원

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “고분자 연료전지 시스템의 전산설계 및 해석” 과제의 보고서로 제출합니다.

2006 . 4

주관연구기관명 : 한국에너지기술연구원

주관연구책임자 : 이 원 용

연 구 원 : 김 창 수

” : 윤 영 기

” : 양 태 현

” : 엄 석 기

” : 임 성 대

” : 박 구 곤

국제공동연구기관명 : 중국 DICP

공동연구책임자 : 李 相 一

보고서 초록

과제관리번호	M6-0302-00-0057	해당단계 연구기간	2003.7.1-2006.3.31	단계 구분	1 단계/ 1 단계	
연구사업명	중 사업명	국제공동연구사업				
	세부사업명					
연구과제명	중 과제명	고분자 연료전지 시스템의 전산 설계 및 해석				
	세부(단위)과제명					
연구책임자	이 원 용	해당단계 참여연구원수	총 : 7 명 내부 : 7 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 230,000 천원 기업: 천원 계: 230,000 천원	
연구기관명 및 소속부서명	한국에너지기술연구원 고분자연료전지연구단		참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :	중국	상대국연구기관명 :Dalian Institute of Chemical Physics			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :				
요약					보고서 면수	281
<p>본 연구는 연료전지자동차, 가정용 코제너레이션 연료전지, 휴대용 연료전지 등에 적용되는 고분자 전해질 연료전지 시스템의 실용화를 위해 필요한 연료전지 스택 설계 및 시스템 해석 기술을 개발하기 위한 것이다. 반응가스 공급과 집전체 역할을 하는 분리판 설계를 위해서는 유로 채널 크기와 유동장 형상설계를 위한 프로그램을 개발하였으며 설계된 분리판의 유동장과 압력, 온도분포 등을 3차원으로 계산하여 성능을 검증하기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 스택의 경우도 분리판과 마찬가지로 설계를 위한 프로그램과 설계된 형상을 해석하기 위한 별도의 프로그램을 개발하여 사용하였다. 분리판의 열유체 해석을 위해서는 질량, 운동량, 에너지 보존방정식과 더불어 전기화학반응을 모델에 포함시켰으며 유동장은 물론 온도와 전기적인 특성도 동시에 해석할 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 고분자 전해질 연료전지의 대표적인 적용 시스템인 가정용, 자동차용, 그리고 휴대용 연료전지에 대한 해석을 수행하였다. 시스템 설계 기술 개발을 위해서는 독립적으로 운전 가능한 코제너레이션 고분자 연료전지 시스템을 대상으로 해석 프로그램을 개발하였다. 이를 위하여 스택을 비롯하여 연료변환기, 공기 공급장치, 냉각장치, 이차전지 보조전원, 열저장조, 전력변환기 등에 대한 모델식을 유도하였으며 이를 이용한 해석 프로그램을 작성하여 종합적인 연료전지의 개념설계와 성능예측이 가능하도록 하였다.</p> <p>본 연구 결과는 연료전지 자동차, 연료전지 이용 소형 코제너레이션 시스템, 무정전 전원장치, 그리고 IT용 연료전지 시스템 시스템의 설계와 성능 예측 기술로 활용될 수 있다.</p>						
색인어	한 글	고분자 전해질 연료전지, 컴퓨터 이용 설계, 수치해석, 바이폴라 플레이트, 스택				
	영 어	polymer electrolyte fuel cell(PEFC), computer-aided- design, bipolar plate, stack				

요 약 문

I. 제 목

고분자 연료전지 시스템의 전산 설계 및 해석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

에너지절약과 환경공해 문제 그리고 최근에 부각되고 있는 지구 온난화 문제 등을 해결하기 위해 발전 및 동력 분야에서 기존의 기술에서 벗어나 고효율 환경친화성 시스템으로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 가장 유망한 것이 연료전지 기술이다. 연료전지는 화학에너지를 연소과정 없이 전기에너지로 변환시키는 전기화학 적 발전 설비이다. 즉, 직접 수소와 산소를 화학적으로 반응시켜 전기를 얻기 때문에 전 지 자체의 효율은 60%정도로, 연료를 연소시켜 열로 변환시킨 후에 동력이나 전기로 변 환시키는 종래의 열기관에 비해 에너지 변환 효율이 높다. 종합화된 연료전지 시스템의 성능은 현재 가장 성능이 우수한 마이크로 가스터빈 발전기 효율인 25%보다 높은 35% 이상이며, 이와 같은 고효율을 소용량 저출력 영역에서도 달성할 수 있는 장점이 있다.

연료전지 중 고분자전해질 연료전지(polymer electrolyte fuel cell, PEFC)는 전해질로 액체를 사용하지 않고 고분자 막을 사용하는 연료전지로 취급이 용이하고, 다른 종류의 연료전지에 비해 부피와 무게가 작고 상온에서 동력밀도가 높으며 시동과 정지가 용이한 장 점이 있다. 이러한 특징을 살릴 수 있는 분야로, 소형 가정용 코제너레이션 시스템, 이동형 전원 시스템과 자동차용 동력시스템으로 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

고분자 전해질 연료전지의 중요성에 비해 미국 일본 등의 선진국이나 중국 등의 연 구 예산에 비해 1/10 정도로 국내 연구개발 예산이 적으나, 최근에 정부주도로 집중적인 투자가 이루어져 종래의 단위셀과 전극전해질 그리고 스택을 위한 기반 연구보다는 실 용화를 위한 시스템의 구성과 실증연구가 활발히 이루어지고 있다. 고분자 연료전지에 대한 기술은 각국이 국가적인 지원과 기업체의 막대한 예산을 바탕으로 소재와 부품 그 리고 시스템을 위한 연구가 진행되고 있으며 기술 이전은 거의 이루어지지 않고 있으며 각국에서 경쟁을 통해 자체적으로 기술을 개발하고 있다. 현재 선진국의 경우 고분자전

해질 연료전지는 기술적으로는 셀의 개발 단계가 거의 완속기로 접어들어 가격 저감화, 내구성 및 신뢰성 향상에 주력하고 있는 한편 종합 시스템 연구에도 주력하고 있다. 국내의 경우도 핵심부품인 전극전해질의 성능은 상용화된 선진국의 제품 수준을 거의 따라가고 있다. 따라서 주어진 전극전해질을 이용하여 연료전지를 최적으로 설계하고 설계된 전지를 바탕으로 한 전체 시스템을 최적화시키는 것이 시스템 개발의 관건이 될 수가 있다. 연료전지의 성능 최적화를 위해서는 주어진 전극전해질에 최적의 가스공급과 수분, 압력, 온도 등 공정의 조절이 필요하며 이를 위한 분리판(바이폴라 플레이트)의 해석과 분리판이 적층된 스택의 유동장 해석이 필요하다. 본 연구는 그동안의 실험적으로 진행되어온 소재와 부품연구에서 탈피하여 컴퓨터를 이용한 연료전지와 시스템의 설계 및 해석 기술을 확보하는 것을 목적으로 연료전지의 유동장과 연계된 전기화학적 해석기술 및 시스템의 종합적인 해석 기술을 바탕으로 컴퓨터를 이용한 연료전지의 유동장과 시스템의 체계적인 설계 및 종합화 기술을 개발하기 위한 것이다.

연료전지는 연료 중의 수소와 공기 중의 산소를 이용하여 직접 전기를 발생시키는 전기화학설비로 반응 활성면적 전체에 걸쳐 수소와 산소의 균일한 공급이 중요하다. 연료전지에서 분리판은 연료전지 반응에 필요한 산화가스와 연료가스를 양면으로 공급하고 단위 전지의 양극과 음극을 직렬로 연결시켜 주는 전도체의 역할을 동시에 수행한다. 따라서 전도체의 역할을 수행하면서 반응에 필요한 가스를 공급하기 위해 유로 채널을 만들어야 한다. 또한 채널의 형태와 단면 크기는 가스 공급뿐만 아니라 고분자 전해질 막의 이온전도에 필요한 수분을 공급하고 배출하는데 영향을 준다. 수분을 원활히 배출하기 위해서 입·출구 가스의 채널에 압력차를 주어 상대적으로 저압상태인 출구에서 팽창된 가스로 하여금 많은 수분을 함유하여 배출될 수 있도록 채널이 설계되어야 한다.

연료전지의 실용화를 위해서는 요소 기술과 더불어 시스템의 설계기술 확립되어야 한다. 연료전지 시스템의 성능은 압축기와 전력변환기 등의 부품 성능과 더불어 연료 및 산화제의 이용률, 압력, 온도 그리고 공급가스 습도 등 운전 조건에 의해 변할 수 있으므로 이런 조건들에 따른 시스템의 정밀한 해석과 이를 통한 최적 설계가 필요하다. 실용적인 설계 및 성능 예측 프로그램 개발을 위해서는 가능한 많은 운전조건에서의 성능 실험자료와 설계기준 등이 설계 및 검증에 위해 채용되어야 한다. 적용시스템에 따라 다양하게 설계 운전될 수 있는 고분자 전해질 연료전지의 실용화를 위해서는 시스템 개발의 경험이 있는 국내외 기관과의 공동 연구를 통해 서로 공유가 가능한 부품과 시스템의 실험 자료를 기반으로 한 설계 및 해석 프로그램을 개발할 필요가 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

분산형 발전 시스템과 전기 자동차용 전원으로 사용될 수 있는 고분자 전해질 연료전지의 실용화를 위해서는 핵심소재 기술개발과 더불어 시스템 설계 및 해석기술이 필요하다. 본 연구는 스택과 스택의 핵심 구성품인 분리판의 유동장 설계와 종합 시스템의 컴퓨터 이용 설계를 위한 해석 프로그램을 개발하기 위한 것이다. 연료전지 스택과 스택을 구성하는 분리판을 포함한 전극전해질 등 핵심요소는 형상과 반응의 복잡성으로 인해 컴퓨터를 이용한 유동 해석이 필요하다. 연료전지 시스템은 스택 이외에 압축기 등 공기 공급설비, 연료공급설비, 냉각 및 열관리 설비, 그리고 제어 및 전력변환기 등으로 구성되며 적용 시스템에 따라 부품들의 특성과 조합이 달라질 수 있어 최적 구성과 설계를 위해서 별도의 시스템 해석 프로그램이 필요하다. 분리판, 스택 그리고 시스템의 컴퓨터 이용 설계와 해석 기술 개발을 위해 수행된 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

- 분리판(바이폴라 플레이트)을 설계를 위한 연료전지 내부 유동장 해석 프로그램 개발
 - 유동장 및 전기화학 반응을 위한 모델식 정립
 - 컴퓨터를 이용한 3차원 유동장 해석 프로그램을 개발
 - 단위 전지 구성 요소인 연료, 공기, 냉각을 위한 분리판 설계 및 전산 해석
 - 자기 호흡식 연료전지를 위한 자연 대류 포함 해석 프로그램 작성

- 분리판 유동 채널 형상 결정 및 최적 설계
 - 다양한 분리판 유동 패턴 분석을 통한 최적 유동 패턴 결정
 - 바이폴라 플레이트 유동 형상 및 채널 크기에 따른 성능 실험
 - 자기 호흡식 연료전지를 위한 채널 설계 범위 및 형상 결정
 - 자기 호흡식 연료전지의 전산해석 및 실험 비교

- 스택의 유동장 최적 설계를 위하여 매니폴드 설계와 해석 수행
 - 매니폴드 형상 설계 및 해석
 - U자형과 Z자형 매니폴드의 유동 특성 분석
 - 입구 연결관의 길이에 따른 유량 분배 특성 분석
 - 스택 분리판 채널 깊이에 따른 유량 분배 성능 비교

- 열전달 고려한 냉각수 유량 분배 특성 분석

o 연료전지 시스템 열역학적 해석

- 개질기를 포함한 가정용 연료전지를 해석하기 위하여 각 부품별 모델식 유도 및 전산 해석 프로그램 구성
- 열 및 전기 부하에 따른 연료전지 시스템 성능 예측

IV. 연구개발결과

본 연구는 고분자 전해질 연료전지 시스템의 실용화 개발을 위해 반드시 필요한 연료전지 스택의 유동장 설계 및 연료전지 시스템 해석 기술을 개발하기 위한 것이다. 반응가스 공급과 집전체 역할을 하는 분리판 설계를 위해서는 형상설계를 위한 프로그램과 설계된 분리판의 성능 예측을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 스택의 경우도 분리판과 마찬가지로 설계를 위한 프로그램과 설계된 형상을 해석하기 위한 별도의 프로그램을 개발하여 사용하였다. 분리판의 열유체 해석을 위해서는 전기 화학적반응을 모델에 포함시켰으며 유동장은 물론 온도와 전기적인 특성도 동시에 해석할 수 있도록 하였다. 독립적으로 운전 가능한 코제너레이션 고분자 연료전지 시스템을 대상으로 모델식을 유도하여 운전방법과 연계한 해석 프로그램을 개발하여 시스템 설계 및 성능예측에 사용할 수 있도록 하였다.

o 모델식 유도

연료전지 스택내부의 열 유동 분석과 각종 주변 운전장치가 연계된 종합 시스템의 성능을 분석할 수 있는 별도의 모델식과 해석 프로그램을 개발하여 사용하였다.

- 채널, 매니폴드 및 가스확산층 등의 다공성 매질을 포함한 유동 방정식 정립
- 전극촉매층과 전해질막에서의 화학 반응과 습도 분석을 위한 방정식 정립
- 3차원 유동장 해석 프로그램 개발:
- 유동장 해석을 위한 상용 유동 해석 프로그램과 전기화학반응 계산을 위한 사용자 프로그램의 연계 해석
- 독립 운전되는 고분자 전해질연료전지 시스템 해석을 위한 스택, 개질기, 공기 압축기 등의 특성 방정식 유도 및 해석 프로그램 작성

- 분리판 최적화를 위한 응력해석과 최적화 방법 정립

o 분리판 설계

연료전지 성능에 중요한 역할을 하는 분리판의 최적 설계를 위해서 고려할 사항은 채널을 통한 균일 유량분배, 채널에 응축된 물배출 그리고 채널에서의 압력손실의 최소화 등이며 이를 위한 기준을 실험과 이론을 통해 도출하여 실제 설계에 사용하였다. 분리판 각 채널에서 균일한 가스 공급과 물배출은 채널입출구의 압력차에 영향을 받으며, 운전 조건에서 적절한 압력을 유지할 수 있도록 분리판 설계 프로그램을 구성하였다. 작성된 설계 프로그램을 통해 연료, 공기, 냉각을 위한 분리판 채널과 리브의 크기와 수 그리고 길이 등을 결정할 수 있어 기본적인 설계 제원을 확보할 수 있다.

o 분리판 해석

다양한 분리판 형상에 대한 유동장 해석을 통해 최적 유동 패턴으로 사행 (serpentine) 채널을 결정하였다. 설계 프로그램을 통해 유동 패턴과 채널 크기가 결정된 분리판의 성능 검증을 위해 전산해석에 의해 유량분배, 압력 분포 그리고 온도 분포를 계산하였다. 또한 기존의 형태와 다른 새로운 패턴의 분리판을 설계한 경우 검증 실험을 수행하여 계산의 정확성과 실제적인 유량 분포를 확인하였다.

o 분리판의 응력 해석을 통한 구조 최적화

분리판의 두께와 채널의 크기에 따른 응력 해석을 수행하여 최적의 두께를 계산할 수 있었으며 이를 통해 크기를 최소화한 연료전지 설계가 이루어질 수 있도록 하였다. 가스확산층의 구조 변형을 고려한 유동 특성을 분석하여 가스확산층 변형이 채널의 유동과 압력손실에 크게 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 지금까지는 분리판 채널 설계에서 가스확산층의 변형을 고려하지 않은 정사각형 채널에서의 압력손실을 설계 기준으로 사용하여 실제로는 높은 값의 압력손실이 발생하였다. 스택 체결력에 의해 변형된 가스확산층에 의해 감소되는 실제 단면적을 고려하여 채널 크기를 설계하여 설계의 정확도를 높일 수 있었다.

o 스택 설계 해석

스택에서 각 분리판으로 균일한 가스 공급과 배출을 위해서는 매니폴드와 스택으로의 가스 인입부와 배출부의 설계가 중요하다. 분리판의 매니폴드 크기는 스택의 용량으

로 산출되는 공급유량을 기준으로 결정되어야 한다. 복수의 단위전지가 적층되어 구성된 스택의 유동 균일 분배를 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- 스택의 유동장 최적 분배 매니폴드 형상 설계 및 해석
- 스택으로의 가스 인입부 대한 유동 해석을 통한 형상 설계
- 입출구 매니폴드 유동 방향에 따른 유동 균일성 해석을 통한 최적 매니폴드 채용
- 채널의 크기 변화와 매니폴드의 유량 분배 특성과의 상호 연관성 해석

o 연료전지 시스템 설계 및 해석

연료전지 시스템은 핵심 부품인 스택 이외에 공기 공급설비, 연료 변환 및 공급설비, 냉각 및 열저장 설비, 물관리 설비, 그리고 제어 및 전력변환기 등으로 구성되며 시스템의 설계와 운전조건을 예측하기 위해서는 종합적인 시스템으로서의 해석이 필요하다. 본 연구에서는 개질기를 포함한 가정용 코제너레이션 연료전지를 중심으로 각 부품에 대한 특성식이나 모델식을 유도하여 전산 해석 프로그램을 구성하였으며 주어진 수요부하와 운전 방법에 따른 성능을 분석하였다.

본 연구는 고분자 전해질 연료전지 스택 및 시스템의 기계적 설계와 성능예측을 위한 컴퓨터 이용 해석 기술을 개발하기 위한 것이다. 본 연구를 통해 개발된 프로그램을 활용할 경우 다양한 용도와 용량, 그리고 반응가스의 종류에 상관없이 주어진 소재의 성능을 최대로 구현할 수 있는 고효율의 스택 설계가 가능해질 수 있으며, 시스템 측면에서는 주변 운전장치의 최적화도 가능해질 수 있다. 체계적인 고분자 전해질 연료전지 설계와 성능 예측을 통해 연료전지 시스템의 효율과 물론 동력밀도를 높일 수 있어 상용화를 촉진시킬 수 있을 것이다.

V. 연구개발결과의 활용계획

미국, 일본, 독일의 경우 이미 Prototype 연료전지 자동차의 개발을 마치고 시범운전을 하고 있으며 주택용 연료전지의 경우도 일본에서는 2005년까지 실용화 연구를 마치고 5년간의 실증 실험과 대규모 모니터링 사업을 통해 실용화 기술을 확립하여 2010년부터 보급시키려는 계획으로 국가 주도 프로젝트가 수행되고 있는 등 연구개발과 보급이 가속화 되고 있다. 국내의 경우도 기술 개발과 더불어 실용화를 가속시키기 위해 가정용 연료전지시스템과 연료전지 자동차를 위한 모니터링 사업이 진행중에 있다. 연료전지 시스템을 상용화시키기 위해서는 소재 개발을 통한 가격 저감 기술 확보는 물론 시스템의 설계 최적화를 통한 성능 향상과 신뢰성 확보가 필요하다.

본 연구는 고분자 전해질 연료전지 분야에서 경쟁력 있는 기술 확보를 위해 컴퓨터를 이용한 체계적인 설계와 해석기술을 개발하기 위한 것으로, 결과는 연료전지 자동차, 연료전지 이용 소형 코제너레이션 시스템, 무정전 전원장치, 그리고 IT용 연료전지 시스템 시스템의 설계 기술로 활용될 수 있다. 활용방안을 정리하면 다음과 같다.

- 고분자 전해질 연료전지 스택 및 분리판의 독자적인 개발에 이용
- 가정용연료전지 등 분산형 코제너레이션 시스템 성능 예측 및 설계 기술로 활용
- 자동차, 전기 스쿠터, 잠수함 등 수송용 기계의 연료전지 전원 설계 기술로 활용
- IT용 연료전지 등 고효율 휴대용 연료전지 전원 개발에 활용
- 잠수함, 전동차용 등 다양한 용도의 연료전지 시스템 개발 시 설계 및 성능예측 기술 제공
- 고분자 전해질 연료전지 설계, 제작 표준화 기술로 활용
- 고분자 전해질 연료전지 스택 및 시스템의 성능 평가 도구로 활용
- 연료전지 운전제어기 개발에 활용
- 연료전지 설계 패키지 상용 프로그램 개발에 활용

S U M M A R Y

I. Title

Computer-aided Design and Analysis of Polymer Electrolyte Fuel Cells

II. Background and Objective

Fuel cells are one of the most promising technologies for reducing global warming gas and meeting national energy saving policy.

A fuel cell is electrochemical device that convert chemical energy of fuel directly to DC electricity and heat in a very clean and efficient process without combustion. Fuel Cell efficiencies are greater than 40%, which are higher than conventional power conversion systems. Electric conversion efficiency of residential fuel cell systems is generally 35 %. A polymer electrolyte fuel cell(PEFC), using a thin proton conductive polymer membrane as the electrolyte, is compact in size, simple to handle, and work at low temperature, which means possibility of quick start and stop. Because of these advantages, PEFC can be applied to transportation systems, potable powers and residential cogeneration systems.

The fuel cell program's major activities are concentrated on research of advanced materials including MEAs at the single cell level, system integration, and demonstration. It is very important to increase performance and durability and to reduce materials and fabrication costs for early commercialization. For this purpose, optimization of stacks is inevitable. Analytical and numerical calculation including computational method can be used as a useful tool for bipolar plate and stack design.

The separators(flow field plates or bipolar plates) have flow channels on their surfaces to supply reactant gases. The channel geometry and flow directions are different on the anode and on the cathode.The choice and optimization of flow field

geometry of the bipolar plates and stacks affects the performance of PEFC because of gas, water and temperature distributions and electric resistance. When designing bipolar plates and stacks, even flow distribution, water removal and minimizing pressure drop and electric contact resistance should be considered for proper performance especially for large active area cells operated in practical conditions.

In small stacks, the air as the reactant gas of the cathode can be supplied by free convection or with the small fan. If these methods are used, the cathode channel should be parallel straightend of channel be open to the outside air to reduce pressure drop. But in large stacks for residential and vehicle applications, the multiple serpentine channel type is generally used to satisfy the design requirement, low pressure drop, water removal and even flow distribution. For design and prediction of the performance of bipolar plates and stacks with complex patterns, numerical analysis using computational fluid dynamics (CFD) program is unavoidable to calculate flow, thermal and current distributions. The experimental test at the design stage is conducted for the basic design data which can be used to choose optimal geometry and size of bipolar plates and stacks. Single cells and sub stacks are used to obtain the design criteria and to evaluate the performance of full stacks.

Fuel cell stacks require fuel, oxidant and coolant to generate electricity continuously. The flow rate, pressure, and temperature of each streams must be controlled. The fuel cell system consists of a stack, a fuel supply system, an air supply system, a water and thermal management system, and a power conversion and control system to supply reactants and maintain proper stack operation condition. A computer simulation program can be used to estimate the PEFC performance. Various component characteristics and control strategies are necessary for the simulation program to find practical design and operation conditions.

The main objective of this study is to develop the computer-aided design schemes of bipolar plates, stacks, and systems for PEFC based on numerical analysis. The partial objectives are as following;

- Develop and validate models for bipolar plate, stacks

- Perform bipolar plate and stack design
- Development of lumped parameter fuel cell models to analyze PEFC systems
- Evaluate steady-state performance of PEFC systems for combined heat and electric power

III. Research Scope

In order to develop the practical PEFC systems, not only core elementary technology for materials, such as electrode and membrane, separator and membrane and electrode assemblies (MEAs), but also design and analysis technologies are necessary. The approach for developing computer-aided design scheme includes two paths: i) determine the configuration and channel and rib size of bipolar plate, and manifold size of stacks with the simplified design program and ii) numerical analysis of bipolar plate and stacks to evaluate the performance and rigidity as followings.

- o Develop the flow field analysis program for bipolar plate optimization
 - develop models for bipolar plate including electro chemical reaction
 - establish three dimensional numerical analysis scheme based on computational fluid dynamics
 - design and analyze flow fields of oxidant, fuel and coolant plate
 - establish numerical analysis program for air-breathing PEFCs, which include natural convection equations
 - optimal design of flow configuration and channels for bipolar plates
 - decide flow pattern in a bipolar plate
 - design flow channel and validate flow and pressure distributions
 - channel optimization for an air-breathing PEFC

- o Design and validate fuel cell stack based on numerical analysis
 - choose optimal manifold configuration
 - compare two different types of manifolds, U- type and Z-type manifold

- analyze flow distribution depending on the length of the stack entrance pipe
 - analyze the effect of channel size on the flow distribution
 - design and analyze a coolant plate including heat transfer effect
- o Performance analysis of integrated PEFC systems using the computer program
 - develop the computer simulation program for hybrid PEFC systems including a stack, a reformer, BOPs, a battery pack, a thermal storage system, and a controller.
 - estimate thermal and electric performances of PEFC systems for combined heat and electric power

IV. Results

The computer-aided design and analysis schemes of bipolar plates, stacks, and systems for PEFCs has been established. The following activities were done to develop for this purpose.

- o developed comprehensive computer model for PEFCs including electrochemical reactions
- o conducted experiments to obtain design criteria
- o developed a 3-D single phase model for hydrogen feed single cells
- o applied numerical method to analyze bipolar plate and stack flow field
- o analyzed and compared different flow patterns of bipolar plate
- o compared and chose optimal manifold type from U-type and Z-type
- o completed detailed bipolar plate and stack design
- o performed numerical analysis of a air-breathing PEFC to find optimal size of air channels
- o demonstrated the feasibility of computational schemes for design and analysis of PEFCs

- o developed the system simulation program using fuel cell component models and characteristic equations
- o estimate performance of PEFC systems for combined heat and power at the concept design stage
- o calculate a system performance for optimal control strategy

C O N T E N T S

Chap. 1 Introduction	27
Sect. 1 Background and objectives	27
Sect 2. Research Scopes	30
Chap. 2 State of Arts	34
Sect. 1 Bipolar plates and stacks	34
Sect 2. Polymer electrolyte fuel cell systems	55
Chap. 3 Flow field and structure analysis of bipolar plates	61
Sect. 1 Design and analysis of Bipolar plates	61
Sect 2. 3-D analysis of an air-breathing PEFC	105
Sect 3. Structure analysis and optimization of bipolar plates	136
Chap. 4 Flow dynamics analysis of fuel cell stacks	167
Sect. 1 Manifold flow analysis for stacks	167
Sect. 2 Flow field design and analysis of PEFC stacks	185
Chap. 5 Design and analysis of fuel cell systems	193
Sect. 1 Design and analysis schemes	193
Sect 2. Modelling and load analysis	195
Sect 3. Discussion of simulation results	221
Chap 6 Results and achievements	235
Sect. 1 Conclusions	235
Sect. 2 Attainment and contribution	239
Sect. 3 Application	241

Chap. 7	Technical Information	244
Sect. 1	World Hydrogen Energy Conference	244
Sect. 2	2004 Fuel Cell Seminar	254
Sect. 3	2005 Fuel Cell Seminar	260
Sect. 4	PEFC technology in China	266
Sect. 5	PBFC2	273
Reference		279

목 차

제 1 장 서론	27
제 1 절 연구 배경 및 필요성	27
제 2 절 연구 내용 및 범위	30
제 2 장 국내외 기술개발 현황	34
제 1 절 분리판, 스택 기술	34
제 2 절 시스템 기술	55
제 3 장 수냉식 분리판 설계 및 해석	61
제 1 절 유동 해석	61
제 2 절 공기호흡식 연료전지의 3차원 수치 해석 및 설계	105
제 3 절 분리판 구조해석	136
제 4 장 연료전지 스택 설계 및 해석	167
제 1 절 매니폴드와 인 입구 설계 및 해석	167
제 2 절 스택 설계 및 해석 기술	185
제 5 장 연료전지 시스템 설계 및 해석	193
제 1 절 시스템 해석 기술 개요	193
제 2 절 시스템 모델 및 부하 분석	195
제 3 절 해석 결과 분석	221
제6장 연구 결과 목표 달성도 및 활용계획	235
제1절 연구 결과	235
제2절 연구 개발 목표 달성도 및 대외 기여도	239
제3절 연구개발 결과의 활용 계획	241

제 7 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	244
제 1 절 세계 수소학회(World Hydrogen Energy Conference)	244
제 2 절 2004 연료전지 세미나	254
제 3 절 2005 연료전지 세미나	260
제 4 절 중국 연료전지 기술	266
제 5 절 PBFC2 고분자 연료전지기술	273
 참 고 문 헌	 279

그림 목차

[그림 2-1] 분리판의 기능	35
[그림 2-2] 분리판 유동 채널 형상	37
[그림 2-3] Ballard 분리판 설계 특허 (1998)	38
[그림 2-4] 점진적으로 변하는 유로 단면을 갖는 분리판 채널 형상	39
[그림 2-5] 실린더 형상 반응가스 채널의 분리판	41
[그림 2-6] 가스채널 입구부의 유로 형상	42
[그림 2-7] 발라드사의 스택 구조	43
[그림 2-8] 하이브리드 반응가스 분리판 유로	44
[그림 2-9] UTCFC의 실링기술을 포함한 스택기술	44
[그림 2-10] 혼다 연료전지 분리판 디자인	46
[그림 2-11] GM사의 금속 분리판 구조	47
[그림 2-12] GM사 스택의 내부 구조	47
[그림 2-13] 후지사의 스택 구조	48
[그림 2-14] Intelligent Energy사의 스택 구조	50
[그림 2-15] 독일 ZSW사의 소형 스택 구조	51
[그림 2-16] 대만 Asian Pacific사의 스택 구조	52
[그림 2-17] Plug Power사의 스택 내부 구조	53
[그림 2-18] Plug Power사의 스택 외형 구조	53
[그림 2-19] 주택용 연료전지 개념도	58
[그림 2-20] 연료전지 코제너레이션 시스템 구성도	58
[그림 2-21] 가정용 연료전지 효율 및 에너지 손실	59
[그림 3-1] 연료전지 설계 과정	61
[그림 3-2] 연료전지 스택 셀 적층수 결정 과정	63
[그림 3-3] 연료전지 분리판 반응/활성 면적 선정 과정	64
[그림 3-4] 연료전지 전산 해석과 최적화 과정	66
[그림 3-5] 연료전지 분리판 설계시 고려해야 할 작동조건 및 환경조건	67
[그림 3-6] 고분자 전해질 연료전지 스택 및 분리판 입구 온도 영향	68

[그림 3-7] 연료전지 운전 온도에 따른 포화수증기압 곡선의 변화	69
[그림 3-8] 반응가스 채널에서의 응축수의 다양한 유동 패턴: (a) 가스 확산층에서의 물방울 생성에 따른 Corner Flow, (b) Annular Film Flow, and (c) 순간적인 채널 막힘에 의한 Slug Flow	70
[그림 3- 9] 액체 상태 물 안구 생성 및 채널 막힘 현상에 대한 3차원 도식	71
[그림 3-10] Shear Flow에 의해서 물방울에 작용하는 힘의 평형	72
[그림 3-11] 반응가스 채널에서의 공기 속도와 물방울 이탈 지름간의 상관관계	75
[그림 3-12] 연료전지 분리판 채널 폭과 랜드에 따른 성능 비교	75
[그림 3-13] 분리판 채널 폭과 랜드 비율	76
[그림 3-14] 다양한 채널 형상에 대한 전산해석을 통한 유동 검증	77
[그림 3-15] 엑셀 테이블을 이용한 분리판 채널수 계산의 예	80
[그림 3-16] 연료측 매니폴드/채널입구부 해석 형상	85
[그림 3-17] 반응면적 250cm ² 의 가정용 개질가스 연료측 분리판	86
[그림 3-18] 개질가스용 연료전지 분리판의 매니폴드	87
[그림 3-19] 개질가스 공급용 채널의 속도 분포	87
[그림 3-20] 분리판 채널 입구부와 곡선 회전부에서의 속도 분포	89
[그림 3-21] 개질가스 공급용 분리판의 각 채널당 유량 분배 편차	90
[그림 3-22] 개질가스 공급용 채널의 압력 분포	90
[그림 3-23] 반응면적 250cm ² 를 갖는 가정용 공기측 분리판	91
[그림 3-24] 공기 공급용 채널의 속도 분포	92
[그림 3-25] 분리판 채널 회전부와 출구부에서의 속도 분포	93
[그림 3-26] 공기 공급용 분리판의 각 채널당 질량 유량 분배 비교	94
[그림 3-27] 가정용 연료전지 냉각 분리판	95
[그림 3-28] 가정용 연료전지 냉각 채널에서의 속도 분포	96
[그림 3-29] 냉각수 공급용 채널의 압력 분포	97
[그림 3-30] 차량용 수소 가스 분리판 형상	98
[그림 3-31] 차량용 수소 가스 분리판의 압력 분포	99
[그림 3-32] 차량용 수소 가스 분리판 채널당 유량 분배 편차	99
[그림 3-33] 차량용 공기 공급 분리판 형상	101
[그림 3-34] 차량용 공기 공급 분리판 압력 분포	101

[그림 3-35] 차량용 공기 공급	102
[그림 3-36] 차량용 냉각 분리판 형상분리판 채널당 유량 분포 편차	103
[그림 3-37] 차량용 냉각 분리판 압력 분포	104
[그림 3-38] 공기호흡식 연료전지	105
[그림 3-39] 단위전지 실험장치 구성	114
[그림 3-40] 수치해석결과와 실험결과 비교	115
[그림 3-41] 습도에 따른 연료전지 성능 변화	116
[그림 3-42] 습도가 77%인 경우 시간에 따른 전압과 전류의 천이 특성	117
[그림 3-43] 습도가 63%인 경우 시간에 따른 전압과 전류의 천이 특성	117
[그림 3-44] 습도 77% 온도 26 ℃에서 부하에 따른 온도분포	118
[그림 3-45] 습도 63% 온도 26 ℃에서 부하에 따른 온도분포	119
[그림 3-46] 공기극 촉매층에서의 전류 밀도 분포	120
[그림 3-47] 공기극 채널과 접한 가스 확산층에서의 온도분포(℃)	120
[그림 3-48] 촉매층에서의 한계 전류 분포(mA/cm ²)	121
[그림 3-49] 촉매층에서의 산소의 물분율	121
[그림 3-50] 공기극 채널에서의 속도 분포	122
[그림 3-51] 산소 공급 제한으로 인한 농도 손실 분포(Voltage)	122
[그림 3-52] 폭이 다른 채널에서 한계 전류 밀도 비교	124
[그림 3-53] 채널 크기에 따른 속도 분포	125
[그림 3-54] 채널크기에 따른 온도 분포	126
[그림 3-55] 공기극 촉매층에서의 온도 분포	128
[그림 3-56] 농도손실 전압 분포	129
[그림 3-57] 연료극 촉매층에서의 수분 분포	130
[그림 3-58] 전해질막을 통한 물전달량	132
[그림 3-59] 전해질막에서의 저항 손실	133
[그림 3-60] 채널폭에 따른 공기호흡식 연료전지의 성능변화	134
[그림 3-61] k=2인 경우의 중심합성계획	142
[그림 3-62] 구조해석에 사용된 단위전지 모델의 형상	143
[그림 3-63] 박막면의 응력-변형률 선도	143

[그림 3-64] 유한요소 모델과 경계조건 및 하중	144
[그림 3-65] 유동해석에 사용된 공기관의 유로 형상	145
[그림 3-66] 1단계 최적설계 단위전지 모델의 형상	147
[그림 3-67] 2단계 최적설계 단위전지 모델의 형상	149
[그림 3-68] 변형유용방향탐색법에 의한 최적 모델의 응력 분포	152
[그림 3-69] 크리깅에 의한 최적 모델의 응력분포	152
[그림 3-70] 변형유용방향탐색법 최적모델에 대한 공기관의 압력분포	153
[그림 3-71] 크리깅 최적모델에 대한 공기관의 압력분포	153
[그림 3-72] 구조해석을 위한 모델의 형상	155
[그림 3-73] 구조해석을 위한 모델의 경계조건과 하중	155
[그림 3-74] 공기관의 채널 형상(활성면적:300cm ²)	157
[그림 3-75] 출구 경계에서의 격자	158
[그림 3-76] 채널 단면적의 변화	159
[그림 3-77] 유량에 대한 압력차 비교	161
[그림 3-78] 압력 분포도	161
[그림 3-79] 압력 분포도	164
[그림 3-80] 압력 분포도	164
[그림 4-1] 고분자전해질 연료전지 스택 구성	169
[그림 4-2] 고분자 전해질 연료전지 전극 반응 및 전기 흐름	170
[그림 4-3] 활성 면적 100cm ² · 연료극(a)와 공기극(b) 분리판 형상	171
[그림 4-4] 60개의 단위셀로 구성된 스택의 가스 입출구 패턴	172
[그림 4-5] 스택 유동장 해석을 위한 흐름도	175
[그림 4-6] 고분자 전해질 연료전지 매니폴드와 스택 3차원구조	179
[그림 4-7] 단위셀 모델에서의 그리드(grid) 구성	179
[그림 4-8] Z자형 매니폴드와 U자형 매니폴드 스택에서의 분리판 채널당 유량 분포 ·	180
[그림 4-9] 단순화된 연료전지 분리판 채널 형상	181
[그림 4-10] 스택 유체 공급 매니폴드 형상 및 구조	182
[그림 4-11] 완충 영역 길이가 매니폴드 유동에 미치는 효과	183
[그림 4-12] 스택 유량 증가에 따른 매니폴드 유동 패턴	184
[그림 4-13] 시간 변화에 따른 매니폴드 유동 발달 현상	185

[그림 4-14] 60셀 스택에 있어서 U자형과 Z자형 매니폴드에 따른 유량 분포 비교 (Channel Depth = 0.7mm)	187
[그림 4-15] 60셀 스택에 있어서 U자형과 Z자형 매니폴드에 따른 유량 분포 비교 (Channel Depth = 0.5mm)	188
[그림 4-16] 버퍼존(buffer zone)) 길이에 따른 유량 분포 변이	190
[그림 4-17] 60셀 연료전지 스택에서의 온도 분포	191
[그림 5-1] 연료전지 시스템 설계 및 해석 과정	194
[그림 5-2] 연료전지 코제너레이션 시스템의 개념도	196
[그림 5-3] 전체 시스템 해석 모델	197
[그림 5-4] 1 kW급 연료전지의 IV곡선 및 출력 곡선	198
[그림 5-5] 입력 전력에 따른 전력변환장치의 효율	199
[그림 5-6] 사용된 공기 압축기 성능 곡선	200
[그림 5-7] 사용공기량에 따른 압축기 소비 동력	200
[그림 5-8] 유량에 따른 연료 압축기의 소비동력	201
[그림 5-9] 축전지 VOC vs.SoC	202
[그림 5-10] 온도와 방전전율에 따른 축전지 용량	202
[그림 5-11] 축전지의 SOC와 출력에 따른 효율	204
[그림 5-12] 온도에 따른 Steam Reformer의 전환율	207
[그림 5-13] 온도에 따른 수증기 개질반응의 필요 열량	208
[그림 5-14] 시스템 해석 순서도	214
[그림 5-15] 봄, 가을철 가정에서의 열과 전기 부하	215
[그림 5-16] 여름철 가정에서의 열과 전기 부하	216
[그림 5-17] 겨울철 가정에서의 열과 전기 부하	216
[그림 5-18] 열 및 물질 수지 계산을 위한 다이어그램	222
[그림 5-19] CASE 1의 시스템 전기 출력 특성 (겨울)	229
[그림 5-20] CASE 1의 시스템 전기 출력 특성 (겨울)	229
[그림 5-21] 시스템 전기 출력 특성(봄, 가을)	230
[그림 5-22] 온수탱크 온도 변화(봄, 가을)	231
[그림 5-23] 축전지의 SoC 변화(봄, 가을)	231
[그림 5-24] 시스템의 열 출력 특성 (봄, 가을)	232

[그림 5-25] 연료 및 공기 공급량(봄, 가을)	233
[그림 5-26] 시스템 열 및 전기 에너지 출력 및 에너지 손실율(봄, 가을)	234
[그림 7-1] 분산형 연료전지 시스템 개발 현황	246
[그림 7-2] 연료전지 코제너레이션 시스템	246
[그림 7-3] 연료전지 자동차 개발 현황	247
[그림 7-4] 연료전지 자동차 부품 구성	248
[그림 7-5] 일본의 연료전지 자동차 실증 실험	249
[그림 7-6] 분리판 기술 개발	250
[그림 7-7] 연료전지 수치 해석 및 실험장치	251
[그림 7-8] 전극 개발	252
[그림 7-9] 고분자 전해질막 개발	252
[그림 7-10] 듀폰사의 몰드형 분리판	257
[그림 7-11] 스쿠터용 연료전지	257
[그림 7-12] 이동형 연료전지 스택	258
[그림 7-13] 전기적인 성능과 물분포 상관성	258
[그림 7-14] 대런 연료전지 연구센터의 75kW급 연료전지 시스템	267
[그림 7-15] 연료전지 운전장치 계통도	268
[그림 7-16] 중국 DICP에서 제작한 연료전지 시스템	272
[그림 7-17] DICP 연료전지가 탑재된 연료전지 하이브리드 버스	273

표 목 차

<표 2-1> 국내외 연료전지 자동차 개발 현황	56
<표 2-2> 주택용 연료전지 등 소형 분산발전 시스템	60
<표 3-1> 개질 가스를 조성하고 있는 기체의 구성비	82
<표 3-2> 개질 가스의 기체 조성에 따른 각각의 질량 유량	82
<표 3-3> 개질 가스를 구성하고 있는 각 화학종의 물성	83
<표 3-4> 지배 방정식 정리	112
<표 3-5> 경계 및 초기 조건 정리	112
<표 3-6> 크리깅 모델의 상관 함수	138
<표 3-7> 1단계 최적설계의 결과 비교	148
<표 3-8> 2단계 최적설계의 결과 비교	150
<표 3-9> 연료전지 분리판의 최적값 비교	151
<표 3-10> 입구 경계 조건	158
<표 3-11> 변형률 비교	159
<표 3-12> 응력 분포 비교	159
<표 3-13> 유동 해석과 실험의 압력차 결과 비교	160
<표 3-14> 두 가지 유동 해석에 대한 압력차 결과 비교	162
<표 3-15> 접촉 조건을 고려하지 않은 경우의 해석과 실험의 압력차 결과 비교	163
<표 3-16> 접촉 조건을 고려한 경우의 해석과 실험의 압력차 결과 비교	163
<표 3-17> 구조해석을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 압력차 결과 비교	165
<표 4-1> 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델에서의 실험상수 값	173
<표 4-2> 분리판과 스택의 제원 및 운전 조건	177
<표 4-3> 수력직경과 레이놀즈 수(Reynolds number)	178
<표 5-1> 축전지 충전 계수 (α)	203
<표 5-2> 개질 반응식	205
<표 5-3> 평형정수와 반응열	208
<표 5-4> 계절별 열 및 전기 사용량	216
<표 5-5> 연료전지 출력 제어 조건 Case 1	218

<표 5-6> 연료전지 출력 제어 조건 Case 2	218
<표 5-7> 도시 가스 발열량 계산	220
<표 5-8> 해석 모델의 운전 조건	221
<표 5-9> 연료전지 출력 100% 부분부하시 열·물질 수지	224
<표 5-10> 연료전지 출력 75% 부분부하시 열·물질 수지	225
<표 5-11> 연료전지 출력 50% 부분부하시 열·물질 수지	226
<표 5-12> 연료전지 출력 25% 부분부하시 열·물질수지	227
<표 5-13> 연료전지 부하 제어방법에 따른 효율	228
<표 7-1> 고분자 전해질 연료전지 시스템 시범 운전 현황	248
<표 7-2> 미니 전기 버스 제원	270
<표 7-3> 중국 연료전지 버스 제원 비교	271

제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경 및 필요성

에너지절약과 환경공해 문제 그리고 최근에 부각되고 있는 지구 온난화 문제 등을 해결하기 위해 발전 및 동력 분야에서 고효율 친환경 시스템으로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연료전지는 수소와 산소를 이용하여 연소과정없이 전기화학적으로 직접 전기를 발생시키는 발전장치로서 높은 에너지 변환 효율과 환경 친화성으로 인해 분산형 전원과 수송용 동력기관 등 장래의 에너지 환경 분야에서 Key Technology의 하나로 인식되고 있다. 연료전지 중 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC)는 전해질로 액체를 사용하지 않고 고분자 막을 사용하는 연료전지로 취급이 용이하고, 다른 종류의 연료전지에 비해 부피와 무게가 작고 상온에서 동력밀도가 높으며 시동과 정지가 용이한 장점이 있다. 이러한 특징을 살릴 수 있는 대표적인 분야가, 소형 가정용 코제너레이션 시스템, 이동형 전원 시스템과 전기자동차용 전원시스템 등이다.

고분자 전해질 연료전지의 대표적인 적용분야인 연료전지 자동차는 Time지가 2000년 대 초기에 개발해야 할 Top 10 과제 중의 하나로 선정된 것으로 환경친화적 연료전지의 고효율, 무공해성의 특성상 미래 자동차 시장의 주류를 장악할 것으로 예측되고 있다. 연료전지 자동차 개발에 대한 투자는 정부의 투자를 제외하더라도 기업체인 포드 자동차와 다임러 클라이슬러와 발라드파워사의 공동 투자액이 10억불을 상회하며 일본도 닛산, 혼다, 미쓰비시가 10억불을 공동 출자하는 등 막대한 연구개발비가 투자되었다. 정부의 경우도 미국 DOE의 수소 프로그램(Hydrogen Fuel Initiatives, HYFI)으로 2004년과, 2005년에 각각, US\$159M, US\$225M이 집행되었고 2006년에 US\$242.7M이 집행되었으며, FCVT(FreedomCAR and Vehicle Technologies) 프로그램으로 2004년과 2005년에 US\$86.5M, US\$85.3M이 집행되었으며 2006년에는 US\$99.9M이 집행되어 2006년에 고분자연료전지와 관련된 분야에 총 US\$ 342.6M이 집행되었다. 일본의 경우 연료전지 자동차와 가정용 연료전지분야의 인프라 구축, 표준화, 기초연구에 집중되고 있으며 시범운전 프로그램은 발전시스템을 위한 “Stationary FC Demonstration Study”와 자동차를 위한 JHFC(Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project)가 수행되고 있다. 연료전지 연구 예산은 2005년 기준 35.4 B엔 정도로 연료전지의 중요성을 알 수 있다.

연료전지는 화학에너지를 연소과정 없이 전기에너지로 변환시키는 전기화학적 발전 설비이다. 즉, 직접 수소와 산소를 화학적으로 반응시켜 전기를 얻기 때문에 전지 자체의 효율은 60%정도로, 연료를 연소시켜 열로 변환시킨 후에 동력이나 전기로 변환시키는 종래의 열기관에 비해 에너지 변환 효율이 높다. 종합화된 연료전지 시스템의 성능은 현재 가장 성능이 우수한 마이크로 가스터빈 발전기 효율인 25%보다 높은 35%정도이며, 이와 같은 고효율을 1kW급의 소용량 발전시스템에서도 달성할 수 있다는 장점이 있다. 열 이용까지 고려할 경우 약 80% 정도 까지 달성할 수 있어 에너지 절약 효과가 크다. 이와 같이 연료전지를 통해 고효율의 에너지 변환시스템을 구현시키기 위해서는 고성능의 요소기술 개발과 더불어 최적화된 시스템의 구성 기술이 필수적이며 이를 위해 최적화 설계 기술과 시스템 성능예측 기술이 필요하다. 본 연구는 그동안 실험적으로 진행되어온 소재와 부품연구 개발 결과를 정량화 구체화시키고 시스템의 실용화를 앞당기기 위해 컴퓨터를 이용한 연료전지 본체 즉 스택과 시스템의 설계 및 해석 기술을 확립하기 위한 것으로 연료전지내부의 유동장 해석기술 및 시스템의 종합적인 해석 기술을 바탕으로 연료전지 본체와 시스템의 설계 및 성능 예측기술을 확립하였다. 개발된 분리판과 스택 설계 및 해석 프로그램을 통해 연료전지 본체의 상용화를 위해 필수적으로 필요한 분리판의 형상과 매니폴드 그리고 스택 구조의 최적화가 가능하며, 두 번째로는 시스템 해석 프로그램을 통해 시스템을 구성하는 주요 부품의 설계조건을 도출할 수 있으며 동시에 시스템의 최적 운전 전략을 도출 할 수 있다.

고분자 전해질 연료전지의 중요성에 비해 선진국이나 중국 등의 연구 예산에 대비한 국내에서의 개발 예산은 1/10이하이며 초기의 단위셀과 전극전해질 그리고 스택을 위한 기반 연구에 비해 최근에는 시스템 구성과 실증 연구가 활발하게 진행되고 있다. 고분자 연료전지에 대한 기술은 각국이 국가적인 지원과 기업체의 막대한 예산을 바탕으로 소재와 부품 그리고 시스템을 위한 연구가 진행되고 있으며 선진국으로 부터의 기술 이전은 쉽지 않으며 각국에서 자체적으로 기술을 개발할 수밖에 없다. 현재 선진국의 경우 고분자전해질 연료전지는 기술적으로는 전지의 개발 단계가 거의 완숙기로 접어들어 가격 저감화, 내구성 및 신뢰성 향상에 주력하고 있으며 실증을 통한 시스템 개선 연구에도 주력하고 있다. 국내의 경우 핵심부품인 전극전해질의 기술과 시스템 종합화 기술은 선진국 수준을 거의 따라가고 있다. 주어진 전극전해질을 이용하여 연료전지를 최적으로 설계하고 설계된 전지를 바탕으로 한 전체 시스템을 최적화시키는 것이 고효율 국산 시스템 개발의 관건이 될 수가 있다. 연료전지의 성능 최적화를 위해서는 주어진 전극전

해질에 최적의 가스공급과 더불어 수분, 압력, 온도 등 최적의 공정 조건이 조성되어야 하며 이를 위해 분리판과 분리판이 적층된 스택 유동장의 설계와 해석이 필요하다.

연료전지는 연료 중의 수소와 공기 중의 산소를 이용하여 직접 전기를 발생시키는 전기화학설비로 반응 활성면적 전체에 걸쳐 수소와 산소의 균일한 공급이 중요하다. 연료전지에서 분리판은 연료전지 반응에 필요한 산화가스와 연료가스를 공급하고 단위 전지의 양극과 음극을 직렬로 연결시켜 주는 전도체의 역할을 동시에 수행한다. 따라서 전도체의 역할을 수행하면서 반응에 필요한 가스를 공급하기 위한 유동 채널의 적절한 크기와 간격을 설계할 필요가 있다. 분리판에서 가스를 공급하기 위한 채널의 형태와 각 채널의 폭과 깊이 그리고 간격이 전체 연료전지 활성면적을 통해 반응가스의 분포에 큰 영향을 미친다. 연료전지의 사용압력에 따라 반응가스의 밀도가 변해 같은 이용율에서 가스의 유속과 압력구배가 변할수 있으므로 스택내부에서 반응에서 생성된 수분을 배출할 수 있는 유속과 압력 조건이 될 수 있도록 운전압력을 고려하여 유동 채널이 크기가 결정되어야 한다. 가스 공급이 균일하지 않을 경우 전류분포와 온도분포도 불균일하여 국부적으로 전기 및 열적으로 과부하 상태가 될 수 있으며, 이 경우 전지의 효율저하는 물론 수명이 단축될 수 있다. 또한 채널의 형태와 단면 크기는 가스 공급뿐만 아니라 고분자 전해질 막의 이온전도에 필요한 수분을 공급하고 배출하는데 영향을 준다. 고분자 전해질 연료전지는 전해질로 사용되는 고분자막의 특성상 원활한 이온전도를 위해 전해질 막이 항상 습한 상태를 유지해야 하며, 이를 위해 입구에서 반응 공기에 의해 전해질 막이 건조되는 것을 막기 위해 가습을 해야 한다. 고분자 전해질 연료전지의 경우 작동 온도가 100℃ 이하이므로 가습을 위해 공급된 수분과 화학반응에 의하여 생성된 물이 채널에서 응축될 수가 있다. 따라서 수분을 원활히 배출하기 위해서는 채널에서의 적절한 가스 유속과 입·출구 가스의 채널에 압력차를 주어 상대적으로 저압상태인 출구에서 팽창된 가스로 하여금 많은 수분을 함유하여 배출될 수 있도록 채널이 설계되어야 한다. 이를 위해 다른 종류의 연료전지들에 비해 가능한 채널수를 적게 하고 유로를 길게 하여 채널 당 유속을 높이고 압력 손실이 크게 발생하도록 한다. 상대적으로 적은 채널수로 활성면적 전체에 가스가 공급하기 위해 유로 길이가 길어지며 형태가 복잡해질 수밖에 없으며, 이에 따라 균일한 유동분포와 반응, 수분배출을 위해 정밀한 설계가 필요하다.

현재까지 국내의 경우 기반 연구로는 전극전해질의 성능향상에 주력하였으며 시스템 개발을 위해서는 종합화에 주력하였다. 스택과 분리판은 실험과 경험을 위주로 설계 제

작되어 개발에 비용과 시간이 많이 소요되고 있었으며 최적 성능을 기대할 수 없었다. 소형 단위전지의 성능 실험은 제작된 전극과 전해질을 이용하여 최대로 얻을 수 있는 이상적인 성능을 확인하는 것으로 실제 사용되는 대면적 전극과 복잡한 채널과 매니폴드로 구성된 연료전지 모듈과는 성능에 차이가 있었다. 따라서 소형 단위전지가 아닌 실제 연료전지 모듈에 대한 해석을 기반으로 하는 설계 기술이 필요하다. 설계와 해석을 위해서는 분리판과 스택의 기하적인 복잡성으로 인해 컴퓨터를 이용한 전산 유동 해석 방법이 필요하다. 바이폴라 플레이트에 대한 기술은 이미 대부분 선진국에 의해 기술 특허가 걸려있는 상태로 주어진 설계범위에서 새로운 구조를 개발하기가 쉽지 않으며, 기술 경쟁력 강화를 위해서는 우선적으로 사행채널과 같이 기본적인 분리판 유동 형태를 이용한 최적화 설계 방법의 확립이 필요하다.

연료전지의 실용화를 위해서는 요소 기술과 더불어 시스템의 설계기술 확립이 필요하다. 연료전지 시스템의 성능은 압축기와 전력변환기 등의 부품 성능과 더불어 부하와 연료 및 산화제의 이용률, 압력, 온도 그리고 공급가스 습도에 의해 변할 수 있으므로 이런 조건들에 따른 시스템의 정밀한 해석과 이를 통한 최적 설계가 필요하다. 이 과정에서 순수한 이론해석 자료는 물론 핵심부품의 실제 성능이 설계 자료로 사용되어야 하므로 국내외 공동 연구를 통해 확보한 성능 자료를 설계 프로그램에 반영할 필요가 있다.

주택용 연료전지와 연료전지 자동차의 핵심 기술인 고분자 전해질 연료전지의 설계 기술의 개발을 통해 실용화 기술이 확립되면 대체에너지 이용확대를 통한 수소화 사회로의 이행과 에너지 문제의 해결, 그리고 환경 문제 해결에 기여할 수 있을 것이다. 또한 연료전지 실용화에는 전기기기 산업, 소재산업, 에너지 산업 등 광범위한 산업에 걸친 기술이 필요하기 때문에 국가 산업 전체에 미치는 영향이 크고, 새로운 기술의 진전에 의해 신규산업의 창조, 고용창출에도 기여할 수 있을 것이다.

제 2 절 연구 내용 및 범위

분산형 발전 시스템과 전기 자동차용 전원으로 사용될 수 있는 고분자 전해질 연료전지의 실용화를 위해서는 핵심소재와 운전장치(Balance of Plant ,BOP)개발과 더불어 체계적인 설계 기술이 필요하다. 연료전지 스택과 스택을 구성하는 단위전지는 반응공정과 형상의 복잡성으로 인해 컴퓨터를 이용한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 스택과 분리판의 유로 패턴과 채널 매니폴드 등의 크기 결정을 위한 설계 프로그램과 이와는 별도로

설계된 분리판과 스택의 성능을 검증할 수 있는 해석 프로그램을 병행하여 개발하였다.

연료전지의 분리판의 최적 유동 형상을 결정하기 위하여 우선적으로 다양한 유동장 패턴에 대한 비교 해석을 수행하였으며, 초기 형상 설계를 위한 간이 설계법 개발은 수치해석에 기반한 전산해석 방법을 확립하였다. 전기 화학적 특성과 연계된 유동장 해석을 위하여 이론적인 모델 정립은 물론 설계자료 확보를 위해 독자적인 실험장치들을 이용하여 연료전지 내부의 전류분포 분석은 물론 유동 채널 크기에 따른 성능 변화를 분석하였다. 분리판 유동 구조 최적 설계를 위한 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

○ 연료전지 기술 해외 조사

- 고분자 연료전지의 해석 및 설계 기술의 해외 연구 동향을 분석하기 위하여 연료전지 관련 주요 학회 참가하여 기술 발표 및 정보 교환
- 공동 연구기관인 중국 DICP의 연료전지 연구개발 센터의 주기적인 방문과 전문가 초청을 통한 실질적인 공동 연구 수행

○ 연료전지 성능에 중요한 역할을 하는 분리판을 설계하기 위한 연료전지 내부 유동장 해석 프로그램 작성

- 연료전지 설계와 해석을 위한 유동 모델식 정립과 컴퓨터를 이용한 해석 프로그램을 개발하였으며, 다양한 유동장 형상에 대한 유동 분포 비교 해석
- 단위 전지 구성 요소인 연료(수소 및 개질 가스), 산화제(공기 및 산소), 냉각제(물 및 공기)를 위한 분리판 설계 및 성능예측 프로그램 개발
- 연료전지를 위한 채널 설계 범위 및 형상 결정, 설계된 유동장의 전산 해석
- 열전달 고려한 냉각수 유량 분배 특성 분석

○ 고분자 전해질 연료전지의 전기적 성능예측을 위한 모델링과 기본 실험 장치의 구성 및 실험

- 연료전지 해석을 위해서 유동장 및 전기화학 특성 모델링
- 연료전지의 전기화학을 고려한 3차원 유동장 해석 프로그램 개발
- 단위 전지 실험을 통한 전지 구조 및 공정에 따른 성능 분석을 위하여 유동 채널 구조에 따른 성능 분석과 유동 채널내의 물관리 특성 분석
- 자기 호흡식 연료전지의 3차원 해석을 통한 최적 채널 사이즈 결정

- 대면적 분리판의 압력 분포 실험에 의한 유동 균일성 확인 및 해석결과와 비교 검증
- 바이폴라 플레이트 유동 형상 및 채널 크기에 따른 성능 실험
- 특성 실험결과와 해석결과를 이용하여 설계 프로그램 개발

o 분리판 유동 채널 형상 결정 및 최적 설계

- 다양한 분리판 유동 패턴 분석을 통한 최적 유동 패턴 결정
- 채널 형상 결정 및 최적 분리판 설계를 위해 활성면적과 용량에 따른 유동장 설계 및 성능 예측

o 분리판의 응력 해석을 통한 구조 최적화

- 연료전지 분리판의 두께와 채널의 크기에 관한 응력 해석을 통해 최적의 두께 및 채널 형상 결정
- 스택 체결력에 의한 전극전해질 구조 변형을 고려한 분리판 채널 유동 특성 분석

스택으로의 원활한 가스 공급과 배출을 위해서는 매니폴드와 가스 인입부의 설계가 중요하며 매니폴드는 단위전지가 적층된 스택으로서의 용량을 고려하여 설계되어야 한다. 복수의 단위전지로 이루어진 스택의 유동장 해석을 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

o 스택의 유동 균일 분배를 위하여 매니폴드 설계와 해석 수행

- 외부가스와 스택의 연결부에 대한 해석 수행
- 매니폴드 형상 설계 및 해석
- U자형과 Z자형 매니폴드의 유동 특성 분석을 통한 최적 형상 결정
- 분리판 채널의 깊이 변화와 매니폴드의 유량 분배 특성과의 상호 연관성 해석

연료전지 시스템은 스택을 중심으로 운전장치로서 공기와 연료를 공급하는 설비와 열 및 물관리를 위한 설비 그리고 연료전지에서 생산된 DC 전기를 AC 전기로 변환시키기 위한 전력변환기 등으로 구성된다. 본 연구에서는 개질기를 포함한 가정용 연료전지를 중심으로 각 부품에 대한 특성식이나 모델식을 이용한 전산 해석 프로그램을 구성하였으며 주어진 단위 주택의 계절별 요구부하와 운전방식에 따른 성능을 분석하였다.

o 시스템 개념 설계 및 열역학 해석 프로그램 개발

- 스택을 포함한 주요 부품 특성 모델식 유도
- 연료전지 시스템 전산 해석 및 설계 프로그램 개발

o 시스템 최적 설계 및 운전 제어 방법 개발

- 독립 운전되는 연료전지 코제너레이션 시스템 성능 평가
- 시스템 해석을 통한 최적 제어전략 도출

본 연구를 통하여 분리판과 스택을 설계할 수 있는 프로그램과 설계된 분리판으로 구성된 단위전지와 스택을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였으며 동시에 시스템의 성능을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 사용하여 자동차용과 가정용 연료전지에 적합한 분리판과 스택을 설계하고 성능을 예측할 수 있었으며 동시에 응력해석을 통하여 분리판과 스택의 구조적 안정성의 검증과 소형화 설계방법을 제시하였다. 또한 휴대용으로서 자기 호흡식 연료전지에 대한 해석을 수행하여 최적 설계조건을 도출하였다. 부품의 실험적인 특성자료를 기반으로 한 시스템 해석 프로그램을 구성하여 시스템의 설계와 운전전략을 도출하는데 사용할 수 있도록 하였다. 본연구에서는 해석 프로그램을 독립 운전되는 고분자 전해질 연료전지 코제너레이션 시스템에 적용하여 계절별성능 예측과 trade off를 통한 부품의 선정 그리고 최적의 제어 전략을 도출하는데 사용하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

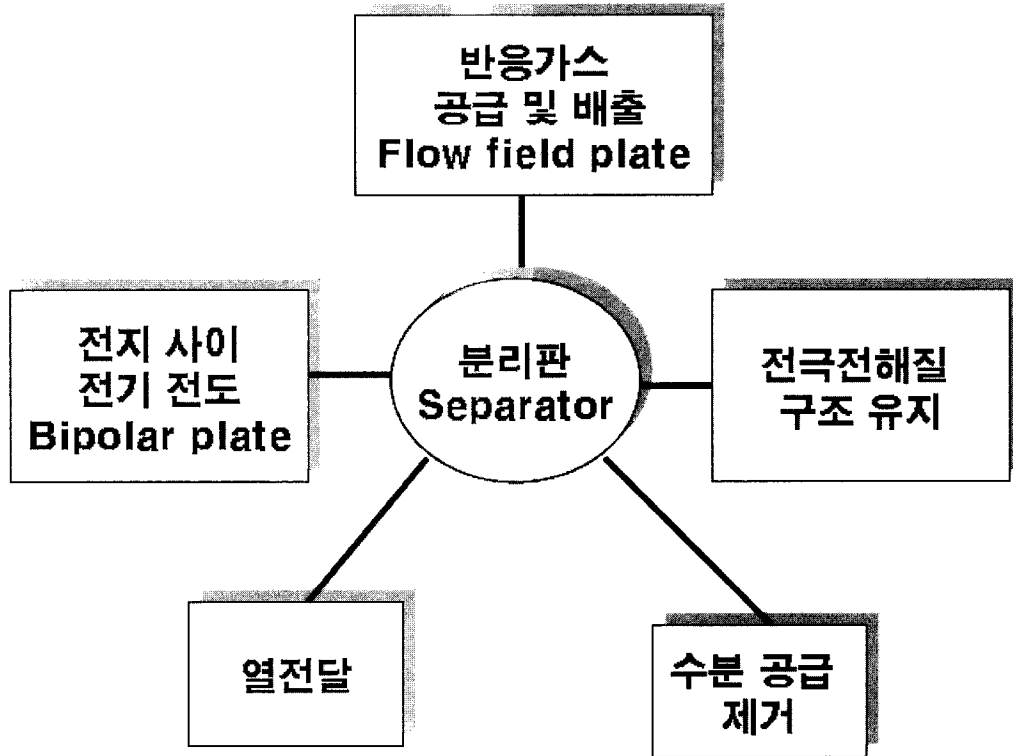
제 1 절 분리판, 스택 기술

1. 스택 및 분리판 기술 현황 개요

연료전지 시스템의 상용화를 위해서 성능최적화를 통한 가격 저감과 수명 및 신뢰성을 향상시키기 위한 노력이 활발히 진행되고 있다. 연료전지 시스템의 성능 극대화를 위해서는 핵심적 전력 생산 장치인 스택의 효율적 제작과 더불어 핵심 요소인 고분자 이온 교환막, 가스 확산층, 및 분리판에 대한 종합적 연구가 진행되어야 한다. 그 중에서 이온 교환막과 가스 확산층은 재료/화공학적인 기술이 필요하며 가스 확산층과 스택 분야는 열·유체공학과 구조 역학 등의 기계공학적인 설계 기술이 필요한 분야이다.

연료전지 관련 연구가 활발히 시작된 1980년대 이후로 초기에는 전력 생산 밀도의 향상에 초점을 맞추어 이온 교환막의 두께를 최소화하여 이온 저항을 줄이면서 동시에 막을 통한 기체의 투과성을 억제하는 기술 개발에 주력하였다. 또한 이온 교환막의 표면에 도포되는 백금 촉매의 활성화를 향상시키면서 상대적으로 백금의 사용량을 획기적으로 줄이고자 많은 연구자들이 심혈을 기울여왔다. 이런 노력의 결과로 2000년대에 들어서면서 수십 마이크로 ($\sim 20 \mu\text{m}$)의 두께를 갖는 이온교환막과 $0.1\sim 0.4 \text{ mg/cm}^2$ 의 백금 촉매 사용량이라는 두드러지는 연구 성과가 이루어졌다. 하지만 연료전지의 상업화를 위해서는 이러한 소재 개발뿐만 아니라, 연료전지의 구동에 필요한 연료와 산화제 공급, 열 및 물 관리 등을 위한 스택의 열 유동 설계 기술과 스택 외부에서 가스와 냉각 유체 등을 적절하게 조절하고 사용자에게 적합한 전기와 열을 공급하기 위한 운전 장치(Balance of Plant, BOP)가 포함된 전체 시스템 측면에서의 최적화가 필요하다. 특히 고분자 전해질 연료전지의 경우 작동 온도가 100°C 이하이므로 스택 내부의 물관리가 매우 중요하며, 반응가스 공급과 연료전지에서 생성된 부산물인 물과 열의 제거와 밀접하게 관련된 분리판과 매니폴드 및 스택의 유로 설계는 연료전지 발전 모듈 자체뿐만 아니라 BOP 등의 전체 시스템 구성요소 제원 설정 및 운전 조건, 나아가 장기 수명성 및 신뢰성에 매우 큰 영향을 미친다.

연료전지 분리판의 역할은 [그림 2-1]과 같으며 다양한 필요 기능을 만족시키기 위해



[그림 2-1] 분리판의 기능

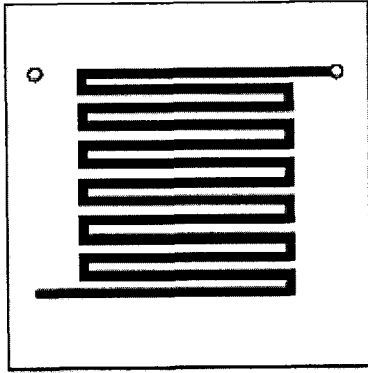
설계되어야 한다. 연료전지 분리판이나 스택의 설계에 있어서 가장 먼저 고려되어야 할 사항은 적용분야로, 가정용으로 활용할 것인지, 자동차용 발전 시스템에 적용할지를 먼저 결정하는 것이다. 적용 시스템에 따라 연료의 종류, 동력과 열회수, 운전 모드, 무게, 부피, 가격, 효율 등의 설계 요구조건 등이 달라질 수 있다.

가정용의 경우는 연료전지의 부피와 무게는 상대적으로 중요하지 않으며 열회수를 위한 장치와 수소를 위한 개질장치가 추가되어야 한다. 대다수 일반적인 도시 가구에 연결되어있는 천연가스(NG) 가스로부터 반응기(Reformer)를 통해서 수소를 추출하여 연료전지에 공급하므로 수소 저장 장치를 차량에 부착하여 사용하는 차량용 연료전지 시스템에 비하여 상대적으로 많은 유량이 흐르게 된다. 유량의 절대비는 가정용의 경우 개질과정의 최종단계에서 나오는 수소량과 다른 비활성기체의 비에 따라서 많게는 순수 수소의 경우보다 최대 2배정도의 유량이 전체 연료전지 시스템을 흘러가게 된다. 일반적으로 가정용의 경우는 반응가스 공급 입구 운전압력이 거의 상압에 가깝고 분리판 및 매니폴드에서의 압력강하를 5kPa 정도에서 설계하게 된다. 차량용의 경우는 연료전지의 초기 개발 단계에서는 가정용의 경우처럼 차량에 메탄올 개질기를 장착하여 개질된 수소를 사용한 예도 있었지만 부하 응답성과 공간 점유율로 인한 실효성과 전체 엔진 시스템의 제어

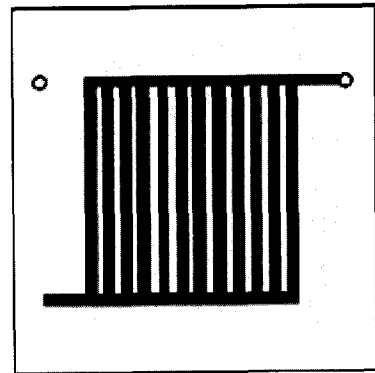
나 공정의 복잡성으로 인해 최근에는 고압의 가스 상태의 수소를 직접이용하고 있다. 차량용 연료전지 스택의 초기단계에서는 부피와 무게를 줄이기 위하여 300kPa 이상의 운전 압력에서 운전되는 스택을 설계하였으나 이러한 고압 상태를 유지하기 위해서 공기 압축에 과도한 동력이 소요 이외에 압력제어의 어려움이 있어 국내에서는 130kPa 이하의 상압형이나 150kPa 정도의 중압형 운전을 채용하고 있다. 특히 상압형의 경우는 최대 압력 강하량을 30kPa 이내로 설정하여 전체 시스템 제어 및 분리판, 매니폴드와 스택 유량 배관과 유체기계 등을 설계하고 있다.

연료전지의 응용 분야의 선택 후 고려해야 될 중요인자는 주변장치, 특히 전력변환기의 운용 범위이다. 가정용의 경우 연료전지 스택의 출력을 1~5kW로 설정하여 개발하고 있으며, 이때 직류 전력변환기의 입력 전압 범위는 30~70V이다. 차량용의 경우는 현재 80kW급 연료전지 스택 개발이 정부 주도로 진행되고 있으며, 이 경우 직류 전력 변환기의 가변 전압 범위는 200~400V로 가정용에 비해 상대적으로 전압 변동폭이 크다. 스택의 출력과 직류 전력 변환기의 운전 범위가 결정되면, 이 자료를 근거로 분리판의 반응면적을 계산하게 된다. 이 때, 추가적으로 고려해야 될 사항은 연료전지 운전 변수 및 성능 곡선에서 개발하고자 하는 스택의 설계값이다. 설계변수로는 스택 온도, 압력, 반응가스 이용률, 상대습도와 최대 출력 (차량용) 또는 정격 출력 (가정용)이 발생하는 전압에서의 전류밀도 등이다. 이러한 광범위한 데이터를 이용하여 연료전지 분리판의 활성면적을 구하고, 반응가스 누출을 차단하기 위한 가스켓 면적과 매니폴드에서의 압력 강하 허용폭을 설정하여 최종적으로 분리판의 전체 외형 크기를 결정하게 된다. 일반적인 가정용 분리판의 활성면적 크기는 최대 250cm²이하로 설계가 되며, 차량용의 경우는 300cm²가 넘는 대면적 분리판을 제작하게 된다. [그림 2-2]가 연료전지 분리판의 채널 형상을 나타낸 것이다. 연료전지 분리판의 반응가스 채널 형상은 고분자 전해질 연료전지를 제외하고는 일반적으로 평행채널 형상이 사용되고 있으나 고분자 전해질 연료전지의 경우는 물 배출을 고려하여 입출구의 압력차가 발생하는 사행채널이 일반적으로 사용되고 있다. 활성면적이 적어 공급 유량이 적은 경우에는 그림 (A)의 단일 사행 채널이 사용될 수 있으나 압력 손실 줄이기 위하여 일반적으로 (C)와 같은 다중 사행채널이 사용된다.

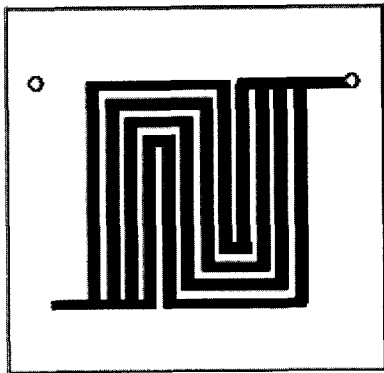
휴대용 연료전지의 경우는 소형화를 위하여 활성면적이 100cm² 이하의 분리판이 사용되며, 공기 공급과 냉각 장치가 필요 없는 자기 호흡식 연료전지의 경우는 공기 공급과 물 배출이 공기극 채널에서 자연 대류와 증발에 의해 이루어져야하므로 자동차나 가정용



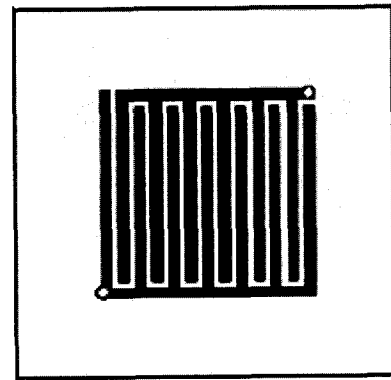
(A) 사행채널



(B) 평행채널



(C) 다중 사행채널



(D) 불연속 채널

[그림 2-2] 분리판 유동채널 형상

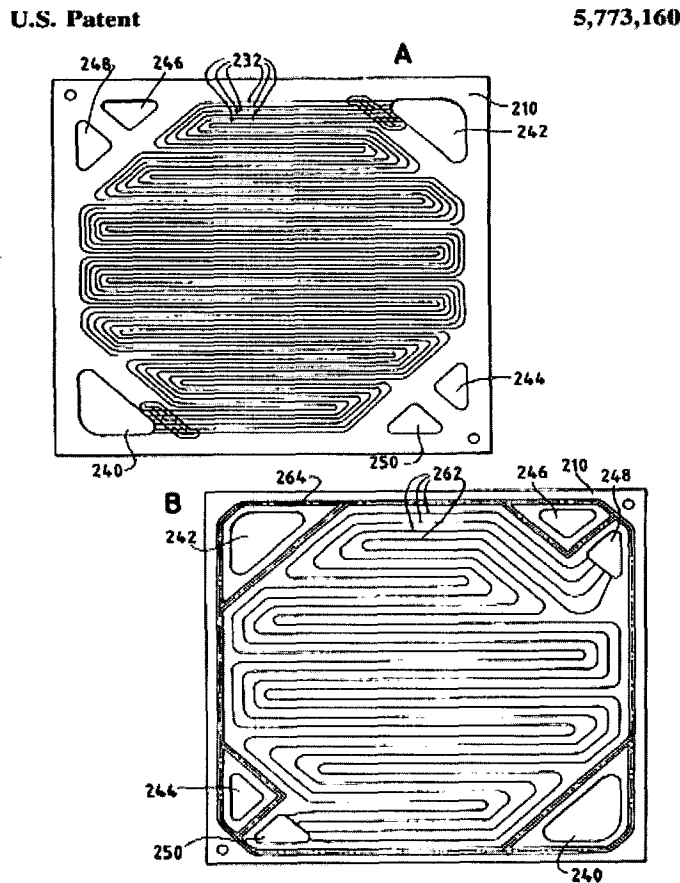
연료전지의 사행채널과 달리 채널 폭이 넓고 원활한 공기 공급을 위하여 입출구부가 외부에 노출되어 있는 직선의 평행한 채널로 이루어진다.

전 세계적으로 산업체 및 유수의 연료전지 제작사들이 다양한 형태의 스택 및 분리판에 대한 연구를 진행하고 있으며 그 중 대표적인 제작회사의 연구결과들을 요약하면 다음과 같다.

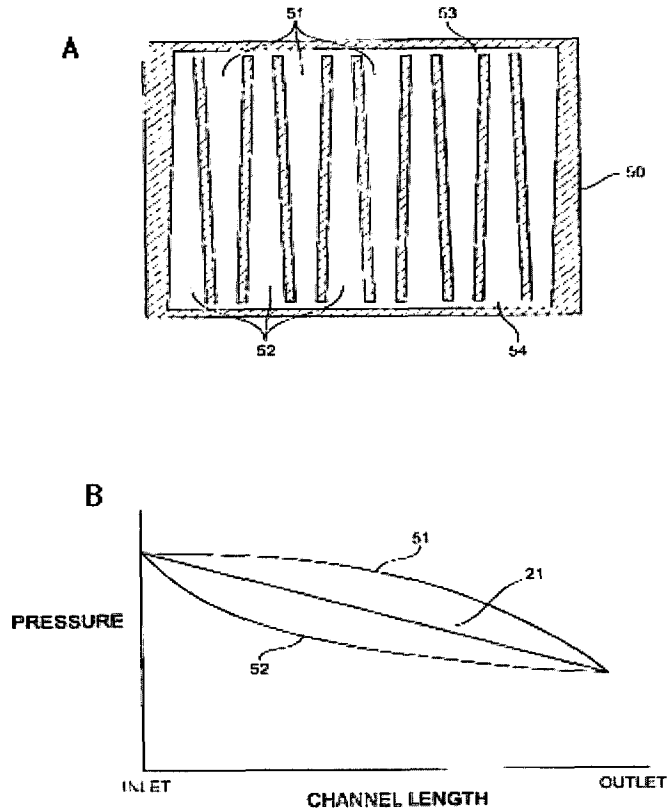
2. 발라드(Ballard)사

발라드사는 캐나다의 대표적인 연료전지 시스템 개발 업체로서 연료전지 스택 및 분리

판 개발 기술을 선도하고 있다. 가정용 및 차량용 그리고 이동형 연료전지 시장에서 전 세계적으로 유명한 기업들과 공동으로 연료전지 시스템을 개발하고 있다. [그림 2-3]은 발라드사가 1998년 특허를 획득한 분리판 설계의 일부분으로 다중 사행채널 형상이다. A로 표시된 상판은 연료, 공기 및 냉각수 채널에 비슷하게 적용된 매니폴드/분리판 연결부의 6개의 공기 채널 입구를 보여주고 있으며, 특히 산화제인 공기측 유체 유동 통로에 대한 개략도를 보여주고 있다. 아래의 B로 표시된 그림은 공기측 유로 뒷면에 양각된 냉각 유로의 형태를 보여주고 있다.



[그림 2-3] Ballard 분리판 설계 특허 (1998)



[그림 2-4] 점진적으로 변하는 유로 단면을 갖는 분리판 채널 형상

[그림 2-3]에서 알 수 있는 바와 같이 공기측 매니폴드는 사각 분리판의 오른쪽 위와 왼쪽 아래에 독립적으로 위치하고 있고, 연료측과 냉각수 입구는 반대측 모서리 부분에 매니폴드 유로를 이분하고 있다. 이는 산화제로 공기를 사용하는 경우 유량이 수소 연료 측에 비해서 3배정도 더 많기 때문에 매니폴드에서의 압력강하를 낮추기 위해서 공기측 매니폴드 유로의 크기를 다른 연료나 냉각수보다 2배 이상 크게 설계하기 때문이다.

[그림 2-4]와 [그림 2-5]는 발라드사가 2003년에 등록한 유체 유로의 형상이다. 이 디자인은 향상된 물 관리 기능과 고분자 연료전지에서의 반응가스 분배를 더욱 고르게 만들기 위한 것이다. 연료전지 내에서의 전기화학 반응에 의해 생성된 물이 반응가스 유로나 전극의 반응가스 분포 층에 축적된다면, 이 생성수는 반응가스가 막-전극 계면의 촉매지역에 접근하는 걸 방해하여 결국 연료전지 성능을 저하시킬 것이다. 따라서 효과적인 연료전지 물 관리를 위해서는 반응가스 채널의 입·출구 사이에 높은 압력차를 만들어 응축수의 축적을 방지할 필요가 있다. 하지만 이러한 높은 분리판 채널 입·출구 압력차

는 앞에서 간략히 언급되었듯이 가압된 반응가스를 공급해야 된다는 측면에서 기생전력의 증가로 귀결되므로 스택의 성능 향상과 부가 에너지에 대한 분석이 필요하다.

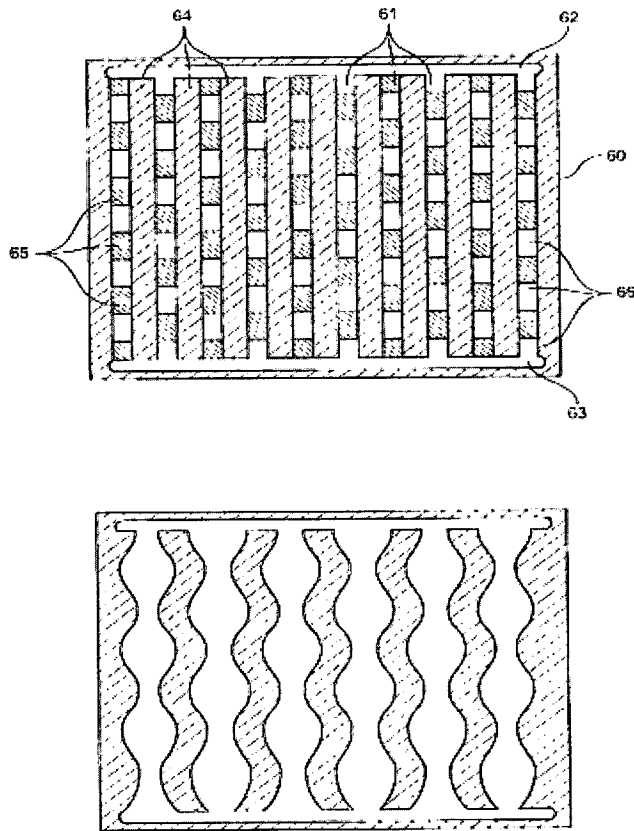
[그림 2-4]의 윗부분은 2채널마다 유동의 진행방향으로 채널이 확대되거나 축소되는 형상을 갖는 분리판 채널 유로 형상을 보여주고 있으며 [그림 2-4]의 아래에서는 다양한 채널 유로 디자인에서의 압력강하를 채널 길이의 함수로 도시하였다. [그림 2-4]의 윗 부분 형상에서와 같이 이웃하고 있는 두 개의 채널의 단면과 유동 저항은 일정하지가 않다. 채널에서는 단면적이 감소할수록 상대적인 유체의 속도는 증가하게 된다. 채널 단면의 수력학적 지름의 변화는 유체의 속도 변화를 초래하여 직선채널의 경우에는 압력이 채널을 따라 계속해서 변하게 된다. 점진적으로 가늘어지는 채널에서의 이론적 압력강하는 단상이라고 가정하였을 때 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P(x) = P_i - \rho(x) \left[\left\{ f \int_0^x \frac{p(x) \cdot F(x)^2}{8 \cdot A(x)^3} dx \right\} + \frac{F(x)^2}{2 \cdot A(x)^2} \right] \quad (\text{식 2-1})$$

이 방정식에서 $P(x)$ 는 채널방향 길이 x 에서의 압력을 나타내며 P_i 은 입구 압력, $\rho(x)$ 는 유체의 밀도, f 는 실험적인 표면 마찰계수, $p(x)$ 는 채널 단면의 둘레 길이, $F(x)$ 는 유체 유동, $A(x)$ 는 채널의 단면을 나타낸다.

[그림 2-4] 하단부는 이웃한 두 개의 가변채널(점진적 증가/감소 채널)에서의 압력의 차이를 정성적으로 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯이 채널 유동 진행부의 전체영역에서 이웃한 두 채널사이에 압력 차이가 존재하며 임의의 한계 상황 하에서 이러한 이웃한 채널 사이의 압력차를 성능향상을 위해 이용할 수도 있다. 또한 [그림 2-1]에서 제시된 단순화된 채널에 비해서 채널 단면에서의 대류 유동 특성이 향상되고 이를 통해서 막-전극 계면에서의 반응가스의 분포와 물 제거 능력의 향상을 수반하게 된다. 이러한 향상된 물 제거 능력과 반응가스 분포는 채널 폭의 변화가 아닌 채널 깊이의 변화로서도 가능하다. 예를 들면 한 채널의 깊이가 입구 영역에서부터 출구 영역까지 점진적으로 감소하게 만들고 이웃한 채널의 깊이는 점진적으로 증가하게 설계하여 비슷한 압력 분포 특성을 얻을 수 있다.

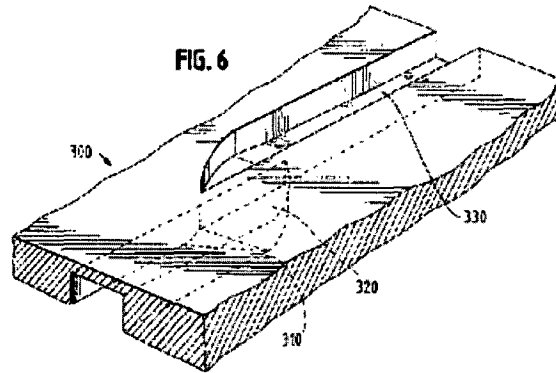
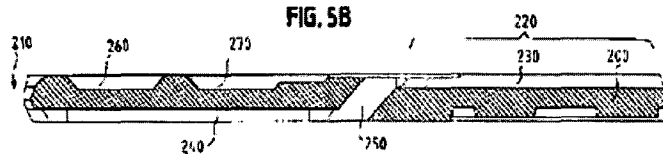
[그림 2-5]의 윗부분은 반응가스 유동방향으로 주기적으로 채널의 깊이가 변하는 가스 채널 형상을 보여주고 있다. 그림에서 65는 상대적으로 깊게 파인 채널을 66은 얇게



[그림 2-5] 실린더 형상 반응가스 채널의 분리판

파인 채널을 보여주고 있다. 상대적으로 깊게 파인 채널에서는 유체의 속도가 감소하게 되고 따라서 압력은 상대적으로 깊게 파인 채널 부위보다 높을 것이다. 실제 압력 분포나 채널간 압력차는 다양한 인자들 (예를 들면, 채널의 깊이가 다른 부분의 비율 등) 에 의해 영향을 받을 것이다. 어느 경우이든 이웃한 채널 간의 압력차는 0이 될 수는 없다. [그림 2-5]의 아래는 모래시계 모양을 가지며 주기적으로 폭이 변하는 분리판 채널 형상을 보여주고 있으며, 앞에서처럼 채널 길이 방향으로 이웃한 채널사이의 압력강하는 0이 될 수 없는 형상이다.

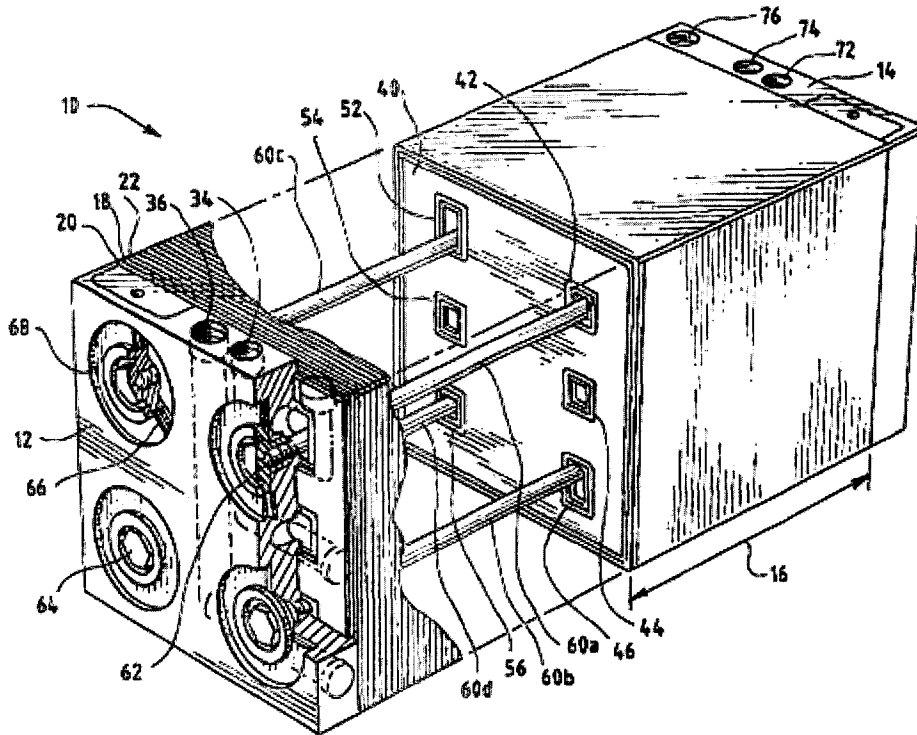
[그림 2-6]은 분리판의 채널로 기체가 들어가는 입구부분의 형상이다. 반응 기체는 매니폴드에서 채널과 같은 평면상에서 진입하는 것이 아니고 채널의 반대면에서 시작하여 분리판을 관통한 후 채널부로 진입하는 구조로 되어 있다. 이러한 구조의 장점은 기체 밀봉에 유리하다는 것이다. 밀봉을 위해서는 가스켓이 끊어진 부분 없이 놓여져야 하는데



[그림 2-6] 가스채널 입구부의 유로 형상

이러한 구조가 아니면 가스켓의 일부분과 기체 출입로가 중첩되어 밀봉을 어렵게 한다. 이러한 관통구조는 가스켓의 어느 부분도 기체 출입로와 접촉하지 않기 때문에 밀봉에 유리하다. 그러나 관통구조에서 문제점은 관통부 근처에서 직각으로 유로가 꺾임으로 인해 기체의 와류가 형성된다는 것이다. 이를 완화하기 위해 관통부를 곡선 처리함으로써 기체의 흐름을 원활하게 한 구조이다.

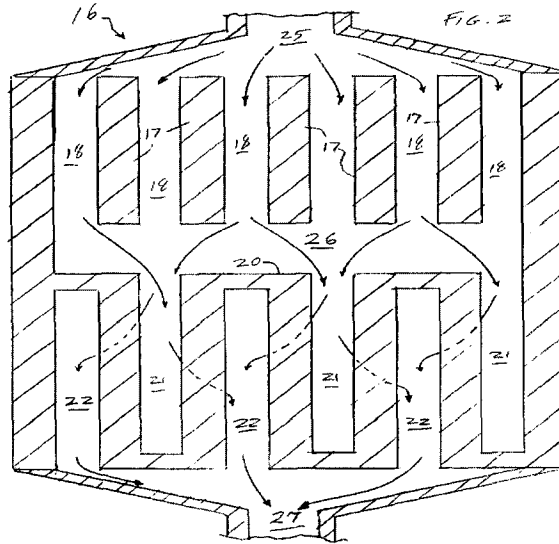
[그림 2-7]은 발라드사의 대표적인 특허 가운데 하나이다. 스택의 외각에 체결용 rod를 사용하여 체결하는 일반적인 방식이 아니고 스택의 중심부를 관통하여 체결하는 방식을 사용하고 있다. 체결용 rod는 매니폴드부분을 통과하게 되어 있으며 엔드판의 변형이 적고 셀 전체를 균일하게 압축할수 있으며 분리판의 면적대비 셀의 활성면적을 증가시킬수 있어 스택의 출력밀도를 향상시킬 수 있다. 그러나 매니폴드 부분을 체결용 rod가 공유함으로써 인해 각 채널로 공급되는 유량이 일정하지 않을 수 있으며 이는 셀의 성능저하를 일으킬 수 있다. 또한 매니폴드를 rod가 공유함으로써 인해 엔드판의 구조가 복잡해지는 단점도 있다.



[그림 2-7] 발라드사의 스택 구조

3. UTCFC (United Technology Corporation Fuel Cell)

UTCFC는 상압형 연료전지 시스템을 개발하여 기생전력을 최소화하는 가정용, 차량용 연료전지를 생산하는 업체로서 미국의 방위산업체으로 유명한 United Technology 그룹의 계열사이며 처음 회사를 설립하였을 때는 Internatioanl Fuel Cell의 이름을 사용하였으나 UTCFC로 개명하였다. 가압형 연료전지 시스템을 채택하는 발라드와 함께 세계 고분자 연료전지 기술을 양분하는 대표적 연료전지 개발업체로서 국내 현대자동차에 연료전지 스택 모듈을 제공하여 연료전지 자동차 개발을 지원하였다.



[그림 2-8] 하이브리드 반응가스 분리판 유로

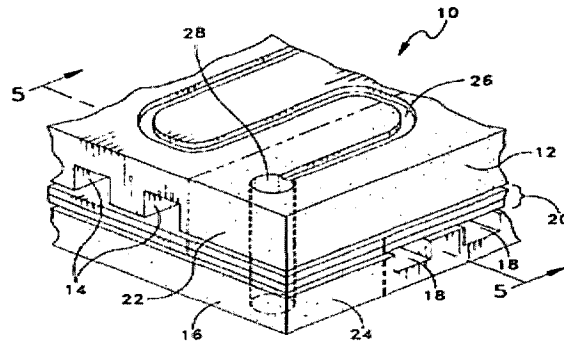
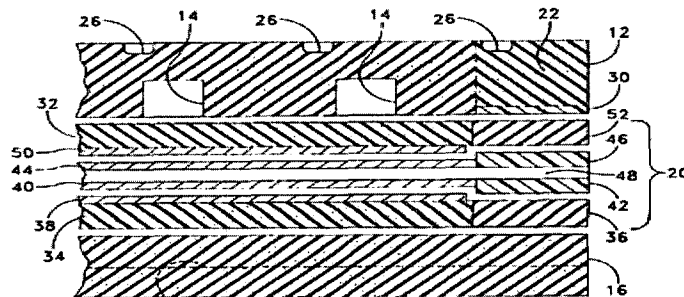


FIG. 4

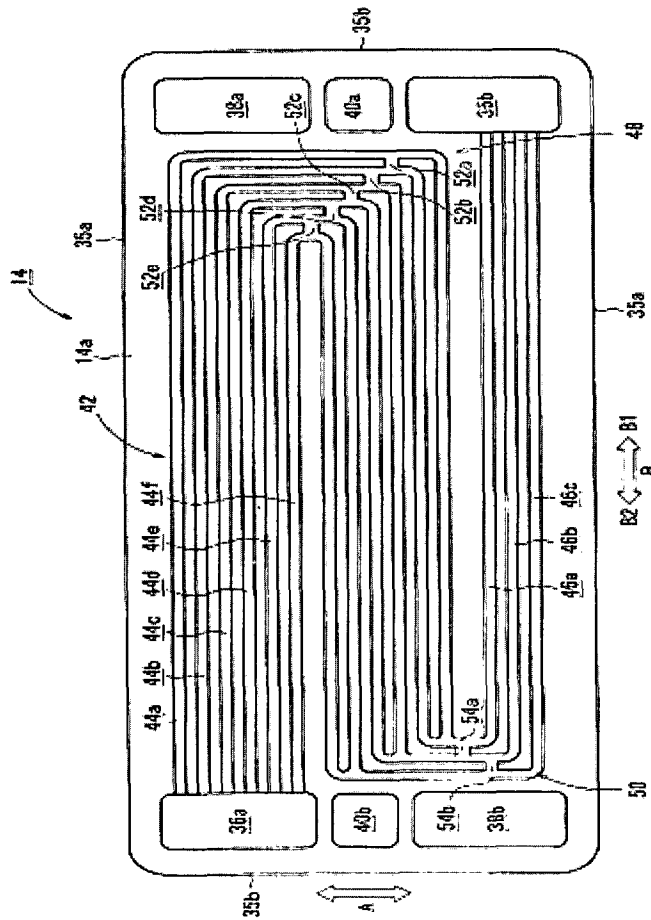


[그림 2-9] UTCFC의 실링기술을 포함한 스택기술

[그림 2-8]은 UTCFC가 개발한 하이브리드 연료전지 분리판 유로 디자인이다. 연료전지 반응가스는 18로 명명된 채널을 통해서 흐르다 26번 중간영역에서 혼합된 후 전체 채널의 하단부 영역에서 불연속(interdigitated) 유동 특성을 갖는다. UTCFC 만의 독특한 실링 기술로서 다공성의 분리판을 사용하며 물이 스며들기 쉽도록 분리판 표면에 친수성 처리를 하여 기공을 막지 않고 그대로 사용한다[그림 2-9]. 가습이 되지 않은 경우에는 분리판으로 기체가 투과하여 스택의 밀봉을 바랄 수 없으나 냉각판의 유로에 냉각수를 채우면 분리판의 기공으로 물이 스며들어 모세관 압력을 발생시키며 기체의 압력차가 모세관 압력보다 커지기 전까지는 밀봉이 된다. 이러한 액체의 모세관 압력을 이용한 밀봉 방식을 wet seal이라 하며 원래는 액체 전해질을 사용하는 인산형 연료전지에서 기술을 차용한 것이다. wet seal은 밀봉을 위한 가스켓에 문제가 있는 경우에 안전판 역할을 하며 기체의 분리판 투과에 대해 비교적 안정하다는 장점을 갖는다. 반면 분리판의 기공이 크기 때문에 분리판의 강도가 감소하여 스택 체결시 파괴되기 쉬운 단점을 갖게 된다.

4. 혼다 (Honda)

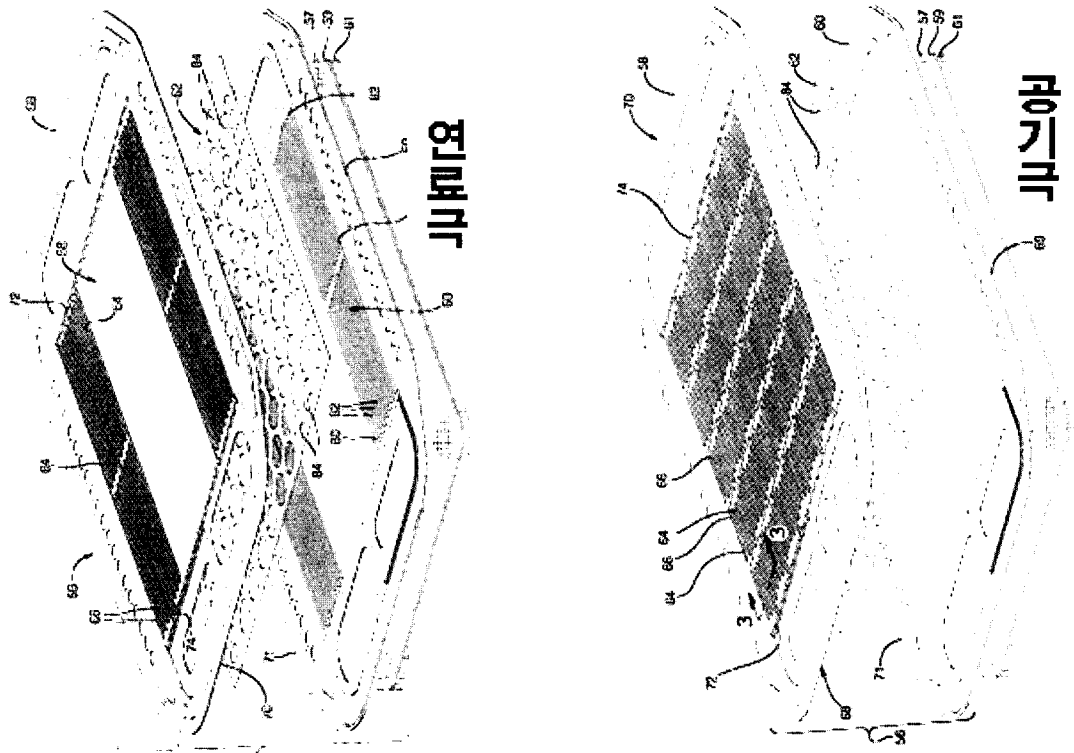
혼다자동차는 세계 최초로 연료전지 자동차를 시범 운행한 회사이다. 이 차량은 영하 30℃에서 운전이 가능하도록 설계되어 있으며 금속 분리판을 사용하였다. [그림 2-10]은 혼다자동차가 2003년에 특허 등록한 Bent Section Flow Passage Grooves를 갖는 연료전지 분리판 디자인이다. 최초 6개의 가스유로가 B1 방향으로 수평하게 뻗어있다. 48로 표시된 지역에서 한 번의 회전을 한 후에 각각 채널의 유로가 연결되어진 후 아래 방향으로 2개의 채널씩 독립된 형태를 취한 후, 50으로 표시된 영역 부근에서 회전하면서 최종적으로는 3개의 채널로 줄어들면서 출구측 매니폴드로 진행한다. 이 설계에서는 매니폴드 36a로부터 분리판으로 유입되는 채널당 유량 분배는 균일하게 존재하며 따라서 채널당 압력 강하는 거의 차이가 없다는 점이다. 또한 영역 50 근처에서는 채널수가 반으로 줄어들어 출구 매니폴드에 가까운 지역에서 유체의 속도가 증가하여 생성된 물을 매우 효과적으로 제거할 수 있으며 연료전지 출력 성능이 매우 만족할만하게 유지될 수 있다는 점이다.



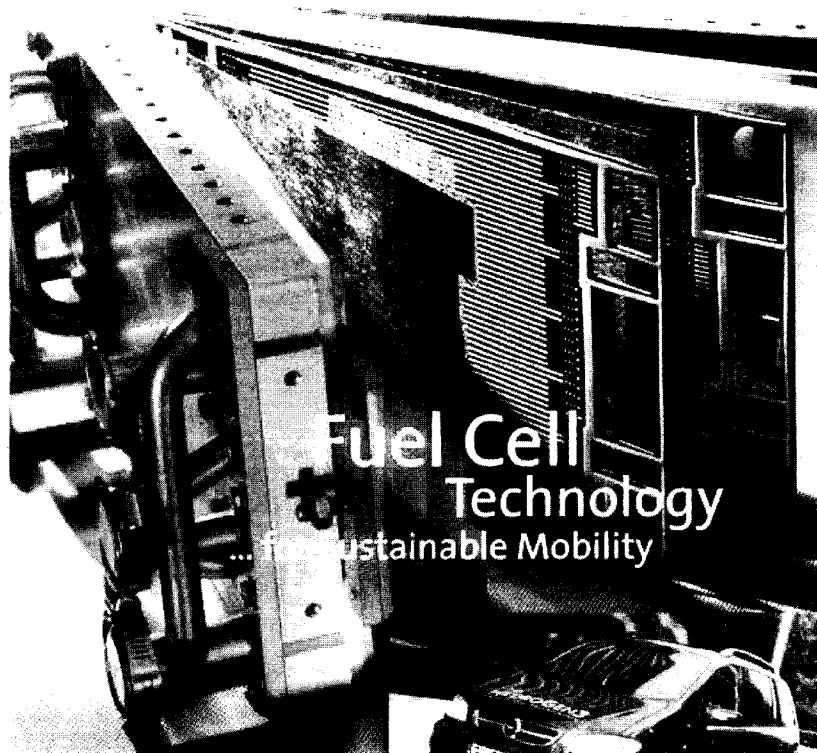
[그림 2-10] 혼다 연료전지 분리판 디자인

5. GM(General Motors)

[그림 2-11]이 GM 사의 자동차용 스택에 사용되는 분리판의 형상이다. 좌측은 연료극, 우측은 공기극이며 사행채널과 함께 평행채널에서 사용되는 여러 개의 섬모양의 기체 분배구조를 동시에 갖는 복합적인 구조로 되어 있다. 일반적인 사행채널처럼 한 개의 입구에서 출발하여 출구에 도달하는 것이 아니라 입구에서 여러개의 섬모양의 분배 구조를 통과한 후 여러개의 입구에서 동시에 사행채널로 진행 후 출구부분에서 다시 분배 구조를 통과하여 합쳐지는 구조로 되어 있다. 이러한 구조는 사행채널과 평행채널의 장점을 고루 얻기 위한 구조로 보인다. 그러나 분배구조의 설계가 잘못된 경우에는 셀 전체에 걸쳐 고른 기체 분포가 이루어 지지 않음으로 인해 결국 셀 전체의 성능을 저하시키는 원인으로 작용할 수 있다.



[그림 2-11] GM사의 금속 분리판 구조

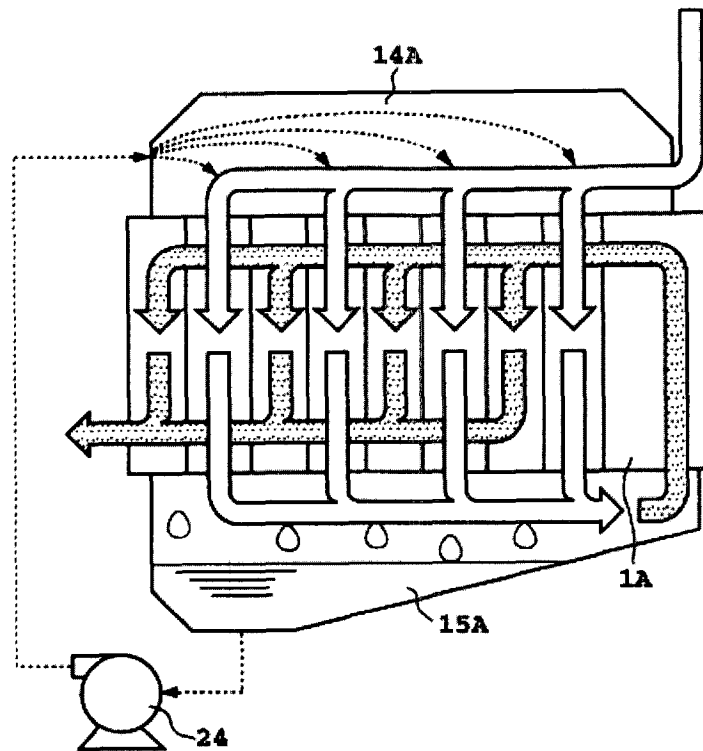


[그림 2-12] GM사 스택의 내부 구조

[그림 2-12]가 GM사의 연료전지 자동차에 사용된 스택의 내부구조를 보여주는 그림이다. 기체 및 냉각수의 입 출구는 수소, 공기, 냉각수 모두 2부분으로 나뉘어져 들어가게 구성되어 많은 유량을 감당할 수 있도록 배치하였다. 셀 내에서는 균일한 반응을 위해 매니폴드에서 채널로 진입할 때 여러개로 분기되어 셀의 전 면적에 기체가 고르게 분배되는 병렬 사행채널 구조를 채택하고 있다. 반응이 일어나는 활성면적은 분리판 면적의 80% 이상을 차지할 만큼 면적이용률이 크며 분리판의 외각은 거의 모든 면적이 매니폴드가 차지하고 있다. 밀봉을 위한 가스켓은 최소한의 폭을 사용하고 단순한 구조를 채용하여 활성면적의 활용도를 최대한으로 끌어 올리고 있는 효율적인 구조를 가지고 있다.

6. 후지사(Fuji Electric Co. Ltd.)

[그림 2-13]이 후지사의 시스템으로서 냉각 채널과 가슴기가 없는 구조가 특징이다. 고분자연료전지는 일정습도 이상의 수분공급이 필요하며 또한 냉각도 필요하다. 이를 위해서는 일반적으로 가슴기와 냉각을 위한 냉각수를 순환시키는 설비를 따로 구비하여야 하며 이는 시스템을 복잡하게 만들며 부가적인 동력을 소모하는 원인이 된다. 후지사는

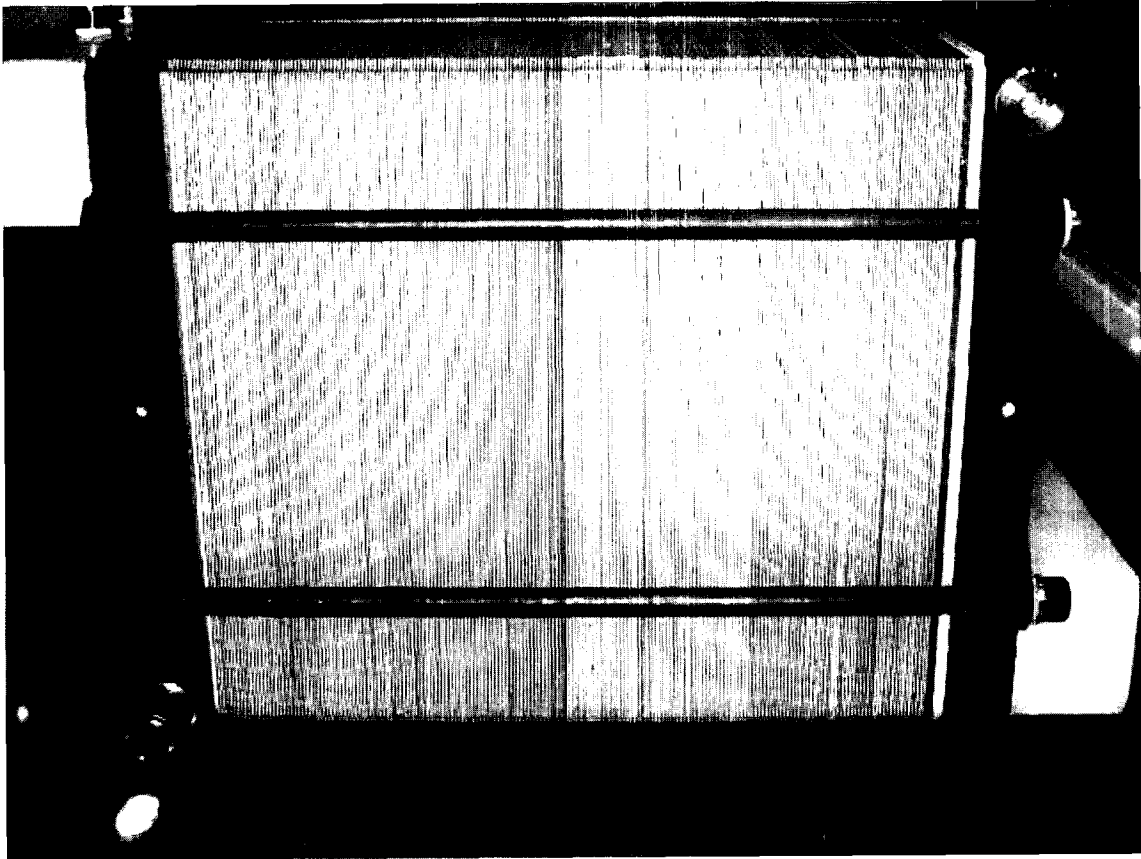


[그림 2-13] 후지사의 스택 구조

공기극쪽에 반응가스인 공기와 함께 물을 과잉으로 액상으로 흘려보내서 물이 기화되어 가습이 됨과 동시에 기화열에 의해 냉각이 이루어지는 시스템을 고안하였다. 전체적인 시스템은 단순해지나 공기극에서 액상의 물이 전기화학 반응을 방해하지 않도록 잘 배출시키는 분리판의 유로설계와 매니폴드 부분이 물에 잠기지 않도록 하는 디자인에 따라 시스템의 완성도가 결정되는 고안이다. Nuvera사의 정지형 연료전지 시스템에서도 후지사와 마찬가지로의 구조를 채택하고 있다.

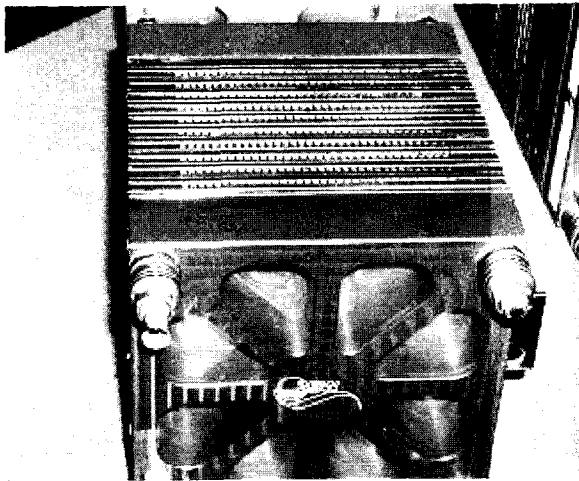
7. Intelligent Energy사

[그림 2-14]가 영국 Intelligent Energy 사의 스택이다. 분리판 으로는 금속을 사용하며 셀당 두께가 불과 2mm 정도에 지나지 않을 정도로 작은 것이 특징이다. 냉각수나 냉각판은 따로 존재하지 않는 것으로 보이며 일본 후지사의 시스템과 같이 공기극에 냉각수를 같이 흘려보내서 가습과 냉각을 동시에 달성하는 것으로 추측된다. 이 경우 셀간 두께가 상당히 작은 관계로 분리판의 유로의 깊이가 제한된 상태이므로 공기측 유로의 폭이 상당히 큰 평행채널 구조를 한 것으로 판단된다.



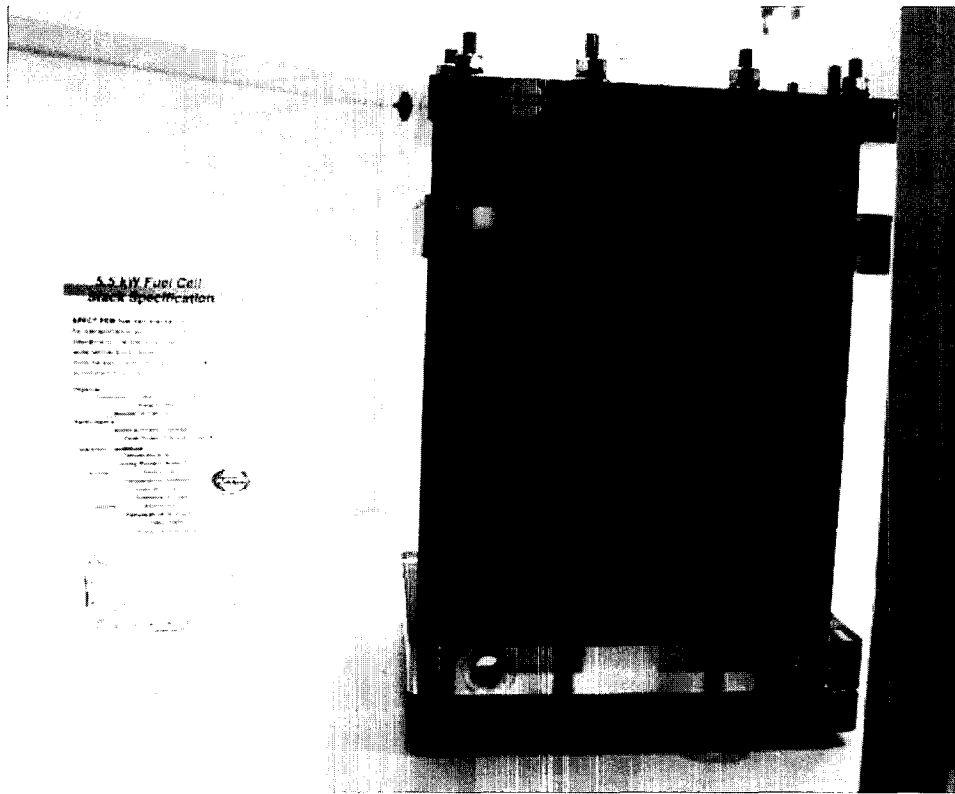
[그림 2-14] Intelligent Energy사의 스택 구조

8. 독일 ZSW사 Stack



[그림 2-15] 독일 ZSW사의 소형 스택 구조

[그림 2-15]가 독일의 벤처회사인 ZSW사의 공랭식 스택 사진으로서 Anodizing한 알루미늄을 엔드판으로 사용하는 것이 특징이다. 냉각 채널은 분리판에 폭 1mm 이상의 홈을 내어 스택을 체결하였을 때 스택을 관통하여 외부에서 공기가 공급될 수 있도록 냉각 채널들이 배치되도록 구성하여 냉각 휠을 구동하여 스택을 냉각한다. 일반적으로 1kW 미만일 경우 공랭식 냉각방식을 사용하는 것이 시스템을 간단하게 구성하고 소형화시키는데 유리하다. 1 kW이상 또는 배열을 활용하여야 하는 경우에는 수냉식을 사용하는 것이 일반적이다.



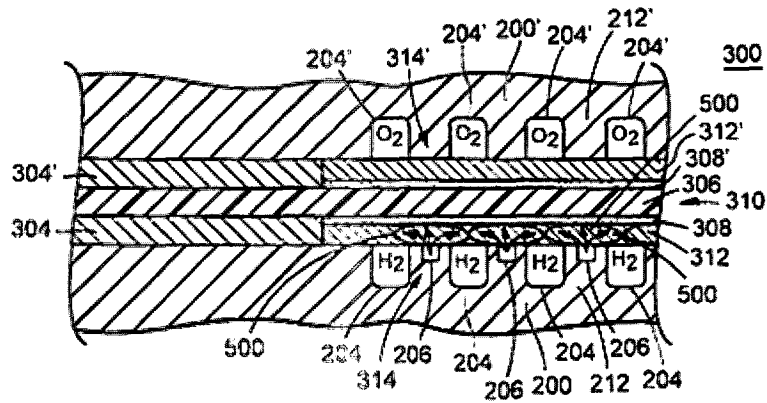
[그림 2-16] 대만 Asian Pacific사의 스택 구조

9. Asian Pacific사

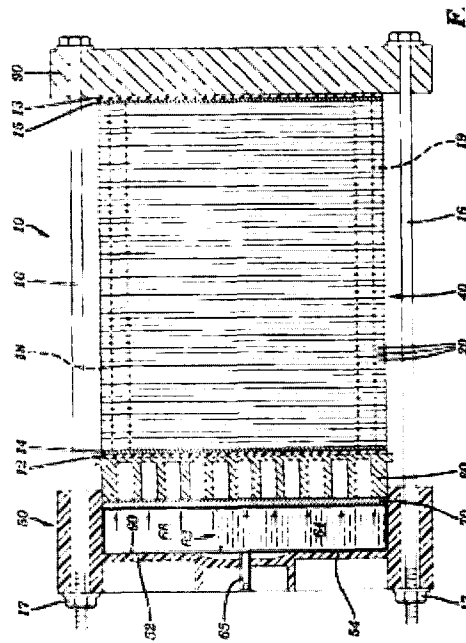
[그림 2-16]은 대만 Asian Pacific사 스택으로서 스택하부는 MEA가 포함된 발전스택이고 상부는 막가습기가 있는 가습부이다. 상부에서 가습된 공기가 하부의 스택으로 공급되는 가습기와 스택을 일체화한 구조이다.

10. Plug Power Inc.

Plug power 사는 미국 뿐 아니라 전 세계에서 가정용 연료전지를 가장 많이 보급한 회사로 이 분야에서 상당한 기술력을 보유하고 있다. [그림 2-17]은 고분자 연료전지의 셀에 물을 공급하기 위한 분리판의 새로운 구조도이다. 수소 연료가 흐르는 연료극 채널에 물을 공급하기 위한 채널을 하나 더 마련하여 가습기를 추가하지 않고도 가습을 할수 있는 구조이다. 아이디어는 훌륭하지만 실제로 가공상의 어려움이 있으며 압력차 조절이 어려워 전지내부가 flooding 되어 성능이 저하될 가능성을 가지는 단점이 있다.



[그림 2-17] Plug Power사의 스택 내부 구조



[그림 2-18] Plug Power사의 스택 외형 구조

[그림 2-18]이 Plug Power 사의 스택 체결구조인데 일정 압력을 셀에 전달할 수 있는 구조이다. 엔드판 부분에 빈 공간을 만들어 액체 또는 기체를 저장한다. 저장된 액체 또는 기체 온도에 따라 그 온도에 해당하는 증기압을 발생시키게 되어 일정압력을 셀에 전달하게 된다. 사용하는 조성은 NH_3 , CCl_3F , C_3H_8 또는 C_3H_6 이며, 사용하는 온도와 압력 범위에서 액상과 기상이 공존하는 화합물 들이며 부피에 상관없이 온도가 정해지면 일정한 증기압을 발생하게 되어 장기 운전 중에도 스택에 일정한 압력이 전달된다.

11. 분리판 및 스택 해석

앞에서 설명한 분리판 설계 형상 외에도 다양한 디자인이 논문이나 특허에서 제시되고 있으며 각각의 연료전지 시스템의 응용 목적과 특성 및 생산성 측면을 고려할 필요가 있다. 일반적으로 자동차용의 경우는 그 특성상 분리판 가로와 세로의 종횡비가 매우 큰 구조를 채택하고 있으며 기생전력을 최소화하여 연료전지 스택에서 생산된 전력의 동력 변환을 극대화 하려는 추세를 반영하여 압력강하를 최소화하면서 수분 제거를 효과적으로 할 수 있는 분리판 개발에 초점을 맞추고 있다. 또한 현재까지 연료전지 분리판이나 스택 디자인 설계시에는 대부분 순수한 유체 유동 관점에서만 접근하여 왔으나 보다 구체적으로 연료전지 내부에서 일어나는 다양한 반응물의 소멸과 물의 생성에 대한 복합적 해석을 바탕으로 한 접근법이 필요한 시점이다. 이를 위해서 본 연구에서는 유체 역학적 해석을 근간으로 한 분리판 해석으로 부터 물질 및 전하 전달을 포함하여, 최종적으로는 열전달 해석을 접목시키는 포괄적 연료전지 분리판 해석 결과를 제시하였다.

전극전해질을 사이에 두고 연료와 산화제 공급을 위한 분리판과 산화제 공급면의 뒤쪽에 가공된 냉각판이 연속적으로 쌓여서 스택이 구성된다. 특허를 통해서는 다양한 스택 형상과 구성방법이 소개되고 있지만 논문으로는 설계와 해석을 위한 기술이 거의 발표되고 있지 않다. 동일한 단위전지가 연속적으로 연결되어 있기 때문에 유량이 균일하게 분포한다는 가정 하에 연료전지의 해석이 주로 단위 전지 차원에서 이루어지고 있으며 반응가스가 각 단위전지로 일정하게 분배될 경우에는 큰 문제가 없지만 실제적으로는 입구와 출구에서 유량 분배가 달라질 수 있으며 스택 설계를 위해서는 매니폴드와 단위전지의 채널간의 유량 분배에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 각 단위전지에 가스를 분배하는 역할을 하는 매니폴드의 형상과 가스 인입부의 위치와 형상에 따라 가스 분배율이 달라 질수 있기 때문에 이에 대한 해석을 수행하였다.

제 2 절 시스템 기술

미국과 일본을 중심으로 소 분자 전해질 연료전지를 사용하는 연료전지 자동차와 가정용 연료전지에 대한 적용 연구가 진행되고 있으며 국내에서도 가정용과 자동차용 연료전지 시스템과 운전장치에 대한 개발이 진행되고 있다. 고분자 전해질 연료전지는 용량에 따라 이동형 전원에서 전기자동차 전원 그리고 발전플랜트까지 다양한 응용성을 가지고 있다.

이동형 연료전지는 대부분 고분자형(PEFC)과 직접메탄올 형(DMFC) 기술이 사용되고 있으며, 수mW~수W급을 위해서는 DMFC 기술이, 수W~수십W급의 기기를 위해서는 소형 개질장치나 수소 저장장치를 갖춘 PEFC 기술이 시장을 점유할 것으로 예측되고 있으며, 백 W급 이상에서는 PEFC가 적용될 것이다. 이동용 연료전지 연구 개발에서 현재 가장 활발한 지역은 북미(주로 미국)이지만 북미 회사들은 대부분은 정부 지원 프로그램에 참여하고 있고 프로젝트 기반으로 단지 몇 개의 시제품만을 만들고 있다. 일본의 전지와 전자기기 업체들 대부분이 일반 소비자를 위해 대량 생산을 계획하고 있다. 자동차 등의 전원으로는 다음과 같은 장점으로 인해 고분자전해질 연료전지가 사용되고 있다.

- 전류밀도 및 출력밀도가 크며 저온 운전으로 설치 장소의 제약이 적음
- 설비 구조가 단순하여 소형 시스템 구성이 용이
- 기동 시간이 짧은 동시에 부하 변화에 대한 응답특성이 빠름
- 전해질로 고분자막을 사용하므로 부식문제가 적으며 전해질 보충이 필요 없음

차량의 운행환경 및 설계 요구조건에 따라 80kW 내외의 출력이 필요하며 기존의 내연기관과 비교하여 경쟁력을 확보하기 위하여 승용차라는 제한된 공간에서 차량의 구동에 필요한 동력을 충분히 제공할 수 있도록 동력밀도를 개선하는 기술개발과 혹서/혹한 등의 극한 환경조건에서 견딜 수 있는 기술이 필요하다. 또한 자동차의 수명을 보증하기 위한 내구성 확보 및 가격경쟁력을 확보할 수 있는 가격절감 기술의 개발이 필요하다. <표 2-1>은 국내외 연료전지 자동차 개발 현황을 나타내고 있다.

<표 2-1> 국내외 연료전지 자동차 개발 현황

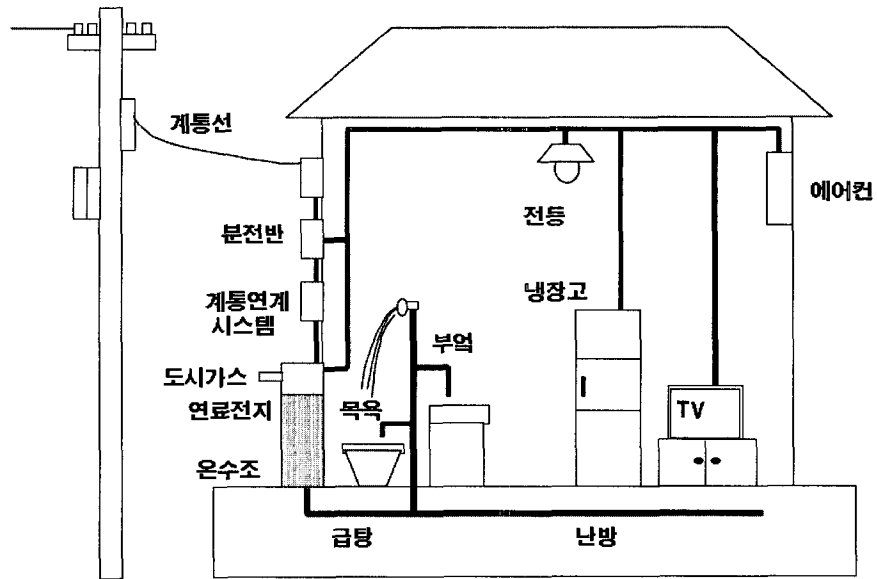
회사	개발차량		연료	주요내용	상용화 계획
현대자동차	산타페 (FCHEV)		압축수소 (350bar)	<input type="checkbox"/> 출력: 75kW급(hybrid) 20kW Ni-MH battery <input type="checkbox"/> 최고속도: 125km/h <input type="checkbox"/> 주행거리: 160 km	2010년 국산화
GM	HydroGen3		액체수소 (4.6kg) 압축수소 (700bar 3.2kg)	<input type="checkbox"/> 출력: 94kW급(hybrid) <input type="checkbox"/> 시동: 30초 <input type="checkbox"/> 최고속도: 160km/h <input type="checkbox"/> 주행거리: 400km (액체수소) 270km (압축수소)	2004년
Ford	Focus FCV-hybrid		압축수소 (350bar)	<input type="checkbox"/> 출력: 65kW급(hybrid) Ballard PEFC stack Sanyo Ni-MH battery <input type="checkbox"/> 최고속도: 128km/h <input type="checkbox"/> 주행거리: 320km	2004년
Daimler Chrysler	NECAR-5		MeOH	<input type="checkbox"/> 출력: 75kW급 <input type="checkbox"/> 최고속도: 150km/h <input type="checkbox"/> 주행거리: 500km	2004년
Toyota	FCH-4		압축수소 (250bar)	<input type="checkbox"/> 출력: 80kW급(hybrid) <input type="checkbox"/> 최고속도: 150km/h <input type="checkbox"/> 주행거리: 250km	2003년
Honda	FCX		압축수소 (340bar)	<input type="checkbox"/> 출력: 78kW급 <input type="checkbox"/> 최고속도: 150km/h <input type="checkbox"/> 주행거리: 355km	2004년
Nissan	X-TRAIL FCV		압축수소 (350bar)	<input type="checkbox"/> 출력: 75kW급(hybrid) UTC PEMFC stack Li-ion battery <input type="checkbox"/> 최고속도: 125km/h	2005년

분산전원용 연료전지는 초기에 발전소의 전력을 일부 대체하려는 목적으로 수백 kW급의 대형 시스템이 개발되었으나 현재는 전 세계적으로도 주택용 연료전지가 가장 활발하게 개발되고 있으며 상업화도 가장 먼저 이루어질 것으로 전망되고 있다. 소형 분산전원용 연료전지는 대부분 PEFC가 적용되었으며 일부 고체산화물 연료전지(SOFC) 기술이 사용되고 있다. [그림 2-19]와 [그림 2-20]이 계통 연계형으로 개발되는 주택용 연료전지 개념도와 구성도를 나타낸다. [그림 2-21]이 현재로서 가장 성능이 우수한 가정용 연료전지의 효율을 나타내는 것으로 열회수 효율까지 고려하면 총 효율은 80% 정도가 된다.

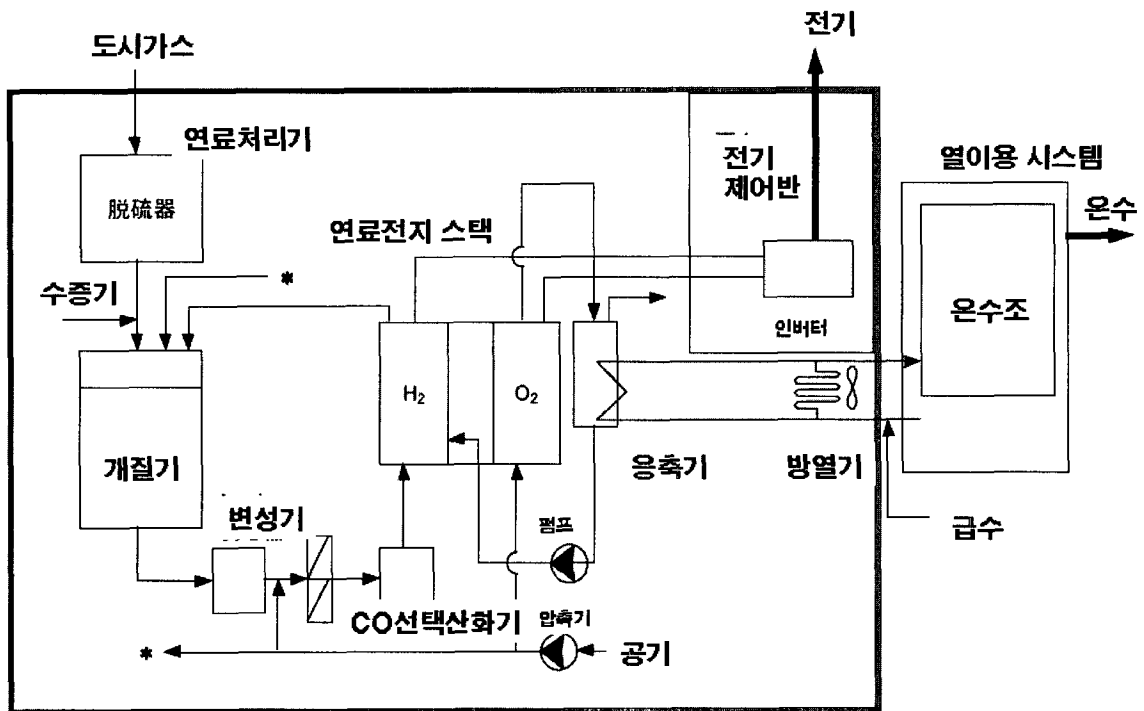
소형 분산전원의 경우 연료전지 시스템의 가격 절감 및 수명향상이 가장 큰 과제로 인식되고 있으며 대부분 실증단계에 머물러 있다. 최근에는 주택용 시장으로부터 백업용, 무정전 및 오지용 전원 쪽으로 관심이 전환되고 있다. <표 2-2>가 주택용 연료전지 개발 현황이다. 미국 Plug Power사는 GenSys(5kW 열병합시스템), GenCore (5kW 파워모듈)을 개발하여 시범운전에 적용하고 있으며 Long Island Power Authority(LIPA)와 변전소에 120기 설치하는 등 미국 국방성이 주관하는 실증사업에 주도적으로 참여하고 있다. Ebara Ballard는 발라드사와 합작하여 1kW 시스템을 개발하였으며 2004년까지 일본의 17군데에서 실증 중이다.

국내의 경우 GS Fuel Cell, Fuel Cell Power사에서 가정용 연료전지를 개발하여 실증 운전 중이다.

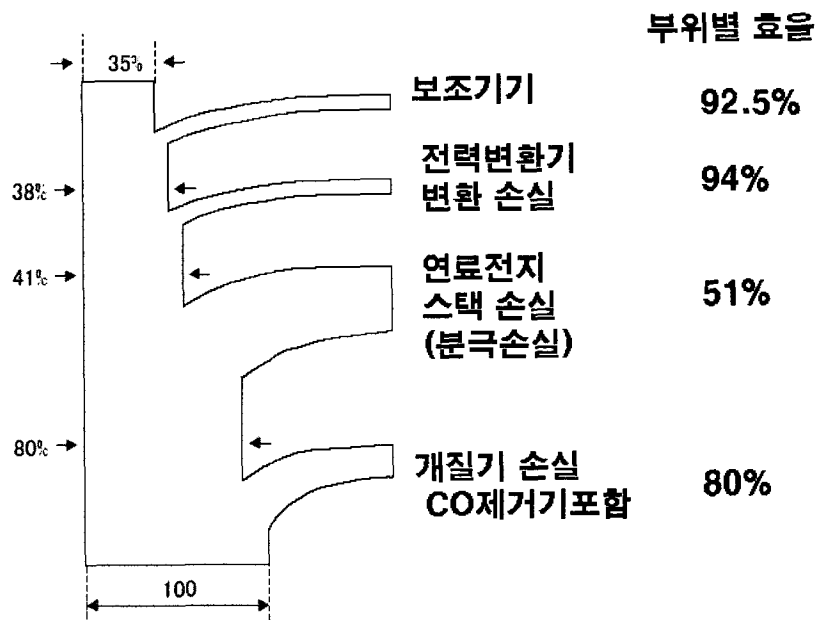
현재 연료전지시스템은 대규모의 발전 설비보다는 5kW 이하의 주택용과 자동차용 연료전지에 대한 연구가 집중되고 있다. 주택용 연료전지로는 가정에서 열과 전기를 이용하는 기위한 코제너레이션 기술에 대한 연구가 이루어지고 있다. 미국과 일본을 비롯한 선진국과 국내의 경우 연구활동이 대부분 하드웨어 기반 구축에 집중되고 있으며 하드웨어 개발 프로그램의 일부분으로 해석기술이 단편적으로 다루어지고 있다. 독립적인 연구는 대학에서 주로 수행되고 있어 하드웨어와 연계된 실질적인 결과가 나오기 어려운 상태이다. 연료전지의 실용화를 위해서는 설계 기술의 확립되어야 하며 이를 위해서는 이론적인 접근방법이 필요하다. 복잡성으로 인해 연료전지의 설계와 검증을 해석을 수행하기 위해서는 컴퓨터를 이용한 수치해석적인 시뮬레이션이 방법이 필요하다.



[그림 2-19] 주택용 연료전지 개념도


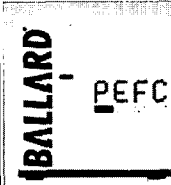
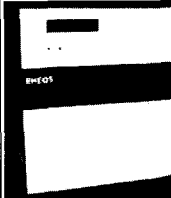

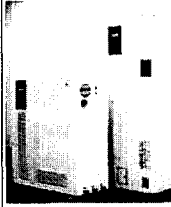

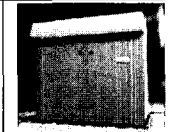


[그림 2-20] 연료전지 코제너레이션 시스템 구성도



[그림 2-21] 가정용 연료전지 효율 및 에너지 손실

<표 2-2 주택용 연료전지 등 소형 분산발전 시스템>

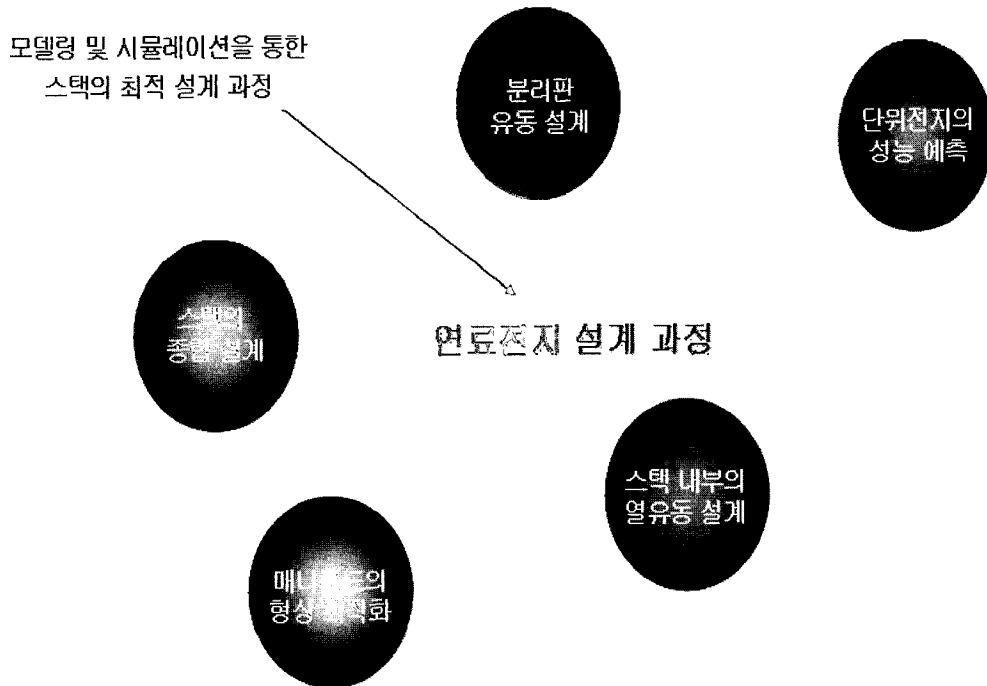
회사	개발제품		연료전지 종류	주요내용	상용화 계획
Avista Labs	Independence 1000		PEMFC	<input type="checkbox"/> 출력: 1kW급 <input type="checkbox"/> 연료: 산업용 수소 <input type="checkbox"/> 크기: 0.5X0.4X0.6m, 66kg <input type="checkbox"/> 운전: 수천시간 <input type="checkbox"/> 용도: 백업전원용 <input type="checkbox"/> 특징: MEA, 카트리지 모듈 적용, 발전효율: 36-40%	시제품 판매 중 US\$8050
Balard Power Systems (Ebara)	1kW cogeneration stationary system		PEMFC	<input type="checkbox"/> 출력: 1kW급 <input type="checkbox"/> 연료: NG (개질기: Tokyo Gas) <input type="checkbox"/> 크기: 0.9X0.9X0.9m <input type="checkbox"/> 운전: 40,000시간목표 <input type="checkbox"/> 용도: 가정용, 열병합발전 <input type="checkbox"/> 특징 : 발전효율: 34% 열효율: 58% 총효율: 92%	2004년 US\$4000 예상
Nippon Oil	ENEOS		PEMFC	<input type="checkbox"/> 출력: 1kW급 <input type="checkbox"/> 연료: LPG <input type="checkbox"/> 크기: 1X0.9X0.5m <input type="checkbox"/> 용도: 가정용, 열병합발전 <input type="checkbox"/> 특징 : 발전효율: 32% 열효율: 40% 총효율: 72%	2005년 US\$4200 목표
Sanyo Electric	1kW PEMFC System		PEMFC	<input type="checkbox"/> 출력: 1kW급 <input type="checkbox"/> 연료: NG <input type="checkbox"/> 운전: 40,000시간목표 <input type="checkbox"/> 용도: 가정용, 열병합발전 <input type="checkbox"/> 특징 : 발전효율: 35%목표	2005년 US\$4000 목표
Toshiba Internationa l Fuel Cells (TIFC)	5kW PEMFC System		PEMFC	<input type="checkbox"/> 출력: 5kW급 <input type="checkbox"/> 연료: NG/LPG <input type="checkbox"/> 크기: 1.0X0.7X1.7m(550kg) <input type="checkbox"/> 용도: 상업용/가정용 <input type="checkbox"/> 특징 : UTC 스택 및 Hydrogen sources 부분산화개질기 적용	2004년 US\$ 25,000 목표
NUVERA Fuel Cells	AVANTI		PEMFC	<input type="checkbox"/> 출력: 3.7kW급 <input type="checkbox"/> 연료: NG <input type="checkbox"/> 크기: 0.7X0.8X1.5m(431kg) <input type="checkbox"/> 운전: 1000시간보증 <input type="checkbox"/> 용도: 가정용, 열병합발전 <input type="checkbox"/> 특징 : 발전효율: 31.5%	Prototype type 실증시험중
Plug Power	GenCore		PEMFC	<input type="checkbox"/> 출력: 5kW급 <input type="checkbox"/> 연료: 수소, 도시가스 <input type="checkbox"/> 크기: 1.1X0.7X1.5m(180kg) <input type="checkbox"/> 용도: 백업 및 가정용전원	실증시험중

제 3 장 수냉식 분리판 설계 및 해석

제 1 절 유동 해석

1. 수냉식 연료전지 해석

연료전지의 성능을 최적화하기 위해서는 전지내부에서 발생하는 전기화학적 특성과 더불어 열·유체역학적으로 발생하는 다양한 열 및 물질전달 현상에 대한 이해가 필요하다. 전력을 생산하는 스택에서 발생하는 열 및 물질 전달 특성을 이해하고 이를 스택 설계에 반영하기 위해서는 기본 단위인 단위전지에서 공급된 가스의 반응 구조와 열특성을 이해할 필요가 있다. 단위전지 내부에서 반응가스의 조성과 확산 및 대류현상에 대한 종합적 고찰과 반응 후 생성물의 상태, 특히 물의 거동에 대한 분석이 필요하며 연료전지의 냉각



[그림 3-1] 연료전지 설계 과정

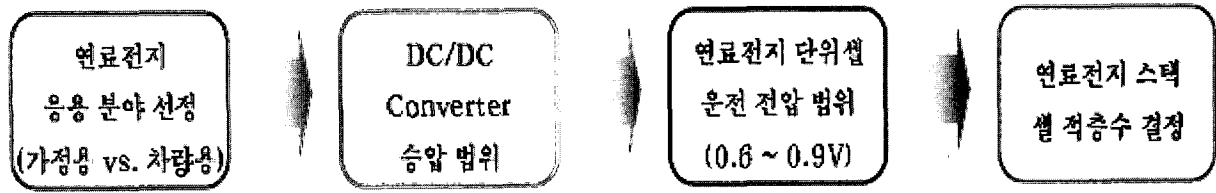
과 온도 분포를 예측하기 위한 열전달 특성에 대한 분석과 이해가 필요하다. 일반적인 연료전지의 설계 과정을 간략히 소개하면 [그림 3-1]에서 보듯이 그 첫 단계로서 분리판의

유동장(Flow field) 설계가 수행되어야 하며, 다음으로 물질 및 전하 전달현상을 포함한 단위 전지의 성능을 예측하는 단계를 지나서 매니폴드의 형상 최적화 및 스택 내부의 열·유동 설계과정이 진행된다. 이들 각각은 연료전지 스택의 최소 단위인 분리판과 발전 모듈인 스택의 설계에 이르는 과정을 대표하게 된다.

분리판은 반응에 필요한 산화 gas와 연료 gas를 양면으로 공급하고 단위 전지의 양극과 음극을 직렬로 연결시켜 주는 전도체의 역할을 동시에 수행하는 중요한 구성 요소로서, 반응 gas 공급을 위한 채널과 전자의 흐름을 위한 리브에 의해 요철 형상을 가진다. 분리판의 한 면은 산화 gas(Oxidant)를 공급하기 위한 채널이 형성되어 있으며 전기적으로 양극(Cathode) 역할을 하고, 다른 한 면은 연료 gas(Fuel) 공급을 위한 유로가 형성되어 있으며 인접한 단위 전지의 음극(Anode) 역할을 한다. 산화 gas 및 연료 gas 공급을 위해 분리판의 양쪽 표면에 가공되는 채널은 설계시 주어지는 반응면적, 압력강하 허용범위 그리고 gas 종류 및 이용률 등에 의해 크기와 모양이 결정된다. 산화 gas 및 연료 gas 공급을 위한 각각의 채널에서의 gas 공급이 불균일할 경우 전류 분포와 온도 분포도 균일하지 않게 되어 국부적으로 전기 및 열적으로 과부하 상태가 될 수 있으므로 균일 유동을 위한 채널 설계가 필요하다. 유동이 균일하지 않을 경우 전지의 효율 저하는 물론 수명 단축을 초래할 수 있어 채널의 형태와 단면 크기는 유동의 균일성을 고려하여 세밀히 설계되어야 한다.

연료전지 분리판의 형상과 크기는 전극전해질접합체를 사이로 가스확산층과 분리판이 양쪽에 존재하는 단위전지가 적층되어 만들어지는 스택의 출력과 적용분야에 따라 달라질 수 있다. 일반적으로 가정용 연료전지는 계통에 연계되는 것이 일반적이며 주로 1~5kW급으로 설계되고 있다. 차량용의 경우는 승용차를 위해서는 80kW 정도까지 설계되며 버스의 경우는 100kW급에서 200kW급까지 다양한 연료전지가 적용되며 연료전지와 이차전지나 캐패시터를 병렬로 연결한 하이브리드 시스템의 설계 방식과 버스 용도에 따라 설계 용량이 변할 수 있다. 분리판 설계시 고려할 사항으로 중요한 인자는 전력변환기의 입력 전압범위이다. 가정용의 경우는 대략 30 ~ 70 V, 차량용의 경우는 200 ~ 400 V 범위의 입력 범위를 갖는 DC/DC 컨버터가 사용된다. 단위전지에서 최대 출력과 효율을 고려한 경우, 셀 전압이 0.6V에서 0.95V 사이에서 변한다고 가정하면, 연료전지 스택에 직렬로 연결되어 적층되는 총 셀의 숫자는 가정용의 경우 약 40 ~ 70장, 차량용의 경우는 400장 정도라고 유추할 수 있으며 이러한 과정을 정리하면 [그림 3-2]와 같다. 이는 일반적으로 연료전지용으로 개발된 현재의 추세를 반영할 뿐 절대적인 수치는 아니다.

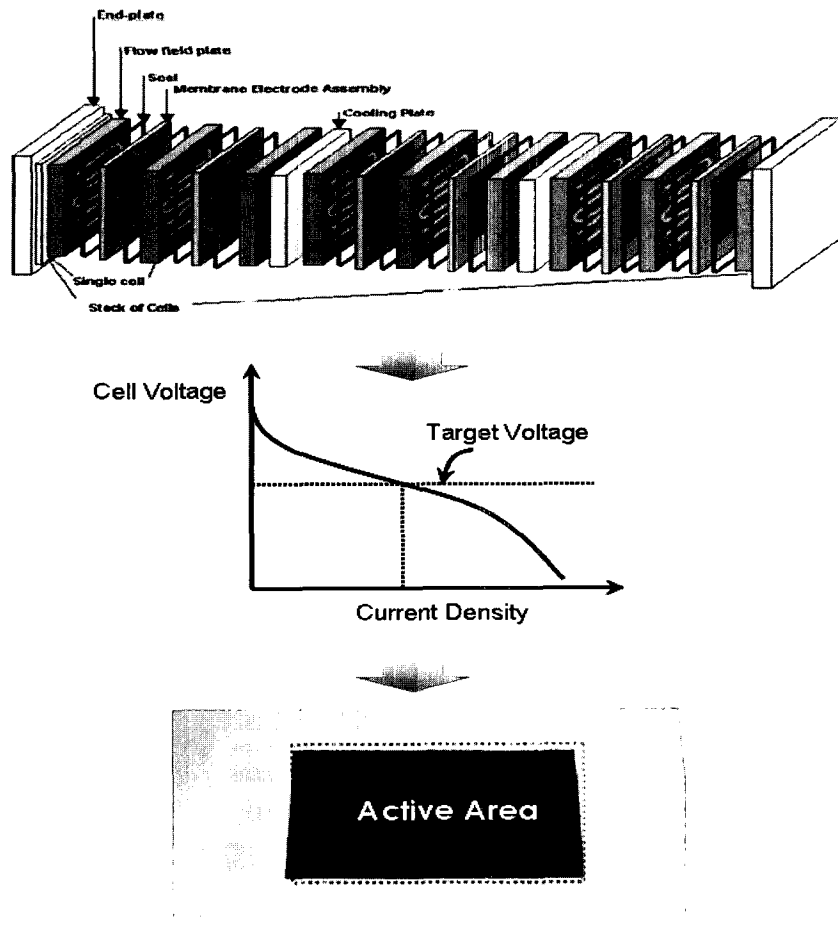
일반적으로 가정용의 경우는 화학공장이나 재생에너지를 이용하여 생산된 순도가 높은



[그림 3-2] 연료전지 스택 셀 적층수 결정 과정

수소(99.99% 이상)를 연료로 사용하기 보다는 도시가스를 개질하여 연료전지 스택에 공급하는 방식이 채택되고 있다. 연료전지 차량의 경우도 초기 개발단계에서는 메탄을 개질 방식이 시도되었으나 공정의 복잡성으로 공간의 제약으로 인해 최근에는 고압의 수소 실린더에서 연료를 직접 전달하는 방식을 취하고 있다. 용도에 따라 달라질 수 있는 연료의 차이로 인하여 가정용과 차량용 연료전지의 출력 성능이 다르다. 차량용의 경우는 일반적으로 최대 출력 범위인 0.6V에서 1.0 A/cm² 이상의 전류 밀도를 얻을 수 있으나, 가정용의 경우는 개질수소가스에 포함된 비활성 기체나 기타 오염 가스 성분으로 인하여 0.5A/cm² 근처의 낮은 전류 밀도를 얻을 수 있다. 또한 차량용의 경우는 매우 요구 부하 특성에 의해 출력 변화가 심한 반면, 1kW급 가정용의 경우는 계통 연계가 되어 일정 부하로 운전되어 단위 셀을 근거로 할 때 0.7V & 0.3 A/cm² 근처에서 주로 운전되는 것이 일반적이다. 5kW급으로 개발되는 가정용의 경우에는 전력 수요 보다는 열부하 측면을 고려한 측면이 강하여 이 경우 단위 셀당 0.6V에서 최대 출력이 발생한다고 보면 타당하다. 이러한 연료전지 응용상의 특성을 반영하여 앞에서 서술된 DC/DC 전력변환기 입력 범위로부터 구한 연료전지 스택을 구성하는데 필요한 분리판의 개수를 고려하면, 가정용 1 ~ 5kW급의 경우는 대략 100 ~ 250cm², 차량용의 경우는 250 ~ 450cm²의 반응면적이 되도록 분리판이 설계된다. 연료전지 분리판의 반응 면적선정 과정을 도식적으로 설명한 것이 [그림 3-3]이다.

연료전지 분리판 설계시 고려해야 될 또 하나의 사항은 냉각방식으로, 공랭식과 수냉식에 따라 분리판의 형상이 다르다. 일반적으로 공랭식 냉각 시스템은 수냉식에 비해 냉각 분리판의 채널 크기가 상대적으로 매우 크다. 이는 냉매로 이용되는 공기의 열용량이 작아서 유량 단면을 크게 하여 많은 유량을 압력손실 없이 통과시키기 위한 것이다. 유체 유로의 압력 강하는 유속과 채널의 길이에 비례하여 증가하기 때문에 공기 냉각 방식의 경우에는 채널의 단면적은 크게 유지하면서 전체 유로의 길이는 짧게 설계한다.



[그림 3-3] 연료전지 분리판 반응(활성) 면적 선정 과정

공랭식 냉각 시스템의 경우 크게 두 가지로 냉각방식을 구분할 수 있다. 첫째는 일반적인 연료전지 분리판 제작처럼 냉각 채널을 따로 만드는 방식과 또 다른 하나는 산화제인 공기 채널의 단면을 크게 설계하여 공기를 산화제이자 냉매로써 사용하는 방법이다. 전자의 경우는 kW급 수준의 공랭식 연료전지 스택을 제작할 때 채택하는 방식이고 후자의 경우는 자기 호흡식 고분자 전해질 연료전지 시스템 같은 수십 W급 이동형 연료전지 시스템에 적용하는 방식이다. 특히 공기를 산화제이자 냉매로 사용하는 경우는 공급되는 반응가스의 습도와 온도가 성능에 미치는 영향이 크므로 이에 대한 고려가 필요하다. 다시 말해서, 100 W급 이상의 연료전지 시스템에 적용하는 경우에는 고분자 전해질 이온 교환막을 적절한 가습 상태로 유지하기 위해서는 냉각과 산화제로서 공급되는 공기 유량을 가습시키기 위해서 필요 이상의 대용량 가습기가 필요할 수도 있다. 이러한 경우에는 냉

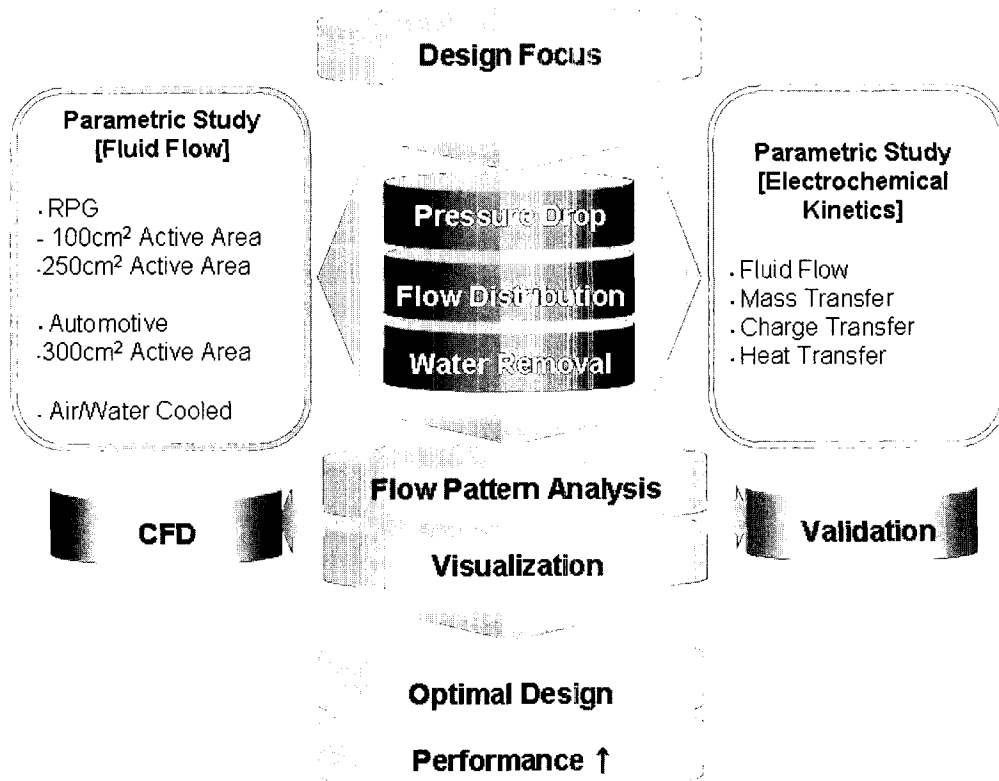
각과 반응을 위한 공기 채널을 분리하는 것이 전체 시스템 크기나 부하 제어 측면에서 유리하다. 물을 냉매로 이용하는 수냉식 시스템은 열병합 시스템으로 사용하는 kW급 가정용 연료전지나 차량용 연료전지 시스템 같은 수십 kW급 대용량 연료전지 일반적으로 사용된다. 연료전지 시스템 운전시 발전되는 전력량에 비례하는 양의 열이 스택으로부터 발생하게 된다. 이를 효과적으로 제거하거나 열로 회수하여 이용하기 위해서는 열용량이 큰 물이나 에틸렌글리콜 등이 차량용 등에 일반적으로 사용된다. 이 때 주의할 점은 냉매로 사용되는 물질의 전기적 전도성과 열용량 그리고 부식성 등이다. 일반적으로 물을 냉매로 사용하는 경우 탈이온수를 만들어 사용하며 냉각라인 입구로 냉매를 공급하기 전에 불순물을 제거하는 과정이 필요하다.

본 장에서는 가정용과 차량용으로 개발되는 연료전지 분리판 설계 과정에 대해서 기술하고자 하며, 또한 공랭식과 수냉식 연료전지 스택에 대해서도 연구결과를 정리하였다. 가정용 분리판의 경우 반응면적의 크기가 250cm^2 인 경우에 대해서 설계 해석하였으며 차량용의 경우는 반응면적이 450cm^2 인 대면적 분리판에서의 반응가스 유체 유동 현상에 대해서 분석하였다. 또한 연료전지 운전시 발생하는 비균일 온도 현상에 대한 연구를 위하여 단순화된 채널 형상을 이용하여 물질 전달, 전하 전달 및 에너지 보존 방정식을 적용하여 연료전지 내부 온도 분포를 예측하였다.

본 연구의 목적은 [그림 3-4]에서 제시되듯이 연료전지 스택 유체 유동과 전달 현상에 대한 이해를 바탕으로 연료전지 시스템의 성능을 최적화할 수 있는 분리판 설계 방안을 제시하는 것이다.

2. 연료전지 분리판 설계 변수

연료전지 분리판은 Separator 또는 Bipolar Plate라고 불리는데 이는 분리판의 양쪽 외부 표면에 새겨진 채널을 통하여 외부에서 공급된 수소와 공기의 공급 유로를 제공하며, 별도로 공기 공급판 반대편에 가공된 채널을 통해서 냉매 (일반적으로 탈이온수를 사용하는 경우 냉각수로 호칭)를 관통시켜 연료전지의 온도 제어 역할을 하게 된다. 연료전지는 반응가스가 혼합되어 연소되는 과정에 의한 에너지 변환이 아닌 전기화학 반응을 통



[그림 3-4] 연료전지 전산 해석과 최적화 과정

한 직접 전기 발생 장치이므로, 분리판에서 공급되는 수소, 공기 및 냉각수 사이의 직접 접촉은 방지되어야 하며 연료전지의 음극에서 발생한 전자의 원활한 흐름을 위하여 전도성 재질을 사용하여 외부 회로 (External Circuit)를 형성하게 된다. 이 때 전자는 분리판에 새겨진 유로와 유로 사이의 리브를 통하여 연료전지 음극과 양극 사이를 이동하게 된다. 일반적으로 수소 가스가 공급되는 분리판 측 측매에서는 수소 분자가 이온화되는 과정에서 전자를 방출하므로 음극(Anode) 역할을 하고, 반대로 공기가 흐르는 분리판 측은 전기적으로 양극(Cathode) 역할을 하게 된다. 산화 가스 및 연료 가스 공급을 위해 분리판의 양 쪽 표면에 형성되어 있는 채널은 단면을 흐르는 유량과 압력강하 허용범위 및 가스 이용률 등의 차이점으로 인하여 일반적으로 서로 다른 형태와 크기의 채널 형상을 갖고 있다. 만일 산화 가스 및 연료 가스 공급을 위한 채널에서의 가스 공급이 불균일할 경우 비가역적 전기화학 반응 및 고분자 전해질 이온 교환막의 저항 등에 의한 열발

PARAMETERS AND PROPERTIES

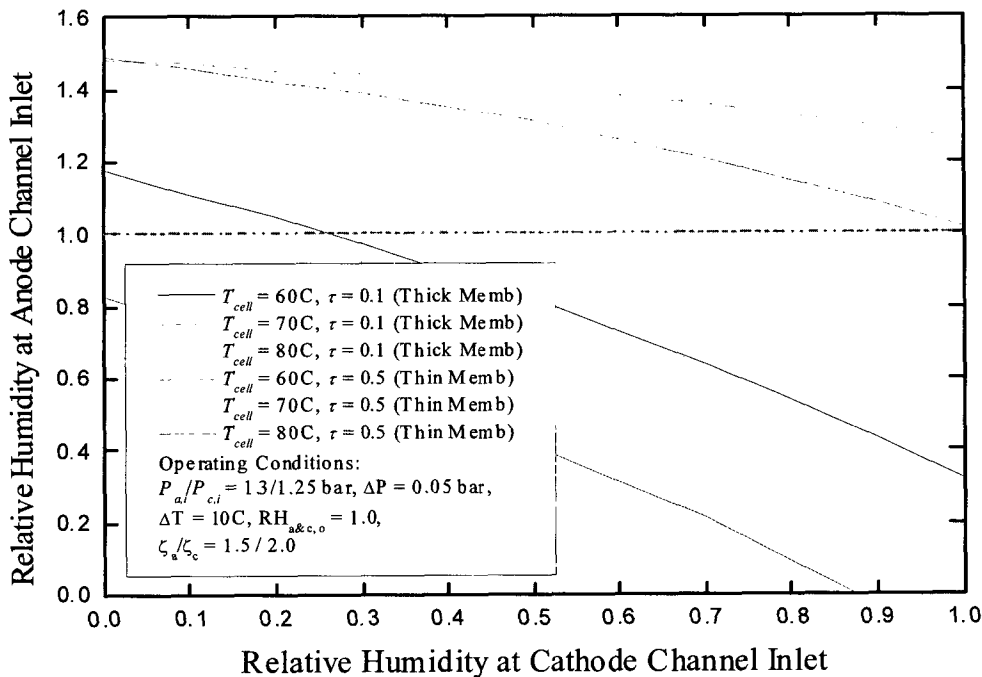
T _{cell}	343 K	R	8.3145 J/mol K	V _{oc}	1.178 V
P	1.3 bar	F	96487 C	V _{cell}	0.7 V
P _{sat}	0.307097245 bar	RH _a	1	C _P	4200 J/kg K
c _{sat}	10.7682632 mol/m ³	RH _c	1	del_T_cool	10 K
c _{H2O_a}	10.7682632 mol/m ³	c _{H2O_c}	10.7682632 mol/m ³	# of cell	20
c _{tot_a}	45.58406956 mol/m ³	c _{tot_c}	45.58406956 mol/m ³	total # cells	20
c _{H2}	34.81580636 mol/m ³	c _{O2}	7.311319335 mol/m ³	Q _{cool}	8.54942E-07 m ³ /sec
stoi _a	2	stoi _c	2	rho _{H2O}	998 kg/m ³
I	0.3 A/cm ²	A _{rx}	250 cm ²		
Q _{cell_a}	2.23263E-05 m ³ /sec	Q _{cell_c}	5.31578E-05 m ³ /sec		
rho _{H2}	8.63E-02 kg/m ³	rho _{Air}	8.53E-01 kg/m ³		
Total Power	1.05 kW				

[그림 3-5] 연료전지 분리판 설계시 고려해야 할 작동조건 및 환경조건

생으로 인하여 연료전지 반응면적에 걸친 온도 분포가 균일하지 않게 될 수 있다. 이 경우 연료전지의 성능 저하는 물론 수명 저하도 초래할 수 있으므로 채널의 형태와 단면 크기는 유동의 균일성을 고려하여 주의 깊게 설계하여야 한다.

분리판 설계시 고려해야 될 주요 인자는 [그림 3-5]에 나타난 전지 운전 온도, 압력, 운전 전압 및 출력 전류 밀도, 연료 이용률, 냉각수 입·출구 온도차 등이다. 일반적으로 고분자 전해질 연료전지는 60 ~ 80℃사이에서 운전되며 최적 운전 온도는 고분자 전해질 연료전지의 구성 부품 및 주변 기기와 응용 목적에 따라서 달라진다. 운전 온도의 경우 고분자 전해질 막의 특성에 의해 전지 성능이 90℃ 근처 고온에서는 갑자기 감소하는 경향이 있으므로, 자동차용의 경우는 가습을 줄이고 시동성능(Quick Start)을 높이기 위해서는 스택의 온도를 낮게 설계하면 좋으나 연료전지 특성상 출력에 버금가는 에너지가 열로써 방출되어야 하므로 스택온도가 낮을수록 이에 반비례하여 면적이 큰 대형 방열기가 요구될 수 있다. 또한 고분자 연료전지 스택 운전 온도가 낮을수록 연료전지 운전에서 생성되는 부산물인 물의 응축현상이 심하게 발생할 수 있다. 따라서 연료전지의 작동 운전 온도의 결정 대한 세심한 주의가 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 [그림 3-6]의 이론 해석에 근거를 두고 연료전지 스택 및 분리판의 입구 온도를 60 ~ 70℃ 근처에서 선정하였다. [그림 3-6]은 연료전지 분리판의 출구 영역에서 물이 포화수증기로 존재한다는 가정 하에 이를 달성하기 위한 각각의 고분자 연료전지 스택 또는 분리판의 입구 온도에서의 반응가스에 필요한 가습량을 계산하여 나타낸 그림이다. [그림3-6]에서 τ 는 고분자 전해질 이온 교환막의 양극에서 생성된 물중에서 음극으로 이동하는 물의 양을 나

타낸다. 전해질 막의 두께가 두꺼울수록 물질저항이 증가하여 τ 의 값은 감소하게 된다.



[그림 3-6] 고분자 전해질 연료전지 스택 및 분리판 입구 온도 영향

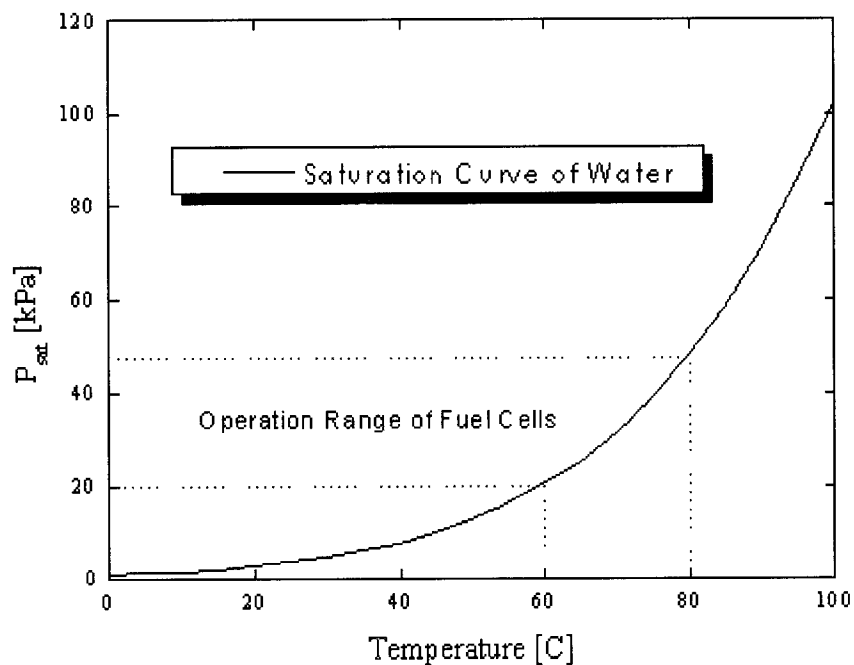
2000년 이전에는 Dupont사에서 개발한 Nafion 117 (건조상태에서 막두께 $175 \mu\text{m}$)을 사용하여 왔으나 최근 고분자 전해질 이온 교환막 제조 기술의 발달로 Gore-Tex사에서는 $20 \mu\text{m}$ 두께를 갖는 초경박 이온 교환막을 개발하였다. 그림에서 두꺼운 막의 경우는 Nafion 117같은 막에서의 물의 이동 현상을 모사한다고 간주할 수 있으며, 얇은 막의 경우는 가장 이상적인 경우로서 (생성수의 반이 양극에서 음극으로 이동한다는 가정) Gore-Tex membrane을 가정한 이론적 추론이다. 위의 결과를 근거로 연료전지 운전온도를 $65 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 설정하여 분리판 및 스택 설계에 대한 수치 해석을 수행하였다.

고분자 연료전지 운전 온도와 함께 가장 중요한 설계 변수는 운전 압력 및 분리판과 매니폴드, 스택 유로를 통한 압력 강하이다. 가정용의 경우는 개발 초기 단계부터 공랭식 및 수냉식 연료전지 시스템에 대해서 대기압을 약간 웃도는 압력 하에서 대기중의 공기를 산화제로 이용하려는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 자동차의 경우는 한정된 시스템 공간에서 출력의 극대화를 달성하고 물 관리 측면에서 유리한 가압시스템 ($2 \sim 3$ 기압)을 채택하여 개발을 진행해왔다. 하지만 이 경우 가압을 위한 압축기가 필요하며, 이를 구동하기 위한 대량의 에너지를 연료전지 출력에서 충당하게 되어 전체 연료전지 시스템

의 효율저하를 초래하게 되는 약점을 지니게 되었다. 이러한 부수적 전기 소모를 최소화 하자는 취지에서 최근에는 대부분의 자동차를 위한 연료전지를 위해서도 가정용과 마찬가지로 상압시스템(~ 130kPa)을 채택하는 추세이다. 따라서 본 연구에서는 분리판 및 스택 설계시 최대 입구압력을 130kPa로 설정하였다.

수냉식 고분자 연료전지 시스템의 경우 연료전지 냉매로 탈이온수를 사용하는데, 이 때 연료전지 냉각수 입·출구 사이의 온도차를 5 ~ 10℃ 정도로 설정한다. 이러한 이유는 냉각수의 온도차를 거의 없게 하는 isothermal operation의 경우 대량의 냉각수 공급에 따른 냉각수 펌프의 용량이 매우 커져서 결론적으로 연료전지에서 발생하는 전력 중에서 펌프 및 기타 주변장치 가동에 사용되는 기생전력 (Parasitic Loss)이 많이 요구되기 때문에 스택과 방열기의 열전달 특성을 고려하여 적절한 온도차로서 설정하였기 때문이다.

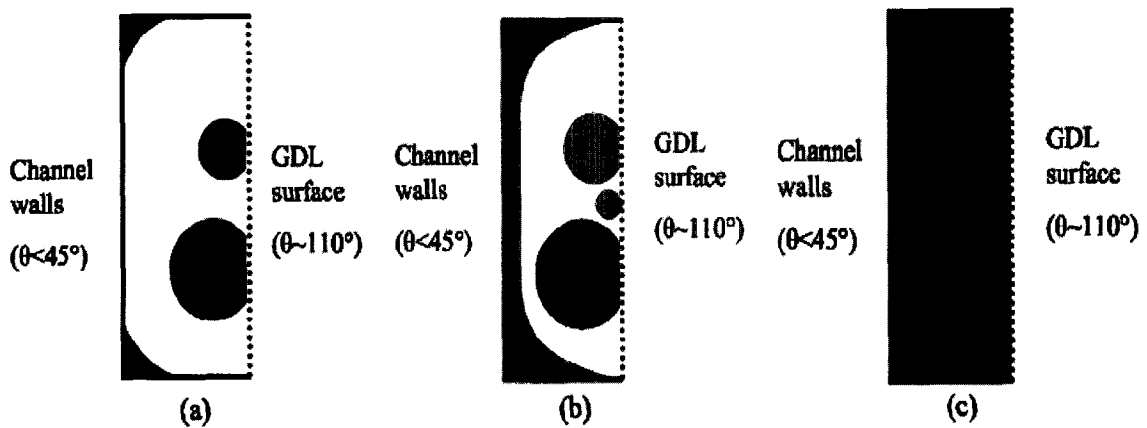
또한 온도차가 없는 isothermal operation의 경우 물의 응축에 매우 취약하여 연료전지 효율을 감소시킬 수 있는 확률이 높아지므로 전체 시스템 운전상에 불리하게 작용한다.



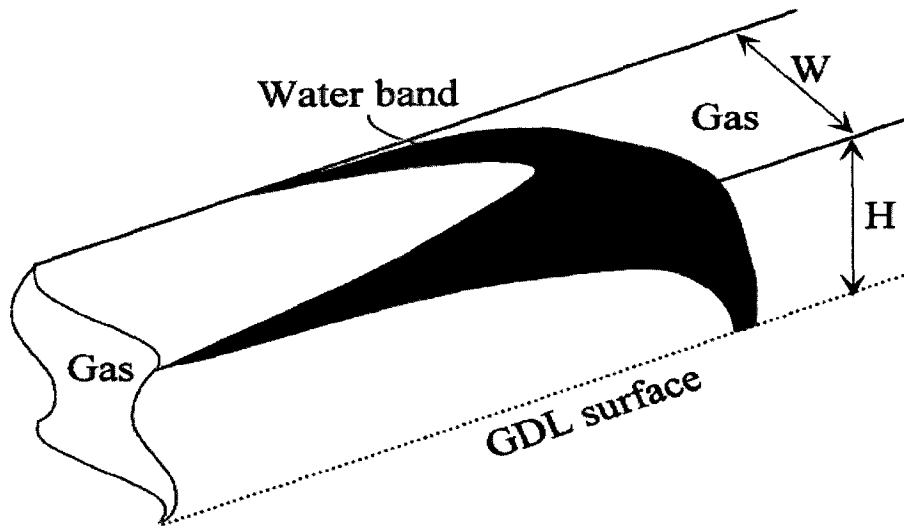
[그림 3-7] 연료전지 운전 온도에 따른 포화수증기압 곡선의 변화

따라서 설정된 온도 증가를 허용함으로써 [그림 3-7]에서 보는 바와 같이 포화수증기압 곡선을 냉각수 진행 방향으로 지수함수적으로 증가시킬 수 있어 물의 응축현상을 최대한 억제하며 동시에 온도의 함수인 촉매반응을 촉진시켜 연료전지 효율을 극대화시킬 수 있게 된다. 본 연구에서는 이러한 열역학적 사실을 바탕으로 냉각수 입·출구 온도차를 10℃로 설정하여 향후 연료전지 분리판 및 스택 설계에 적용하였다.

고분자 전해질 연료전지 분리판 설계시 경우 반응가스가 흐르는 채널의 단면을 증가시켜서 분리판 압력 강하를 최소화할 수는 있으나, 이 경우 연료전지 전기화학 반응에 의해 생성된 응축수를 분리판 출구로 배출시키기 위해 필요한 압력차를 얻을 수 없게 된다. 채널에서 물배출에 필요한 압력차와 유속을 얻기 위해서는 유량에 따른 채널의 단면적과 길이를 적절하게 설계할 필요가 있다. 채널에 물이 방울 형태로 있는 경우에 채널을 막은 경우에 따라 제거의 메커니즘이 달라질 수 있다. 공기측 반응가스 속도가 낮은 경우 채널에서의 액체 상태의 물의 움직임은 [그림 3-8]에 도식된 바와 같이 Corner Flow, Annular Film Flow, Slug Flow 등이 있으며 이 중에서 Slug Flow와 채널 막힘 현상 (Channel Clogging) 등은 분리판 채널에서의 가스 공급을 중단시키므로 최대한 억제시킬 필요가 있다.



[그림 3-8] 반응가스 채널에서의 응축수의 다양한 유동 패턴:(a) 가스 확산층에서의 물방울 생성에 따른 Corner Flow, (b) Annular Film Flow, 그리고 (c) 순간적인 채널 막힘에 의한 Slug Flow



[그림 3-9] 액체 상태 물 안구 생성 및 채널 막힘 현상에 대한 3차원 도식

[그림 3-9]는 액체상태 물의 안구에 의한 채널 막힘 현상을 도시한 것이다. 일반적으로 전기화학반응에 의해서 생성된 수분을 가스확산층 표면으로부터 제거하기 위해서는 공기 공급 채널의 반응가스 유속에 따라 다음과 같은 두가지 모드를 고려할 수 있다. 첫째는 물방울의 크기가 작고 채널부 반응가스 속도가 상대적으로 큰 경우 반응가스 채널로부터 작용하는 Drag Force에 의한 것이고, 다른 하나는 반응가스의 채널내 유속이 작고 물방울의 크기가 분리판 채널의 크기에 필적할 만할 때 채널 외벽과의 Capillary interactions에 의한 것이다. 물방울 액적 이탈 지름과 산화제 공급 채널내 공기의 유속간의 상관관계를 도출하기 위해서는 가스확산층 표면에 존재하는 하나의 물방울에 작용하는 힘의 관계를 고려할 필요가 있다. 물방울에 작용하는 힘에는 중력, 표면 장력과 반응가스 유동에 의해서 발생하는 shear drag force 등이 있다. 표면 장력과 중력간의 관계를 나타내는 무차원 상수로 Bond number가 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$B_o = \frac{\Delta\rho g d_d^2}{\sigma} \quad (3-1)$$

여기서 $\Delta\rho$ 는 액체와 기체간의 밀도차를, g 는 중력가속도, d_d 는 물방울 액적의 지름, 그리고 σ 는 계면에서의 표면장력을 나타낸다.

물방울이 반응가스 유동 채널과 접촉하기 전의 최대 액적 지름은 기하학적 관계로부터 구해질 수 있으며, 그 크기는 $2h/(1-\cos\theta)$ 이다. 여기서 h 는 채널의 깊이를 θ 는 물방울 액적과 가스확산층의 접촉각을 의미한다. 문헌에서 나타난 선행 연구결과에서는 0.5 mm 채널 깊이와 150° 의 접촉각에서 물방울은 최대 0.53mm의 액적 지름을 갖는 걸로 나와 있으며 이에 상응하는 Bond number는 0.06보다 작은 값으로 예측된다. 따라서 중력의 효과는 거의 무시할 수 있다. 물방울을 가스확산층 표면에 고착시키려고 하는 힘은 표면 장력, 접촉각과 물방울 액적의 지름에 의해서 결정된다. 물방울에 작용하는 기계적 평형은 Young에 의해 개발되었으며 평형 접촉각 θ 로 다음과 같이 표현된다.

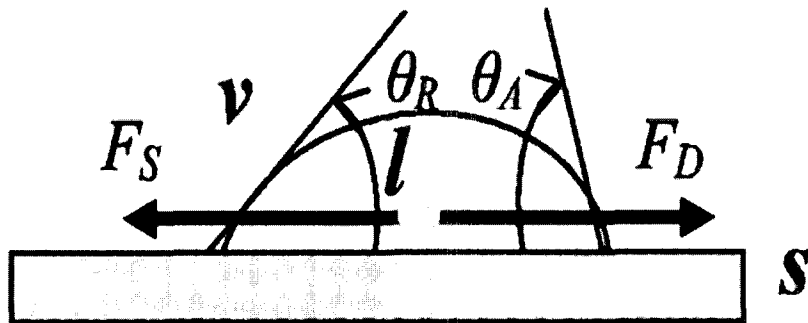
$$\sigma_{lv}\cos(\theta) = \sigma_{sv} - \sigma_{sl} \quad (3-2)$$

[그림 3-10]은 표면 장력에 의한 물방울 고착현상을 나타낸 그림으로서 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$F_s = \sigma_{lv}d_d\sin(\theta)[\cos(\theta_r) - \cos(\theta_a)] \quad (3-3)$$

만약 advancing and receding 접촉각이 대칭적으로 존재한다면 다음식이 유도된다.

$$\theta_a = \theta + \Delta\theta \text{ and } \theta_r = \theta - \Delta\theta \quad (3-4)$$



[그림 3-10] Shear Flow에 의해서 물방울에 작용하는 힘의 평형

전체 물방울 고착력은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$F_s = 2\sigma_{lv}d_d\sin^2(\theta)\sin(\Delta\theta) \quad (3-5)$$

Drag Force는 다음과 같이 정의가 된다.

$$F_D = \frac{1}{2}C_D\rho V^2 A_P \quad (3-6)$$

여기서 A_P 는 유동 방향에 수직한 물방울의 투영면적(projected area)으로서 다음과 같이 계산된다.

$$A_P = \frac{d_d^2}{4}\left(\theta - \frac{1}{2}\sin(2\theta)\right) \quad (3-7)$$

여기서 C_D 는 물방울의 항력계수(Drag Coefficient)이며 실험 상관관계식에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$C_D = \frac{24}{Re}(1 + 0.1925Re^{0.63}) = \frac{4.62}{Re^{0.37}}(1 + 5.2Re^{-0.63}) \quad (3-8)$$

상기 식 (3-8)의 Re 는 Reynolds number를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{Vd_d}{\nu_g} \quad (3-9)$$

식 (3-9)에서 V 는 채널에서의 공기 속도이고 d_d 는 물방울의 지름이며 ν_g 는 가스의 비점성계수이다.

물방울을 가스확산층 표면으로부터 이탈시키기 위해서는 Drag Force가 물방울의 고착력보다 커야한다. 물방울의 지름이 물방울 이탈 지름보다 크다면, Drag Force는 물방울 고착력보다 크게 되어 물방울은 가스확산층 표면으로부터 이탈할 수 있게 된다. 따라서 채널크기가 물방울의 이탈 지름보다 작다면 물방울은 가스확산층 표면으로부터 이탈하기

전에 반응가스 공급채널과 접촉하기 때문에 물방울 이탈 지름은 분리판 채널 설정에 중요한 인자이다. 물방울은 물-분리판 채널 표면에 상응하는 접촉각을 가지고 고체-액체 접촉 특성을 갖게 된다. 물방울 이탈 지름을 정의하면 다음과 같다.

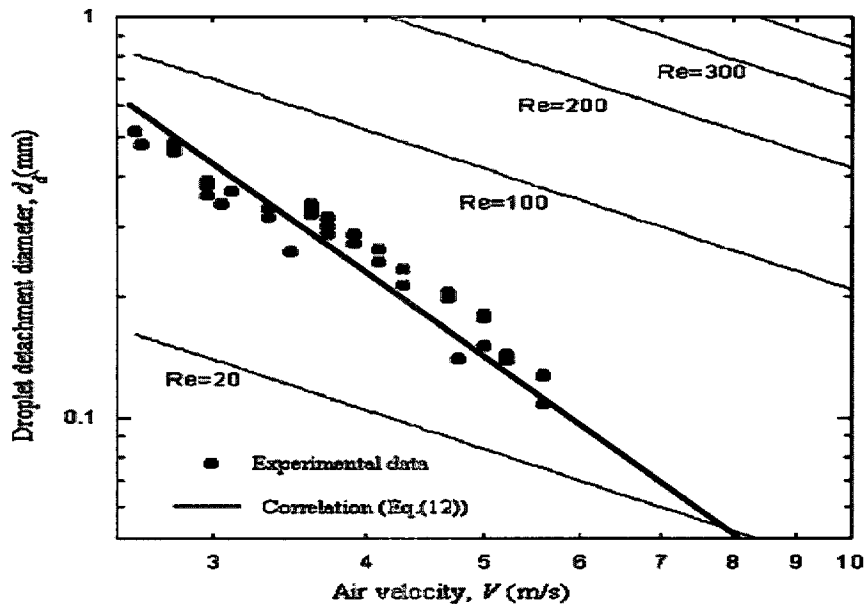
$$d_d = K' C_D Re^2 \quad (3-10)$$

여기서 K' 는 물과 공기를 포함한 모든 유체의 물성치와 표면 접촉 특성을 반영하는 μm 의 단위를 갖는 실험 상수이다.

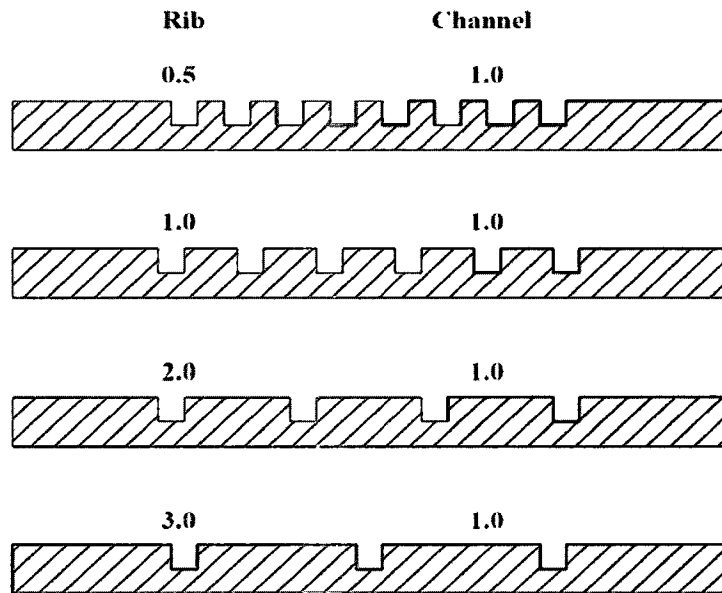
[그림 3-11]은 $\log d_d = -2.59 \log V + K - 1.59 \log(1 + 5.2 Re^{-0.63})$ 로 정의되는 값과 $\log V$ 간의 상관관계를 실험 및 이론으로 구한 값을 비교한 것이다. [그림 3-11]의 결과는 최근에 주로 사용되는 carbon paper 형태의 가스확산층에만 적용할 수 있다. 이 결과로부터 4.25 m/s의 공기 속도에서 물방울 이탈 지름은 200 μm 에 이르며 앞에서 물방울의 크기가 이보다 크다면 (0.5mm 깊이의 공기공급 채널에서 실험적으로 촬영한 최대 크기는 0.53mm에 이른다) 반응가스 공급 채널과 물방울간의 상호작용에 의해 물방울을 가스확산층 표면으로부터 이탈시킬 수 있다. 따라서 결과적으로 연료전지 성능 저하를 방지할 수 있는 최소 채널 유속임을 알 수 있다.

분리판 설계시 다음으로 고려해야 될 변수는 [그림 3-12]에서 제시된 채널 폭과 리브의 비율이다. 채널 사이의 간격인 리브의 폭을 줄이면 상대적으로 유동 채널의 폭이 넓어져 물과 가스 입출력을 용이하게 해줄 수 있다. 특히 확산층에서 가스가 투과할 수 있는 기공을 막아 연료전지의 성능을 저하시키는 flooding 현상이 리브에서 시작하기 때문에 이에 대한 효과를 줄일 수 있다. 그러나 리브의 폭이 줄어들면 접촉에 필요한 면적이 감소하여 리브를 통해 가해지는 가스 확산층의 접촉압력이 높아질 수 있고, 이에 따라 기공이 눌리는 것에 의해 가스의 확산 효과가 감소하는 현상이 발생할 수 있다. 또한 전기화학반응에서 발생한 전자의 외부 이동 통로가 감소하여 전기적 저항 증가를 초래할 수 있다. 따라서 채널의 폭은 구조적 안정성과 열 및 물질전달, 전기적 저항 등을 고려하여 설계되어야 한다. 본 연구팀에서 실행한 [그림 3-13]의 선행결과를 근거로 할 경우 반응가스 공급 채널 폭과 리브의 비율이 최소 1보다 크게 설계를 수행할 필요가 있다.

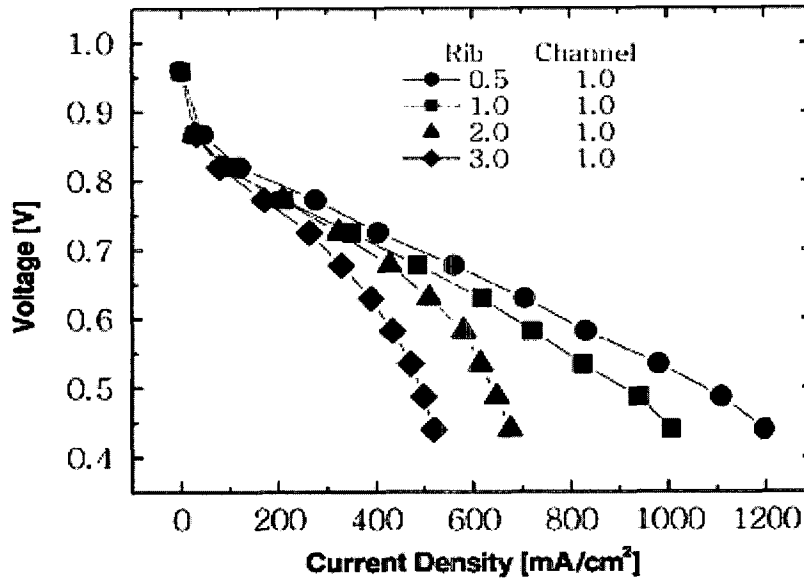
하나의 독립적인 연료전지 셀을 구성하기 위해서는 연료측과 공기측 분리판 채널 및 전극전해질접합체, 가스확산층 등을 적층하여 외부의 강한 힘을 이용하여 체결하게 된다.



[그림 3-11] 반응가스 채널에서의 공기 속도와 물방울 이탈 지름간의 상관관계



[그림 3-12] 분리판 채널 폭과 랜드 비율

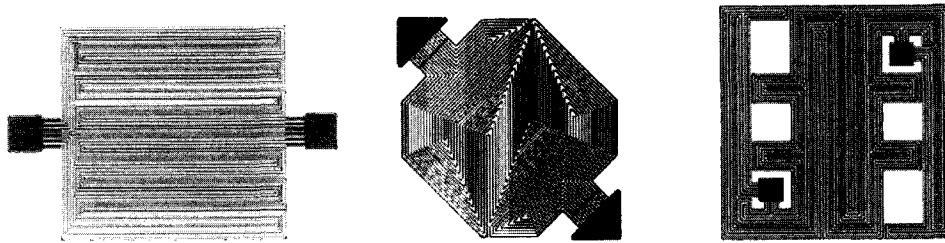
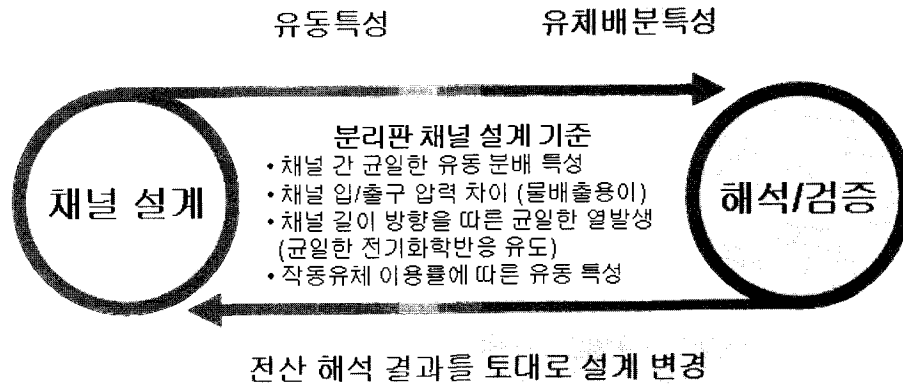


[그림 3-13] 연료전지 분리판 채널 폭과 랜드에 따른 성능 비교

이 때 전체 반응면적에 걸쳐서 연료측과 공기측 분리판 채널과 리브의 가공 부위가 약간의 공차 차이로 어긋나는 경우 고분자 전해질 이온 교환막이나 가스확산층에 국부적인 응력 집중을 초래하여 심한 경우 이들 소재의 파손을 초래할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 분리판의 긴 변이 존재하는 수평 방향으로 연료측과 공기측의 채널과 랜드가 1:1 부합이 되도록 분리판 폭과 리브 폭을 연료측과 수소측에 같은 값을 적용하였다.

3. 연료전지 분리판 설계

연료전지 분리판을 최적화하기 위한 많은 연구가 진행되면서 다양한 연료전지 분리판 형상이 제시되어 왔다. 초기의 단순한 사각형상의 외형으로부터 8각 분리판 형상, 또는 분리판의 대각 모서리에서 반대편 대각 모서리 부분으로 반응가스가 흘러가거나 전기 화학반응이 일어나는 고분자 막 활성 면적의 중앙에서 유체가 공급되는 등 면적 활용률을 극대화하여 공간 점유율을 낮추기 위한 다양한 노력이 있었다. 이러한 연구들의 공통된 전제 조건은 [그림 3-14]에서 보이듯이 분리판 채널 간 균일한 유동 분배 특성을 확보하고 채널 입/출구의 압력 차를 임의의 설정치 이상 유지하여 응축수에 의한 유로 막힘 현상을 최소화하면서 채널 길이 방향에 따른 균일한 온도 분포를 얻기 위한 것이었다.



[그림 3-14] 다양한 채널 형상에 대한 전산해석을 통한 유동 검증

연료전지 분리판 활성면적 결정을 위해서는 우선적으로 전력변환계통의 특성, 공급 가스의 특성 및 연료전지 스택의 출력 등을 고려할 필요가 있다. 다음 과정으로는 연료극 분리판, 공기극 분리판 및 냉각 분리판의 압력 강하 허용값을 만족시키기 위해 분리판 위에 음각으로 가공될 유체 유로, 즉 채널의 개수 및 단면적을 결정하는 것이다. 이를 위해서는 유체 역학적 접근이 필요하며 연료전지 분리판 설계 과정을 정리하면 다음과 같다.

먼저, 연료전지 운전 조건을 정리한다. 운전온도, 압력, 상대습도, 연료전지 출력 전류 밀도 및 연료 또는 공기 이용률 등을 설정한다. 연료전지 운전에 있어서 열·유체 공학적인 측면에서 가장 중요한 설계 이슈는 열과 물관리이다. 특히 전기화학 반응에 의해서 생성되는 응축수의 영향을 최소화하기 위해서는 열 및 물관리에 대한 특별한 전략이 필요하다. 공급되는 가스의 상대 습도량과 냉각 채널에서의 입·출구 온도차에 의한 포화수증기압의 변화 곡선을 고려하여 연료전지 운전 온도를 결정한다. 최근의 연료전지 운전은 대부분 상압운전을 목표로 하여 최대 입구 압력을 130kPa 이하로 설정하여 운전하는 추세이다. 연료전지 운전 출력 전류 밀도는 앞에서 서술된 바와 같이 가정용의 경우는 개질

가스를 사용하고, 차량용의 경우 순수 수소를 사용하는 조건에서 결정한다. 이 때 각각의 연료전지 성능은 사용되는 전극전해질접합체의 성능에 크게 좌우된다. 끝으로 연료이용률은 Dead-End 운전의 경우를 제외하고는 재순환 시스템을 채택하여 수소의 경우는 50 ~ 80% 범위에서 설정되며 공기측의 경우는 약 50% 정도로 설정한다. 이러한 세부적인 사항들을 고려하여 연료전지 운전조건을 설정한 후에 연료전지 운전에 필요한 유량을 계산한다.

연료전지 운전에 필요한 반응가스의 몰유량식(molar flow rate) 계산식은 다음과 같다.

$$\dot{n}_r = \frac{I \cdot A_{rx}}{n_e \cdot F} \quad [\text{mol/s}] \quad (3-11)$$

여기서 I 는 전류밀도[A/cm²], A_{rx} 는 활성면적[cm²], n_e 는 반응가스 몰당 전자 숫자, F 는 Faraday 상수 [96487 C/e-mol]를 나타낸다.

또한 연료전지 반응가스 이용률을 상징하는 Stoichiometry, ζ , 는 연료전지에 공급된 반응 가스량에 대해서 실제 반응에 사용된 반응 가스량의 비를 의미하고, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\zeta_r = \frac{c_r \cdot Q}{\dot{n}_r} \quad (3-12)$$

여기서 c_r 은 반응가스의 농도 [mol/m³], Q 는 반응가스의 유량 [m³/s]을 나타낸다.

식(3-12)와 식 (3-11)에서 반응가스 몰 유량식과 반응가스의 농도의 함수로서 반응가스의 유량을 구할 수 있으며 식(3-13)과 같이 정리될 수 있다.

$$Q = \frac{\zeta_r \cdot n_e \cdot F}{c_r \cdot I \cdot A_{rx}} \quad (3-13)$$

식(3-13)을 이용하여 분리판의 각 채널당 흐르는 반응가스의 속도, v_{in} , 를 구하면 다음과 같다.

$$v_{in} = \frac{\zeta_r \cdot n_e \cdot F}{n \cdot A_x \cdot c_r \cdot I \cdot A_{rx}} \quad (3-14)$$

여기서 n 은 분리판에 새겨진 채널의 개수이고, A_x 는 각 채널의 단면적이다. 유체역학적으로 채널에서의 압력강하, ΔP 는 다음의 식(3-15)와 같이 표현된다.

$$\Delta P = f \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot \frac{L}{D_h} \quad (3-15)$$

여기서 f 는 표면 마찰 계수, ρ 는 반응가스 혼합물의 밀도 [kg/m^3], V 는 반응가스 혼합물의 채널 유속 [m/s], L 은 채널의 길이 [m], D_h 는 수력 지름 [m]을 의미한다.

또한 수력 지름, D_h 는 다음과 같이 정의된다.

$$D_h = \frac{4A_x}{P} \quad (3-16)$$

여기서 P 는 유체가 진행하는 단면의 외곽 둘레 길이를 나타낸다.

표면 마찰 계수, f 는 층류 유동과 난류 유동에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$f = \begin{cases} \frac{64}{Re_d} & \text{층류} \\ \frac{0.316}{Re_d^{1/4}} & \text{난류} \end{cases} \quad (3-17)$$

여기서 $Re = \frac{\rho D_h V}{\mu}$ 로 표현되는 무차원수로서 Reynolds number이고, μ 는 점성계수를 의미한다.

일반적으로 분리판 채널 유동은 층류 (Laminar flow, $Re < 2300$) 이므로, 식 (3-16)과 식 (3-17)의 층류 관계식을 식 (3-15)에 대입하고 분리판 채널 수, n 에 대한 관계식을 구하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

Anode			Cathode		
width	2.3 mm		width	2.3 mm	
depth	0.55 mm		depth	0.65 mm	
land	1.2 mm		land	1.2 mm	
del_P	8000 Pa		del_P	10000 Pa	
Ax	1.27E+00 mm ²		Ax	1.50E+00 mm ²	
Ax_in m	1.27E-06 m ²		Ax_in m	1.50E-06 m ²	
wet_P	5.70E+00 mm		wet_P	5.90E+00 mm	
mu	1.03E-05 kg/m_sec		mu	2.11E-05 kg/m_sec	
Dh_a	8.88E-01 mm		Dh_c	1.01E+00 mm	
Dh [m]	8.88E-04 m		Dh [m]	1.01E-03 m	
L	1.59E+00 m		L	9.97E-01 m	
n	4.89E+00	6	n	1.03E+01	10
v_in_a_ch	9.78 m/sec		v_in_c_ch	15.77 m/sec	

[그림 3-15] 엑셀 테이블을 이용한 분리판 채널수 계산의 예

$$n = \frac{64\mu \cdot Q \cdot L}{2D_h^2 \cdot \Delta P \cdot A_x} \quad (3-18)$$

위 식(3-18)을 이용하여 주어진 운전 조건하에서 분리판 채널의 입·출구 사이에 설정된 허용 압력값을 초과하지 않기 위한 최소 채널수를 계산할 수 있으며, 마이크로 소프트웨어의 엑셀 소프트웨어를 이용하여 연료측과 공기측의 분리판 채널수를 비롯한 설계값을 계산한 것이 [그림 3-15]이다.

4. 가정용 연료전지 분리판 설계

앞에서 기술한 연료전지 분리판 설계 방법을 이용하여 분리판의 유동 채널이 결정되면 성능을 검증하기 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 이용하여 전산 해석을 수행하였다. 해석결과는 설계된 분리판의 유동장의 성능 검증이나 설계개선을 위한 자료로는 물론 연료전지 시스템 측면에서는 외부에서 압축기와 펌프를 이용하여 적절한 유량과 압력의 반응 가스와 냉각수 공급을 위한 운전 자료로 활용될 수 있다.

가정용 연료전지를 위해서 활성 면적 250 cm²인 분리판에 적용하여 설계 및 해석을 수행하였다. 수소, 공기 및 냉각 채널은 65°C 유체 공급 입구 온도와 상압 작동을 기준으로

설계 되었다.

스택을 통해 각 단위 전지로 분배되는 유량을 기초로 분리판의 채널 개수와 크기와 결정할 수 있으므로 설계에 앞서 우선 스택 운전 조건과 성능을 토대로 이론적인 연료 가스와 공기의 공급 유량을 식(3-13)을 이용하여 계산하였다. 이 경우 공기와 수소의 이용률 ζ_c 와 ζ_a 는 각각 40%와 70%로 가정하였으며, $0.7V @ 250mA/cm^2$ 을 기준으로 하였다. 스택의 운전 온도인 $65^\circ C$ 에서 완전 포화된 상태(상대 습도 100%)로 공급되는 입구 유량 조건을 고려할 경우 수증기 공급량을 포함한 전체 공급 유량의 증대가 요구된다. 특히 본 연구에서는 연료극에 공급되는 반응 가스가 순수한 수소가 아닌 탄화수소 계열의 연료가 연료변환장치를 통과한 후 생성된 개질 가스(reformed gas)라고 보았기 때문에, 앞서 계산한 순수 수소 공급 유량 대비 이산화탄소, 수증기, 질소 등의 불순물에 대한 스택 입구 유량 증가분과 공기극과 마찬가지로 가습에 의한 수증기의 증분을 고려해 주어야 한다. 따라서 본 연구에서는 연료극에 공급되는 개질 가스의 질량 유량과 $65^\circ C$ 온도 조건에서 상대습도 100%로 가습되어 공기극에 공급되는 산화 가스의 질량 유량을 계산한 후 이에 대한 영향을 채널 설계 시에 고려해 주었다. 이 경우 개질 가스는 수소(H_2) 62%, 이산화탄소(CO_2) 16%, 수증기(H_2O) 19%, 질소(N_2) 3%의 체적 조성을 갖는 완전 혼합 기체이며, 공기와 마찬가지로 이상 기체, 비압축성으로 가정하였다. 개질 가스의 체적 조성비와 연료 이용률을 이용하여 수소, 이산화탄소, 수증기 및 질소에 대한 질량 공급 유량을 계산할 수 있다. 체적 조성비는 정량적인 값이 아니라 단지 기준 유량에 대한 각각의 기체가 차지하고 있는 체적 구성 비율을 의미하는 것이므로, 식 (3-13)을 이용하여 계산한 수소 유량을 기준으로 개질 가스를 구성하고 있는 잔여 가스의 체적 조성비를 이용하여 이산화탄소, 수증기, 질소의 유량을 계산하였다. 계산 과정에 필요한 수소, 이산화탄소, 수증기, 질소의 분자량, 몰분율, 질량분율을 정리하면 <표 3-1>과 같다. 이를 이용하여 스택 입구부에서 공급되는 각각의 기체에 대한 질량 유량과 각 셀 에 공급되는 질량 유량을 계산할 수 있으며, 그 결과는 <표 3-2>와 같다. <표 3-2>에서 수증기의 공급 유량은 연료극 스택 입구부의 운전 온도인 $65^\circ C$ 에서의 포화수증기압을 이용하여 계산한 값으로 개질 가스 조성만을 이용하여 계산한 수증기의 질량 유량과는 다소 차이가 있다. 포화수증기압은 온도의 함수로, 본 연구에서는 문헌으로 부터 발췌한 식(3-19)의

<표 3-1> 개질 가스를 조성하고 있는 기체의 구성비

	분자량(MW_i)	몰분율(χ_i)	질량 분율(Y_i)	비 고
수 소	2.0159	0.62	0.0996	$Y_i = \chi_i \frac{MW_i}{MW_{mix}}$ $MW_{mix} = 12.5546$
이산화탄소	44.0098	0.16	0.5609	
수증기	18.0153	0.19	0.2726	
질 소	28.0075	0.03	0.0669	

<표 3-2> 개질 가스의 기체 조성에 따른 각각의 질량 유량

	스택의 공급 유량 [kg/s]	각 셀 당 공급 유량 [kg/s]
수 소	4.2×10^{-5}	1.05×10^{-6}
이산화탄소	2.365×10^{-4}	5.913×10^{-6}
수증기	2.821×10^{-5}	7.05×10^{-7}
질 소	1.917×10^{-4}	4.791×10^{-6}

포화수증기압과 온도의 상관 관계식을 이용하여 스택 입구 온도에서의 포화수증기압을 계산하였다.

$$\log_{10} P_{sat} = -2.1794 + 0.02953 - 9.1837 \times 10^{-5} T^2 + 1.4454 \times 10^{-7} T^3 \quad (3-19)$$

위의 식 (3-19)로부터 구한 스택 입구 온도 65C에서의 포화수증기압과 건조한 상태의 개질 가스 공급 유량과 가습량의 비(w)를 나타내는 식 (3-20)을 이용하여 스택 입구에서 공급해 줘야 하는 가습량을 결정할 수 있다.

$$w = \frac{MW_{H_2O}}{MW_{Drygas}} \times \frac{P_w}{(P_t - P_w)} \quad (3-20)$$

본 연구에서는 스택 입구에서 완전히 포화된 상태(상대습도 100%)의 개질 가스가 공급

<표 3-3> 개질 가스를 구성하고 있는 각 화학종의 물성

	밀도 [kg/m^3]	점성계수 [$Pa \cdot s$]
수소	0.0724	9.725×10^{-6}
이산화탄소	1.5956	1.668×10^{-5}
수증기	1.014	1.949×10^{-5}
질소	0.707	1.106×10^{-5}

된다고 보았기 때문에, 식 (20)의 수증기 분압(P_w)과 해당 온도에서의 포화수증기압(P_w^{sat})은 동일한 값을 갖는다. 이로부터 산출한 연료극 스택 입구부에서의 수증기 공급량은 개질 가스 조성만을 이용하여 계산한 수증기 량에 비해 60% 정도 큰 값을 갖는다. 해당 온도에서의 가습량은 포화수증기압에 의해 결정되는 값이므로, 본 설계에서는 <표 3-2>에 명시되어 있는 바와 같이 포화수증기압을 이용하여 계산한 수증기량을 연료전지 분리판 채널에서의 입구 유속을 결정하는데 사용하였다.

이와 같은 계산을 통하여 얻어진 개질 가스의 이론적 공급 유량으로 단위 전지 및 스택 입구부에서의 유속을 결정한 후 이를 이용하여 연료전지 분리판 채널 유동 특성을 파악할 수 있다. 유동장 해석을 위해서는 유량 이외에 개질 가스를 구성하고 있는 수소, 이산화탄소, 수증기, 그리고 질소의 밀도와 점성계수가 필요하다. 개질 가스를 구성하고 있는 기체 각각의 물성은 <표 3-3>에 정리하였다. 이들 기체에 대한 밀도와 점성계수를 이용하면 개질 가스 전체의 밀도와 점성계수(혼합 물성)를 계산할 수 있다.

<표 3-3>에 정리한 각 화학종의 물성은 65°C 온도와 조건과 상압을 기준으로 한 데이터를 보간법을 이용하여 구한 결과이며, 개질 가스 전체의 혼합 밀도(ρ_{mix})와 점성계수(μ_{mix})는 다음의 식 (3-21)과 (3-22)를 이용하여 계산하였다. 본 연구에서는 이와 같이 계산한 혼합 가스의 밀도 $0.283 \text{ kg}/m^3$ 와 점성계수 $1.464 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot s$ 을 이용하여 개질 가스의 유동 특성을 계산하였다.

$$\rho_{mix} = \left[\sum_i \frac{Y_i}{\rho_i} \right]^{-1} \quad (3-21)$$

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_i \mu_i Y_i MW_i^{1/2}}{\sum_i Y_i MW_i^{1/2}} \quad (3-22)$$

분리판 채널 입구부의 공기 공급 유량과 가습량도 연료극의 경우와 동일한 과정으로 계산해 낼 수 있다. 습공기의 물성은 열역학적 물성값을 표시한 표부터 직접 구할 수 있으며, 소수점 이하의 해당 온도에 해당하는 물성을 얻기 위하여 보간법을 적용하여 계산하였다. 열역학적 테이블에서 찾은 가습된 공기의 밀도는 0.946 kg/m^3 , 점성계수는 $1.834 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이며, 이 값은 식 (3-21)과 (3-22)를 이용하여 계산한 물성과 $\pm 1\%$ 이내로 정확하게 일치한다.

5. 전산 해석을 이용한 유동 채널의 설계 및 해석

가. 지배방정식

연료전지 분리판을 설계한 후 성능을 예측하기 위해서는 유동장과 열전달, 전하이동 및 물질전달을 동시에 해석해야 하지만, 여기서는 설계 초기 단계에서 유동 채널에서의 유량 균일 분배와 물배출 특성을 파악하기 위한 것이므로 물질전달과 열전달 및 전기 특성을 고려하지 않고 유동장만을 해석하였다. 즉, 전산해석을 위해 촉매층에서의 화학반응과 전류/전압 분포는 고려하지 않았으며 유속 분포를 위주로 해석한 것으로 채널 유동은 비압축성, 층류 유동으로 가정하고 수치해석을 수행하였다. 채널의 형상은 수소, 공기, 냉각 채널 모두 입·출구 부분을 제외하고는 폭과 깊이가 균일하도록 설계하였으며, 상온 상태에서의 유동을 고려하였다. 연료극과 공기극 채널 내부의 작동 유체인 개질 가스와 공기는 이상 기체의 거동을 따른다고 가정하였으며, 점성과 관성력 이외의 힘의 효과, 점성에 의한 에너지 소산 효과는 무시하였다. 본 절의 유동장 해석을 위해서는 연속방정식과 운동량 방정식만이 사용되며 냉각판을 추가한 연료전지 단위 셀의 온도장 해석을 위해서는 식 (3-25)의 에너지 방정식이 추가로 필요하게 된다. 해석에 사용된 지배방정식을 정리하면 다음과 같다.

[연속 방정식]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot V = 0 \quad (3-23)$$

[운동량 방정식]

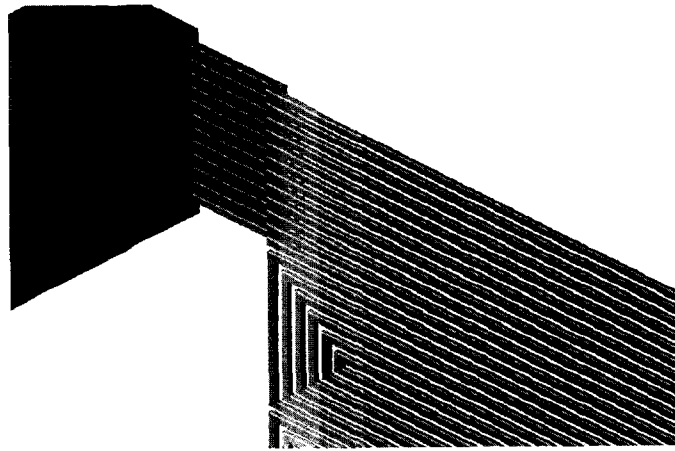
$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla \cdot P + \nu \cdot \nabla^2 V + \Gamma \quad (3-24)$$

[에너지 방정식]

$$\rho \frac{DH}{Dt} - \frac{D\rho}{Dt} = \nabla \cdot (K_j \nabla T) + \Phi \quad (3-25)$$

나. 가정용 개질 가스 공급 채널의 유동 설계

상압에서 작동하는 개질 가스 공급용 채널을 설계하기 위해 필요한 유량은 <표 3-2>에

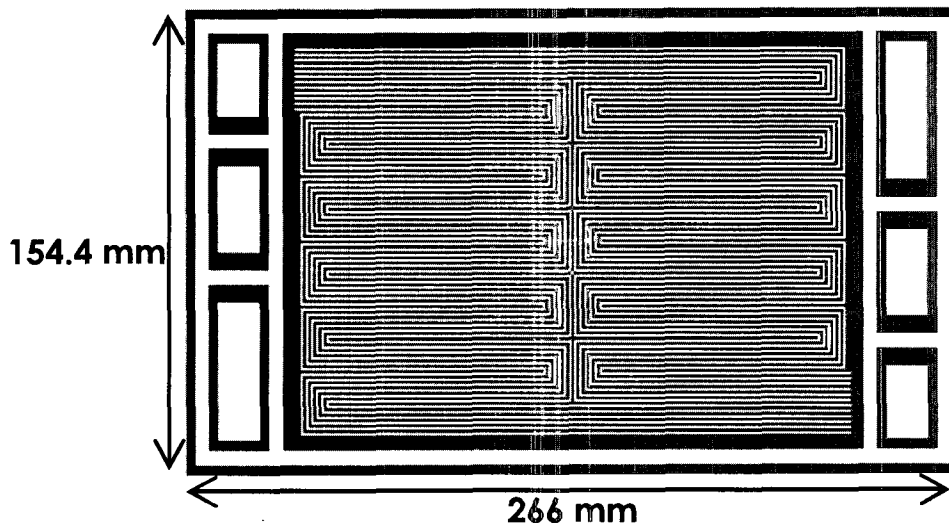


[그림 3-16] 연료측 매니폴드/채널입구부 해석 형상

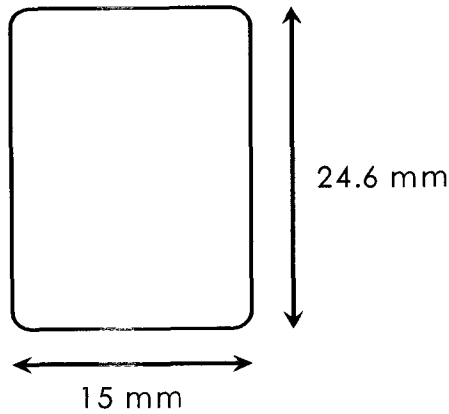
제시한 바와 같이 이론적으로 계산한 값을 사용하였다. 전산 해석을 통한 채널의 설계 및 성능검증을 위해서는 우선 채널의 형상을 결정해야 하는데, 본 연구에서는 앞서 검증된 바 있는 직사각형 형태의 단면을 갖는 다중 사행 형상의 채널을 채택하였다. 개질 가스를 공급하는 경우 순수한 수소를 사용하는 경우에 비해 2배가 넘는 유량이 공급될 수 있으므로 채널 입·출구의 압력 차이가 과도하게 발생하지 않도록 채널의 수를 증가시키거나, 과도한 유량에 의해 발생하는 압력 차를 줄이기 위해서 채널의 수력직경을 크게 설계할

필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 사항들을 고려하여 폭 1.0mm, 깊이 0.5mm인 채널 12개가 분리판 입구에서 각각 6개씩 분기하여 활성 면적 전체에 걸쳐 10회 순환한 후 배출되는 다중 사행 채널 형상을 설계하였다. 분리판 유로를 통한 개질가스 유동의 압력 강하는 4000Pa 이하가 되도록 설계하였으며 전산 해석을 통해 압력과 유량 분배 특성을 검증하였다. 전기적 전도체 및 구조적 지지체로서의 역할을 담당하는 리브의 폭은 0.8mm로 하였으며, 매니폴드와 채널 연결부의 형상은 스택 체결 시에 기밀성을 높이면서 압축 응력에 견딜 수 있도록 [그림 3-16]에서 보는 바와 같이 계단 형상의 요철 구조로 설계하였다. 설계한 개질 가스 공급용 채널 및 분리판의 형상은 [그림 3-17]과 같다.

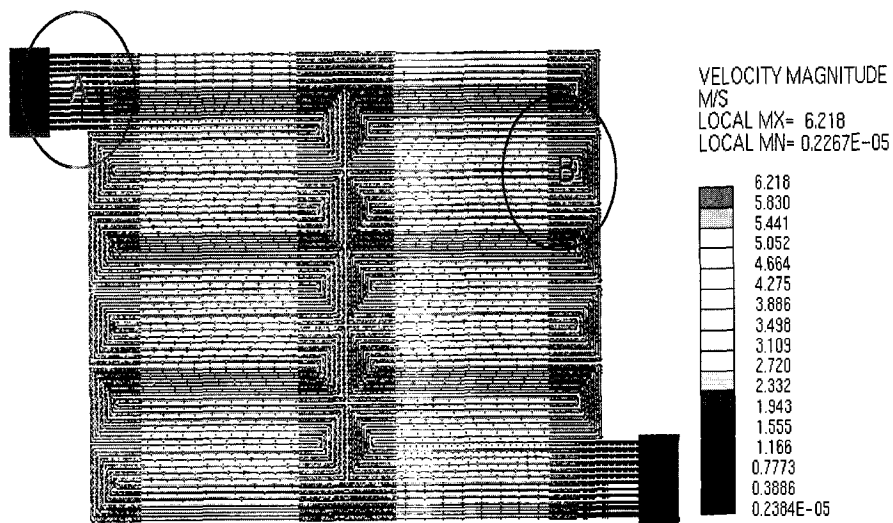
[그림 3-17]의 개질 가스 공급을 위한 분리판의 정확한 활성 면적은 250cm^2 ($192\text{mm} \times 130.4\text{mm}$)이며, 전체 매니폴드를 포함한 외곽 사이즈는 $266\text{mm} \times 154.4\text{mm}$ 이고 매니폴드의 크기는 개질 가스의 유량, 채널과 리브의 폭을 고려하여 [그림 3-18]과 같이 설계하였다. 채널의 입구 부분에서 채널과 리브가 차지하는 폭은 30mm로 벽면의 효과를 줄이고 매니폴드에서 채널로 균일하게 유량이 분배될 수 있도록 양 옆으로 1.5mm 정도 확장되었다. 일반적으로 매니폴드의 크기는 매니폴드에서의 압력손실이 분리판의 유동 채널을 통한 가스 압력손실의 1/10 이하가 되도록 설계한다.



[그림 3-17] 반응면적 250cm^2 의 가정용 개질가스 연료측 분리판



[그림 3-18] 개질가스용 연료전지 분리판의 매니폴드

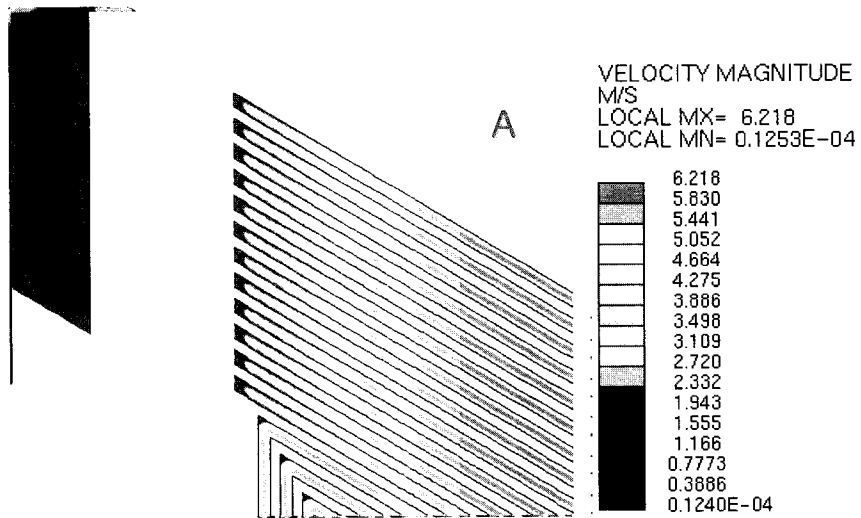


[그림 3-19] 개질가스 공급용 채널의 속도 분포

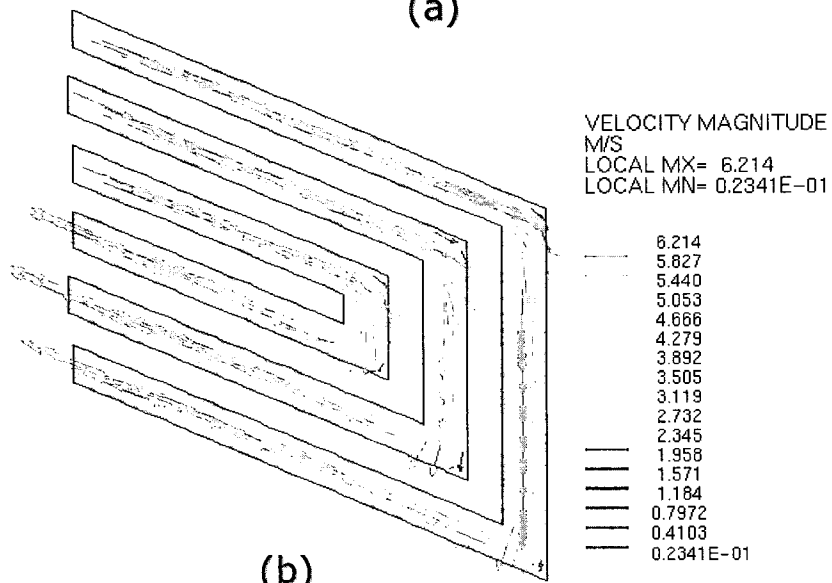
본 해석에서는 앞서 계산한 혼합가스의 질량 유량과 혼합가스의 밀도, 매니폴드의 단면적을 이용하여 계산한 매니폴드의 입구 속도를 해석 모델의 입구 경계 조건으로 사용하였다. 혼합가스의 질량 유량에는 연료전지의 작동 온도에서의 포화수증기압을 고려한 가습량이 포함되어 있으므로, 본 해석 모델은 가습에 의한 채널의 압력 증대 영향을 반영하고 있다고 볼 수 있다.

250cm² 반응면적을 갖는 연료전지 분리판의 개질 가스 공급 채널과 매니폴드, 그리고

채널과 매니폴드의 연결부에 대한 유속 및 압력 분포를 검증하기 위한 전산해석 결과는 [그림 3-19]와 같다. [그림 3-19]의 해석 결과로부터 채널에서의 최대 유속은 6.2 m/s로 앞에서 언급된 가스확산층 표면에 생성되는 물방울 액적을 제거하기에 충분한 유속을 보인다. [그림 3-20]은 분리판 매니폴드/채널 연결부를 포함한 유동 입구부([그림 3-19]의 A)와 10회의 회전을 갖는 부위([그림 3-19]의 B)에서의 속도 벡터를 도시한 그림이다. 균일한 속도로 분리판 채널에 유입된 개질가스는 채널 입구 영역에서 완전 발달된 유속 분포를 보이고 있으며 회전부에서는 원심력에 의해서 채널 외벽쪽으로 속도 벡터의 방향이 변하고 있음을 알 수 있다. [그림 3-21]은 매니폴드로부터 분리판 각각의 채널로 유입되는 유량 분배를 도시한 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 평균 유량에 대한 채널 각각의 유량 분배율 편차는 최고 0.04%로 매니폴드를 통해 공급된 유량이 12개의 채널로 매우 균등하게 배분되므로 채널을 통한 반응면 전체에 걸쳐 균일한 유량 공급이 이루어질 것으로 예측된다. [그림 3-22]은 분리판의 입구 매니폴드로부터 반응면적을 통과한 후 출구 매니폴드에 이르는 영역에서의 개질가스 유동에 의한 압력분포를 보여주고 있다. 앞에서 기술된 바와 같이 본 연구에서는 이론적으로 4,000Pa 이하가 되도록 설계값을 정하여 채널의 폭과 깊이 그리고 채널수를 결정하였다. [그림 3-22]에서 볼 수 있듯이 수치적으로 예측한 전체 분리판 입·출구부 압력차는 최대 2,733Pa로 설계값으로 설정된 값보다 낮은 압력 손실을 보여주고 있다.

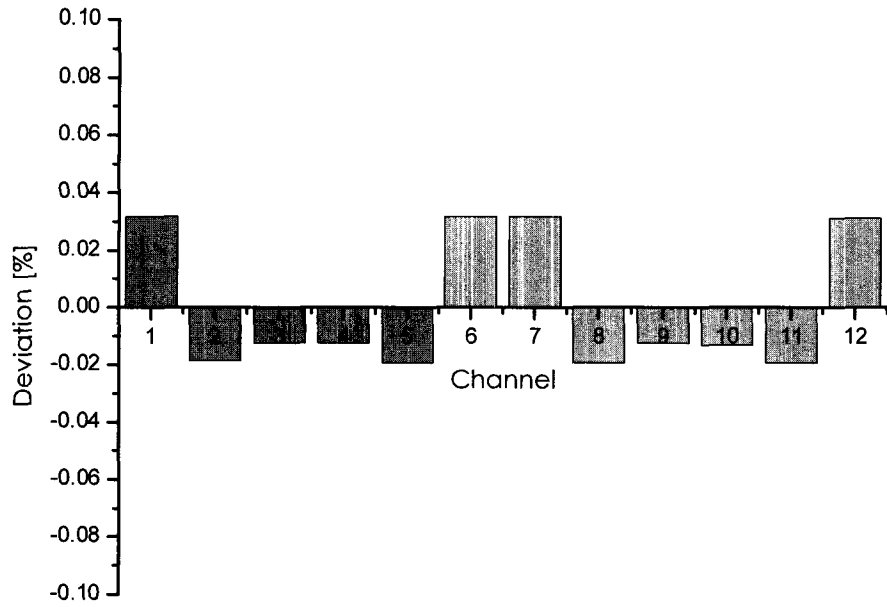


(a)

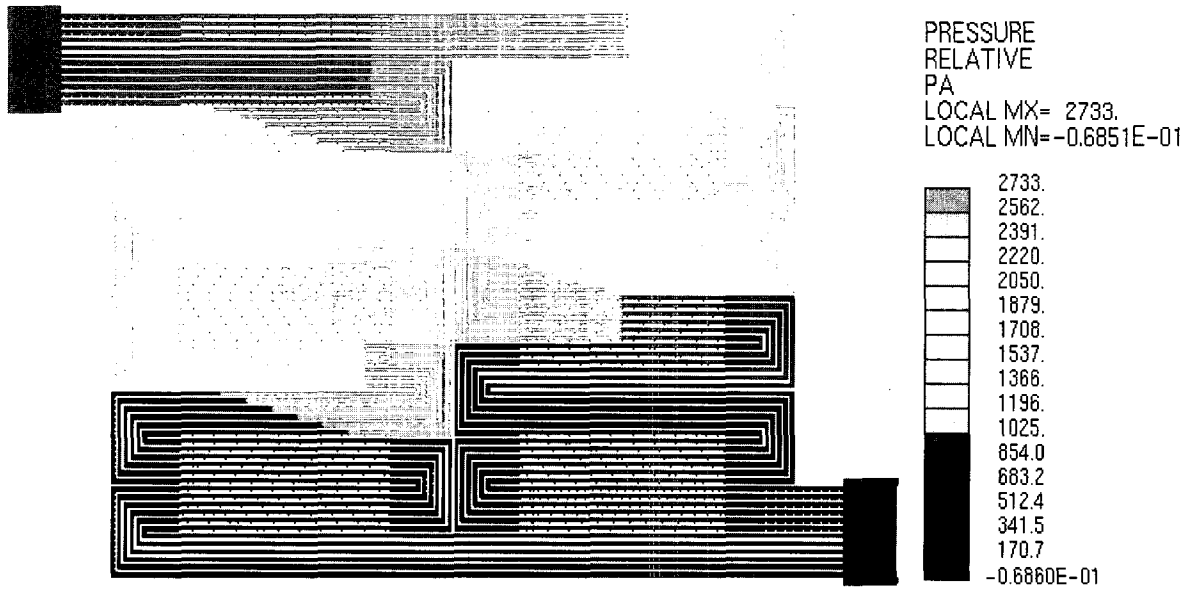


(b)

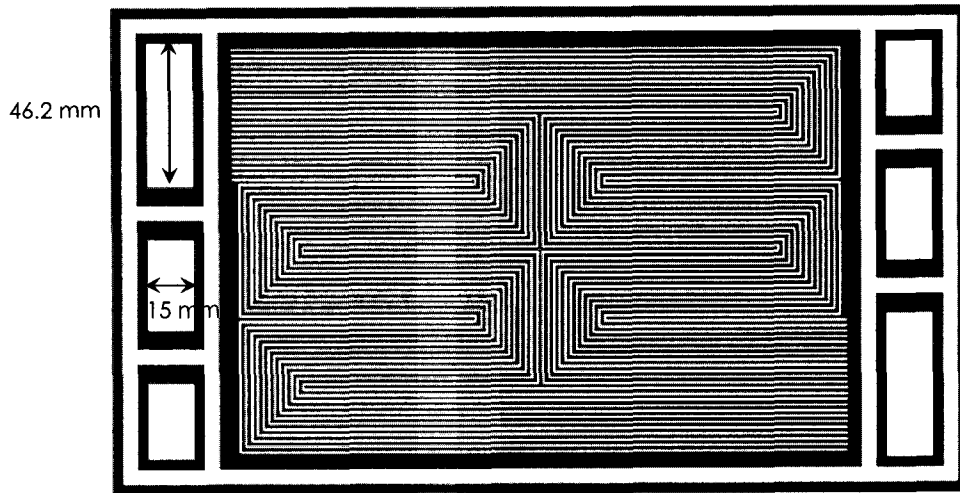
[그림 3-20] 분리판 채널 입구부와 곡선 회전부에서의 속도 분포



[그림 3-21] 개질가스 공급용 분리판의 각 채널당 유량 분배 편차



[그림 3-22] 개질가스 공급용 채널의 압력 분포

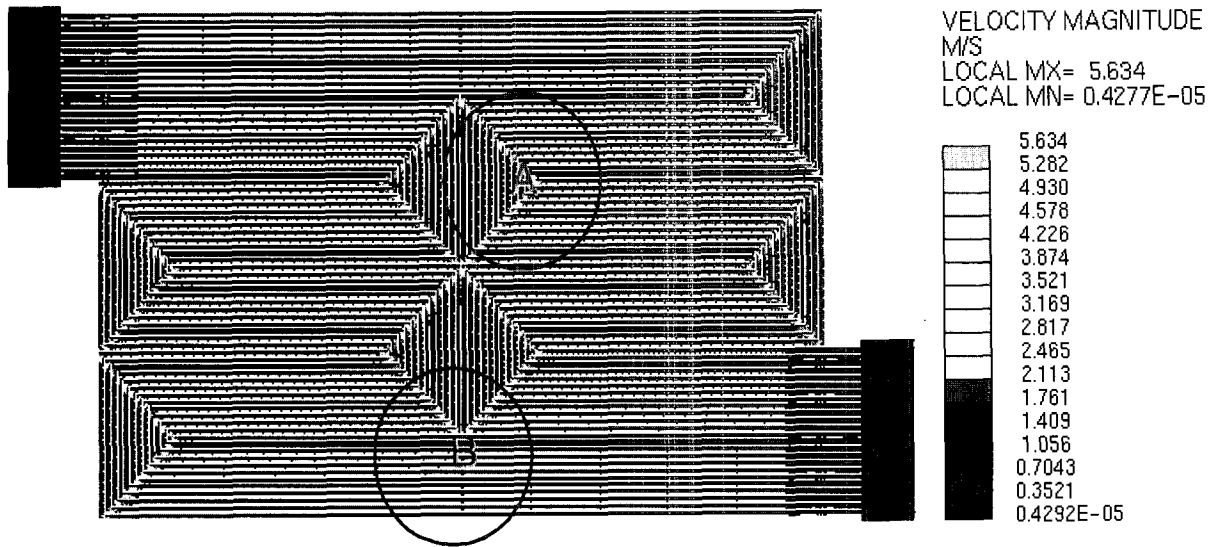


[그림 3-23] 반응면적 250cm^2 를 갖는 가정용 공기측 분리판

다. 가정용 공기 공급 채널의 유동 설계

가정용 개질 가스 공급용 채널의 설계 조건과 마찬가지로 공기 채널 역시 상압 운전을 기준으로 설계하였다. 분리판 매니폴드 입구로부터 반응면적을 통과한 매니폴드 출구부까지의 이론적 최대 압력 강하치는 개질가스 연료측과 마찬가지로 $4,000\text{Pa}$ 이하로 설정하였고 이를 근거로 공기 채널의 폭은 1.0mm , 채널의 깊이는 0.7mm , 리브의 폭은 0.8mm 로 결정하였다. 다량의 공기를 적당한 유속으로 채널 내부에 공급하기 위해 채널의 개수를 24개로 하여 전체 활성 면적에 걸쳐 개질가스 연료측처럼 반응면적을 이분하여 각각 12개의 채널이 4회 돌아서 나오도록 [그림 3-23]과 같이 설계하였다.

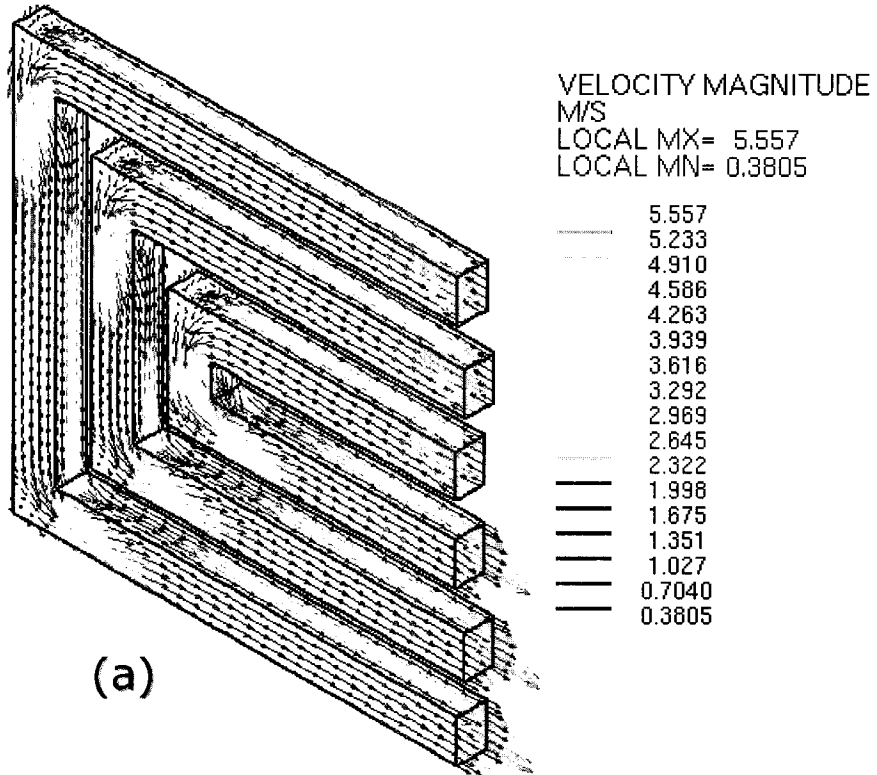
[그림 3-23]의 공기 공급을 위한 분리판의 매니폴드의 크기는 공기의 유량, 채널과 리브의 폭을 고려하여 설계하였다. 채널의 입구 부분에서 채널과 리브가 차지하는 폭은 46.2mm 로 벽면의 효과를 줄이고 매니폴드에서 채널로 균일하게 유량이 분배될 수 있도록 양 옆으로 1.5mm 정도 확장되었으며, 연료측 설계와 마찬가지로 매니폴드에서의 압력 강하가 채널을 통한 가스 압력 강하량의 $1/10$ 이하가 되도록 매니폴드 단면을 설계하였다. [그림 3-17]에서 보이는 개질가스 연료측 분리판과 [그림 3-23]의 공기측 분리판을 서로 맞대었을 때, 횡방향으로 연료측과 공기측의 채널 및 리브 폭이 일치하여 강한 외부 체결압이 작용하더라도 셀을 구성하는 고분자 전해질 이온 교환막 등의 손상이 최소화될 수 있도록 하였다.



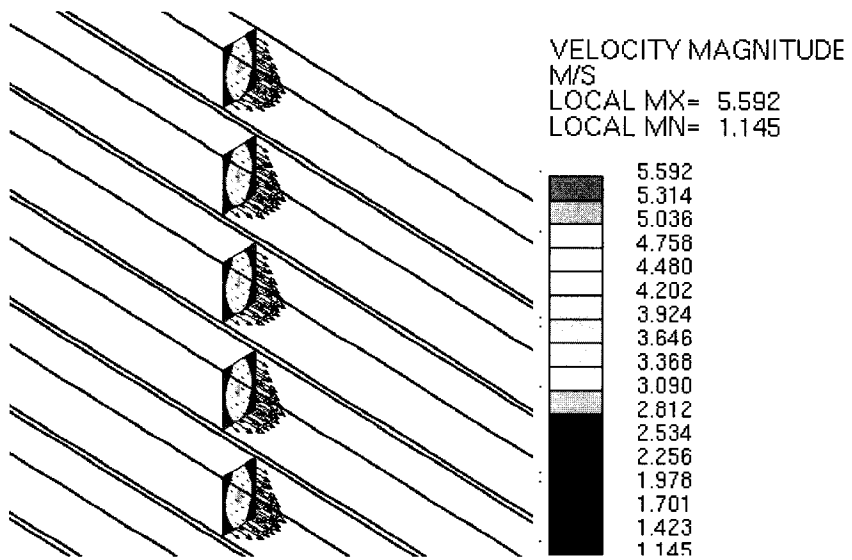
[그림 3-24] 공기 공급용 채널의 속도 분포

개질 가스 공급용 채널 설계와 마찬가지로 매니폴드로부터 분기되어 채널로 유입되는 입구 연결부는 공기의 누출이 생길 가능성이 높은 부분이므로, 공기 채널이 형성되어 있는 분리판의 하단면에서 상단으로 계단 형상으로 관통하도록 가공하여 가스켓이 공기 채널과 직접 접촉되지 않도록 하였다. 채널 입구 부분에 분리판 하단면으로 공급된 공기가 직각으로 꺾여 반응 면에 형성되어 있는 채널로 공급되는 경우 유동의 균일성을 저해할 수 있으므로, 채널로 분기되기 전에 채널 보다 10~15% 정도 큰 폭을 갖는 여유 공간을 두어 유량 재분배가 가능하도록 하였다.

개질 가스와 마찬가지로 공기판에 공급되는 공기는 가습된 상태로 수분에 의한 채널의 압력 증가를 해석에 반영하였다. [그림 3-24]는 설계된 공기 채널에 대한 전산 해석 결과를 보여주고 있다. [그림 3-24]로부터 스택의 해당 입구 온도 65℃에서 상대 습도 100% 상태의 공기가 공급되는 경우 채널내 최대 유속은 5.6 m/s임을 알 수 있다. [그림 3-25]는 채널의 회전부와 채널 출구부에서의 속도 벡터를 도시한 그림이다. [그림 3-25]의 (a)에서 볼 수 있듯이 채널 회전부에서는 대부분의 유량이 통과하는 유동 단면(채널 단면중에서 실제 유동이 지나가는 단면)의 크기가 모서리 부분의 이차유동 영향으로 줄어들게 되어 단면을 통과하는 유량의 bulk velocity가 증가하게 되며 [그림 3-25] (a)에서 유량을 표시하는 색의 변화로 확인할 수 있다.



(a)



(b)

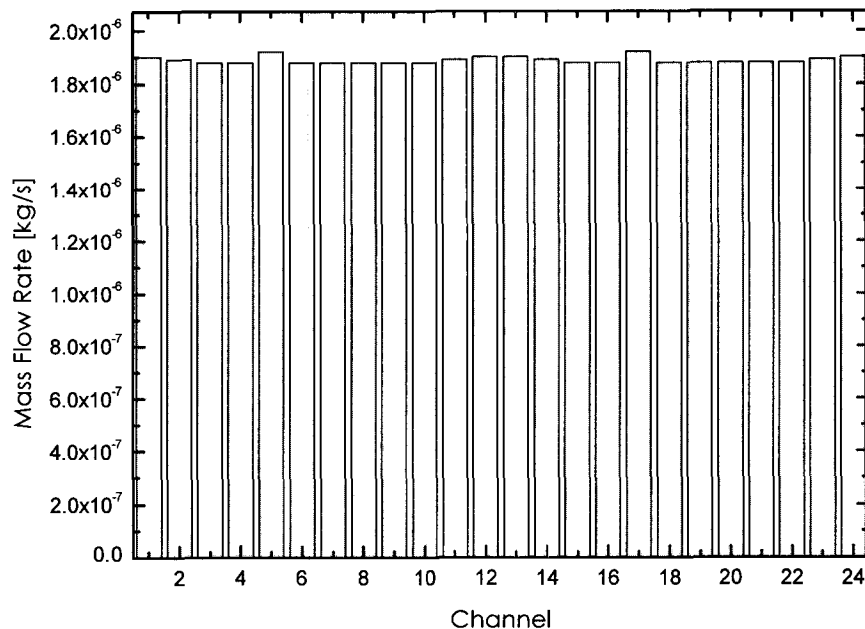
[그림 3-25] 분리판 채널 회전부와 출구부에서의 속도 분포

[그림 3-25] (b)는 출구 매니폴드를 향하여 뻗어있는 채널 단면에서의 속도 벡터를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 채널 유동 단면의 중심부에서 속도가 가장 크게 나타나고 상/하, 좌/우 대칭의 벡터 분포를 갖는 완전 발달 유동의 속도 분포를 보여준다.

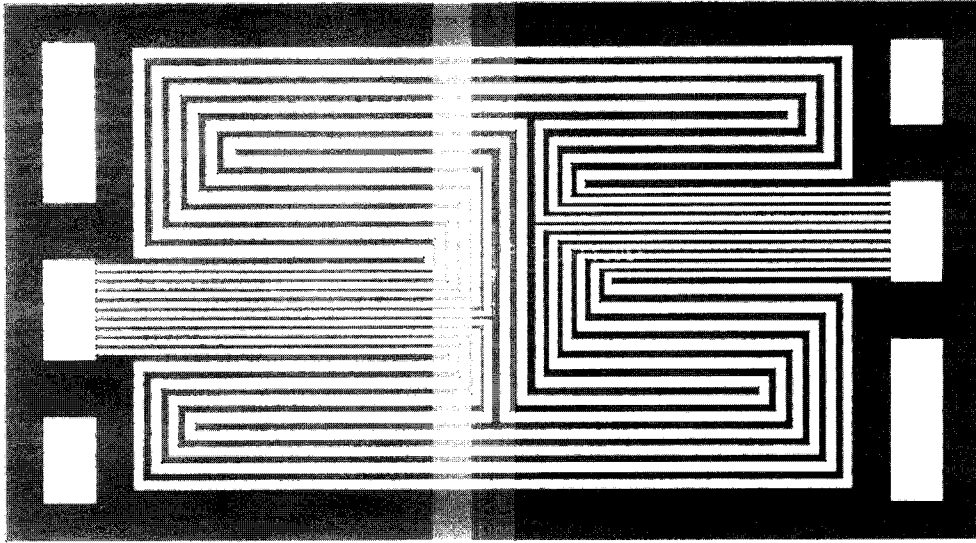
[그림 3-26]은 매니폴드로부터 공기극 24채널 각각으로 유입되는 공기의 질량 유량을 보여주고 있다. 채널간 유동의 분배 안정성은 산술적 평균 유량 대비 채널 간 유량 분배를 비교한 유량 분배율 편차는 최고 1.6%로 매니폴드를 통해 채널 입구부로 공급된 유량이 각 채널로 비교적 균등하게 분배됨을 알 수 있다.

라. 가정용 냉각수 공급 채널의 유동 설계

연료전지는 전기 발생과 더불어 전체적으로 발열 반응에 의해 계속해서 열이 발생하므로 스택의 운전 온도를 일정하게 유지하기 위해서 냉각이 필요하다. 스택의 내부 운전 온도는 정상적인 상태에서의 전해질의 안정성과 스택의 효율을 고려하여 60°C에서 80°C의 범위 내에서 설계한다. 냉각 채널을 설계하기 위해서는 스택의 작동 온도와 더불어 스택 입구와 출구사이의 냉각수 온도차를 알아야 하는데, 이 값은 스택 내부에서의 열전달율에



[그림 3-26] 공기 공급용 분리판의 각 채널당 질량 유량 분배 비교



[그림 3-27] 가정용 연료전지 냉각 분리판

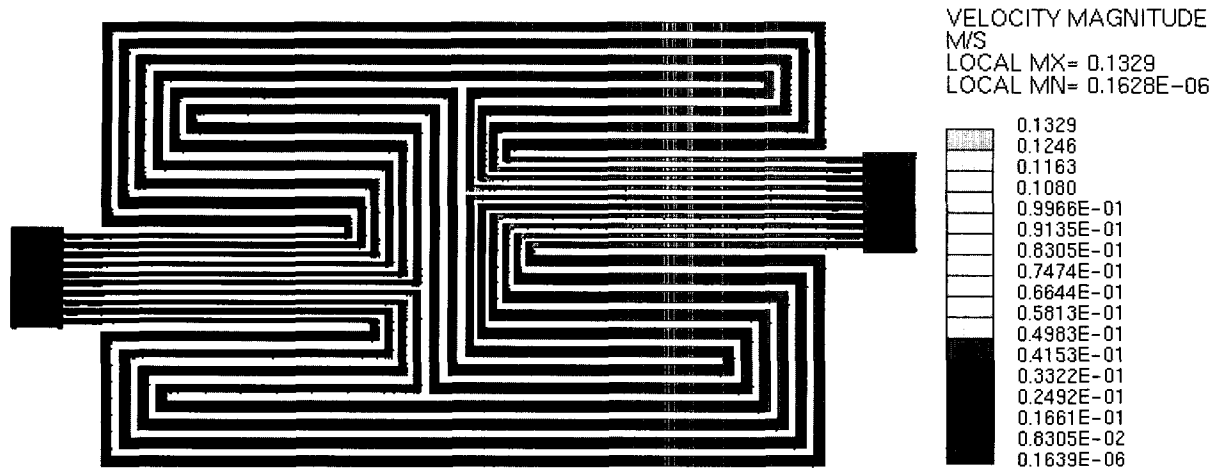
따라 변화하는 값으로 대략 5~10℃의 범위에서 결정된다.

본 연구에서는 스택을 통하는 냉각수 입·출구의 온도 차이를 10℃로 설정한 후 전기 화학 반응에 의해서 스택 내부에서 발생하는 전기적 발열량과 냉각수에 의해 회수되는 열회수량에 의해 냉각수 유량을 결정하였다. [그림 3-27]은 250cm²를 갖는 가정용 연료전지용 냉각판의 단면을 보여주고 있다. 냉각수 채널은 10개이고 냉각수 채널 폭은 1.5mm 이상이며 가변 채널 폭 형상을 가지며 채널의 깊이는 0.8mm이다. 냉각 매니폴드에서 분기한 10개의 채널은 냉각 면적에 따라 위로 6개가 아래에 4개의 채널이 각각 회전한다. 분리판 반응면의 우측부분에서는 냉각 면적 비율의 역전현상에 의해서 반대로 하단부에 6개, 상단부에 4개의 냉각 채널이 가공된다. 이때 매니폴드의 크기는 가로 15mm로 개질 가스 연료판과 공기판의 가로 사이즈와 같고 높이 방향의 세로 길이는 39.6mm이다.

냉각 채널에 흐르는 유량은 연료전지 각 셀에서 방출되는 열량에 의해서 결정된다.

$$\dot{m} C_p \Delta T = (V_{LHV/HHV} - V_{cell}) \cdot I_{cell} \quad (3-26)$$

식 (3-26)의 좌측은 냉각 채널을 흐르는 대류에 의한 열 제거율이며, 우측은 연료전지에서 방출되는 방열량을 나타낸다. 식 (3-26)을 다시 표현하면 식 (3-27)과 같다.

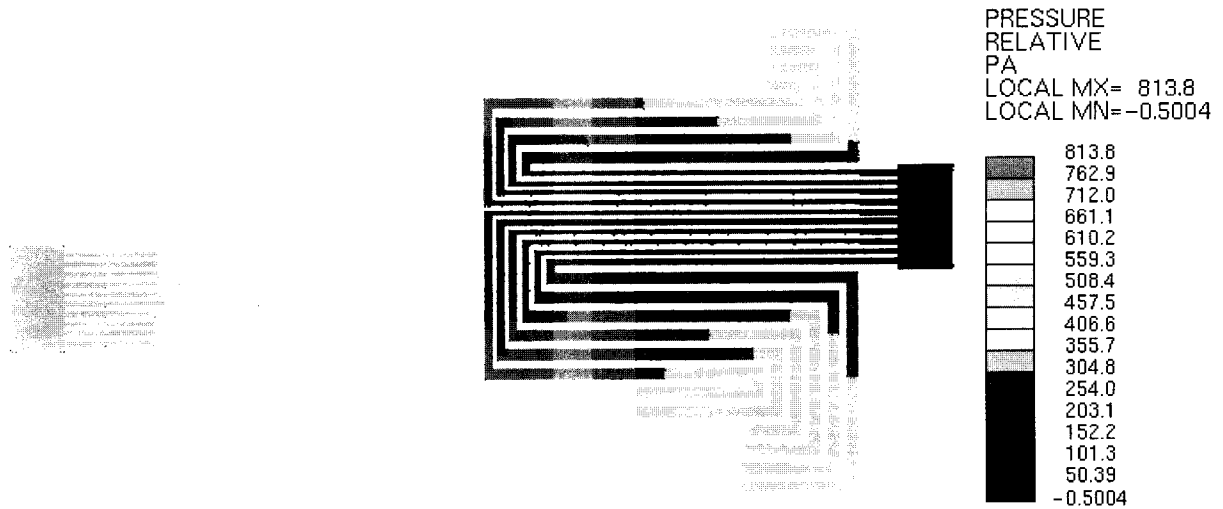


[그림 3-28] 가정용 연료전지 냉각 채널에서의 속도 분포

$$Q_{coolant} = \frac{(V_{LHV/HHV} - V_{cell}) \cdot I_{cell}}{\rho_{cool} C_P \Delta T} \quad (3-27)$$

식 (3-27)에서 ρ_{cool} 은 냉매로 사용되는 유체의 밀도, C_P 는 냉매의 열용량, ΔT 는 냉각 채널 입구에서 출구까지의 온도 증가분, $V_{LHV/HHV}$ 는 매니폴드 출구부에서의 물의 상태 (기체/액체)에 기초한 Open Circuit Voltage이고, I_{cell} 은 연료전지를 흐르는 전류의 양이다.

식 (3-27)에서 구한 냉각수 유량을 연료전지 전체 스택을 구성하는 셀 수로 나누고, 이를 다시 분리판당 채널수로 나누면 각각의 냉각수 채널에 흐르는 냉각수 유량을 구할 수 있다. 본 연구의 경우 가정용 연료전지의 운전 조건을 0.7V, 0.3A/cm²로 가정한다면, 각 채널당 흐르는 냉각수 유량은 0.000138m³/s 이다. [그림 3-28]은 냉각 채널에서의 속도분포를 나타내며, 최고 유속은 0.1329 m/s로 예측된다. [그림 3-29]는 동일한 냉각판에서의 압력 분포를 보여주고 있으며, 이론적으로 설정한 압력강하 허용량은 3000 Pa 이하였으며 수치해석을 통해서 예측된 압력 강하량은 813.8 Pa로서 설정치보다 훨씬 작은 값을 보여주고 있다.

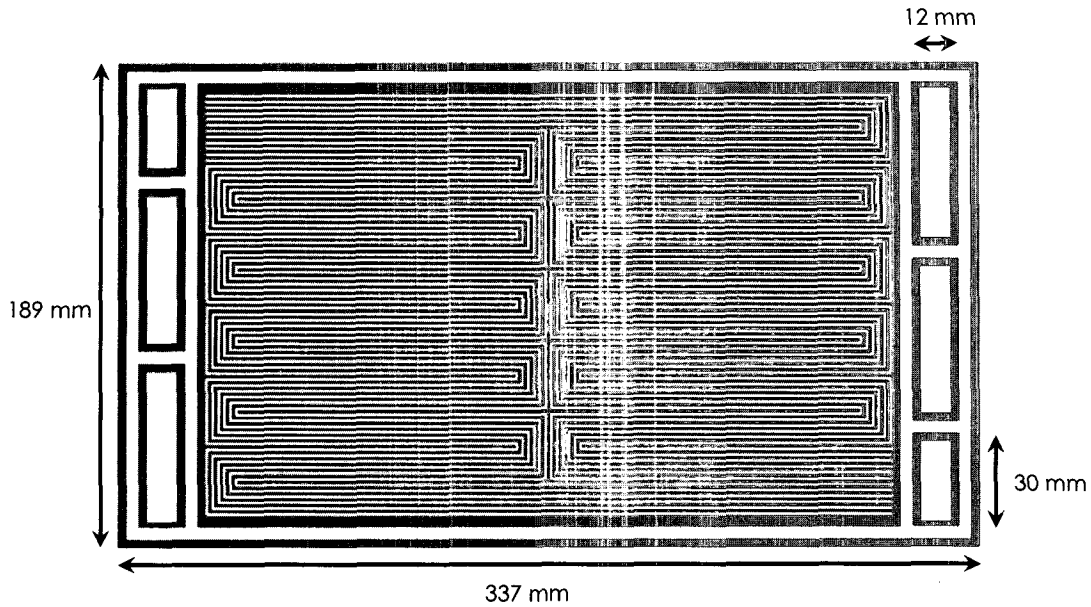


[그림 3-29] 냉각수 공급용 채널의 압력 분포

6. 차량용 연료전지 분리판 설계

가. 차량용 수소 가스 공급 채널의 유동 설계

상압에서 작동하는 차량용 수소 가스 공급용 채널을 설계하기 위해 필요한 유량은 식 (3-13)을 이용하여 이론적으로 계산한 값을 사용하였다. 본 연구에서는 가정용 연료전지와 마찬가지로 직사각형 형태의 단면을 갖는 다중 사행 형상의 채널을 채택하여 분리판을 설계하였다. 차량용의 경우는 연료로서 순수 수소 가스를 사용하고 연료전지 성능 곡선상의 최대 출력까지 운전하기 때문에 개질 가스를 공급하는 가정용의 경우에 비해 출력 밀도가 3배 이상 높다. 따라서 가정용의 경우처럼 비활성 가스가 포함된 대량의 개질 가스가 흐르지는 않으나 차량용의 경우는 가정용에 비해 단위면적당 출력밀도가 높아서 상대적으로 수분 발생량이 높으며 이로 인해서 공기 채널에서의 응축은 물론 확산으로 인해 수소측에서도 수분의 농도가 높아져 양극과 마찬가지로 물의 응축현상에 의한 압력 손실이 증가될 확률이 높다. 또한 차량용의 경우 대면적 분리판(버스의 경우 반응면적 450cm^2)을 사용하여 최대 200kW 급까지 연료전지 스택을 제작하므로 반응가스가 흘러가야 할 유로의 길이가 가정용에 비해 거의 2배 정도로 길어질 수 있다. 본 연구에서는 가정용 연료전지 분리판 설계와 마찬가지로 5000Pa 의 분리판 채널의 압력강하 허용값을 설정하여 분리판 채널의 폭과 깊이 그리고 길이를 설계하였다. 분리판 입·출구 사이의 반응가스 유동의 압력 차를 줄이기 위해서 채널의 깊이를 대략 0.8mm 이상으로 설계하여

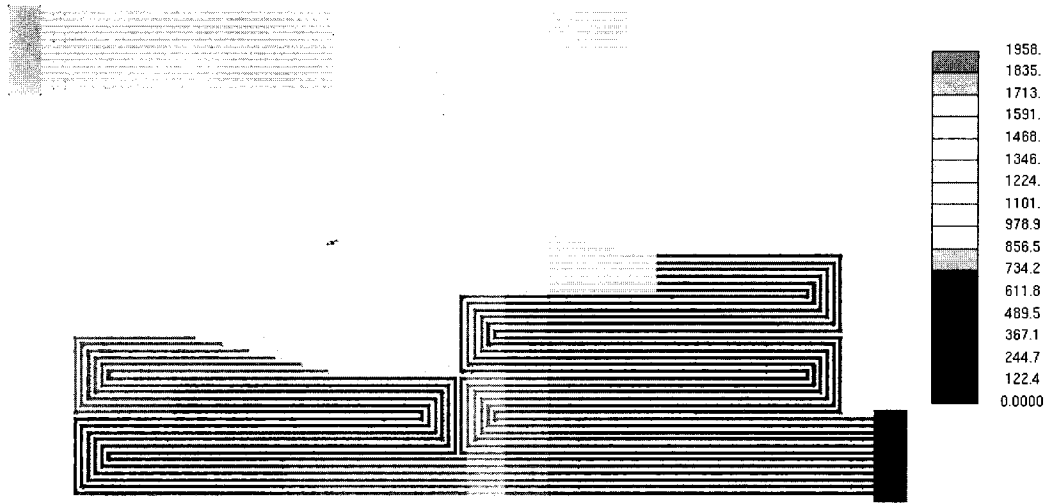


[그림 3-30] 차량용 수소 가스 분리판 형상

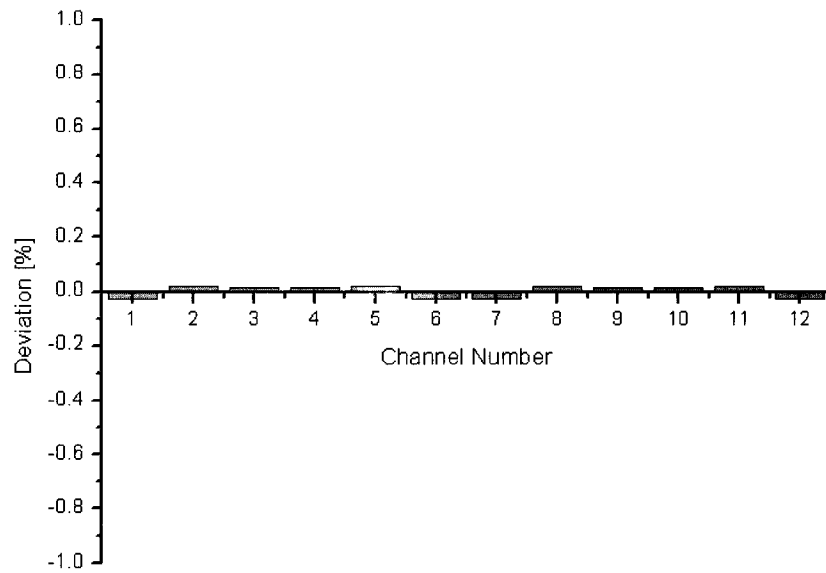
채널의 수력직경을 크게 설계해 주어야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 사항들을 고려하여 [그림 3-30]에서와 같이 폭 1.2mm, 깊이 0.8mm, 리브 폭이 1.1mm인 채널 12개가 분리판 입구에서 각각 6개씩 분기하여 활성 면적 전체에 걸쳐 10회 순환한 후 배출되는 다중 사행 형상의 채널을 설계하였다. 매니폴드와 채널 연결부의 형상은 스택 체결 시에 기밀성을 높이면서 압축 응력에 견딜 수 있도록 가정용에서와 같이 계단 형상으로 상하면을 관통하도록 설계하였다.

[그림 3-30]의 수소 가스 공급을 위한 분리판의 활성 면적은 450cm^2 ($269\text{mm} \times 167\text{mm}$)이며, 전체 매니폴드를 포함한 외곽 사이즈는 $337\text{mm} \times 189\text{mm}$ 이고 매니폴드의 크기는 $12\text{mm} \times 30\text{mm}$ 로 설계하였다. 차량용의 경우는 공간의 제약이 심하여 가급적 분리판의 비효율적인 공간을 줄이고 채널 및 매니폴드의 크기를 허용치 이내에서 최소화하여 설계할 필요가 있다.

본 해석에서는 식 (3-13)에서 계산한 수소 가스의 유량과 혼합가스의 밀도, 매니폴드의 단면적을 이용하여 계산한 매니폴드의 입구 속도를 해석 모델의 입구 경계 조건으로 설정해 주었다. 혼합가스의 질량 유량에는 연료전지의 작동 온도에서의 포화수증기압을



[그림 3-31] 차량용 수소 가스 분리판의 압력 분포



[그림 3-32] 차량용 수소 가스 분리판 채널당 유량 분배 편차

고려한 가습량이 포함되어 있으므로, 본 해석 모델은 가습에 의한 채널의 압력 증대 영향을 간접적으로 고려하고 있다고 볼 수 있다.

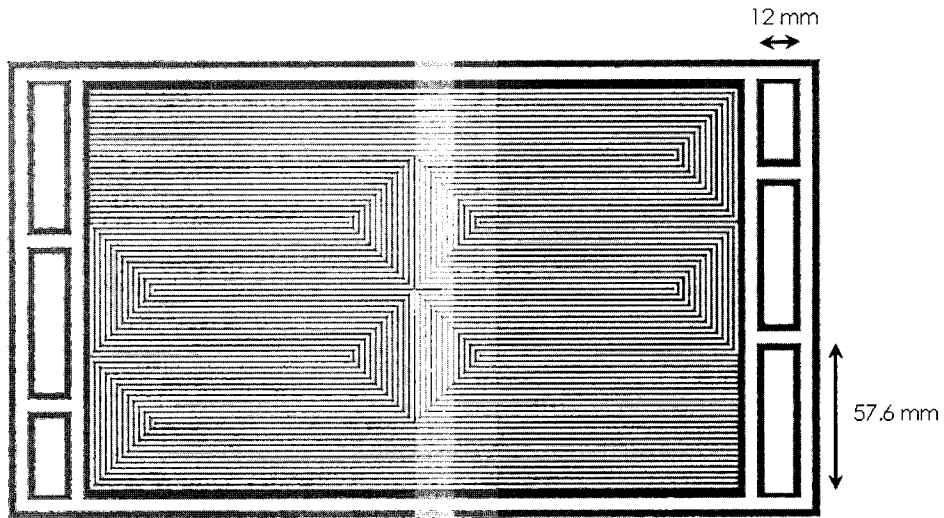
[그림 3-31]은 수소 공급용 채널에서의 압력 강하를 보여주고 있다. 상대습도는 100%로 가정하였으며 수소 이용률은 66.7%로 가정하였다. 수치해석에 의해 예측된 최대 압력 강하량은 1,958Pa로서 이론적 설정치 보다 작은 값을 보여주고 있다. [그림 3-32]는 수소 공급용 분리판에 새겨진 12개 채널당 유량 편차 분포를 보여주고 있다. 채널당 유량 편차는 최대 0.05% 이내로 매우 고른 유량 분배 특성을 나타내고 있다.

나. 차량용 공기 공급 채널의 유동 설계

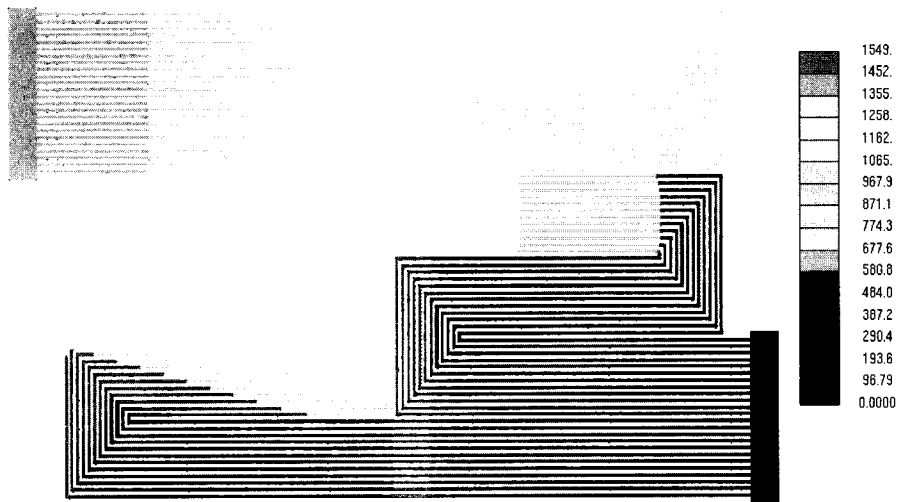
차량용 수소 가스 공급용 채널의 설계 조건과 마찬가지로 공기 채널 역시 상압 작동을 기준으로 설계하였다. 분리판 매니폴드 입구로부터 반응면적을 통과한 매니폴드 출구부까지의 이론적 최대 압력 강하값은 수소측과 마찬가지로 5,000Pa 이하로 설정하였고 이를 근거로 공기 채널의 폭은 1.2mm, 채널의 깊이는 1.0mm, 리브의 폭은 1.1mm로 결정하였다. 다량의 공기를 적당한 유속으로 채널 내부에 공급하기 위해 동시에 가스가 공급되는 채널의 개수를 24개로 하였으며 각각 12개의 채널이 활성면적을 이분하여 좌우의 활성면적을 담당하도록 하였다. 각 채널은 활성면에서 4회 돌아서 나오도록 [그림 3-33]과 같이 설계되었다.

[그림 3-33]에 나타나 있는 바와 같이 공기 공급을 위한 분리판 매니폴드의 크기는 스택 전체로서 분리판 입구 채널 단면적의 총합보다 매니폴드의 단면적이 커야하고 동시에 매니폴드에서의 압력강하가 채널에서의 압력 강하에 비해 1/10이 되도록 설계하였다. 매니폴드 크기는 가로, 세로 폭이 각각 12mm × 57.6mm 이다. [그림 3-31]에서 보이는 수소 가스 연료측 분리판과 [그림 3-33]의 공기측 분리판을 서로 맞대었을 때, 횡방향으로 연료측과 공기측의 채널 및 리브가 일치하는 구조이다.

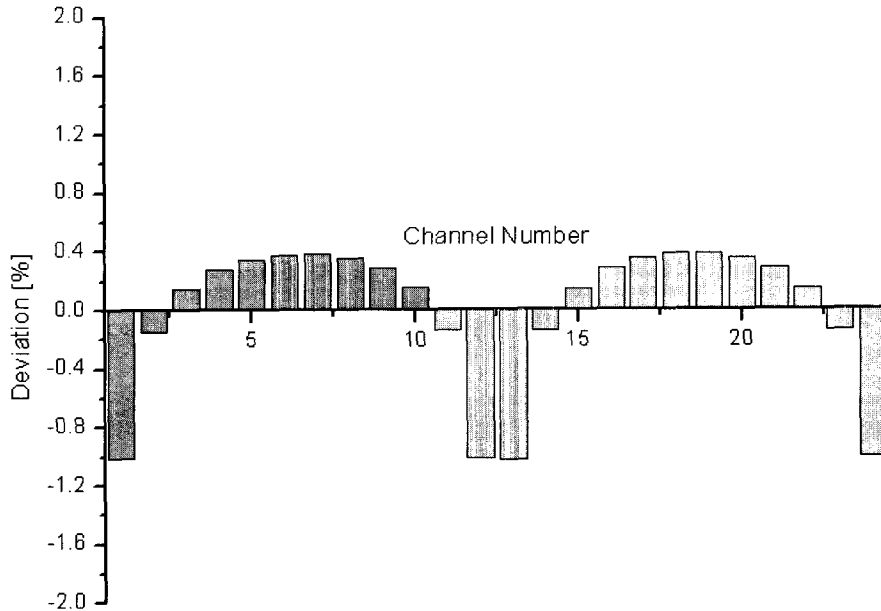
본 해석에서는 식 (3-13)으로부터 계산한 공기의 유량과 혼합가스의 밀도, 매니폴드의 단면적을 이용하여 계산한 매니폴드의 입구 속도를 해석 모델의 입구 경계 조건으로 사용하였다. 혼합가스의 질량 유량에는 연료전지의 작동 온도에서의 포화수증기압을 고려한 가습량이 포함되어 있으므로, 본 해석 모델은 가습에 의한 채널의 압력 증대 영향을 간접적으로 고려하고 있다고 볼 수 있다.



[그림3-33] 차량용 공기 공급 분리판 형상



[그림 3-34] 차량용 공기 공급 분리판 압력 분포

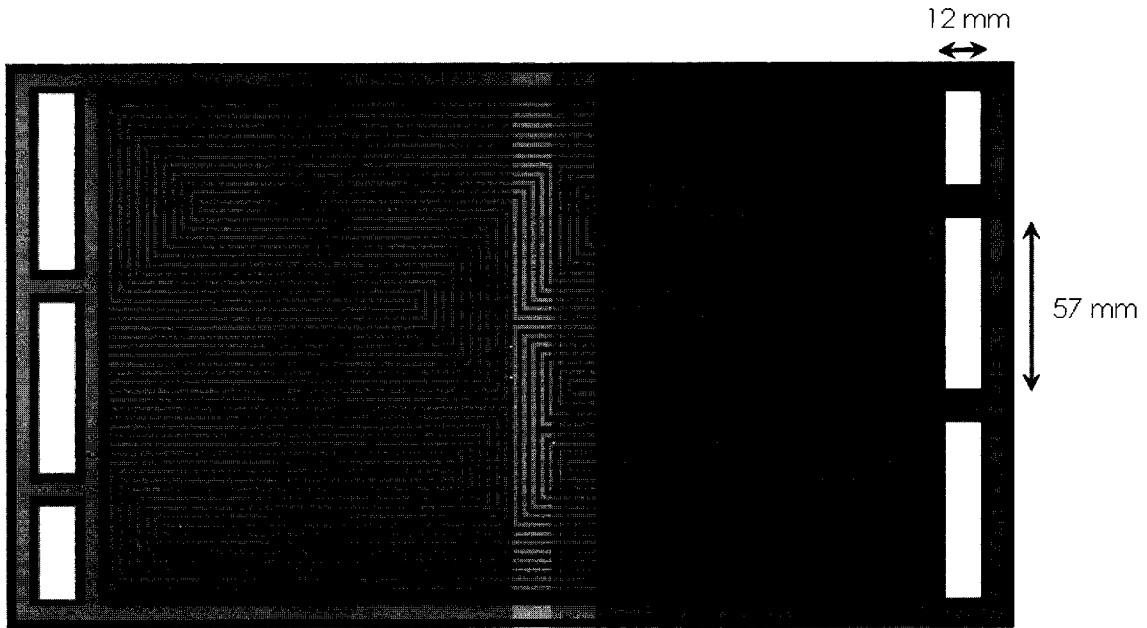


[그림3-35] 차량용 공기 공급 분리판 채널당 유량 분포 편차

[그림 3-34]는 공기 공급용 채널에서의 압력 강하를 보여주고 있다. 상대습도는 100%로 가정하였으며 공기 이용률은 66.7%로 가정하였다. 수치해석에 의해 예측된 최대 압력 강하량은 1,549Pa로서 이론적 설정치 보다 작은 값을 보여주고 있다. [그림 3-35]는 공기 공급용 분리판에 가공된 24개 채널에서의 질량 유속 분포를 보여주고 있다. 채널당 유량 분포 편차는 평균 유량 대비 최대 1.0%를 초과하지 않는 것을 알 수 있다.

다. 차량용 냉각수 공급 채널의 유동 설계

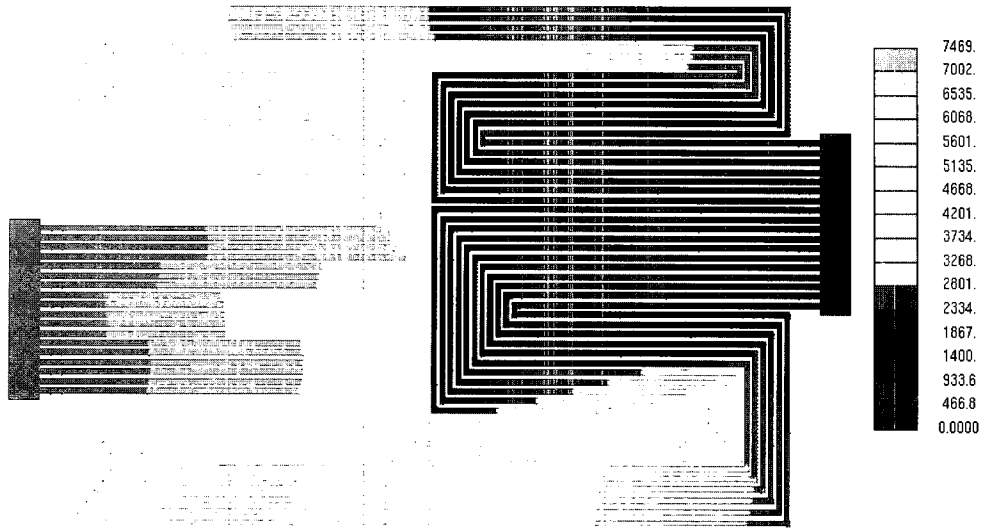
가정용 연료전지는 1 ~ 5kW급 발전시스템이 주를 이루지만 차량용의 경우는 80 ~ 200kW급의 출력을 목표로 개발되고 있다. 연료전지 스택에서 발생하는 열량은 출력에 비례하므로 스택을 일정한 온도로 유지하기 위해서는 냉각이 필요하다. 본 연구에서는 스택의 입·출구의 온도 차이를 10℃로 설정한 후 스택 내부에서 발생하는 열량을 냉각수를 통해 전부 회수한다고 가정하여 식(3-27)로부터 냉각수 유량을 결정하였다. 실제로는 스택과 방열기의 열전달 특성에 의해 스택의 입출구 온도와 냉각수 유량이 결



[그림 3-36] 차량용 냉각 분리판 형상

정된다. [그림 3-36]은 450cm^2 를 갖는 차량용 연료전지 냉각판의 단면을 보여주고 있다. 냉각수 채널은 18개이다. 냉각수 채널 폭은 2mm 이상이며 가변 채널폭 형상을 가지며 채널의 깊이는 1mm이다. 냉각 매니폴드에서 분기한 18개의 채널은 냉각 면적에 따라 위로 11개가 아래에 7개의 채널이 각각 회전한다. 분리판 반응면의 우측부분에서는 냉각 면적의 비율이 바뀔에 따라 반대로 하단부에 11개, 상단부에 7개의 냉각 채널이 가공된다. 이때 매니폴드의 크기는 가로 12mm로 개질가스 연료판과 공기판의 가로 사이즈와 같고 높이 방향의 세로 길이는 57mm이다.

식 (3-27)에서 구한 냉각수 유량을 연료전지 전체 스택을 구성하는 셀 수로 나누고, 이를 다시 분리판당 채널수로 나누면 각각의 냉각수 채널에 흐르는 냉각수 유량을 구할 수 있다. 본 연구의 경우 차량용 연료전지의 운전 조건을 0.6V, $1.2\text{A}/\text{cm}^2$ 로 가정한다면, 저위발열량(Low Heat Value)로 계산한 Open Circuit Voltage를 적용하면, 식 3-(27)로부터 각 채널당 흐르는 냉각수 유량은 $0.0004643\text{m}^3/\text{s}$ 이다. [그림 3-37]은 냉각 채널에서의 압력분포를 나타내며 냉각 분리판에서의 압력 강하량은 7469 Pa로 계산되었다.

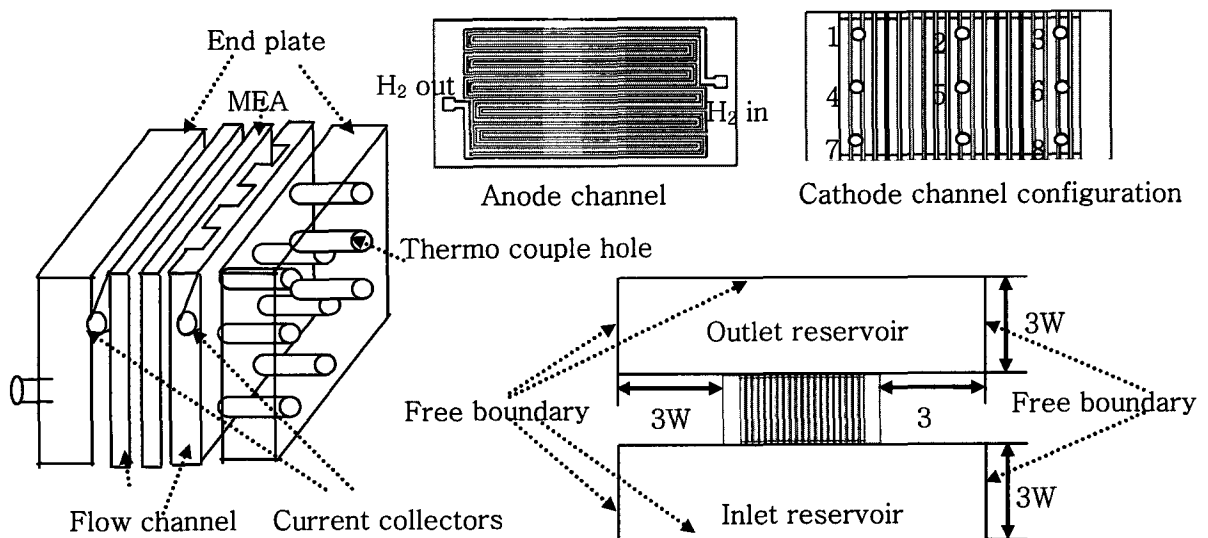


[그림 3-37] 차량용 냉각 분리판 압력 분포

제 2 절 공기호흡식 연료전지의 3차원 수치 해석 및 설계

1. 기술 개요

소형 휴대용(portable) 연료전지는 현재 사용되는 기존의 이차전지를 대체하기 위하여 연구되고 있다. 기존의 연료전지 시스템은 공기 공급과 열 및 물 관리를 위해 압축기와 열교환기 그리고 가습장치와 같은 추가적인 장치가 필요하기 때문에 시스템의 부피와 무게를 줄이는데 한계가 있다. 따라서 기존 시스템에 비해 성능은 떨어지지만 추가되는 부가설비 없이 연료전지 자체적으로 공기를 공급하고 냉각이 이루어지는 공기호흡식 연료전지를 사용한다면 소형 전력시스템을 단순하게 구성할 수 있다. 또한 공기호흡식 연료전지는 공기 공급과 냉각을 위한 별도의 설비를 사용하지 않아 소음이 적고 고장이 발생하지 않아 미래 소형 전원으로 적용될 가능성이 있다. 공기호흡식 연료전지의 구성은 [그림 3-38]과 같다. 연료전지의 작동 시 비가역현상에 의하여 일정량의 열이 발생하는데 공기호흡식 연료전지에 공급된 공기는 연료전지의 열로 인하여 가열되고 부력을 얻어 연료전지의 상부로 손쉽게 배출된다. 결과적으로 연료전지는 주변의 신선하고 찬 공기를 끌어들이 수 있는 흡입력이 생기므로 별도의 압축기 없이 작동이 가능하게 된다. 연료전지의 반응속도는 작동범위 내에서는 가스량에 비례하여 증가하는데 공기 호흡식 연료전지의 경우 자연대류로 공급



[그림 3-38] 공기호흡식 연료전지

되는 산소의 양이 충분하지 않으면 반응 중에 발생된 물이 잘 배출되지 않아 촉매층의 물질전달 가로막는 flooding 현상이 발생하는 단점이 있다. 따라서 연료전지에서 나타나는 여러 전압 손실 요인 중에서 농도 손실이 크게 나타날 수 있다.

기존의 문헌에 의해서도 강제 대류에 비해 자연대류에 의한 경우 농도손실이 크다는 것이 밝혀지고 있다[1-6]. 물관리 역시 공기 호흡식 연료전지에서는 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 요인이다. 고분자 전해질 연료전지는 H^+ 이온 전달을 위해서는 전해질막의 수분함유가 필수적이다. 따라서 초기 구동시 전해질막에 물이 충분히 발생하지 않을 경우 전해질막의 저항이 증가되어 연료전지의 출력이 저하된다. 반대로 높은 가습상태에서 작동되면 포화된 증기가 촉매층이나 가스확산층에서 응축되어 원활한 가스공급을 막아서 반응이 제한된다. 따라서 공기호흡식 연료전지의 성능을 개선하기 위해서는 셀 내부에서 일어나는 현상을 이해하여 가능한 물배출과 공기 공급이 원활하게 일어날 수 있는 구조로 설계하는 것이 필요하다.

고분자 전해질 연료전지에 가스를 공급하기 위한 분리판의 유동 채널 형태는 응축수의 배출을 위하여 적절한 압력차를 수반하는 사행(serpentine) 채널이 널리 사용되고 있으나 공기 호흡식 연료전지의 경우에는 자연 대류에 의해 산소를 공급해야 하기 때문에 공기의 공급이 용이하도록 평행직선 채널이 바람직하다. 연료전지의 성능을 향상시키기 위해서는 이러한 채널형태에서 적절한 채널의 단면적과 길이를 찾는 작업이 선행되어야 한다. 그런데 최근에는 연료전지의 성능최적화를 위해 시간과 비용을 절약할 수 있는 전산해석이 많이 사용되고 있다.

전산해석을 위한 초기의 이론 논문은 1차원 해석이나 2차원 해석을 위한 것으로 이런 연구를 통해 연료전지의 이해를 높일 수 있었으나 [7-13], 간이화된 모델에 적용하여 현실성 반영에는 미흡한 점이 있었다. 최근 몇 년간 3차원 해석을 통해 연료전지의 성능을 예측하기 위한 시도가 이루어지고 있다. Dutta 등[12]은 직선채널에서 3차원 해석을 통해 화학반응에서 소모되는 질량이 유동장에 미치는 효과를 분석하였으며 다른 논문[13]에서는 같은 모델을 사용하여 사행채널 사이에서의 속도분포, 질량 흐름 등을 분석하였다. 업석기 등[14,15]은 전기화학식, 전류밀도 분포, 유동, 수소 확산을 위한 복합가스 전달 등을 고려한 천이 다중 모델을 개발하여 고분자연료전지 해석에 사용하였다. Andreas Schmitz [16]는 2차원 등온 모델을 개발하여 서로 다른 채널형상이 연료전지 성능에 미치는 효과를 분석하였다. Pei wen Li 등은[17] 열전달과의 유사성(Analogy)를 이용한 이론적 해석식과 실험결과를 통해 물질전달효과가 공기호흡식 연료전지에 미치는 효과를

분석하였다. 3차원 해석에 대한 대부분의 자료가 강제 대류식 연료전지로 자연대류식 공기 호흡형 연료전지에 대한 자료는 거의 없는 형편이다. 따라서 본 연구의 목적은 유동과 열 및 물질전달 그리고 전극반응을 고려한 3차원 모델을 통해 공기 호흡식 고분자 전해질 연료전지의 성능해석 기술을 개발하여 궁극적으로는 최적의 유로형상을 설계하기 위한 것이다.

2. 수학적 모델

공기호흡식 연료전지는 기존의 연료전지 특성과 자연대류 현상이 복합되어 있는 것으로, 복합가스를 이용한 3차원 유동해석은 물론 반응을 포함한 가스내의 열전달 및 물질전달과 고체와 기체사이의 열전달 그리고 다공체내에서의 전달현상을 해석해야만 한다. 이와 같은 복잡한 현상의 해석을 통해서만이 물질전달 현상의 향상과 물관리의 효율성을 향상시킬 수 있고 결과적으로 전체시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 해석에 사용될 모델을 정리하면 다음과 같다.

가. 모델식 가정

완전한 연료전지 모델을 위해서는 유동, 에너지, 열 및 물질전달, 전기화학을 포함하는 복잡한 방정식이 필요하며 현실을 고려한 합리적인 가정을 통해 방정식을 간이화하여 계산에 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 하였다.

- (i) 기체는 이상적인 상태로 가정한다.
- (ii) 전지 내부에 존재하는 물은 증기 상태로 가정하며, 화학반응에 의해 생성된 물도 증기 상태로 가정한다.
- (iii) 분리판과 가스확산층의 저항은 전해질의 이온저항에 비해 상대적으로 낮으므로 무시한다.

나. 지배 방정식

전지내부의 유동은 층류 흐름(laminar flow)이다. 유동장을 해석하기 위한 모델식은 보존방정식의 형태로 표현될 수 있다. 일반화된 변수 ϕ 를 도입하면 다음과 같은 식으로 표

현할 수 있다[18].

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \phi \bar{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (3-28)$$

이식은 변수 ϕ 를 위한 전달함수(transport equation)로 통칭되는 것으로 좌측항은 convective항을 그리고 오른쪽 첫 번째 항은 diffusive항을 그리고 좌측 두 번째는 source 나 sink 특성을 나타내는 것이다. ϕ 에 따라서 연속방정, 운동방정식, 그리고 에너지 방정식을 나타낼 수가 있다. 같은 방정식에서도 생성항은 영역에 따라 다르게 표시될 수 있다.

1) 연속방정식을 위한 생성항

채널과 가스확산층에서는 반응이 없기 때문에 생성항은 0이 된다. 연료극 촉매층에서는 수소가 소모되며 공기극과 연료극사이의 물의 전달에 의해 수분의 양이 변하게 된다. 따라서 연료극에서의 생성항은 수소 소모량과 물 전달량으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_m = S_{H_2} + S_{H_2O}^a \quad (3-29)$$

여기서 S_{H_2} 는 Faraday's laws에 의해 전류량에 의해 계산할 수 있다.

$$S_{H_2} = -IM_{H_2O}A_{CV}/2F \quad (3-30)$$

여기서, A_{cv} 는 단위체적당 반응면적이다. 수분은 전해질을 통과하는 물의 양과 관계된다.

$$S_{H_2O}^a = -M_{H_2O}A_{CV}\alpha/F \quad (3-31)$$

연료극과 마찬가지로 공기극도 산소 반응과 반응에 의한 물 생성량 그리고 연료극에서 공기극으로 전달되는 물의 전달량으로 생성항을 나타낼 수 있다.

$$S_m^c = -IM_{O_2}A_{CV}/4F + IM_{H_2O}A_{CV}/2F + \alpha M_{H_2O}A_{CV}/F \quad (3-32)$$

오른쪽 첫번째 항 S_{O_2} 은 반응에 의한 산소 소모량이며 두 번째 항은 반응에 의해 생성된 물의 양이며 세 번째 항은 연료극에서 공기극으로 전달되는 물의 양으로 두 번째 항과 세 번째 항을 더한 것이 공기극에서의 물의 생성량 $S_{H_2O}^c$ 가 된다.

2) 운동방정식에서 소스항

소스항 S_u 는 중력 등 외부힘을 나타낸다. 연료극에서는 중력에 의한 힘을 무시할 수 있으므로 외부에서 작용하는 힘을 0로 고려해 생성항을 고려하지 않는다. 그러나 공기극은 부력에 의해 공기가 유입되기 때문에 중력에 의한 힘이 고려되어야 한다. 공기극의 생성항은 다음과 같이 나타낸다.

$$S_{wy} = -\rho g \quad (3-33)$$

이상기체 상태방정식을 사용하면 혼합가스의 밀도는 다음과 같다.

$$\rho = P/RT \left(\sum X_m / M_m \right) \quad (3-34)$$

촉매층과 가스확산층은 다공성 물질로 구성되어 있는데 이러한 특성은 운동량 보존방정식의 생성항으로 표현이 가능하다. Darcy's law 를 이용하여 압력과 유속과의 관계는 다음식으로 표현되는데

$$\bar{u} = -k_p \nabla P / \mu \quad (3-35)$$

결과적으로 다공성매질에서의 소스항은 다음과 같은 형태를 가진다.

$$S_u = -\mu \bar{u} / k_p \quad (3-36)$$

위 식에서 분모는 투과성을 나타내는 계수이며 유체의 성질에는 관계없이 다공체의 구조에만 영향을 받는다.

3) 에너지보존식에서의 생성항

에너지방정식에서의 생성항 S_T 는 열원과 냉각원에 의한 에너지 생성량을 나타낸다. 촉매층의 비가역적 전압손실에 의한 열발생을 모사하기 위해 다음과 같은 생성항을 추가로 사용하였고

$$S_T^a = I\eta_a, \quad S_T^c = I\eta_c \quad (3-37)$$

전해질막에서 발생하는 이온저항에 의한 열 발생은 다음 식을 사용하였다.

$$S_T^m = I\eta_m \quad (3-38)$$

4) 전해질막에서의 물 전달

연료극의 양이온이 전해질막을 통과하여 공기극으로 전달될 때 물 분자들 역시 같이 딸려가는 전기 삼투현상이 발생한다. 반대로 공기극에 상대적으로 많은 양의 물이 존재하면 확산으로 인하여 연료극으로 물이 전달되기도 한다. 따라서 전체적인 물의 전달은 역 확산에 의한 전달과 전기삼투압에 의한 전달의 차로 계산될 수 있다.

모델식을 간이화하기 위하여 물의 농도 구배는 연료극과 공기극사이의 막이 충분히 얇기 때문에 막을 사이에 두고 단일 스텝으로 선형적으로 변하는 것으로 하였다.

최종적으로 단위 양이온 전달량당 물전달량은 다음식으로 표시된다.

$$\alpha = n_d - FD_w(C_{w,c} - C_{w,a})/It_m \quad (3-39)$$

여기서 확산계수와 electro-osmotic 계수는 물의 활성계수로 결정되는 전해질의 물의 함유량에 의해 결정된다. 자세한 식은 Springer 등[19]에 의해 유도된 관계식을 사용하였다.

5) 전기화학 방전식

본 연구에서는 연료전지의 전압손실로 촉매층의 활성손실(activity over-potential) 전해질막의 저항손실(ohmic resistance) 그리고 공기극에서의 확산손실(Oxygen transport limited over-potential) 를 고려하였다. 주어진 전압과 전압손실식들은 다음과 같다.

$$V_C = V_{OC} - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} \quad (3-40)$$

$$\eta_{act} = RT/0.5F \ln(I/I^0 P_{O_2}) \quad (3-41)$$

$$\eta_{ohm} = t_m I / \sigma_m \quad (3-42)$$

$$\eta_{conc} = BT \ln(1 - I/I_{lim}) \quad (3-43)$$

농도 손실은 산소의 질량전달량과 관계된다. 질량전달량은 물질전달 계수(hm)에 영향을 받으며 산소의 전달량은 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{m}_{O_2} = h_m^{O_2} \rho_{mx} (X_{O_2}^* - X_{O_2}) \quad (3-44)$$

무차원 산소 물질전달 계수인 Sherwood number는 다음과 같이 계산된다.

$$Sh = h_m^{O_2} L / D_{O_2} \quad (3-45)$$

이 식을 이용하여 한계 전류(limit current) 밀도는 다음 식으로 주어진다[26].

$$I_L = 4FD_{O_2} c_{O_2}^* Sh / L \quad (3-46)$$

<표 3-4>가 소스항(Source term)을 포함하여 지배방정식을 정리한 것이다.

방정식에서, ε 는 다공체의 다공성을 나타내는 계수로 확산층에서는 0.4, 촉매층에서는 0.28 그리고 다른 영역에서는 1.0을 사용하였다.

<표 3-4> 지배 방정식 정리

Conversation equation	Source term			
	GDL	Anode Catalyst layer	Cathode Catalyst layer	MEM
Mass $\nabla \cdot (\varepsilon \rho \bar{u}) = S_m$	0	$S_{H_2} + S_{H_2O}^a$	$S_{O_2} + S_{H_2O}^c$	0
Momentum $\nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{u}) + S_u$	$-\mu \bar{u} / k_p$	$-\mu \bar{u} / k_p$	$-\mu \bar{u} / k_p$	0
H ₂ $\nabla \cdot (\varepsilon \rho m_{H_2} \bar{u}) = \nabla \cdot (D_{H_2}^{eff} \nabla \rho m_{H_2}) + S_{H_2}$	0	$-IM_{H_2O} A_{CV} / 2F$	0	0
O ₂ $\nabla \cdot (\varepsilon \rho m_{O_2} \bar{u}) = \nabla \cdot (D_{O_2}^{eff} \nabla \rho m_{O_2}) + S_{O_2}$	0	0	$-IM_{O_2} A_{CV} / 4F$	0
H ₂ O $\nabla \cdot (\varepsilon \rho m_{H_2O} \bar{u}) = \nabla \cdot (D_{H_2O}^{eff} \nabla \rho m_{O_2}) + S_{O_2}$	0	$-M_{H_2O} A_{CV} \alpha / F$	$(I + 2\alpha) M_{H_2O} A_{CV} / 2F$	0
Energy $\nabla \cdot (\varepsilon \rho c_p \bar{u} T) = \nabla \cdot (k^{eff} \nabla T) + S_T$	0	$I \eta_a$	$I \eta_c$	$I \eta_m$

<표 3-5> 경계 및 초기 조건 정리

Parameters	Symbol	Value	Parameters	Symbol	Value
Porosity in carbon paper and catalyst layer	ε	0.4, 0.28	Cathode channel height and width	h_c, w_c	0.3cm
Average current density	I_{avg}	0.15A.cm ⁻²	Relative humidity in air	ξ	63%RH
Ambient temperature, pressure	T_b, P	299K, 101325Pa	Membrane dry density	ρ_{dry}	1840kg.m ⁻³
Anode channel width, height	w_a, h_a	0.1cm	Membrane Dry equivalent weigh	M_{dry}	1100kg.kmol ⁻¹
H ₂ inlet temperature	$T_a,$	299K	Membrane thickness	t_m	0.0508cm
H ₂ flow rate in inlet	N_{H_2}	7.198E-08 kg/s	Thickness of Diffusion layer, catalyst layer	t_d, t_s	0.26cm,0.01cm
Permeability in GDL	k_p	1.8E-18 m ²	Oxygen/nitrogen ratio in air	ζ	0.21/0.79
Permeability in catalyst layer	k_p	1.76E-12 m ²	Cathode channel length	L_c	47mm

다. 계산 알고리즘

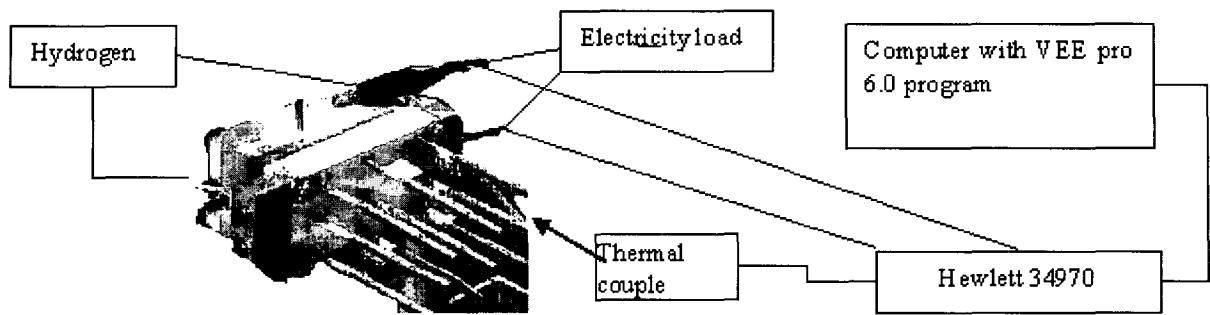
앞서 얻어진 지배방정식들은 전산 유동해석(Computational Fluid Dynamic) 프로그램인 STAR-CD V3.15A을 이용하여 유한체적(finite volume) 방법으로 해석하였다. 모든 계산 과정에서 LINUX 환경에서 MARS (monotone advection and reconstruction scheme)와 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 전극전해질접합체에서의 전기화학반응과 전해질에서의 물전달 현상은 사용코드에는 포함이 되어 있지 않으므로 FORTRAN으로 별도의 사용자 부 프로그램(user subroutine)을 작성하여 유동장 해석과 연계하여 동시에 계산하였다.

3. 실험

실험의 목적은 수치해석 결과의 정확성을 검증하기 위한 것이다. 연료전지의 특성은 IV(전류 전압)곡선으로 나타낼 수 있으며 공기호흡식 연료전지의 경우 온도가 가장 중요한 인자로 온도분포도 측정하였다. 연료극 분리판과 공기극 확산층에서의 온도를 측정하였다.

가. 실험 준비

[그림 3-38]에 공기 호흡식 연료전지의 구조와 온도측정위치를 표시하였다. 가스 공급을 위한 분리판은 stainless steel로 제작하였다. 체결을 위한 끝판(end plate)은 알루미늄 재질로 제작하였다. 분리판은 요철 구조로 되어 있어 가스 공급과 더불어 전기집전과 통로역할을 수행한다. 전극전해질과 분리판등에서의 접촉저항을 줄이기 위해서는 균일한 압축이 필요하며 이를 위해 끝판의 변형이 적게 일어나도록 상대적 두꺼운 15mm 정도의 끝판을 이용하였다. 단위전지 구성 후 내부 저항은 $47\text{ m}\Omega$ 정도였다. 열전대는 온도 측정을 위하여 공기극 끝판과 분리판에 구멍을 내어 삽입하였다. 단위전지의 활성면적은 34 cm^2 으로 전해질은 Nafion 112를 사용하였다. 백금 촉매는 단위면적(cm^2)당 0.3 mg 을 사용하였으며 가스확산층으로는 2차원 구조의 탄소종이(carbon paper)를 이용하였다. 공기극 분리판은 총 23개의 직선 채널로 구성하였으며 폭과 두께는 각각 3mm이다. 연료극은 사행채널로 구성되어 있으며 채널의 단면은 $1 * 1\text{ mm}$ 이다.



[그림 3-39] 단위전지 실험장치 구성

나. 측정 준비

실험은 수소 가스 공급장치, 전자부하 그리고 자료 측정과 제어를 위한 HP 34970A "Data Acquisition/Switch unit"를 이용하였다. 프로그램은 HP VEE pro 6.0을 이용하였으며 제어기로는 HP 노트북 컴퓨터를 사용하였다. 수소는 건조가스 상태로 공급되었으며 수소 출구는 막혀있는 상태로 운전되기 때문에 이용율은 거의 100%이다. 공기는 주변에서 자연대류에 의해 공기극으로 전달된다.

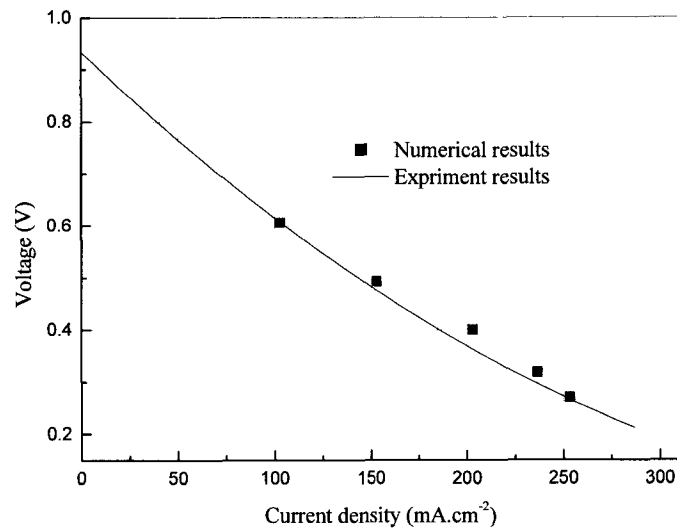
온도분포를 구하기 위하여 T형 열전대를 8개를 삽입하여 공기극 확산층에서의 온도를 측정하였다. 측정 시스템의 구성은 [그림 3-39]와 같다.

4. 결과 분석

가. 모델 검증

전류 밀도를 위하여 연료전지의 전압을 앞에서 주어진 모델식과 경계 조건을 이용하여 계산하였다. 습도 60% , 주변온도 27 °C의 운전조건에서 3mm의 공기극 채널을 갖는 단위전지를 해석하여 실험조건과 비교하였다. 실제 실험조건을 정확하게 제어하기 어려워 평균 습도 63%, 평균 주변온도 26°C조건에서 시험이 수행되었다. 부하에 따른 전압을 계산하여 실제 운전 결과와 비교하였으며 [그림 3-40]과 같이 일치된 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 모델식에 의한 성능이 실험값보다 높게 나오고 있는데 이것은 해석 조건이 실제 운전 조건과 달리 온도가 약간 높고 습도가 낮기 때문이다. 습도가 높아지면 고부하 영역에서 물에 의해 flooding 현상이 나타나 물질전달에 제한을 받게 되어 성능이 저하될 수 있다. 또한 수치 계산에는 부속 장비의 저항을 고려하지 않았기 때문으로 수치 해

석의 결과가 실험결과보다 높게 나타나게 된다. 일반적인 고분자 전해질 연료전지의 특성과 비교해 보면 예측한 바와 같이 공기의 공급이 충분하지 않아 산소 제한으로 인해 농도 손실의 효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

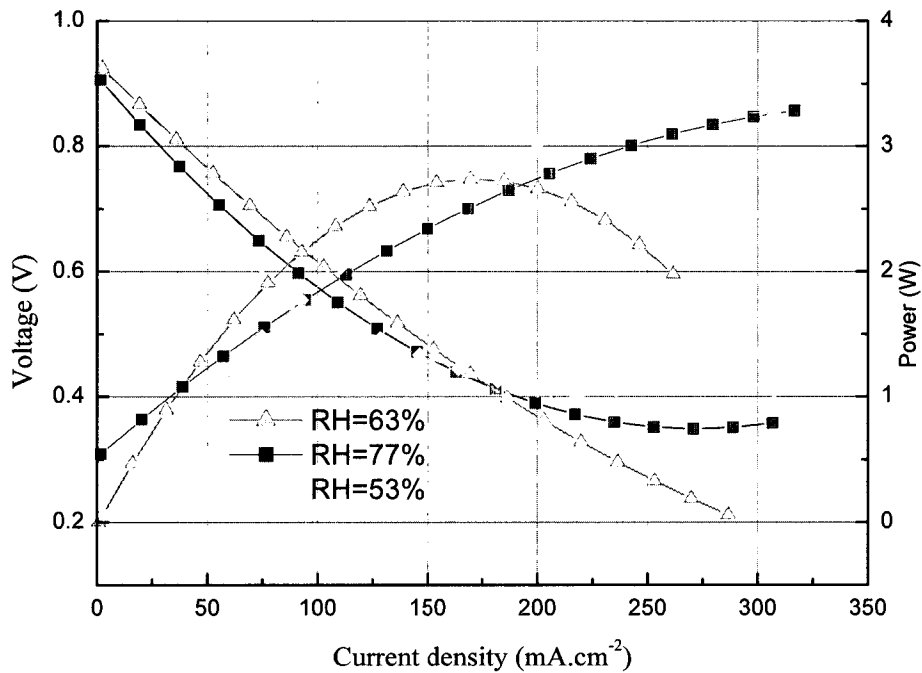


[그림 3-40] 수치해석결과와 실험결과 비교

나. 실험 결과 분석

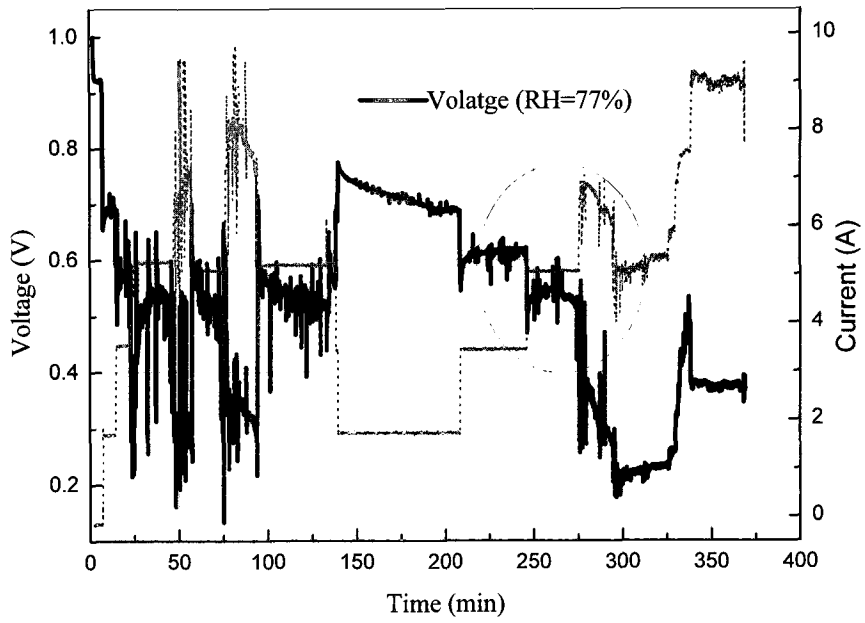
[그림 3-41]이 성능 측정결과를 나타낸 것이다. 전류밀도에 대한 전압과 출력곡선을 통해 주변 습도의 영향을 알 수 있다. 결과를 살펴보면 저부하 상태에서는 상대습도가 높을수록 좋은 성능을 보이고 고부하 상태에서는 상대습도가 낮을수록 좋은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상의 원인은 다음과 같이 설명할 수 있다. 즉 저부하 영역에서는 전해질막의 수분이 모자라 습도가 높은 상태의 공기를 사용할 경우 좋은 성능을 보이게 되며, 고부하 영역에서는 발생하는 수분이 증가하여 flooding 현상이 발생하기 때문에 상대습도가 적은 경우 좋은 성능을 가지게 되는 것이다. 즉 최적의 습도 조건은 flooding이 발생하지 않는 한도내에서 전해질막을 최대한 적셔 줄 수 있는 정도여야 한다. 즉 저부하에서는 상대습도가 63%인 경우가 53%경우보다 성능이 우수하나 부하가 증가하면 생성된 수분이 가스 투과층을 막아 성능이 오히려 감소한다. 63% 정도까지는 반응에 의해 생성된 물이 대부분 가스확산층에 존재하나 습도가 77%정도까지 올라가면

공극 채널과 가스확산층에서 응축된 물이 관찰된다. 초기에는 응축된 물이 작은 이슬처럼 존재하나 서서히 크기가 증가하여 가스 통로를 막게 되며 순간적으로 성능이 급격히 감소하게 된다. 그러나 응축된 물은 채널내에서 수막을 형성하며 수직으로 설치된 채널을 통해 중력방향으로 흘러내리게 된 후 다시 성능이 복원하게 되며 이런 현상이 지속적으로 반복된다. 결론적으로 고습도 운전에서는 응축된 물이 가스공급에 영향을 미쳐 성능을 저하시키는 원인이 된다.

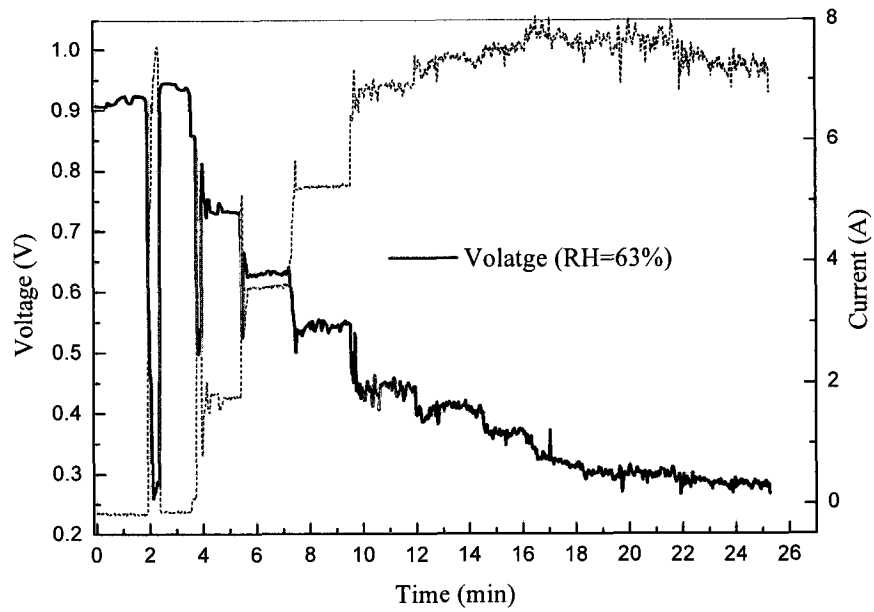


[그림 3-41] 습도에 따른 연료전지 성능 변화

따라서 높은 습도조건에서 운전될 경우 성능이 매우 불안정하며 이와 같은 현상은 [그림 3-42]와 같이 천이 실험을 통해 확인할 수 있다. [그림 3-42]에서 원형으로 표시한 영역에서 알 수 있듯이 채널내부에서 발생한 수분이 응축되면서 전압이 갑자기 감소하다가 다시 복구하는 것을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 현상은 [그림 3-43]과 같이 습도가 63%인 경우에는 관측되지 않고 있다. 그런데 물의 응축은 온도와 밀접한 관계를 갖고 있다. 이는 [그림 3-44]와 [그림 3-45]로부터 알 수 있다.



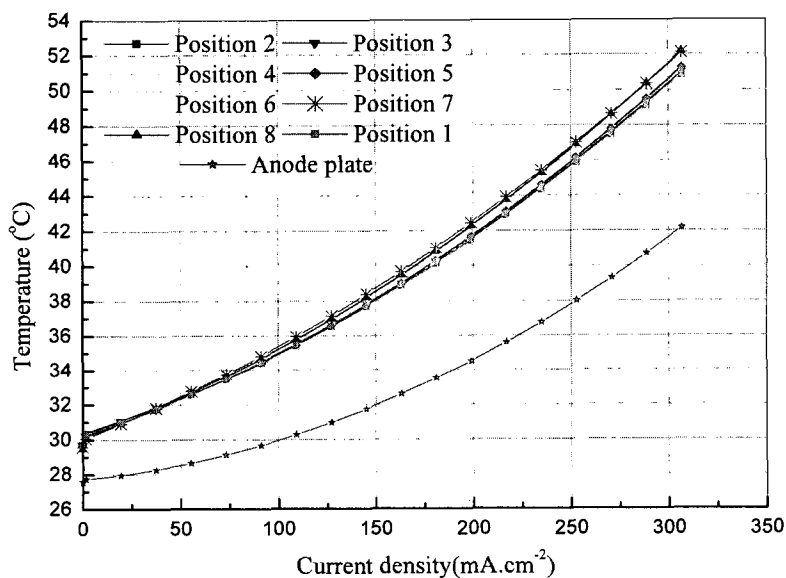
[그림 3-42] 습도가 77%인 경우 시간에 따른 전압과 전류의 천이 특성



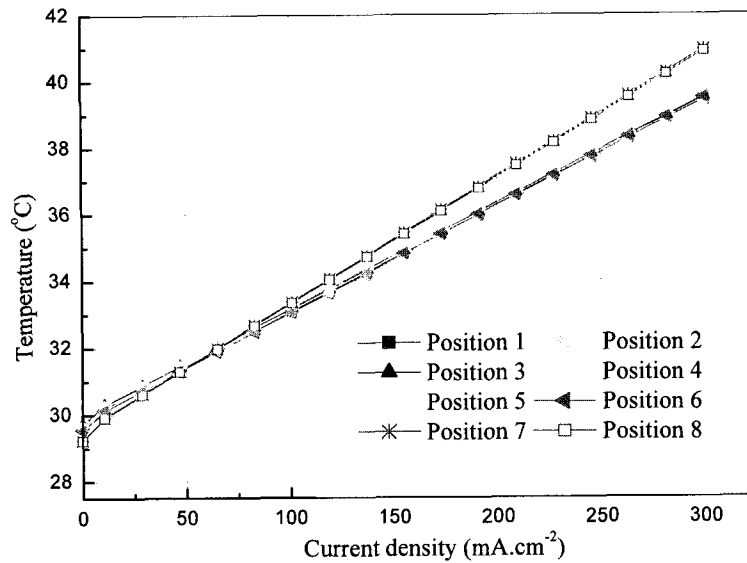
[그림 3-43] 습도가 63%인 경우 시간에 따른 전압과 전류의 천이 특성

[그림 3-44]와 [그림 3-45]를 비교하면 습도 77%에서 응축되는 물이 더 많은 잠열을 방출하기 때문에 같은 부하에서 온도가 높은 것을 알 수 있다. 자연대류에서는 온도차가 공기를 공급하는 원동력이기 때문에 온도차가 크면 공기대류가 향상되어 성능이 향상될 수 있다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 습도가 높은 경우 물의 응축에 의해 성능이 상당히 불안정하다.

[그림 3-44]과 [그림 3-45]의 온도 실험결과에서 가장 높은 온도점이 하부의 외곽 지역인 7, 8번에서 관측되는데 이것은 이 부분에서 공기공급량이 높고 상대적으로 산소 농도가 높아져서 전류발생량이 많아지므로 반응열이 높아지기 때문이다. 또한 양옆 부분에 수소 공급과 배출구가 위치하고 있어 입구에서는 수소농도가 높고 출구부분에는 수소의 습도가 높아서 성능이 높게 나타날 수 있다.



[그림 3-44] 습도 77% 온도 26 °C에서 부하에 따른 온도분포

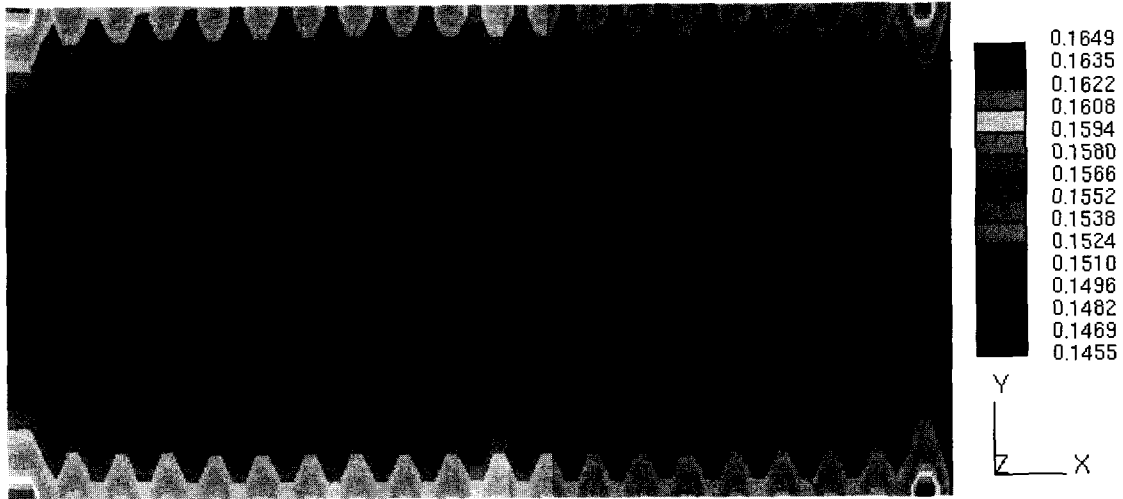


[그림 3-45] 습도 63% 온도 26 °C에서 부하에 따른 온도분포

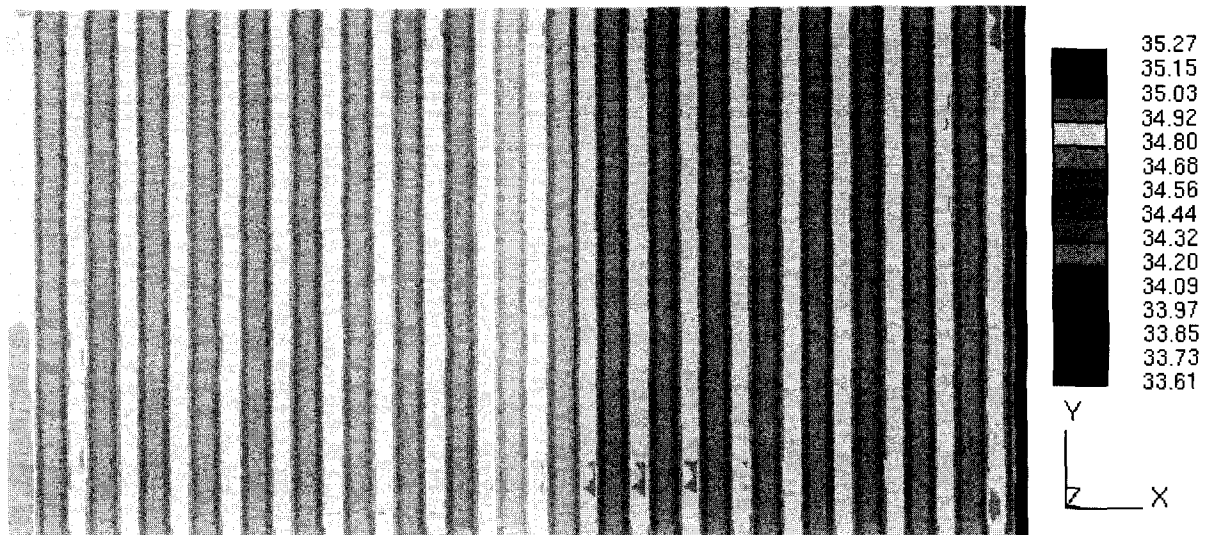
다. 계산 결과 분석

[그림 3-46]는 전류 밀도 분포를 나타낸 것이다. [그림 3-44]의 온도 측정 결과와 비교해서 살펴보면 앞에서 설명한 바와 같이 전류 전류밀도가 높은 영역에서 온도도 높게 나타나는 것을 관측할 수 있다. [그림 3-47]은 공기극 확산층에서의 온도분포를 계산한 것으로 실험결과와 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 가장 높은 온도는 공기극 채널 하부의 좌측과 우측부분에서 나타나는 것을 알 수 있다. [그림 3-48]은 계산된 한계 전류 밀도이다. 공기의 입·출구 부분과 수소의 입·출구부분에서 가스의 분압이 높고 습도에 의해 성능이 높게 나타난다. 가장 낮은 한계 전류 밀도는 281mA/cm²이다. 이것은 특정부위에서 산소공급의 문제에 의해 이것 이상으로는 연료전지가 작동될 수 없다는 것을 의미한다. [그림 3-49]는 공기극 촉매층에서의 산소 몰분율을 나타내고 있다. 자연대류에 의한 낮은 공기공급과 촉매층에서의 산소 소모로 인해 주변과 채널보다는 농도가 낮게 나타난다. 상대적으로 가운데 보다는 외곽 채널에서 자연대류효과가 커서 산소분율이 크게 나타나고 있다. [그림 3-50]은 공기극 채널에서의 속도 분포이다. 마찬가지로 수소 입출구 부분에서 속도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 공기의 공급량은 6.818E-7 kg/s로 산소로 환산하면 1.568E-7 kg/s 정도가 촉매층으로 전달된다. 평균 전류 밀도 150mA/cm²를

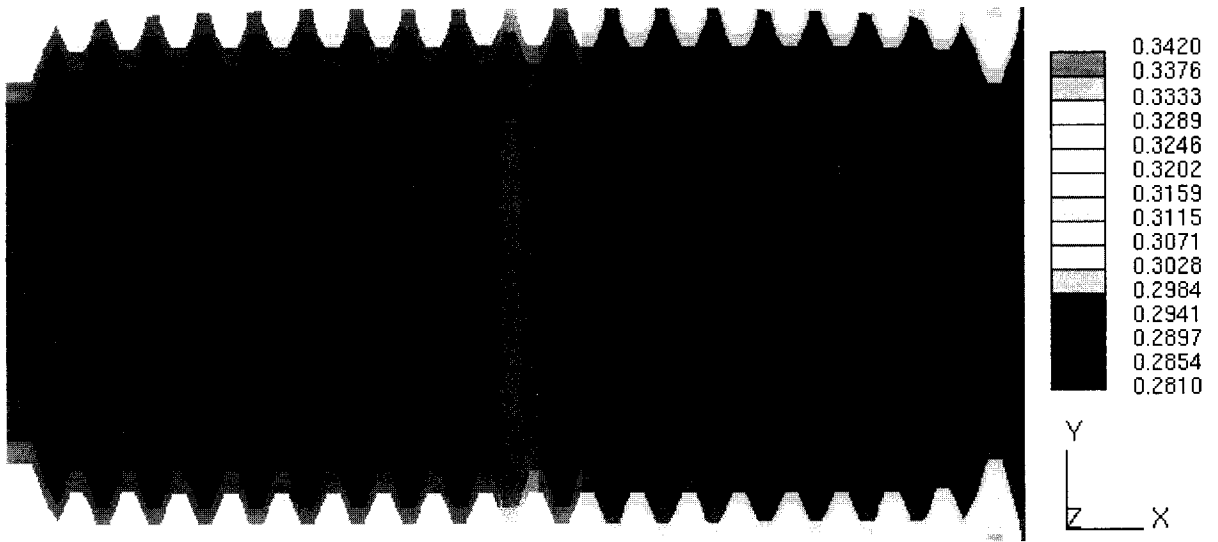
위해서는 산소 소모량이 $5.7E-7$ kg/s이 되어야 하는데 자연대류에 의해 충분한 양의 공기가 공급되지 않기 때문에 [그림 3-51]에서 알 수 있는 바와 같이 $150\text{mA}/\text{cm}^2$ 농도 손실이 발생하는 것을 알 수 있다. 일반적인 강제 대류식 연료전지 보다는 낮은 부하 영역에서 손실전압이 나타나는 것을 알 수 있다.



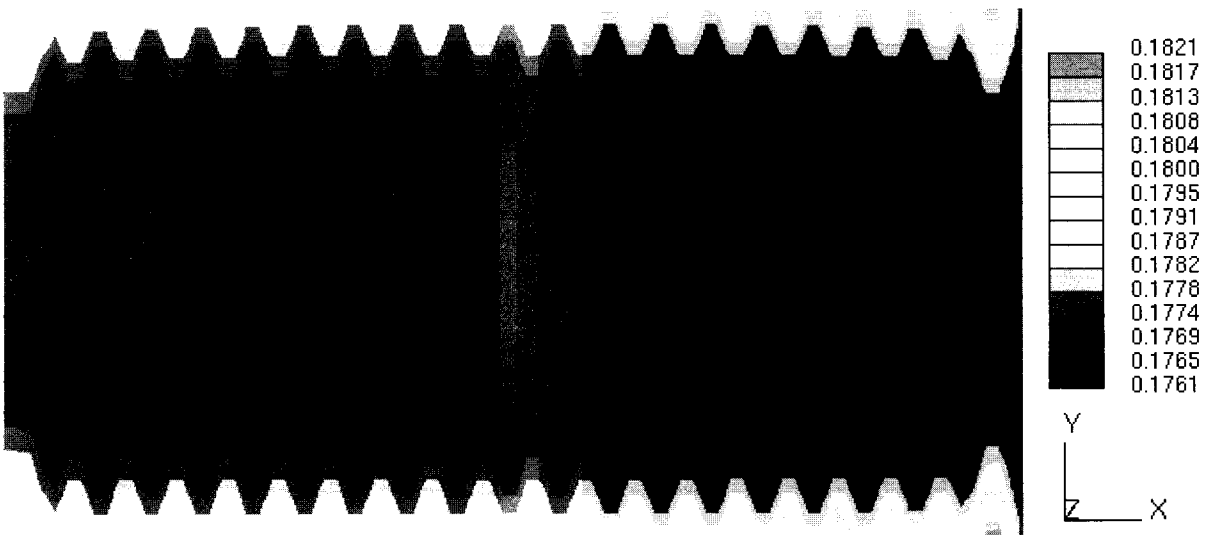
[그림 3-46] 공기극 촉매층에서의 전류 밀도 분포



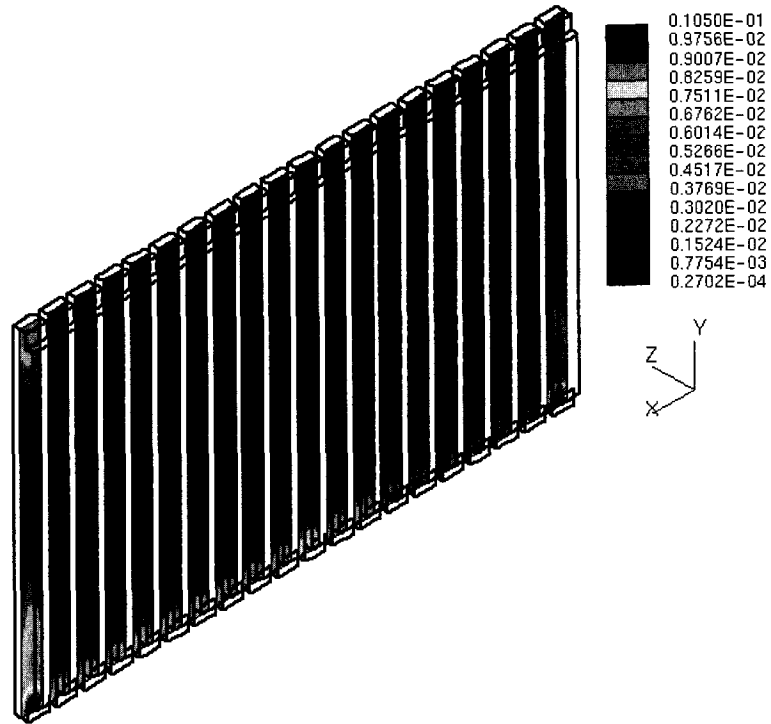
[그림 3-47] 공기극 채널과 접한 가스 확산층에서의 온도분포(°C)



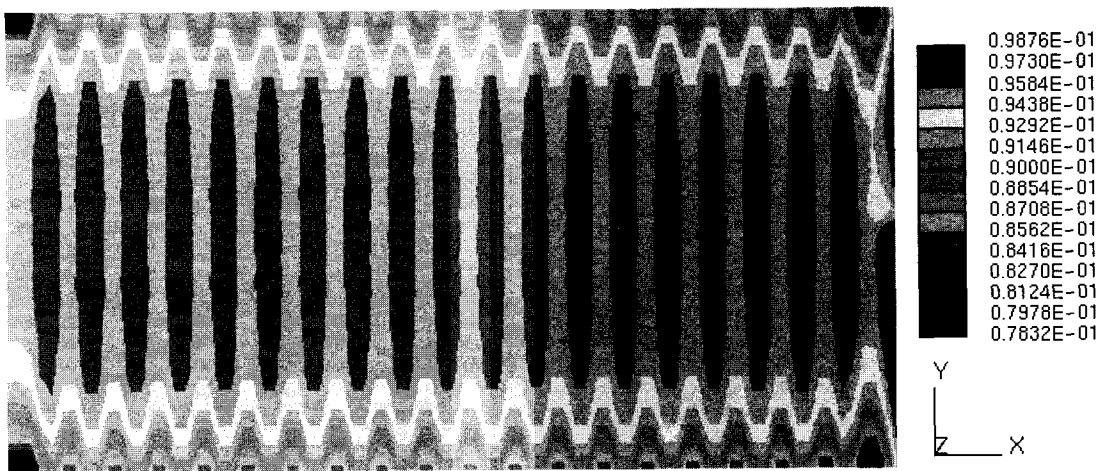
[그림 3-48] 촉매층에서의 한계 전류 분포(mA/cm²)



[그림 3-49] 촉매층에서의 산소의 물분율



[그림 3-50] 공기극 채널에서의 속도 분포



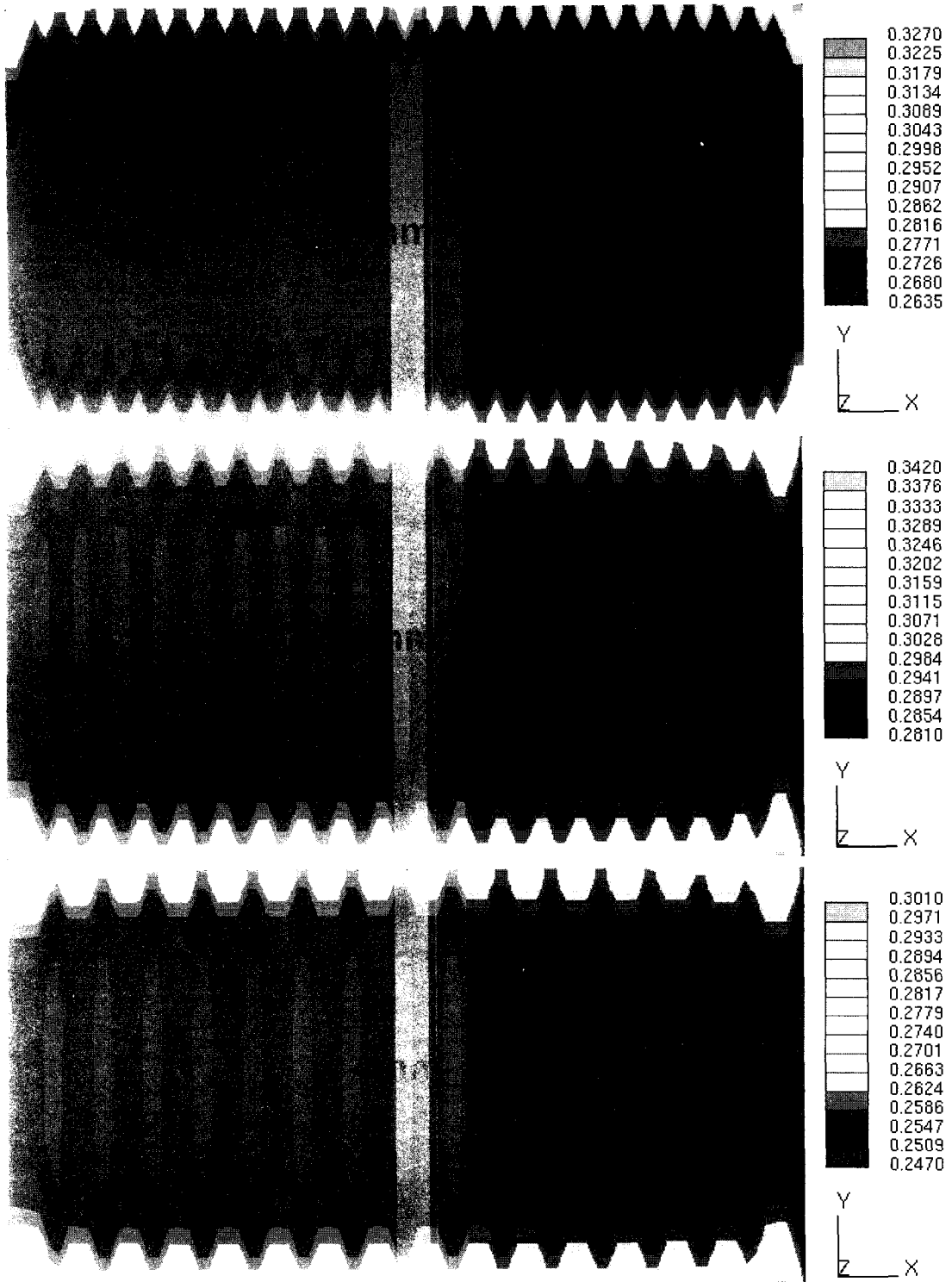
[그림 3-51] 산소 공급 제한으로 인한 농도 손실 분포(Voltage)

라. 채널 구조 영향

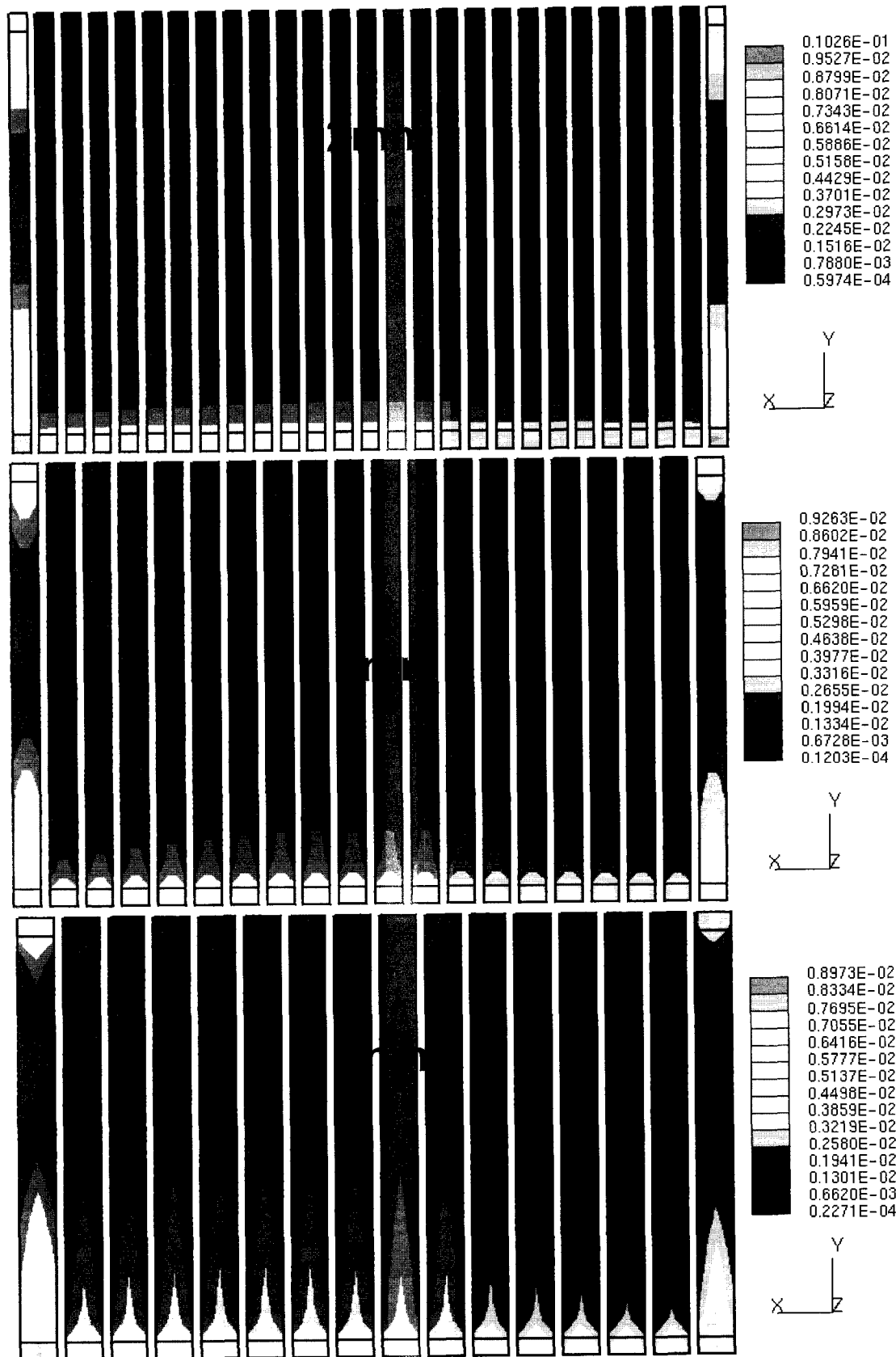
앞에서 정리한 모델식과 경계조건을 이용하여 채널폭이 2mm, 3mm, 그리고 4mm인 단위전지에 대한 해석을 수행하였다. 각각의 채널에 대한 채널과 리브(Rib)에 대한 비는 각각 67.5%, 75.9%, 80%이며 리브의 비율은 각각 0.48, 0.31, 그리고 0.25 이다. 공기극의 채널 크기에 대한 효과를 분석하기 위하여 연료극의 크기는 고정하였다. 공기극 채널의 깊이는 3mm이고 채널 방향 길이는 49mm이다. 전전극의 활성면적은 34cm^2 이다. 평균 전류밀도 $150\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서의 결과를 위주로 채널 크기가 물질 전달과, 물거동, 그리고 공기호흡형 연료전지 성능에 미치는 효과를 분석하였다.

1) 물질 전달 영향

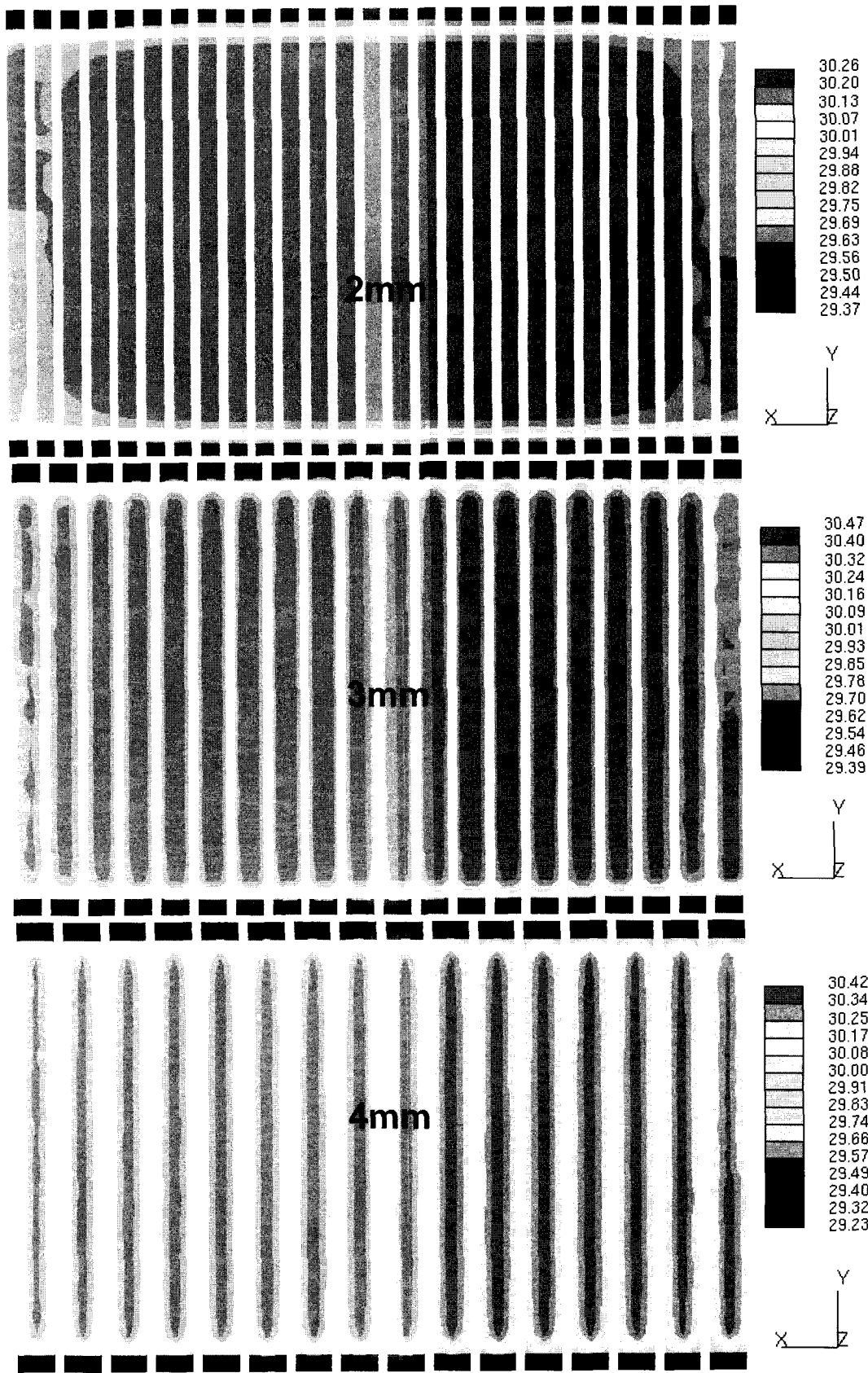
[그림 3-52]는 3가지 채널에 따른 한계 전류 밀도를 나타내고 있는데, 채널 폭이 3mm 일 때 한계 허용 전류가 가장 높은 값으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 3mm 채널폭에서 산소 전달이 가장 우수한 것을 나타내는 것으로 다음과 같이 설명될 수 있다. 채널 입구로 공기가 유입되면 초기에는 경계층이 충분히 발달하지 않으며 이에 따라 속도와 온도에 변동이 심하게 일어나서 열전달과 물질전달이 향상될 수 있다. 채널 폭이 작을수록 입구 효과도 작아져서 작은 거리에서 경계층이 확립된다. 따라서 어느 정도 폭이 넓은 것이 입구 효과가 길어져 열 및 물질전달에 유리하다. 그러나 폭이 너무 넓은 경우에는 경계층이 벽면에 한정되어 중간 부분까지 영향을 미치지 못해 자연대류에 영향을 미치지 못할 수가 있다. 이것은 [그림 3-53], [그림 3-54]의 속도와 온도 분포에서 확인할 수 있다. 4mm 채널이 경계층이 확립될 때까지의 거리가 가장 긴 것을 알 수 있다. 2mm 채널에서는 양면에서 독립된 경계층이 관측되지 않고 있으며 이것은 2면의 경계층이 중첩되기 때문으로 열전달과 물질전달이 채널 전영역에서 높게 나타날 수 있다. 또한 상대적으로 리브의 비율이 높아 벽에서의 높은 열전달을 기대할 수 있다. 가장자리 영역에서의 높은 열전달은 손실을 동반하기 때문에 온도분포에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다. 반면에 4mm 채널의 경우에는 벽면을 중심으로 2개의 구분되는 경계층을 확인할 수 있으며 경계층영역의 외부 영역인 채널 중간 부분까지 충분히 온도를 상승 시킬 수가 없다. [그림 3-55]가 3가지 다른 채널 크기에서의 촉매층의 온도분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 3mm 채널 연료전지에서 가장 높은 온도 분포를 보이고 있다.



[그림 3-52] 폭이 다른 채널에서 한계 전류 밀도 비교



[그림 3-53] 채널 크기에 따른 속도 분포

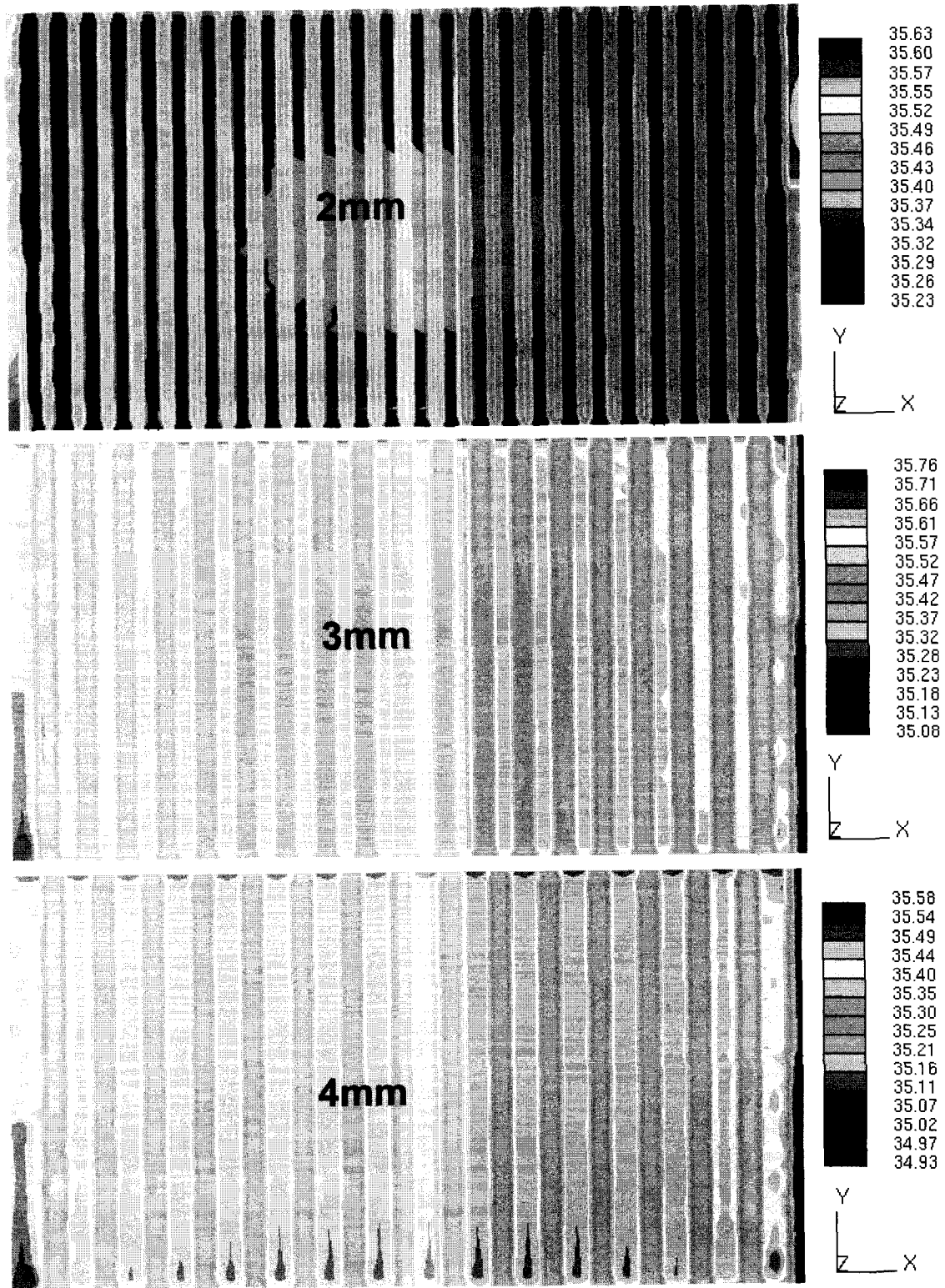


[그림 3-54] 채널크기에 따른 온도 분포

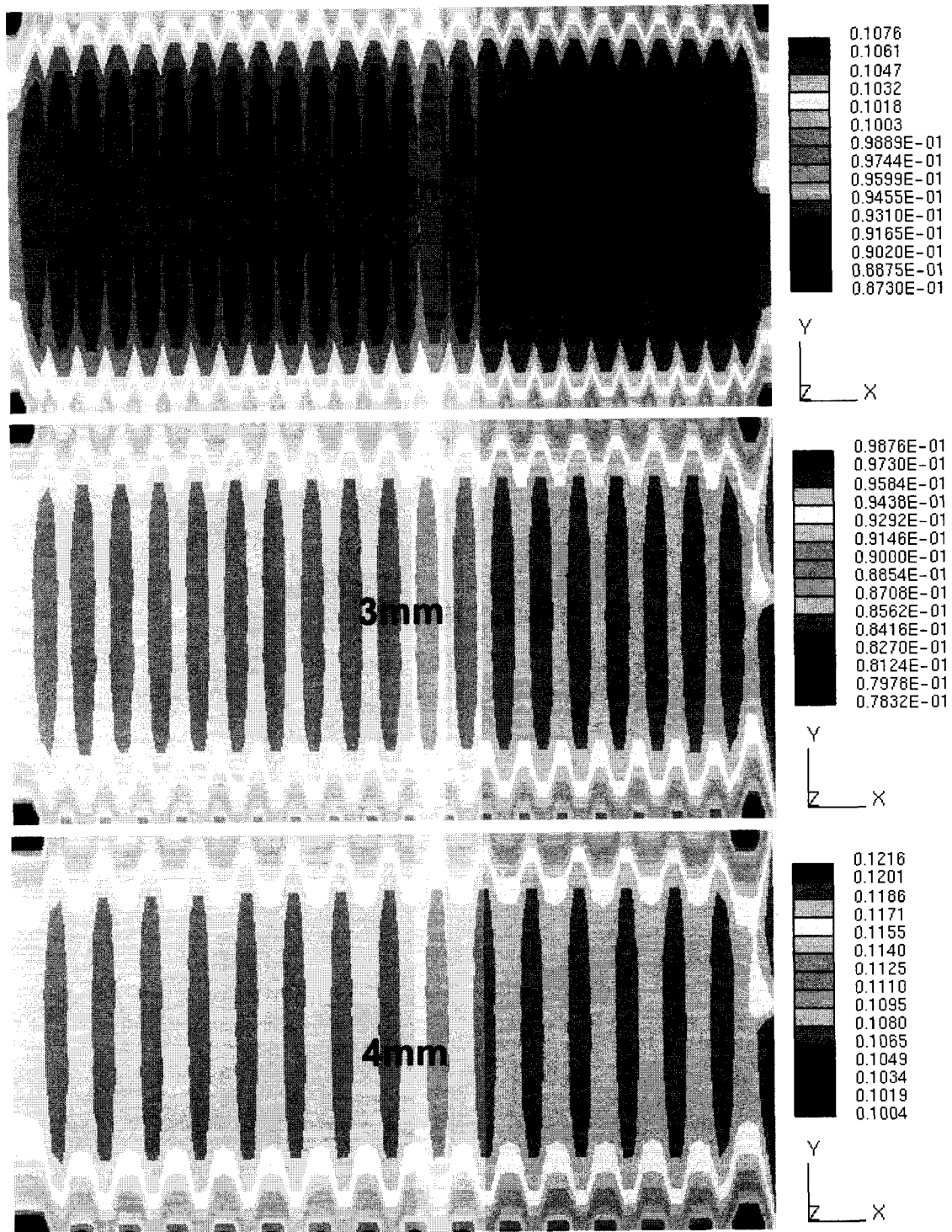
채널내부까지 충분히 가열되지 않은 관계로 자연대류가 활발하게 일어나지 않고, 이에 따라 산소 공급이 충분치 않아서 가장 높은 농도손실 전압이 4mm 채널 연료전지에서 나타난다. 3mm 채널의 연료전지에서 가장 높은 산소 전달효과가 나타난다. 또한 수소 입출구 영역에서 높은 성능을 관측할 수 있는데 이것은 입구에서는 수소 농도가 높고 출구에서는 물의 습도가 충분하기 때문에 반응이 높아지기 때문이다. 공기극 채널 입구부에서도 산소 농도가 높아 물질전달과 반응이 활발하며 일어나며 이에 따라 상대적으로 높은 온도가 관측된다.

2) 전해질에서의 물 거동

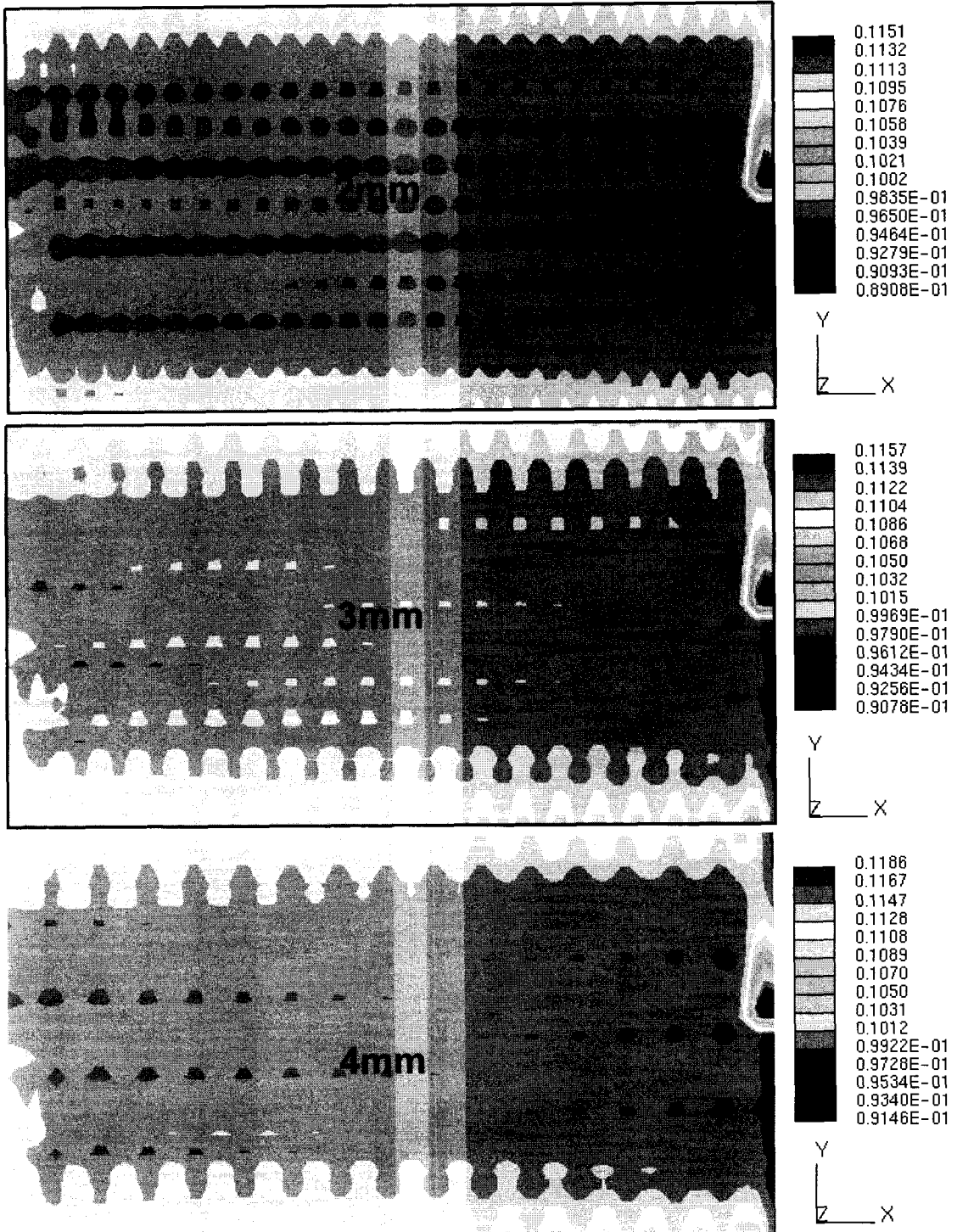
공기호흡식 연료전지에서는 수소는 가습하지 않고 건조한 상태로 공급하기 때문에 반응에 필요한 물은 공기극에서 반응에 의해 생성된 물이 역확산으로 넘어가는 것 밖에 없다. 따라서 역확산 되는 물이 충분하지 않은 경우 연료극측의 전해질이 건조될 수 있으며 이 경우 낮은 수소이온 전달성에 의해 전해질 막에서 저항손실 증가할 수 있다. [그림 3-57]이 연료극 촉매층에서의 물분포를 나타내고 있다. 공기극에서 연료극으로의 역확산은 전류 밀도와 양극사이의 물 농도차이에 좌우된다. 전류 밀도가 높은 공기 입구 출구 영역은 많은 양의 수분이 전기 삼투압에 의해 연료극에서 공기극으로 이동하기 때문에 연료극의 수분비율이 낮게 나타난다. 전류밀도가 낮은 중간영역에서는 상대적으로 역확산량이 커서 연료극 촉매층에서의 수분량이 높게 나타난다.



[그림 3-55] 공기극 촉매층에서의 온도 분포



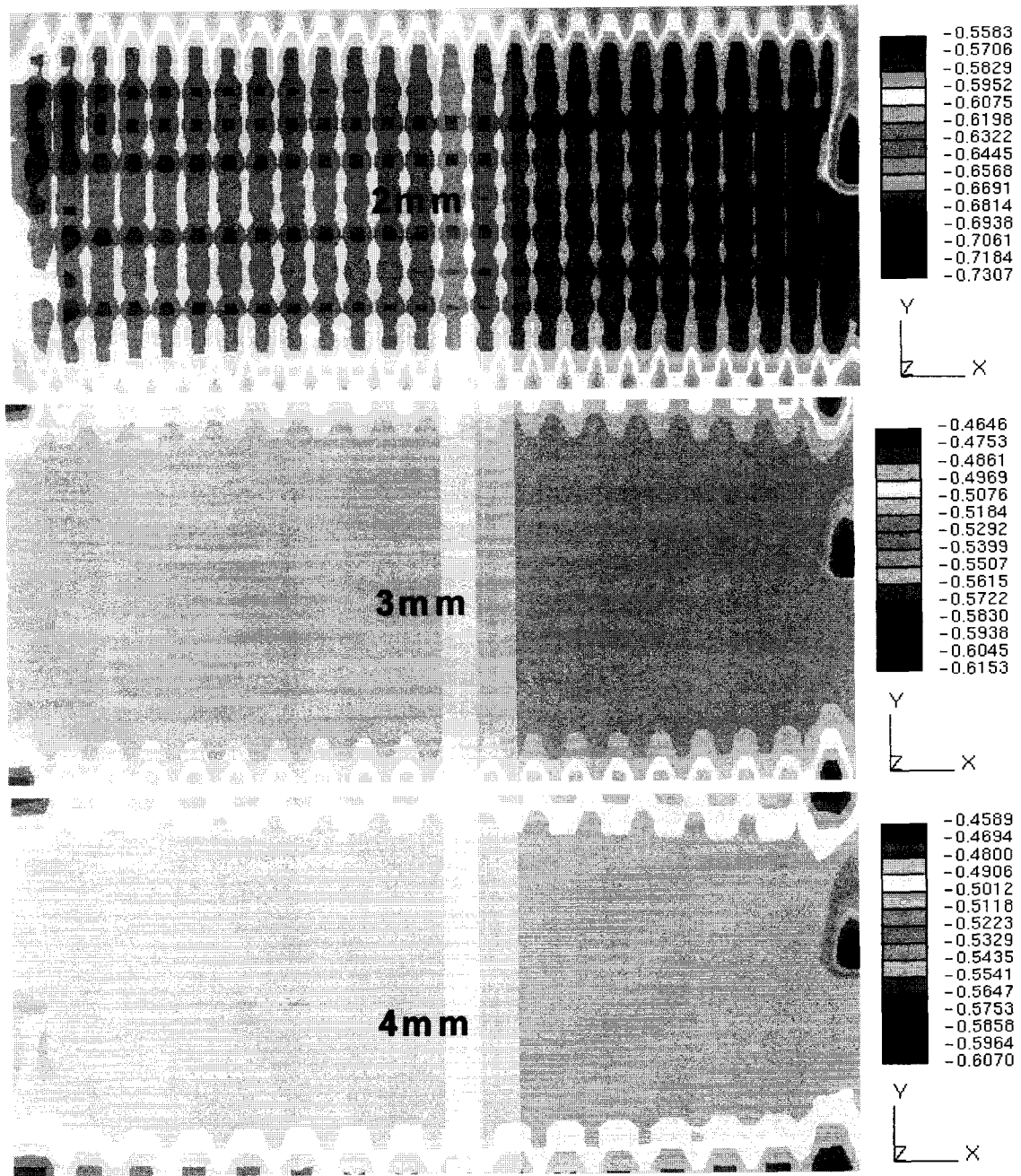
[그림 3-56] 농도손실 전압 분포



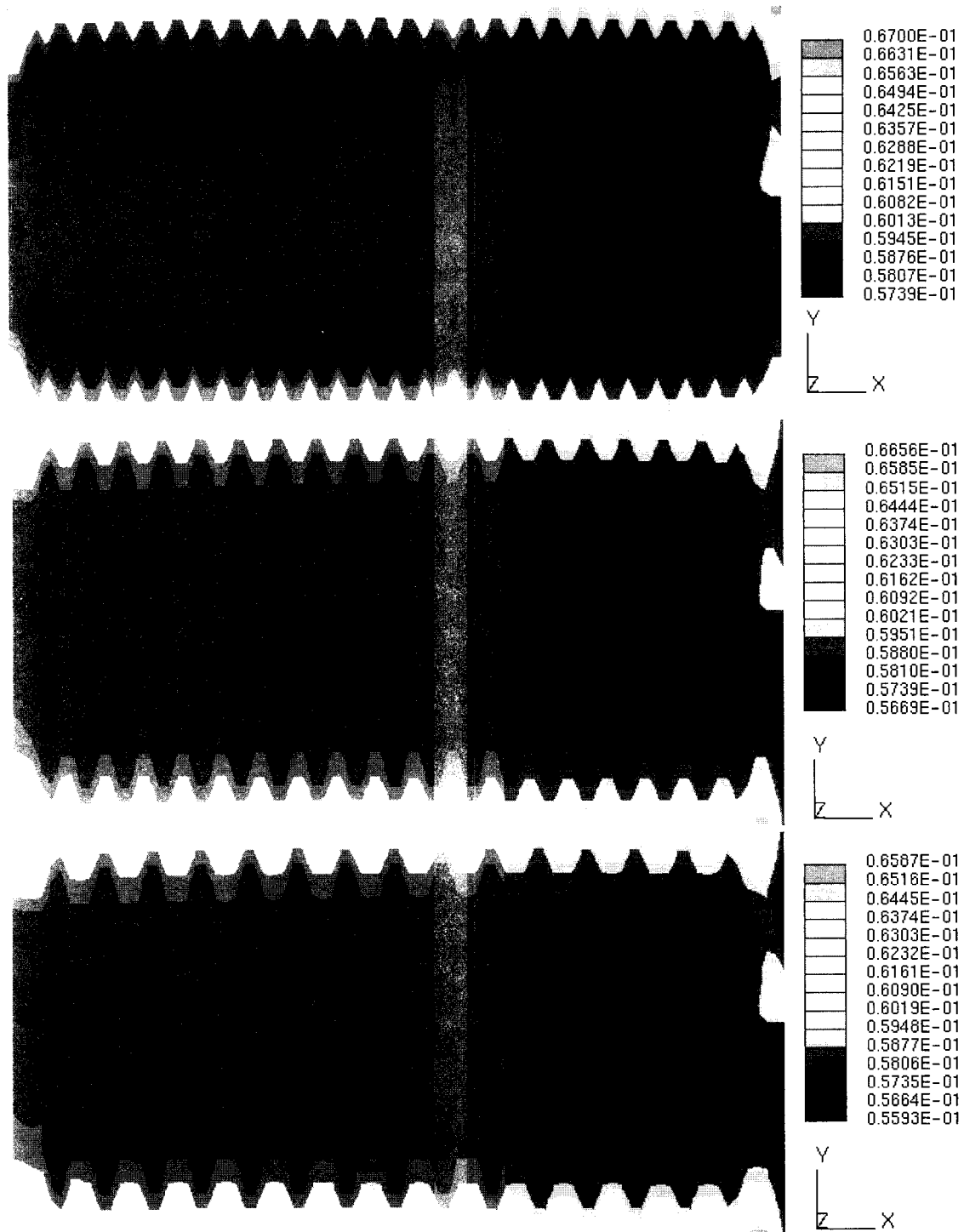
[그림3-57] 연료극 촉매층에서의 수분 분포

수소 입구부분에서는 건조한 순수수소가 공급되기 때문에 물의 농도가 낮게 나타난다. 또한 전해질막에서의 물거동은 분리판의 유동장 설계에 영향을 받는다. 채널이 넓어질수록 물의 전달이 용이하게 이루어질 수 있어 4mm 채널의 경우 수소측의 수분함유량이 높아진다. [그림 3-58]이 양이온 유속 당 물의 순전달량을 나타내고 있다. 고부하 영역에서는 양이온의 전달에 수반되는 전기삼투압에 의한 물 전달이 지배적이며, 그 밖의 운전 영역에서는 역확산이 지배적이다. 유동장 설계가 변하면 물 거동 특성도 변하게 된다.

[그림 3-59]는 3가지 경우에 대한 전해질막 저항에 의한 전압손실을 나타내고 있다. 채널 폭이 넓어질수록 전해질막의 수분함유량이 높아 막전극 저항이 감소한다. 공기극의 경우 채널과 리브 영역을 비교하면 채널 영역이 반응이 더 잘 일어나므로 물의 함유량이 높아져서 수분이 포함되어 있지 않는 연료극으로 더 많은 물을 전달 시킬 수 있기 때문이다. 따라서 리브보다 채널 영역이 넓은 것이 물 생성과 전달에는 효과적이며 이를 통해 연료극 쪽에 충분한 수분을 공급할 수 있다.



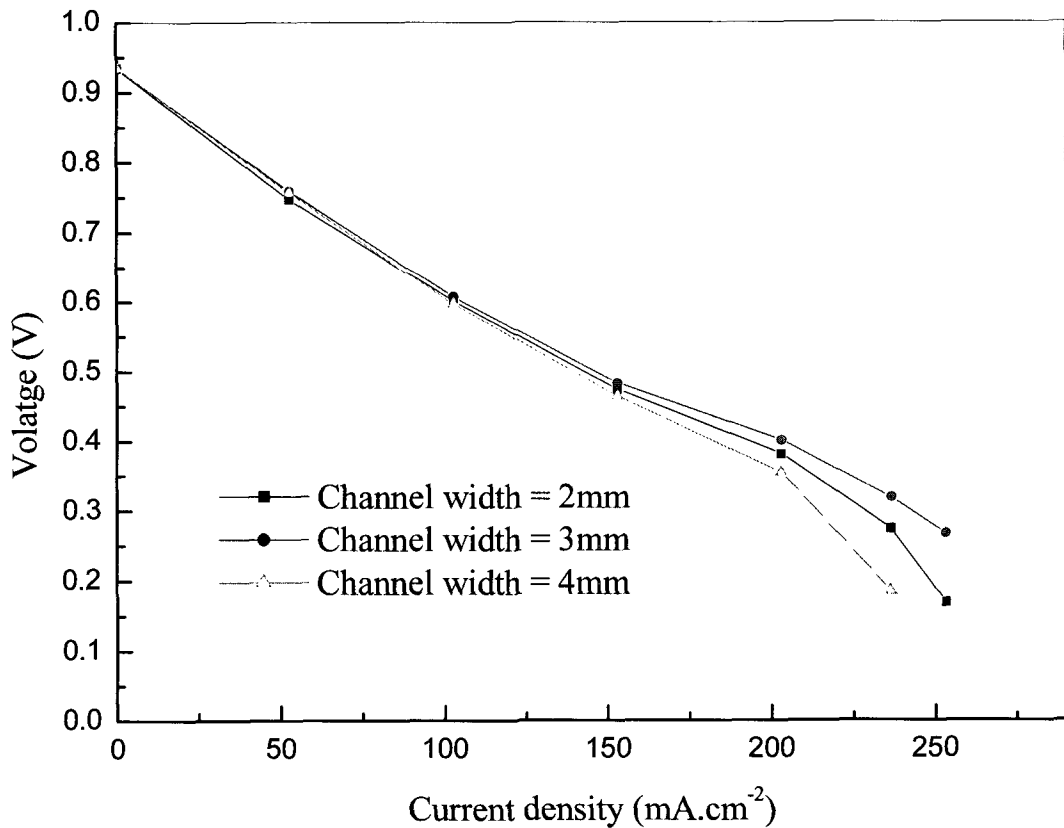
[그림 3-58] 전해질막을 통한 물전달량



[그림 3-59] 전해질막에서의 저항 손실

3) 연료전지 성능

[그림 3-60]이 3가지 채널 크기에 따른 IV 특성 곡선이다. 전압은 서로 다른 전류밀도 상태에서 계산되었다. 3가지 경우 중 채널 폭이 3mm인 경우에 성능이 가장 우수하였다. 채널 폭에 따른 성능 차이는 앞에서 설명한 산소 공급과 물 거동에 영향을 받으며 공기 호흡식 연료전지에서 최적화는 결국 산소공급이 원활히 이루어지고 전해질 막을 통한 물의 수급이 원활히 일어날 수 있는 채널의 구조를 설계하는 것이다. 채널설계를 위한 본 연구에서는 운전 조건으로 상대습도 60%를 고려하였으며 이보다 습도가 높은 경우에는 응축수의 효과를 고려해 주어야 한다. 또한 실제 단위전지의 경우 분리판, 가스 확산층 등에서 전기적인 접촉 저항 등에 의한 성능저하 요인이 있으나 본 연구에서는 고려하지 않는다. 그러나 실제 연료전지의 경우 이러한 요인 들이 성능에 영향을 미치므로 저항 손실을 고려할 필요가 있으며, 특히 리브의 폭이 작아 전극전해질접합체와 분리판 리브 사이에 접촉저항이 커질 가능성이 높은 경우에는 접촉저항 성분을 고려해 주어야 한다.



[그림 3-60] 채널폭에 따른 공기호흡식 연료전지의 성능변화

5. 결론

공기호흡형 연료전지를 해석하기 위한 포괄적인 3차원 해석 프로그램을 개발하였으며 실험으로 검증하였다. 해석을 위한 모델식은 열 및 물질전달, 유동, 전기화학 반응 등을 포함한다. 실험장치를 통하여 온도 분포와 I-V 특성을 측정하여 해석 결과와 비교하였다. 실험은 주변 습도가 다른 상태에서 수행되었으며 수치 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치 하고 있다. 수치 해석을 통해 속도분포, 농도분포, 온도분포, 전류 밀도, 전압손실 분포 등을 계산할 수 있었다. 컴퓨터 해석을 통해 자연대류와 전기화학 반응이 서로 연계되는 공기 호흡식 연료전지의 특성을 계산할 수 있었으며 이를 통해 전지 성능은 물론 내부에서 일어나는 전달 현상과 유동 등에 대한 이해를 높일 수 있었다. 채널폭이 좁은 경우 채널내에서 유동이 충분히 확립될 수 없으며 기체영역에서의 열전달율이 감소하게 되어 자연대류가 강하게발생하지 못하였다. 반면에 채널폭이 너무 큰 경우에는 온도 경계 층이 채널 내부까지 확장되지 못해 채널 내부의 공기층으로 충분히 열이 전달되지 않아 자연대류가 약해지게 된다. 본 연구에서는 2mm, 3mm, 4mm 폭을 가지는 채널을 해석하여 3mm에서 가장 우수한 성능을 얻을 수 있었다. 물 이동측면에서 채널이 넓은 경우에는 공기극에서 생성된 수분이 연료극으로 손쉽게 역확산되어 전해질막의 이온전도도를 증가시켜 주는 긍정적인 효과가 있었다. 그러나 전극전해질 접합체와 분리판 리브사이의 접촉저항 측면에서는 접촉면적이 줄어 성능이 감소할 따라서 충분한 수분으로 인해 양 이온 전달 저항이 감소하여 향상된 성능이 상대적으로 좁아진 리브 면적으로 인해 접촉 저항이 증가하여 전체적으로는 성능이 감소할 가능성이 높아진다. 따라서 공기 호흡식 연료전지에 있어서 최적 설계를 위해서는 채널과 촉매층에서의 높은 물질전달, 전해질막에서의 적절한 수분상태 그리고 낮은 접촉저항을 위한 절충이 필요하다. 본 연구에서 정립한 모델식과 수치 해석 방식은 공기 호흡식 연료전지의 최적화를 위한 도구로 사용될 수 있을 것이다.

제 3 절 분리판 구조해석

1. 구조 해석 필요성

연료전지 분리판은 전극전해질접합체(MEA)의 양쪽에 위치하여 분리판에 가공되어 있는 유동 채널을 통해 반응에 필요한 가스를 공급해 주고 전류와 열을 전달하는 역할을 한다. 연료전지 스택은 복수의 단위전지들이 직렬로 연결되어 있는 분리판과 가스확산층, 전극전해질접합체 사이에 전기적 저항이 적어야 하므로 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 압축력을 가하여 체결하게 된다. 따라서 분리판은 압축력에 견딜 수 있도록 강도와 두께를 갖춰야 하며 동시에 스택 내부 구성체의 변형이 유동에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 분석이 필요하다. 본 절에서는 스택의 부피와 무게의 최소화를 위하여 1)동일한 하중조건에서의 구조해석을 통한 최적화를 수행하였으며, 동시에 구조변형이 유동에 미치는 효과를 분석, 설계에 반영하기 위하여 2)스택체결에 따른 전극전해질과 확산층의 변형과 이에 따른 유로 압력차의 변화를 계산하였다.

2. 연료전지 분리판의 최적화

연료전지 분리판은 전극전해질접합체(MEA)의 양쪽에 위치하여 판에 가공되어 있는 유동 채널을 통해 반응에 필요한 가스를 공급해 주고 전류와 열을 전달하는 역할을 한다. 연료전지본체는 복수의 단위전지들이 직렬로 연결되어 있는 분리판과 가스확산층, 전극전해질접합체 사이에 전기적 저항이 적어야 하므로 압축력을 가하여 체결되어 있다. 분리판은 연료전지 스택 부피의 대부분을 차지하고 중량의 약 80%를 차지하므로, 성능 향상과 더불어 분리판의 무게와 부피를 최소화시키는 것이 스택의 동력 밀도를 높일 수 있는 방법이 된다. 최적화 된 분리판은 낮은 가격, 비투과성, 고전도성, 화학적 안정성, 경량 및 제조 용이성 등의 특징을 가져야 하지만, 그것은 구조, 유동, 전기, 화학 등 많은 분야에 관련되어 모든 성능 조건을 만족시키는 최적의 분리판을 얻는 것은 쉽지 않다. 구조와 유동의 측면에서 보면 분리판은 강도가 충분함과 동시에 가볍고 얇아야 하며, 유로의 깊이와 폭은 기체의 유동을 원활하게 하고 공기판에서 물을 제거하는데 매우 중요하다. 본 연구에서는 활성면적이 300cm^2 인 분리판의 두께 및 공기판의 유로의 너비와 깊이에 대해 최적화를 수행하였다. 분리판의 두께는 구조해석에만 관련된 설계변수로서 유동해석과는 독립적이므로 최적화 계산시간의 단축을 위하여 다단계 최적 방법을 적용하였다. 1단계에서는 채널의 크기를 고정시킨 후 구조 최적화 프로그램을 작성하여 분리판의 두께를 최적화시켰으며 2단계에서는 1단계에서 최적화된 분리판의 두께를 고정시킨 후 구조해석

과 유동해석에 관련된 최적화 프로그램을 작성하여 채널의 크기에 대한 최적화를 수행하였다.

본 연구에서는 비도함수 알고리즘의 특성을 가지면서 불연속 설계변수에 적용이 가능하고 준전역성을 가지며 반복해석의 수를 줄일 수 있는 크리깅(kriging)과 반응표면법(RSM)을 이용한 최적화 프로그램을 작성하여 실제 제작되어 실험중인 활성면적이 300cm²인 고분자전해질형연료전지(PEFC)의 단위전지에 대한 다단계 최적설계(multilevel optimization)를 수행하고 도함수 방법인 변형유용방향탐색법(MFD)에 의한 최적화 결과와 비교 분석하였다. 이를 통하여 복잡한 비선형 문제에 대하여 크리깅과 반응표면법을 이용한 근사 최적화 방법의 실제 적용 가능성을 확인하였다.

가. 크리깅 모델

크리깅 모델은 기본적으로 실험점들에서의 오차가 서로 독립적이지 않고 서로 연관성을 가진다는 가정 하에서 시작된다. 만약, 최소 자승법에 의한 회귀모델을 생성하였을 경우 추정값 \hat{y} 가 실제값 사이에 큰 오차가 있다면 그 추정값에서 매우 가까운 지점에서의 추정값 또한 실제값 y 와 큰 오차를 가질 것이란 사실을 예상할 수 있을 것이다. 이것은 최소자승법에 의한 회귀모델 \hat{y} 가 통계적인 오차를 가지기 때문이다. 크리깅 모델에서는 확정론적인 응답을 회귀모델을 포함하는 임의 모델의 구현으로 처리하고 있다.

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (3-47)$$

$y(x)$ 는 우리가 알고자 하는 함수이며, $f(x)$ 는 주어진 실험 데이터를 이용해서 얻어낼 수 있는 전체 설계 영역에서의 전역모델(global model)로 반응표면모델과 유사한 다항함수(polynomial function)로 표현, 많은 경우에 상수항으로 처리하고 있다. $Z(x)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규 분포를 따르며, 각 데이터 점들을 $Z(x)$ 보간 할 수 있도록 국소적인 변동을 만들어내는 부분으로 응답모델의 불확실성을 나타내준다. 이를 통하여 n 개의 실험점을 적절하게 보간해 줄 수 있는 것이다. 식 (3-48)은 $Z(x)$ 의 공분산(covariance)을 나타내는 식이다.

$$Cov[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R[R(x^i, x^j)] \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3-48)$$

R 은 상관행렬(correlation matrix)이며 $R(x^i, x^j)$ 는 실험 데이터 내 임의의 두 점 x^i 와 x^j 사이의 상관함수이다. R 은 대칭이며, 대각 요소가 모두 1인 $n \times n$ 의 양정행렬이다. 상관함수는 설계자에 의해서 결정되며, Sacks 등에 의해 식 (3-49)~(3-53)과 같은 상관함수들이 제안되었다.

<표 3-6> 크리깅 모델의 상관 함수

Name	Correlation Function
Exponential	$\prod_{k=1}^{n_{dv}} \exp(-\theta_k d_k) \quad d_k = x^i - x^j_k \quad (3-49)$
Gaussian	$\prod_{k=1}^{n_{dv}} \exp(-\theta_k d_k) \quad (3-50)$
Cubic spline	$\prod_{k=1}^{n_{dv}} [1 - 6(\theta_k d_k)^2 + 6(\theta_k d_k)^3] \quad \theta_k d_k < \frac{1}{2}$ $\prod_{k=1}^{n_{dv}} [2(1 - \theta_k d_k)^3] \quad \frac{1}{2} \leq \theta_k d_k < 1 \quad (3-51)$ $0 \quad \theta_k d_k \geq 1$
Matern linear function	$\prod_{k=1}^{n_{dv}} [(1 + \theta_k d_k) \exp(-\theta_k d_k)] \quad (3-52)$
Matern cubic function	$\prod_{k=1}^{n_{dv}} [(1 + \theta_k d_k + \frac{\theta_k^2 d_k ^2}{3}) \exp(-\theta_k d_k)] \quad (3-53)$

여기서, n_{dv} 는 설계변수의 개수이고, θ_k 는 0보다 큰 값으로 실험점들의 거리변화에 따라 얼마나 빠르게 상관값이 변해 가는지를 결정해주는 특성치인 상관인자(correlation parameter)이다. 크리깅 모델을 $\hat{y}(x)$ 라 하면 통계적으로 식 (3-54)와 같이 정의된다.

$$\hat{y}(x) = E(y(x)|y(x^{(1)}), \dots, y(x^{(n)})) \quad (3-54)$$

여기서, $E(A|B)$ 는 주어진 데이터 B 에서 얻을 수 있는 A 의 기대값을 의미하며, n 는 실험점의 개수이다. 따라서 $y(x^{(1)}), \dots, y(x^{(n)})$ 는 크리깅 모델의 구현에 사용될 실험 데이터가 되며, $y(x)$ 는 실제 응답 모델이 된다. 설계자가 궁극적으로 원하는 것은 $y(x)$ 에 가장 가까운 $\hat{y}(x)$ 를 결정하는 것이다. 이를 위해서 MSE(mean squared error)를 도입한다.

식(3-55)는 실제모델 $y(x)$ 와 크리깅 모델 $\hat{y}(x)$ 사이의 오차를 나타내는 식으로 MSE 를 최소화시키는 $\hat{y}(x)$ 가 크리깅 모델이 되며 식 (3-56)과 같이 표현된다.

$$MSE = E(\hat{y}(x) - y(x))^2 \quad (3-55)$$

$$\hat{y}(x) = \hat{\beta} + r^T(x) \mathbf{R}^{-1} (y - f \hat{\beta}) \quad (3-56)$$

여기서, r 은 n_s 의 길이를 가지는 벡터로, 크리깅 모델을 이용해 예측하려는 점과 표본간의 상관벡터(correlation vector)를 의미하고 식 (3-57)과 같이 구해진다.

$$r^T(x) = [R(x, x^1), R(x, x^2), \dots, R(x, x^{n_s})]^T \quad (3-57)$$

R 은 상관함수로부터 계산되는 상관행렬을 의미한다. f 는 길이가 n_s 이고 모든 요소가 1인 벡터를 의미하고, y 는 표본에서의 반응들로 이루어진 길이가 n_s 인 벡터이다. 따라서, 벡터와 행렬의 곱에 의해서 식 (3-56)의 두 번째 항은 상수가 되어 미지점 x 에서의 예측이 이루어진다. 식 (3-56), (3-57)의 표본내의 k 번째 점을 대입하면 행렬식의 정의에 의해 $r^T(x)R$ 은 k 번째에서는 1이고 나머지 위치에선 0인 벡터가 되고 따라서 표본에서의 k 번째 점과 동일한 반응을 주게 된다. 즉, 크리깅 모델은 표본의 모든 점을 지나는 반응면을 구성하고 미지점에서의 예측은 이들 반응면에서의 보간에 의해 이루어진다고 볼 수 있다. $\hat{\beta}$ 는 식 (3-57)의 $f(x)$ 에 해당되며 상수값으로 식 (3-58)과 같이 추정된다. 또한 분산의 추정치는 식 (3-59)와 같다.

$$\hat{\beta} = (f^T R^{-1} f)^{-1} f^T R^{-1} y \quad (3-58)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(y - f\hat{\beta})^T R^{-1} (y - f\hat{\beta})}{n_s} \quad (3-59)$$

크리깅 모델을 추정하기 위하여 사용된 식 (3.44)에서 θ_k 에 대한 최우량추정(Maximum Likelihood Estimate)은 식 (3-60)에서 구할 수 있다.

$$\text{Maximize } \phi(\theta_k) = -\frac{n_s \ln \hat{\sigma}^2 + \ln |R|}{2} \quad \theta_k > 0 \quad (3-60)$$

본 연구에서는 최적의 크리깅 모델을 구성하기 위하여 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing, SA)을 이용하여 식 (3-60)을 최대화하는 θ_k 를 구하였다.

나. 반응표면법(response surface method, RSM)

(1) 반응표면의 생성

반응표면의 생성은 회귀분석을 통해서 이루어진다. 가정한 수학적 모델의 계수를 결정하기 위해서는 최소자승법(least square method)을 일반적으로 사용하고 있으며 실험계획을 통해서 n 개의 실험 점들의 수준을 선정하고, 이 실험점들에 대하여 n 번의 실험을 하였다면 식 (3-61)과 같은 n 개의 수식을 얻어낼 수 있다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \epsilon_i \quad (3-61)$$

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \epsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-62)$$

여기서, ϵ_i 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 오차항이며 식 (3-62)를 행렬표현식으로 나타내면 식 (3-63)과 같고 각각의 행렬은 (3-64)와 같다.

$$y = X\beta + \epsilon \quad (3-63)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}, \quad \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \quad (3-64)$$

최소제곱법에 의하여 최소화시키려는 오차제곱의 합을 행렬로 사용하여 표현하면 식 (3-65)와 같다.

$$L = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \epsilon^T \epsilon = (y - X\beta)^T (y - X\beta) \quad (3-65)$$

$$L = y^T y - 2\beta^T X^T y + \beta^T X^T X \beta \quad (3-66)$$

식 (3-66)을 β 로 미분하여 0으로 놓으면 식 (3-68)과 같은 결과를 얻는다.

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} \Big|_{\hat{\beta}} = -2X^t y + 2X^T X \hat{\beta} = 0 \quad (3-67)$$

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3-68)$$

여기서, $\hat{\beta}$ 은 β 에 대한 최소제곱 추정값이며 회귀모형을 \hat{y} 이라 하면 최종모형은 식 (3-69)와 같다.

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (3-69)$$

반응표면 생성 시 설계변수와 반응치 간의 관계를 정확하게 나타내는 함수를 찾는 것은 거의 불가능하므로 적절한 회귀 모델을 선택해야 한다. 실제로 반응표면법을 이용한 최적 설계는 반응표면 후보함수의 선택에 따라 해의 정확도와 수렴 속도에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서는 식 (3-70)과 같은 다양한 반응 형태를 표현할 수 있는 2차 회귀모형(second order regression model)을 사용하였다.

$$y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i \leq j}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (3-70)$$

여기서, y_i 는 반응값이고, x_i 는 설계변수이며, β 는 회귀상수이다.

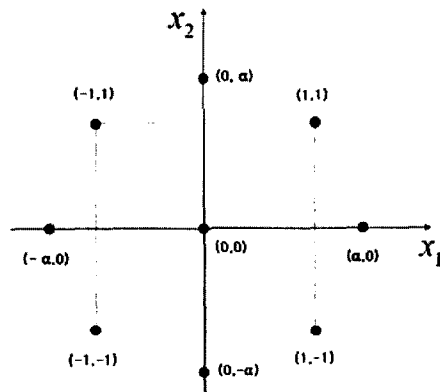
(2) 실험계획법(design of experiment, DOE)

반응표면 생성시에는 무한개의 추출점을 선택하는 것이 가장 좋으나 실제로는 한정된 개수의 추출점을 뽑을 수밖에 없다. 따라서, 반응표면을 생성하기 위하여 가장 적절한 추출점을 뽑아내기 위하여 실험계획법을 이용하며, 이러한 추출점의 선택은 생성된 반응표면의 정확성과 함께 최적화 시간에도 커다란 영향을 미친다. 반응 표면분석을 위하여 많이 사용되는 실험계획법은 반응표면의 추정이 1차 회귀모형으로 적절하다고 판단될 때에는 2^k 요인배치법, 2수준계의 일부 실시법, 심플렉스 계획법(simplex design)이 흔히 쓰이고, 반응표면의 추정이 2차 회귀모형으로 적절하다고 판단될 때에는 3^k 요인배치법, 3수준계의 일부 실시법, 중심합성계획(central composite design), 회전계획(rotatable design) D-optimal 계획법 등이 많이 쓰인다.

독립변수의 수가 k 인 2차 회귀모형은 심플렉스 계획법이나 2^k 요인배치법 등으로는 회귀계수를 추정할 수가 없다. 왜냐하면, 2^k 요인실험에서는 각 변수의 두 수준에서만 실험이 되므로, 변수의 수준 변화에 따라서 발생하는 반응량의 곡면적인 변화를 감지할 수 없으며, 2차 회귀모형

에서 제곱항 x_i^2 의 계수 β_{ii} 등을 추정할 수 없기 때문이다.

본 연구에서는 이런 단점을 보완하고 적은 횟수의 실험으로 곡면을 추정하기 위하여 중심점 (central points)과 축점(axial points)을 2^k 요인실험에 추가시킨 중심합성계획에 의해 추출점을 선택하였다. 중심합성계획에서는 중심점의 수는 제한 없이 하나 이상이면 되며, 축점의 수는 $2k$ 개가 된다. [그림 3-61]은 $k=2$ 인 경우의 중심합성계획에 의한 실험점의 분포이다. 2^2 요인 실험점으로 네 개의 점 $(1, 1)$, $(1, -1)$, $(-1, 1)$, $(-1, -1)$ 이 있고, 4개의 축점으로 $(\alpha, 0)$, $(-\alpha, 0)$, $(0, \alpha)$, $(0, -\alpha)$ 가 있으며, 중심점으로 $(0, 0)$ 이 하나 이상 있다. 여기서, α 의 값은 0이 아닌 양수이면 된다. 따라서, $k=2$ 인 경우에는 중심합성계획이 갖는 최소의 실험점은 9개가 된다. 만약, $\alpha=1$ 이고, 중심점이 하나라면 이것은 3^2 요인배치법이 된다. 그리고 $\alpha=\sqrt{2}$ 라면 중심점을 제외한 8개의 점 모두 반지름이 $\sqrt{2}$ 인 원상에 위치하게 된다. 또한, $\alpha \neq 1$ 이면 각 독립변수는 5개의 다른 수준 $(-\alpha, -1, 0, 1, \alpha)$ 에서 관찰된 결과가 된다. 그러므로 2차 반응곡면을 추정하기에 충분한 경우가 될 것이다.



[그림 3-61] $k=2$ 인 경우의 중심합성계획

만약, 중심점의 개수를 n_0 라 하면 중심합성계획의 실험횟수는 식 (3-71)과 같다.

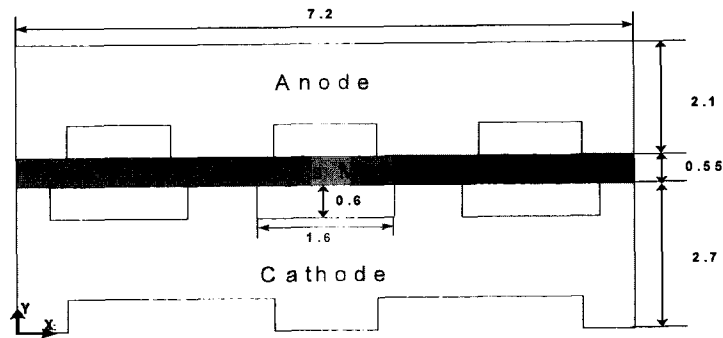
$$n = 2^k + 2k + n_0 \quad (3-71)$$

여기서, $k > 2$ 인 경우에는 3^k 요인배치법보다 훨씬 적은 양의 실험횟수를 가지고 있다. 이와 같은 적은 수의 실험횟수는 실험 자체가 비용이 많이 드는 경우에는 대단히 유리한 장점이 될 것이다.

다. 구조해석과 유동해석 모델

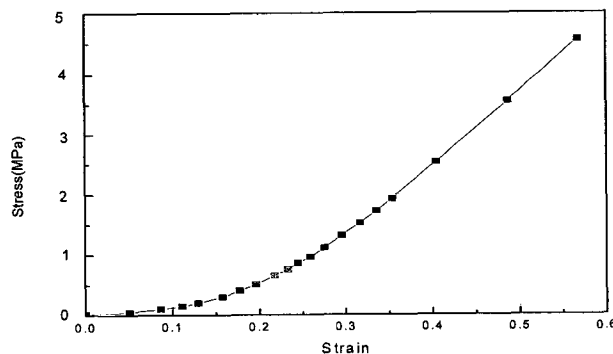
(1) 구조해석의 모델

본 연구의 구조해석에 사용된 모델은 실제 성형되어 실험중인 활성면적이 300cm^2 인 PEMFC 단위전지의 일부를 모델링한 것으로 [그림 3-62]와 같이 공기(Cathode)판, 전극전해질 및 확산층, 그리고 수소(Anode)판의 순서로 적층되어 있다.



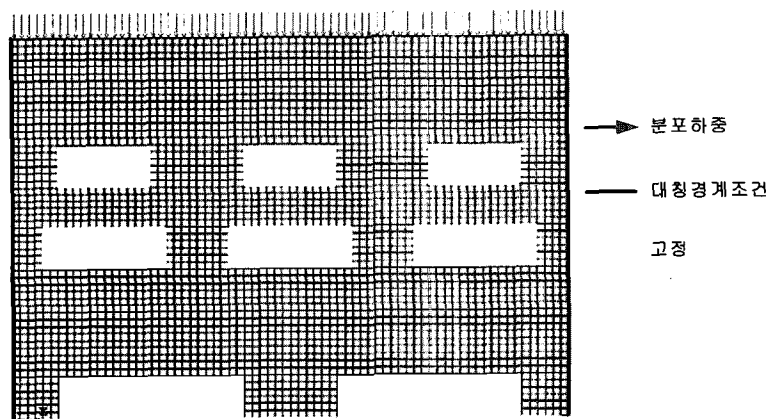
[그림 3-62] 구조해석에 사용된 단위전지 모델의 형상

공기판과 수소판에 사용된 재료는 흑연 그라파이트이며, 기계 가공으로 유로를 성형하였다. 그리고, 박막면의 재료는 [carbon cloth/catalyst/membrane/catalyst/carbon cloth] 순으로 되어 있는 비선형 재료이다. 분리판에 사용된 재료의 물성치는 탄성계수(E)는 4.8GPa 이고, 푸아송비(ν)는 0.2이며, 박막면을 구성하는 재료의 구조적 물성치는 압축실험에 의해서 얻어졌으며, 박막면을 구성하는 재료의 응력-변형률 선도는 [그림 3-63]에 나타내었다.



[그림 3-63] 박막면의 응력-변형률 선도

단위전지 모델의 구조해석은 범용구조해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 수행하였다. 모델에 사용된 요소형태(element type)는 분리판과 박막면 모두 4절점 사각형 요소로서 2차원 solid 구조물에 적용이 가능한 Plane 182를 사용하였고, 요소(element)와 절점(node)은 각각 3480개와 3417개이다. 경계조건은 하단은 고정시키고, 양쪽 끝단은 대칭 경계조건을 적용하였으며, 적용하중으로는 수소판의 상단에서 10기압의 균일한 분포하중을 가했다. [그림 3-64]는 단위전지 모델의 구조해석을 위한 유한요소 모델과 경계조건 및 적용하중을 나타낸다.

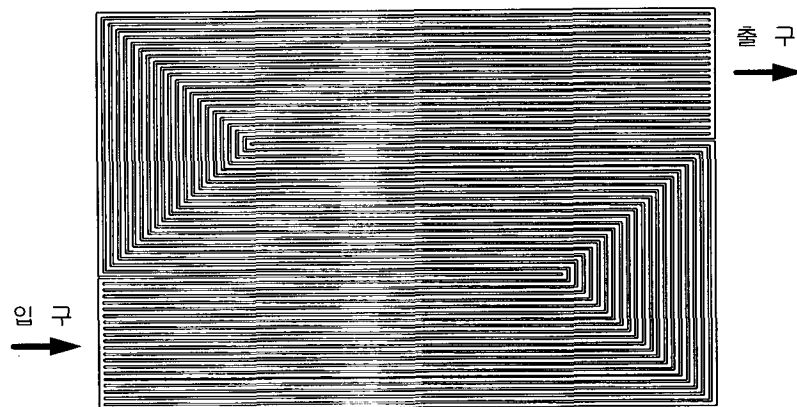


[그림 3-64] 유한요소 모델과 경계조건 및 하중

박막면은 다른 구속조건 없이 수소판의 상단에서 균일한 분포하중을 받아서 분리판과 접촉되기 때문에 비선형 구조해석인 접촉 해석을 수행하였다. 접촉 조건을 나타내기 위해서 강체 대 변형체 접촉 상태를 나타내는 2차원 접촉요소인 Target 169와 Contact 172를 사용하였다. 이는 목표표면이 되는 분리판이 접촉면이 되는 박막면에 비하여 상대적으로 매우 강하기(rigid) 때문이다.

(2) 유동해석의 모델

본 연구의 유동해석에 사용된 유로는 실제 성형되어 실험중인 활성면적이 300cm^2 인 PEMFC 공기판의 유로형상을 모델링한 것으로 [그림 3-65]와 같다.



[그림 3-65] 유동해석에 사용된 공기관의 유로 형상

유로의 단면의 크기는 가스 공급뿐만 아니라 고분자 전해질 막의 이온 전도에 필요한 수분을 공급하고 배출하는 것에도 많은 영향을 준다. PEMFC는 전해질로 사용되는 고분자 막의 원활한 이온 전도를 위해 전해질 막을 항상 습한 상태로 유지해야 한다. 이를 위해서는 입구에서 전해질 막이 건조해지는 것을 방지하기 위해 가습을 해주어야 한다. 이와 같은 경우 PEMFC의 100°C 이하의 작동 온도에서는 가습을 위해 공급한 수분이 채널 내부에 응축되어 가스의 공급을 차단시키는 일이 발생할 수 있다. 또한 수소와 산소의 화학 반응에 의해 생성되는 수증기가 낮은 작동 온도에서 응축될 수 있다. 그러므로, 수분을 원활히 배출하기 위해서는 유로의 입구 부분과 출구 부분에 적당한 압력 차이를 주어 상대적으로 저압 상태인 출구 부분에서 팽창된 가스로 하여금 많은 수분을 함유하고 배출될 수 있도록 유로를 설계해 주어야 한다. [그림 3-65]의 형상은 1~2 kPa의 압력차이가 발생하도록 설계하였으며 이와 같은 채널 형상은 물 배출 측면에서 유리하다.

공기관의 유동해석은 상용유동해석 프로그램인 STAR-CD를 사용하여 수행하였다. 유동해석에 사용된 공기관의 모델은 사각형 요소를 사용하였으며, cell과 vertex는 각각 229,896개와 390,335개이다. 분리관 내의 유동은 비압축성으로 공기의 밀도는 일정하게 유지되고, 매니폴드 입구의 초기 압력은 상압으로 구동되며, 유입되는 유량은 일정하다고 가정하였다. 공기가 공급되는 매니폴드 입구에서의 경계조건은 일정한 유량 $\dot{m}=1.046 \times 10^{-4}$ kg/s이 공급된다. 출구는 입구로부터 충분히 떨어져 있어서 출구에서는 유체의 흐름방향으로 변화가 일어나지 않는다고 가정함에 따라 출구에서 압력을 제외한 모든 변수들의 흐름 방향의 구배가 0이라는 경계조건을 사용하였다. 압력의 계산은 유동이 들어가는 초기의 경계치를 주면 그 값을

받아서 옆의 격자(mesh)의 값을 계산하고 또 그 격자에서 얻은 값을 기반으로 다음 격자의 값을 계산하는 저차 공간 차분화 기법(low-order spatial discretisation schemes, UD)를 사용하였다. 그리고, 정상 상태에 도달되었을 때의 계산을 수행하는 것이므로 유한체적에 대하여 1차로 계산한 값에서 나온 오차를 반복 계산을 통해서 줄여주는 방식인 SIMPLE Algorithm을 사용하였다. 그러므로 iteration을 하여 0에 근사한 값으로 오차를 줄여 나가야 하며, 본 연구에서는 10^{-5} 정도로 오차를 줄였다.

라. 분리판의 다단계 최적설계

본 연구에서는 활성면적이 300cm^2 인 PEMFC의 경량화 및 소형화를 위해서 분리판의 두께 및 공기관의 유로의 너비와 깊이에 관하여 근사 최적화 방법인 크리깅과 반응표면법을 이용하여 최적화를 수행하였으며 유동해석시 적절한 값 이하로 오차를 줄이기 위한 수렴 시간이 구조해석에 비해서 상당히 길기 때문에 반복 해석에 의해서 최적값을 도출하기까지는 시간적 제약이 크고, 분리판의 두께는 구조해석에만 관련된 설계변수로서 유동해석과는 독립적이므로 최적화 시간의 단축을 위하여 다단계 최적설계를 적용하였다. 1단계 최적설계에서는 채널의 크기(H, W)를 고정시킨 후 구조해석에 관련된 최적화 프로그램을 작성하여 분리판의 두께(t_c , t_a)에 대한 최적화를 수행하였으며, 2단계 최적설계에서는 1단계 최적설계에서 최적화된 분리판의 두께를 고정시킨 후 구조해석과 유동해석에 관련된 최적화 프로그램을 작성하여 채널의 크기에 대한 최적화를 수행하였다.

일반적인 최적화에서는 설계변수의 영역을 전체영역으로 설정한 후 한번의 근사모델을 생성하여 최적화를 수행하지만 이 경우 가정된 모델이 적절하지 않거나 설계변수가 많은 복잡한 실제 모델에서는 오차가 적은 근사모델을 생성하기가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 먼저 설계변수 전체영역에서 모델을 만들어 최적점을 찾고 이 국부 최적점을 중심으로 다시 적절한 흥미영역(interest region)을 설정하여 최적화 수행이 반복되다 적절한 수렴조건에 따라 프로그램은 정지한다. 반응표면법의 경우 2차 회귀모델로 생성된 반응표면을 MFD를 이용하여 최적점을 찾았으며, 크리깅의 경우 표본의 모든 점을 지나는 반응면에서 보간에 의한 미지점 예측으로 최적점을 찾기 때문에 별도의 알고리즘은 필요하지 않다.

(1) 1 단계 최적설계

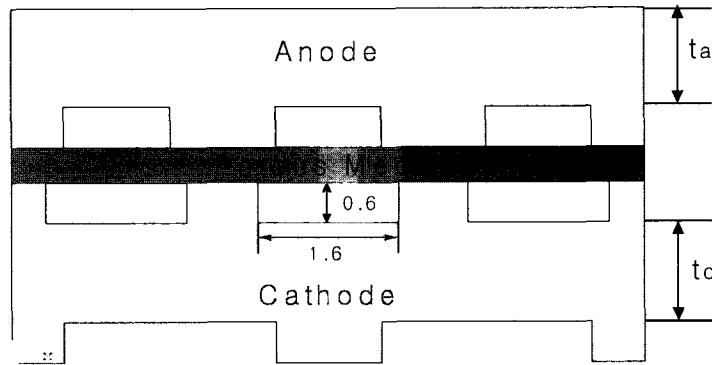
1단계 최적설계에서는 채널의 크기(H, W)를 고정시킨 후 구조해석에 관련된 최적화 프로그램을 작성하여 분리판의 두께(t_c , t_a)에 대한 최적화를 수행하였다. 목적함수는 단위전지의 단위길이 당 무게로 설정하였고, 설계변수는 공기판의 두께(t_c)와 수소판의 두께(t_a)로 설정하였으며, 제한조건은 초기 모델에 대한 구조해석 시의 최대응력(σ_{max})인 6.78 MPa를 넘지 않도록 하였다. 이를 정식화하면 식 (3-72)~(3-75)로 나타낼 수 있고, 최적설계에 사용된 단위전지 모델과 설계변수는 [그림 3-66]과 같다.

$$\text{Minimize : } F = \sum_{i=1}^n \gamma_i A_i l_i \quad (3-72)$$

$$\text{Subject to : } G_1 = \frac{\sigma}{\sigma_{max}} - 1 \leq 0 \quad (3-73)$$

$$0.3 \leq t_a \leq 1.5 \quad (3-74)$$

$$0.3 \leq t_c \leq 1.5 \quad (3-75)$$



[그림 3-66] 1단계 최적설계 단위전지 모델의 형상

여기서, γ , A , l 은 각각 재료의 비중량과 단면적 그리고 단위길이이며, 식 (3-73)는 등가 응력에 대한 제한조건이며, 식 (3-74)~(3-75)는 분리판 두께에 대한 부가제한조건이다.

상관인자 θ_k 를 SA를 이용하여 관계식을 최대화하여 구성된 크리깅 모델과, 중심합성법에 의해 생성된 반응표면모델을 이용하여 1단계 최적설계를 수행한 후 MFD의 결과와 비교하여 <표 3-7>에 나타내었다.

<표 3-7> 1단계 최적설계의 결과 비교

	Initial	MFD	Kriging	RSM
Weight ($10^{-3}N$)	6.1931	4.5693	4.5013	4.8893
t_c (mm)	1.5000	1.4985	1.4781	1.4324
t_a (mm)	1.5000	0.4787	0.4563	0.7464
σ_{max} (MPa)	6.7831	6.7824	6.7831	6.7831
Number of Analysis		89	45	54
두께감소(%)		19.12	19.92	15.35
무게감소(%)		26.22	27.32	21.05

1단계 최적설계의 결과, 크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 27.32%, 21.05%의 무게 감소율을 보여 성능이 향상되었음을 알 수 있고, MFD의 결과와 비교할 때 각각 1%, 5% 내외의 오차를 보여 두 근사모델 모두 신뢰성을 확인할 수 있었으며, 크리깅 모델이 RSM 모델보다 더욱 좋은 값으로 수렴하였다. 수렴 속도를 살펴보면 크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 5번, 6번의 흥미영역 이동에 따른 반복 수행을 하면서, 총 45회와 54회의 유한요소 해석을 수행한 반면, 도함수 방법인 MFD의 경우 89회의 가장 많은 유한요소해석 수행하였다. 그에 비하여 크리깅은 45회의 유한요소해석 횟수로 가장 빠른 수렴 시간을 나타내고 있으면서도 가장 좋은 수렴값을 보이고 있다. 그리고, 크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 19.92%, 15.35%의 두께 감소율을 보여 전체적으로 부피가 감소한 것을 알 수 있다.

(2) 2단계 최적설계

2단계 최적설계에서는 1단계에서 최적화된 분리판의 두께(t_c , t_a)를 고정시킨 후 그 결과를 초기값으로 설정하고 구조해석과 유동해석에 관련된 최적화 프로그램을 작성하여 채널의 크기(H, W)에 대한 최적화를 수행하였다. 목적함수는 단위전지의 단위길이 당 무게로 설정하였고, 설계변수는 공기관의 채널의 높이(H)와 너비(W)로 설정하였으며, 제한조건은 1단계 최적설계 모델의 구조해석 시의 최대응력(σ_{max})을 넘지 않는 동시에 공기관에서 수분의 원활한 배출을 위한 입구부와 출구부의 압력차의 범위로 설정하였다. 이를 정식화하

면 식 (3-76)~(3-82)으로 나타낼 수 있고, 최적설계에 사용된 단위전지 모델과 설계변수는 [그림 3-67]과 같다.

$$\text{Minimize : } F = \sum_{i=1}^n \gamma_i A_i l_i \quad (3-76)$$

$$\text{Subject to : } G_1 = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (3-77)$$

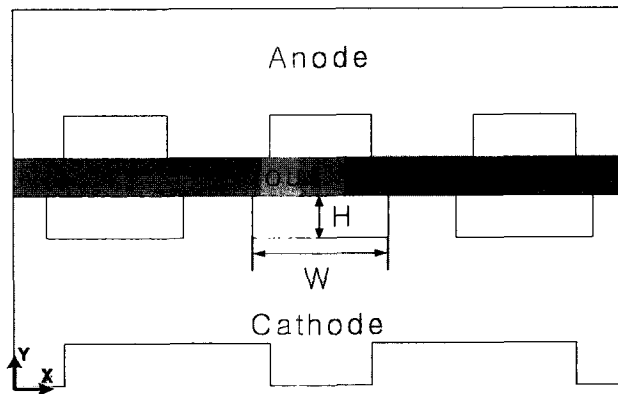
$$G_2 = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (3-78)$$

$$G_3 = 1 - \frac{\Delta P}{\Delta P_{\min}} \leq 0 \quad (3-79)$$

$$1000 \leq \Delta P \leq 3000 \quad (3-80)$$

$$1.44 \leq W \leq 1.76 \quad (3-81)$$

$$0.54 \leq H \leq 0.66 \quad (3-82)$$



[그림 3-67] 2단계 최적설계 단위전지 모델의 형상

여기서, γ , A , l 은 각각 재료의 비중량과 단면적 그리고 단위길이이며, 식 (3-77)은 등가 응력에 대한 제한조건이고, 식 (3-78)~(3-79)는 유동해석의 공기판의 입구부와 출구부의 압력차에 대한 제한조건으로 그최대값과 최소값은 식(3-79)와 같으며, 식 (3-81)~(3-82)는 유로의 너비와 높이에 대한 부가제한조건이다.

크리깅 모델과, 반응표면모델을 이용하여 1단계 최적설계의 결과를 초기값으로 설정하여 2단계 최적설계를 수행한 후 MFD의 결과와 비교하여 <표 3-8>에 나타내었다.

<표 3-8> 2단계 최적설계의 결과 비교

	MFD		Kriging		RSM	
	initial	optimum	initial	optimum	initial	optimum
Weight ($10^{-3}N$)	4.5693	4.5370	4.5013	4.4889	4.8893	4.8698
W (mm)	1.6000	1.6015	1.6000	1.5456	1.6000	1.6107
H (mm)	0.6000	0.5400	0.6000	0.5400	0.6000	0.5708
σ_{max} (MPa)	6.7831	6.7827	6.7831	6.7714	6.7831	6.7587
ΔP (Pa)	1412	1842	1412	1930	1412	1587
Number of Analysis	43		27		72	
두께감소 (%)	1.39		1.40		0.64	
무게감소 (%)	0.71		0.27		0.40	

크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 1단계 최적설계의 결과에 비하여 0.27%, 0.40%의 무게 감소율을 보였다. 1단계보다 목적함수의 감소율이 현저하게 줄어든 이유는 설계변수에서 무게를 감소시키는 인자 중 공기판 및 수소판의 두께가 채널의 깊이에 비해 영향이 더 크기 때문이다. 수렴 속도를 살펴보면 크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 3번, 8번의 흥미영역 이동에 따른 반복 수행을 하면서, 총 27회와 72회의 유한요소 해석을 수행하였으며, MFD는 43회의 유한요소해석 수행하였다. 그리고, 크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 1.40%, 0.64%의 두께 감소율을 보여 약간의 부피가 감소한 것을 알 수 있다.

마. 결과 및 분석

근사 최적화 방법인 반응표면법과 크리깅을 이용하여 다단계 최적설계를 수행한 결과 두 방법 모두 모델의 성능을 향상시킬 수 있었으며, 도함수 방법인 MFD의 최적화 결과와 비교하여 <표 3-9>에 나타내었다.

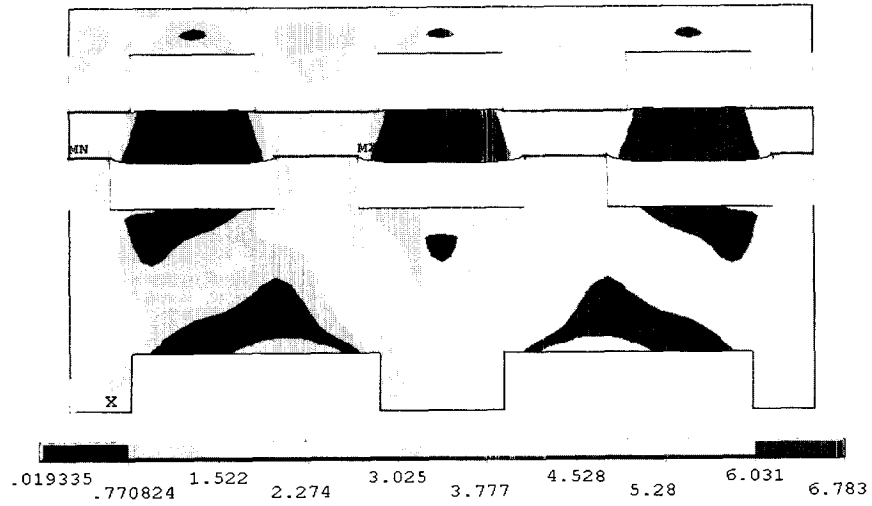
<표 3-9> 연료전지 분리판의 최적값 비교

	Initial value	MFD	Kriging	RSM
Weight ($10^{-3}N$)	6.1931	4.5370	4.4889	4.8698
t_c (mm)	1.5000	1.4985	1.4781	1.4324
t_a (mm)	1.5000	0.4787	0.4563	0.7464
W (mm)	1.6000	1.6015	1.5456	1.6107
H (mm)	0.6000	0.5400	0.5400	0.5708
σ_{max} (MPa)	6.7831	6.7827	6.7714	6.7587
ΔP (Pa)	1412	1842	1930	1587
Number of Analysis		132	72	126
두께감소 (%)		20.24	21.04	15.89
무게감소 (%)		26.74	27.52	21.37

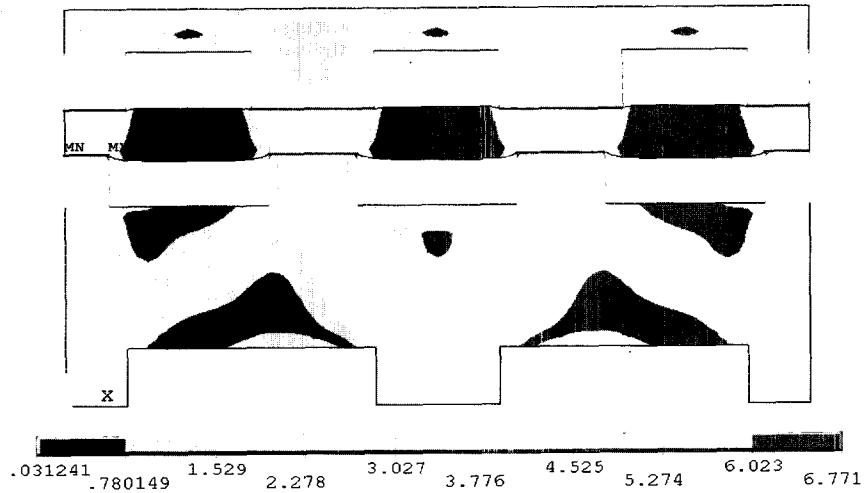
연료전지 분리판의 목적함수를 살펴보면, 1·2단계의 최적화 과정을 거치면서 크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 27.52%, 21.37%의 감소율을 보여 성능이 향상되었음을 알 수 있고, MFD의 결과와 비교할 때 각각 1%, 5% 내외의 오차를 보여 두 근사모델 모두 신뢰성을 확인할 수가 있었으며, 크리깅 모델이 RSM 모델보다 더욱 좋은 값으로 수렴하였다. 수렴 속도를 살펴보면 도함수 방법인 MFD의 경우 총 132회의 많은 유한요소해석을 수행한데 비하여, 크리깅은 총 72회의 유한요소해석 수행으로 가장 빠른 수렴 시간을 나타내고 있으면서도 가장 좋은 수렴값을 보이고 있다.

설계변수 중에서 공기판 및 수소판의 두께(t_c , t_a)와 채널의 깊이(H)를 줄이는 것은 연료전지의 경량화뿐만 아니라 부피를 감소시켜 소형화에도 기여를 하는 인자들이다. 결과를 살펴보면, 크리깅 모델과 RSM 모델은 각각 21.04%, 15.89%의 두께 감소율을 보여 전체적으로 부피가 감소한 것을 알 수 있다. 그리고, 모델의 최적값에서의 제한조건은 모두 그 범위를 만족하는 것을 알 수 있다.

[그림 3-68]에서 [그림 3-70]은 가장 좋은 값으로 수렴 결과를 나타낸 크리깅에 의한 최적 모델의 von Mises 응력분포와 공기판의 압력 분포를 변형유용방향 탐색법과 함께 나타내었다.



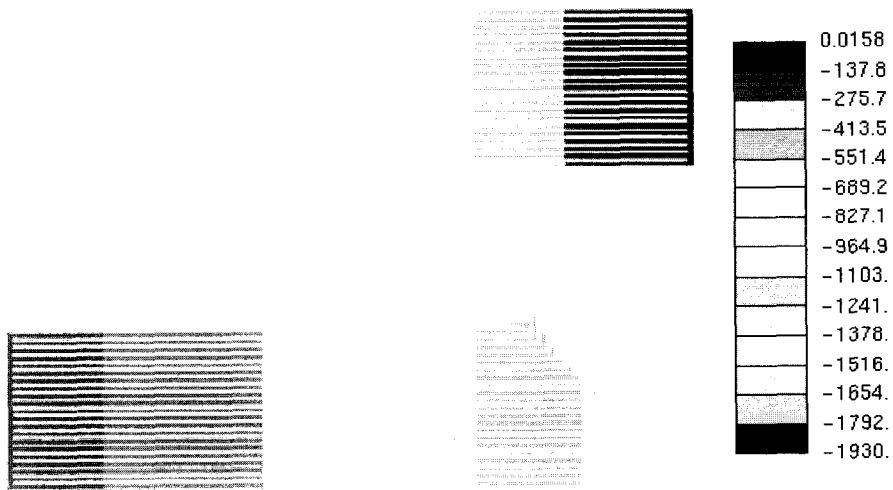
[그림 3-68] 변형유용방향탐색법에 의한 최적 모델의 응력 분포



[그림 3-69] 크리깅에 의한 최적 모델의 응력분포



[그림 3-70] 변형유용방향탐색법 최적모델에 대한 공기관의 압력분포



[그림 3-71] 크리킹 최적모델에 대한 공기관의 압력분포

2. 구조적 변형에 의한 유동특성

가. 구조해석

단위전지의 구성요소 중 공기판은 가장 많은 유량이 공급된다. 또한 공기는 연료가스와 달라 이 용률이 낮고, 화학반응에 의해 물이 생성되어 공기판에 응축될 가능성이 높다. 공기판의 채널수가 상대적으로 많아 유동의 균일성에 문제가 생길 가능성이 높아 공기판의 성능이 단위 전지의 전체 효율을 좌우한다. 연료전지의 성능은 전지판의 전류밀도가 균일하게 최대로 발생될 때 우수한 성능을 나타낼 수 있다. 연료전지의 전류 밀도는 공기판의 내부 유동과 밀접하게 연관되어 있으며 서로 영향을 미친다. 연료전지의 효율을 높이기 위해서는 화학반응을 지배하는 공기가 전지 내부에 고르게 확산되어, 박막면(membrane)에 최대한 투과되도록, 많은 양의 공기가 균일하게 화학반응할 수 있도록 설계되어야 한다.

이와 같은 설계를 하고 전지 채널 설계 후 성능을 검증하기 위해서 분리판의 채널 형상에 대한 유동특성을 파악하는 것이 중요하다. 유동 특성은 채널의 형상과 단면적 등에 의해 좌우된다. 전극판의 단면적 내에서 효율적으로 화학반응이 되도록 채널 형상의 최적 설계가 필요하다. 유동특성 향상을 위한 채널 형상의 최적설계에 있어서 이제까지는 유체역학적 측면에서만 접근이 이루어져왔다. 구조적 변형을 고려한 연구 결과들을 살펴보면, 박막면과 같이 채널의 형상과 관련된 구성요소들의 미세한 변형보다는 전극판과 외부 체결 요소에 의한 응력 분포, 각각의 요소들에 대한 열전달과 이에 의한 열응력에 관한 연구들이 이루어져왔다.

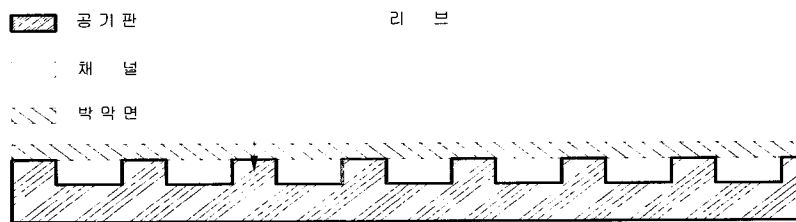
본 연구에서는 연료전지의 조립시에 가해지는 하중에 의한 연료전지 박막면의 변형과 채널형상을 고려하여 연료전지 공기판의 변형해석과 유동 해석 및 실험을 수행하였다. 박막면은 공기판의 채널과 수소판의 채널 사이에 서로 맞닿아있으며, 전극판과 비교하여 강성이 약하여 변형이 큰 재질로 구성되어 있기 때문에 압축 체결 시 박막면의 변형은 분리판 채널의 유량이 흐를 수 있는 면적을 축소시킬 수 있다. 채널 단면의 형상과 면적 변화는 유동 특성에 큰 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 분리판 채널의 최적 설계를 위하여, 먼저 박막면의 구조적 변형에 대한 해석을 수행하였다. 이와 같은 구조 해석 결과를 이용하여 박막면의 구조적 변형을 고려하지 않은 경우의 공기판의 유동특성과 고려한 경우의 공기판의 유동특성을 수행하여 연료전지의 구조적 변형이 유동특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 구조 변형 해석의 경우 접촉조건을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 두 가지 경우에 대해 수행하였으며 각각의 구조 변형 해석 결과 모두를 적용하여 유동 해석을 수행하였다. 그리고, 수치적 유동해석 결과의 검증을 위하여 유동해석과 동일한 조건에서의 유동 실험을 수행하여 비교하여, 연료전지판 성능해석시 구조변형이 유동 특성에 미치는 영

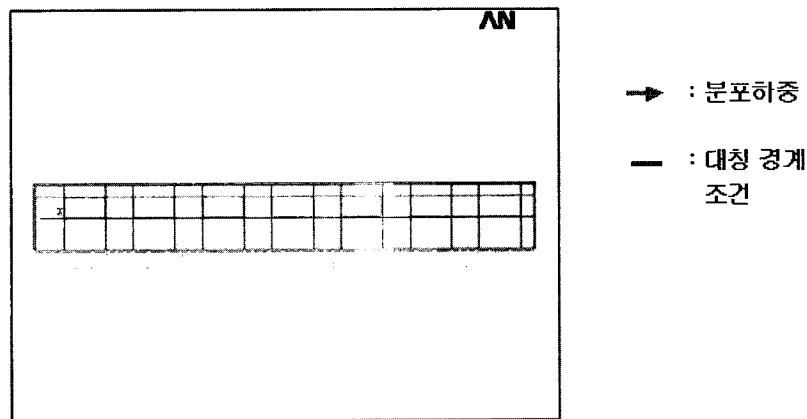
항을 분석하였다.

(1) 부재의 재질 및 모델 형상과 경계 조건

박막면을 구성하는 재료의 구조적 물성치는 압축 실험에 의해서 얻어졌으며, 박막면을 구성하는 재료의 응력-변형률 선도는 [그림 3-63]과 같이 나타내어진다. 공기판에 사용된 재료의 물성치는 탄성계수(E)는 4.8GPa이고, 푸아송비(ν)는 0.2이다. 구조 변형 해석에 사용된 모델의 형상은 [그림 3-72] 같고, 해석에 적용된 경계조건을 도시하면 [그림 3-73]과 같다. 해석에 사용된 모델은 활성면적이 300cm²인 공기판의 일부를 모델링한 것으로 모델의 양쪽 끝단과 박막면의 중심면에 대칭의 경계 조건을 적용하였다.



[그림 3-72] 구조해석을 위한 모델의 형상



[그림 3-73] 구조해석을 위한 모델의 경계조건과 하중

하중조건은 공기판의 밑면을 통해 11기압의 균일한 분포하중이 작용하는 것으로 가정하였다. 본 연구에 사용된 모델의 경우 그림. 3.1.2에서 알 수 있듯이 리브와 박막면 서로 맞닿아 있으며, 리브의 폭이 채널의 폭과 비교하여 약 33%정도 좁게 설계되었다. 공기의 공

급과 확산이 원활하기 위해서는 채널의 폭이 넓어야 하고, 상대적으로 리브의 폭이 좁아야 하지만, 전기 전도성과 구조적 안정을 위해서는 리브의 폭이 넓어야 한다. 그러므로 이와 같이 서로 상충되는 사항을 동시에 고려한 최적 설계가 필요하다.

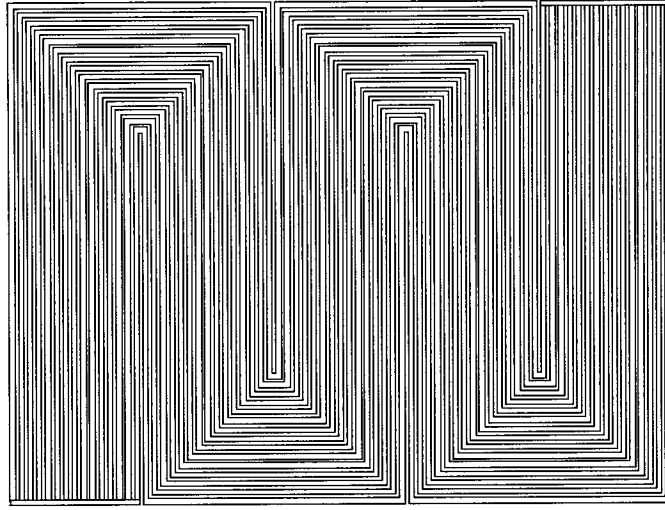
(2) 해석방법

위의 모델의 구조 변형 해석을 위해서는 박막면의 물성치를 [그림 3-63]과 같이 적용하고, 공기판의 리브부분과 박막면이 서로 맞닿아 있는 부분은 다른 구속조건 없이 외부의 체결에 의한 평면에 수직한 압력을 받아서 접촉되어 있는 것으로 그 부분들은 접촉 요소를 사용하여 해석한다. 이에 본 연구에서는 재료의 비선형만을 적용한 경우와 재료의 비선형과 접촉 조건을 모두 적용한 경우의 해석을 수행하였다. 박막면의 물성치를 [그림 3-63]의 그래프와 같이 적용하기 위하여 박막면의 물성치에 대하여 부분적으로 선형화된 비선형 해석을 적용하였다. 접촉 조건을 나타내기 위해서는 2차원 접촉요소 (Target 169, Contact 172)를 사용하였으며, 이 접촉 요소는 강체 대 변형체 접촉 상태를 나타낸다. 이는 Target이 되는 전극판이 접촉(Contact)이 되는 박막면에 비하여 상대적으로 매우 강하기(Rigid) 때문이다.

나. 유동 해석

(1) 모델 형상

본 연구에서는 앞서 수행된 연구에서 성능이 검증된 다중 사행 채널 형상 (serpentine channels)의 유로 형상을 이용하여 유동 해석을 수행하였다. [그림 3-74]는 활성면적이 300cm^2 인 공기판의 유로 형상이다. 이 계산 결과는 동일 형태 또는 다른 형태의 공기판 설계의 기초 자료로 활용이 가능하다.



[그림 3-74] 공기판의 채널 형상(활성면적:300cm²)

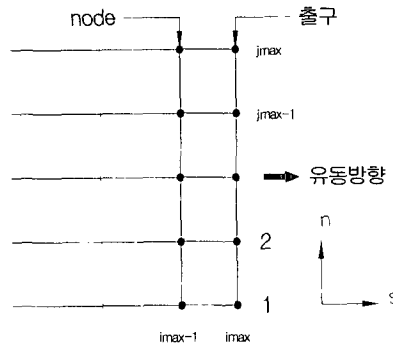
(2) 입구와 출구의 경계조건

공기가 공급되는 매니폴드 입구에서의 경계조건은 일정한 유량이 공급된다고 가정하였다. 구조적 변형을 고려하지 않은 경우를 먼저 살펴보면, 활성면적이 300cm²인 경우 단위전지 40개를 적층하여 전류밀도 120mA, 2.5KW의 전력을 얻을 수 있는 $\dot{m}=1.1492 \times 10^{-4}$ kg/s의 입구 유량을 기준으로 기준유량의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%의 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이를 표로 나타내면 표 <3-10>과 같다. 구조적 변형을 고려한 경우에는 앞에서 사용된 $\dot{m}=1.1492 \times 10^{-4}$ kg/s의 기준 입구 유량을 적용하여 각각의 해석을 수행하였다. 분리판 내의 유동은 비압축성으로 공기의 밀도는 일정하게 유지되고, 매니폴드 입구의 초기 압력은 상압으로 구동되며, 유입되는 유량이 일정하다고 가정하였다. 출구는 입구와 충분히 떨어져 있어서 출구에서는 유체의 흐름방향으로 변화가 일어나지 않는다고 가정하여 출구면에서 압력을 제외한 모든 변수들의 흐름 방향의 구배가 0 이라는 조건을 사용하였다. 이를 식으로 나타내면 식(3-83)과 같다. 여기서 f는 압력을 제외한 변수들이고, s는 유동의 흐름 방향이다.

<표 3-10> 입구 경계 조건

Case	유량(\dot{m})
1	0.2298×10^{-4} kg/s
2	0.4597×10^{-4} kg/s
3	0.6895×10^{-4} kg/s
4	0.9194×10^{-4} kg/s
5	1.1492×10^{-4} kg/s

$$\frac{\partial f}{\partial s} = 0 \quad (3-83)$$

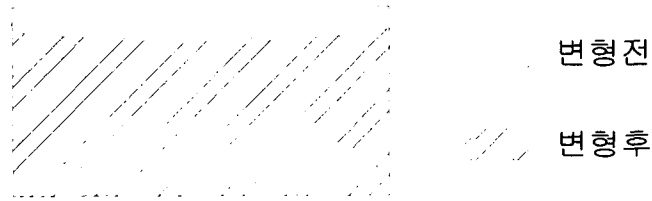


[그림 3-75] 출구 경계에서의 격자

다. 결과 비교

(1) 구조 해석

[그림 3-76]은 단면의 변화를 도식적으로 나타내고 있다. 이러한 단면적의 변화를 고려하여 뒤에 유동 해석이 수행되었다. <표 3-11>은 각각의 경우의 변형률의 비교를 나타낸다. 재료 비선형만 고려한 경우 공기판의 경우 최대 응력은 13.5MPa이고, 최소 응력은 0.35MPa이다. 박막면의 경우 최대 응력은 2.93MPa, 최소응력은 0.35MPa이다. 접촉조건까지 고려한 경우, 공기판의 경우 최대 응력은 12.1MPa이고, 최소 응력은 0.07MPa이다. 박막면의 경우 최대 응력은 3.39MPa, 최소응력은 0.07MPa이다. 이를 표로 나타내면 <표 3-12>와 같다.



[그림 3-76] 채널 단면적의 변화

<표 3-11> 변형률 비교

구분 변형률	A	B	차이
단면적	13.6234	17.0414	20.057
폭	0.0106	0.0106	0.0000
높이(단면적/폭)	13.6712	17.0502	9.818

A : without contact condition

B : with contact condition

단위(%)

<표 3-12> 응력 분포 비교

구분	A	B	차이(%)
박막면의 최대응력	2.93	3.39	15.70
박막면의 최소응력	0.35	0.07	80.00
공기관면의 최대응력	13.50	12.1	10.37
공기면의 최소응력	0.35	0.07	80.00

A : without contact condition

B : with contact condition

단위(Mpa)

구조적 변형을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하면 두가지 경우 모두 응력 분포가 재료의 허용 응력을 초과하지 않지만, 변형이 상당히 일어남을 알 수 있었다. 두 가지 경우를 비교해보면, 접촉조건을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우보다, 변형은 크게 나타나는 반면, 응력 분포는 작게 나타남을 알 수 있었다. 박막면과 공기관면의 최소 응력의

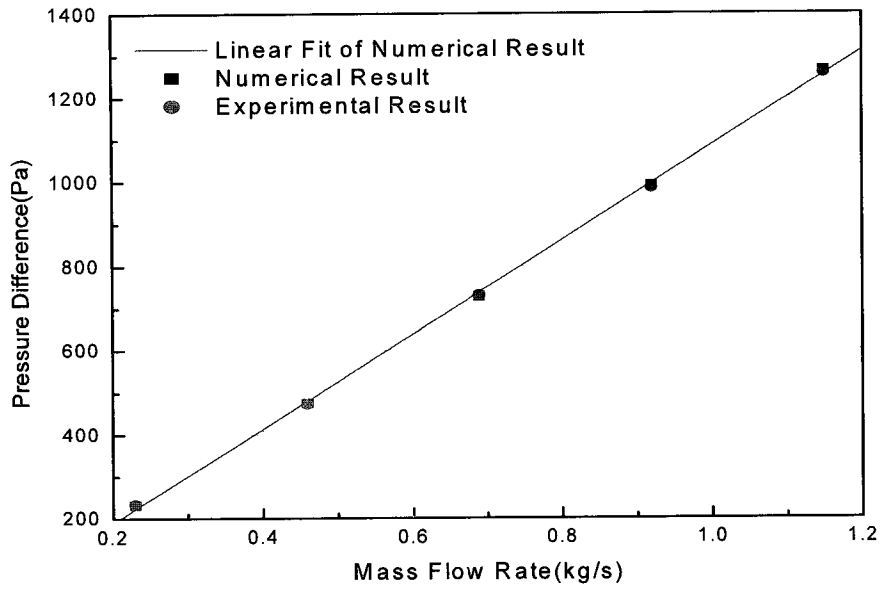
경우 그 차이가 80%로 매우 큰 수치를 나타냈으며, 최대응력의 경우 박막면이 15.7%, 공기관이 10.37%로 상당한 차이를 보였다.

(2) 구조 해석을 고려하지 않은 경우의 유동 해석과 실험

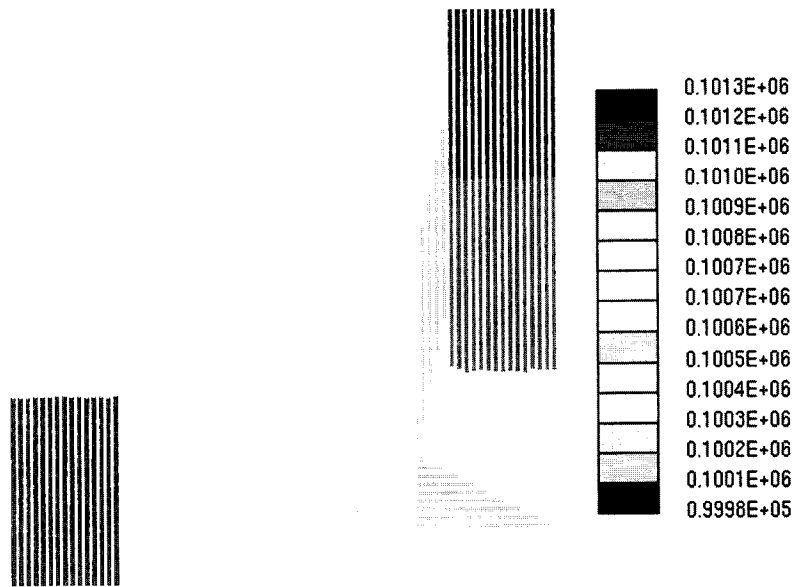
구조 변형 해석의 결과를 고려하지 않은 경우를 살펴보면, 다음의 <표 3-13>에 나타난 것처럼 입구와 출구 사이의 압력차에 대한 실험 결과와 해석 결과의 차이는 $\pm 1\%$ 내로 나타난다. 이 결과를 볼 때 해석과 실험의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 [그림 3-77]에서도 확인 할 수 있다. 실험과 해석 결과를 유량에 대해 나타내보면 [그림 3-77]에 보이는 바와 같이 거의 선형으로 나타난다. 그러므로, 동일한 모델의 경우 공급 유량에 대한 압력차의 추정이 가능하다. 또한 실험이 어렵거나 불가능한 경우를 전산 해석으로 대체함에 있어서 신뢰성이 보장되었다. [그림 3-78]은 Case5의 경우에 대한 압력분포도이다.

<표 3-13> 유동 해석과 실험의 압력차 결과 비교

Case	해석결과(Pa)	실험결과(Pa)	차이(%)
1	233.37	233.43	0.46
2	475.22	473.07	-0.45
3	728.10	730.82	0.37
4	990.60	984.84	-0.58
5	1263.66	1257.99	-0.45



[그림 3-77] 유량에 대한 압력차 비교



[그림 3-78] 압력 분포도

(3) 구조 해석을 고려한 경우의 유동 해석과 실험

구조해석 결과를 고려한 두 가지의 유동 해석의 결과를 살펴보면, 그 압력차의 차이가 평균적으로 6.48% 발생한다. 먼저 접촉 조건을 고려하지 않은 경우의 해석 결과와 실험 결과를 비교해보면, 입출구의 평균 압력차의 차이는 -4.51%이다. 다음으로 접촉 조건을 고려한 경우의 해석 결과와 실험 결과를 비교해보면, 입출구의 평균 압력차의 차이는 3.12%이다. 이 두 차이값의 절대값의 차이는 1.39%이다. 근소한 차이 이기는 하나 접촉 조건을 고려한 경우의 해석결과가 실험 결과와의 차이가 적음을 알 수 있다. [그림 3-79]와 [그림 3-80]은 각각 접촉조건을 고려하지 않은 경우와 접촉조건을 고려한 경우의 압력분포를 나타낸다.

<표 3-14> 두 가지 유동 해석에 대한 압력차 결과 비교

Line	해석결과(B)	해석결과(C)	차이(%)
1	1853.25	1981.54	6.47
2	1856.82	1985.44	6.48
3	1854.41	1982.87	6.48
4	1855.81	1984.28	6.47
5	1854.95	1983.41	6.48
6	1856.52	1985.03	6.40
7	1855.05	1983.49	6.47
8	1855.05	1983.62	6.48
평균값	1855.23	1983.71	6.48

B : without contact condition

C : with contact condition

단위(Pa)

<표 3-15> 접촉 조건을 고려하지 않은 경우의 해석과 실험의 압력차 결과 비교

Line	해석결과(B)	실험결과(D)	차이(%)
1	1834.99	1880	-2.39
2	1838.52	1910	-3.74
3	1836.14	2160	-14.99
4	1837.53	1820	0.96
5	1836.68	1940	-5.33
6	1838.23	1940	-5.25
7	1836.77	1930	-4.83
8	1836.77	1810	1.48
평균값	1836.96	1925.37	-4.51

B : without contact condition

D : with porous media

단위(Pa)

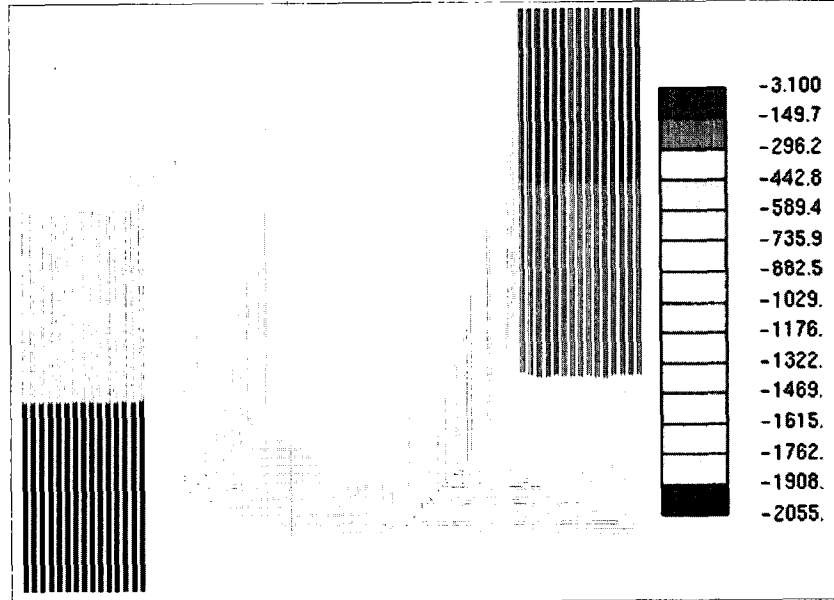
<표 3-16> 접촉 조건을 고려한 경우의 해석과 실험의 압력차 결과 비교

Line	해석결과(C)	실험결과(D)	차이(%)
1	1981.54	1880	5.40
2	1985.44	1910	3.95
3	1982.87	2160	-8.20
4	1984.28	1820	9.03
5	1983.41	1940	2.24
6	1985.03	1940	2.32
7	1983.49	1930	2.77
8	1983.62	1810	9.59
평균값	1993.71	1925.375	3.12

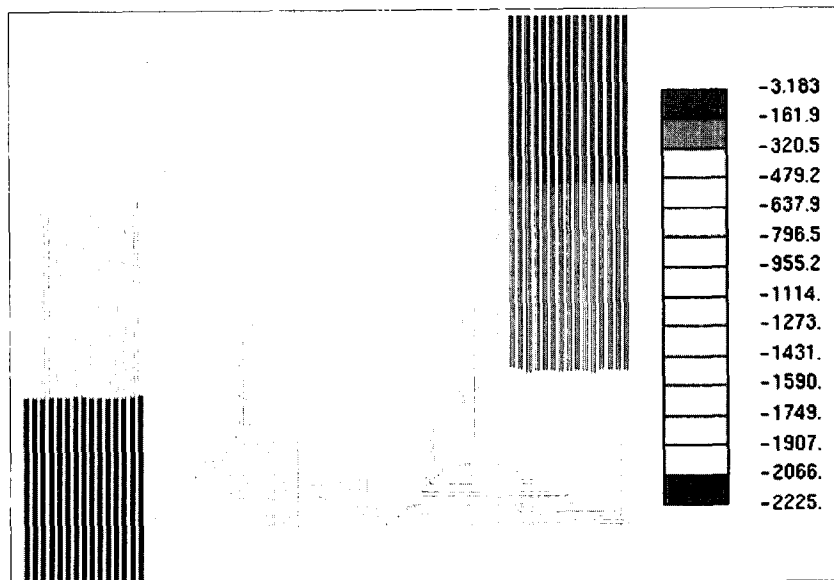
C : with contact condition

D : with porous media

단위(Pa)



[그림 3-79] 압력 분포도 (B)



[그림 3-80] 압력 분포도 (C)

(4) 구조 해석을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 유동 해석

위의 결과를 보면 작은 차이는 있지만, 접촉 조건을 고려한 경우의 해석 결과가 실험 결과와 더 유사하다. 이 경우에 대하여 구조해석을 고려하지 않은 경우의 해석 결과와 비교해보면, 다음의 <표 3-17>과 같은 결과를 얻을 수 있다. 입구와 출구의 평균 압력차의 차이는 36.3%로 상당한 차이를 갖는다.

<표 3-17> 구조해석을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 압력차 결과 비교

Line	A	B	차이(%)
1	1259.30	1981.54	36.45
2	1261.80	1985.44	36.45
3	1265.10	1982.87	36.20
4	1265.67	1984.28	36.21
5	1269.71	1983.41	35.98
6	1264.02	1985.03	36.32
7	1263.05	1983.49	36.32
8	1260.64	1983.62	36.45
평균값	1263.66	1993.71	36.30

A:구조적 변형을 고려하지 않은 경우

B:구조적 변형을 고려한 경우

단위(Pa)

구조적 변형을 고려한 경우 평균 압력차는 1993.71a이고 그렇지 않은 경우의 평균 압력차는 1263.66Pa이다. 두 가지 경우 모두 1000Pa에서 3000Pa의 허용 압력차의 범위를 만족시킨다.

근사 최적화 기법인 크리깅과 반응표면법을 이용한 최적화 프로그램을 작성하여 연료전지의 분리판의 경량화 소형화를 위한 다단계 최적화를 수행한 결과 MFD의 결과와 비교, 신뢰성을 확보할 수 있었고 기존의 도함수 방법의 단점인 긴 최적화 시간과 국부 최적점으로서의 수렴 등과 같은 문제를 근사 모델을 이용하여 해결할 수 있었다.

크리깅에서는 SA를 이용하여 관계식을 최대화하는 상관인자 θ_k 를 구하여 최적의 크리깅 모델을 구성하였고, 반응표면법에서는 반응표면을 생성하기 위하여 2차 회귀 모델을 선택하였으며, 회귀 상수를 구하기 위한 추출점은 중심합성법을 이용하여 구하였다. 모델의 정확도를 높이기 위해 먼저 설계변수의 전체 영역에서 최적점을 찾고 이 국부 최적점을 중심으로 다시 적절한 흥미영역을 설정하여 최적화 수행을 반복하다 적절한 수렴조건에 따라 프로그램이 정지하도록 하였다.

본 연구에서 살펴본 바에 의하면 크리깅과 반응표면법 모두 비선형 문제에서 신뢰할 수 있는 모델을 형성할 수 있으므로 연료전지 분리판을 최적화하는데 적합한 방법이라고 할 수 있으며, 크리깅의 경우 반응표면법보다 모델의 정확도나 수렴속도에서 더 좋은 결과를 보여주고 있다. 따라서, 연료전지 분리판의 설계에 있어서 근사모델을 이용한 분리판의 두께와 채널의 크기에 관한 최적화를 수행하면 좀 더 작고 가벼운 연료전지 설계가 이루어질 수 있다고 사료된다.

앞으로의 연구에서는 다양한 실험계획법을 통하여 좀 더 정확한 반응면을 생성하고 최적화 시간을 단축시킬 수 있는 더욱 향상된 알고리즘의 연구와 함께 최적화된 모델의 실제 모델에 대한 적용도 이루어져야 할 것이다.

또한 선행된 고분자 전해질 연료전지에 관한 연구들을 살펴보면 구조 변형을 고려한 연구는 유동 특성이나 전기화학적 측면에 비해 거의 이루어지지 않고 있었다. 구조해석 결과, 응력분포는 최대 응력이 허용 응력보다 상당히 작게 나타나지만, 구조 변형 해석 결과를 유동 해석에 적용 해본 결과, 박막면의 변형률이 크고, 그 변형이 유동의 흐름에 미치는 효과가 상당하므로, 계속적인 연구가 더 요구됨을 확인할 수 있었다. 또한 박막면의 구조적 변형은 화학반응과 물질전달에 영향을 주는 투과성을 부분적으로 변화시킬 수 있으므로 화학반응과 물질전달을 위한 해석을 수행할 때에도 박막면의 구조적 변형이 고려되어야 한다고 사료된다.

제 4 장 연료전지 스택 설계 및 해석

제 1 절 매니폴드와 인 입구 설계 및 해석

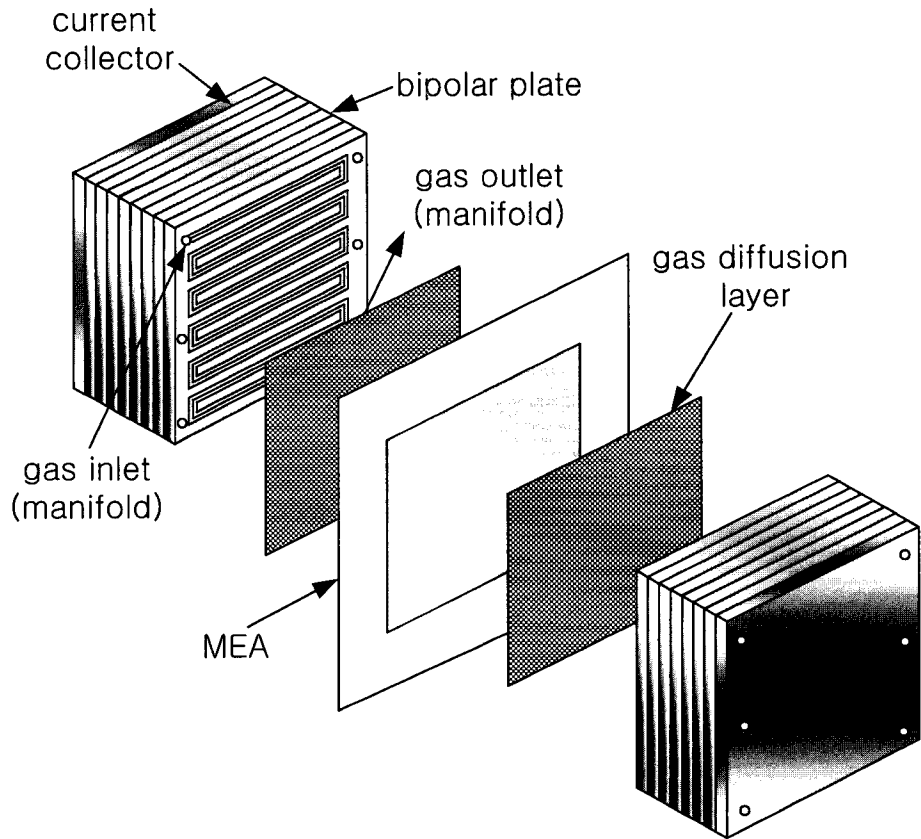
1. 스택 기술 개요

실제 연료전지 스택은 단위전지를 연속적으로 적층시킨 구조를 하고 있으므로, 개별 단위전지의 성능이 스택 전체의 성능에 직접적인 영향을 준다. 만일 분리판 각각의 채널에서의 반응 가스 공급이 불균일한 경우, 전류 및 온도 분포 또한 불균일하게 되어 국부적으로 전기 및 열적 과부하 상태에 놓이게 된다. 이 경우 전지의 효율저하는 물론 수명의 단축과도 직결되므로 채널의 형태와 크기를 결정하는데 있어서 채널 간 유동의 균일성이 반드시 고려되어야 한다. 특히 고분자 전해질 연료전지의 경우 100℃ 이하의 저온에서 작동되므로 가습을 위해 공급한 수분과 전기화학반응에 의해서 생성된 물이 채널 내부에 응축되어 반응가스의 공급을 저해할 수 있으므로, 수분의 원활한 배출을 위한 채널 입·출구 간 압력 차이가 중요한 설계 변수가 된다[20].

수 십 장의 단위전지가 반복적, 규칙적으로 적층되어 있는 스택을 설계하고 제작하기 위해서는 각각의 단위전지 내부의 반응 면적에 균일한 반응가스를 공급함과 동시에 수분 배출의 용이성, 단위전지 간 전압과 온도 차이의 최소화를 구현할 수 있는 구조가 되어야 한다. 이를 위해서는 우선 반응가스 및 냉각수의 각 단위전지 당 유량 분배율이 균일해야 하므로, 스택의 유동 설계 초기단계에서 매니폴드 내 유동분배구조에 대한 유체역학적 연구가 반드시 수반되어야 한다. 즉, 외부 공급원에서 연료전지 스택으로 유입되는 연료 및 공기를 각 단위전지로 공급하고 분배시키는 역할을 하는 매니폴드 내부의 유동 특성에 대한 정의와 그 하부단계인 분리판 채널에서의 유동 특성에 대한 유체·전달 현상에 대한 이해를 바탕으로 열/유체역학적 설계가 이루어져야 한다. 분리판 채널과 매니폴드에서의 반응가스 유동은 단면적을 흐르는 절대 유량과 유체 속도라는 측면에서 유체역학적으로는 층류와 난류라는 서로 다른 근본적인 차이점을 가진 독립적 유체역학적 유동처럼 보이나, 전달 현상론적으로는 연료전지 부하에 따른 분리판 채널에서의 반응가스 소모와 이에 따른 유동 패턴의 변화가 매니폴드 내부의 거시적 동적 거동에 영향을 미친다는 점에서 상호연관적인 관점에서 다루어질 필요성이 있다. 또한 반응가스의 공급 및 거동에 대한 유체역학적인 측면뿐만 아니라, 전기에너지에 상응하는 발생 열의 내부 분포 및 국부적으로 집중된

열부하에 대한 효과적인 제어기술이 연료전지의 최적 성능을 확보하는데 필수적인 만큼 스택 규모에서의 열 분포에 대한 정확한 예측/분석, 열 생성원에 대한 이해는 안정적인 연료전지 운전 및 최적화 설계를 위한 핵심 연구로 다루어져야 한다.

최근에는 매니폴드와 분리판 채널 내부의 유동 현상에 대한 이해를 토대로 매니폴드 및 분리판 채널의 유동 분배구조 설계를 하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있지만 이와 관련하여 발표된 논문은 매우 적은 실정이다. 기존에 수행된 연구결과들을 살펴보면, Boersma와 Sammes[21]는 고체산화물형 연료전지 스택의 1-D 모델에 대하여 각 단위전지 당 유량 분배에 관한 수치해석을 수행하였으며, Koh et al.[22]은 용융탄산염형 연료전지 스택의 1-D 모델에 유동저항 개념을 도입하여 매니폴드 유동 패턴에 따른 각 단위전지 당 유량 분배율에 대한 수치해석을 수행한 바 있다. 기존의 연구들은 단순한 파이프로 구성된 1-D 형상을 채널 및 매니폴드에 도입함으로써, 유동저항 개념을 도입하기 위해 필요한 기하학적 형상에 따른 압력손실계수에 대한 정밀한 실험 결과가 수반되어야 한다. 이에 본 연구에서는 기존의 연구결과를 토대로 3차원 모델을 통해 매니폴드 및 채널의 기하학적 형상에 대한 영향을 해석적으로 반영해 주었으며, 이론적인 접근을 통한 유체저항의 개념을 도입하여 스택설계를 함에 있어서, 매니폴드 및 채널의 기하학적 형상 변화에 따른 열/유동특성 예측을 위해 소모되는 해석시간과 비용을 절감하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 통해 정립된 모델을 이용하여 스택 설계 자료를 도출하기 위해 본 연구에서는 연료전지 스택의 최적 설계를 위한 분리판 채널 형상 설계, 매니폴드 유동 패턴, 매니폴드의 기하학적 형상, 공급 관의 급격한 기하학적 형상 변화로 인한 유동불안정 영역의 안정화를 위한 완충장치의 최적 길이 등에 대한 유동학적 관점의 수치해석과 단순열전달 모델을 적용하여 스택 내부 온도분포 및 열전달 현상 고려 유무에 따른 유동분배패턴의 변화에 대한 열/유동학적 관점의 수치해석에 대한 연구를 수행하였다.

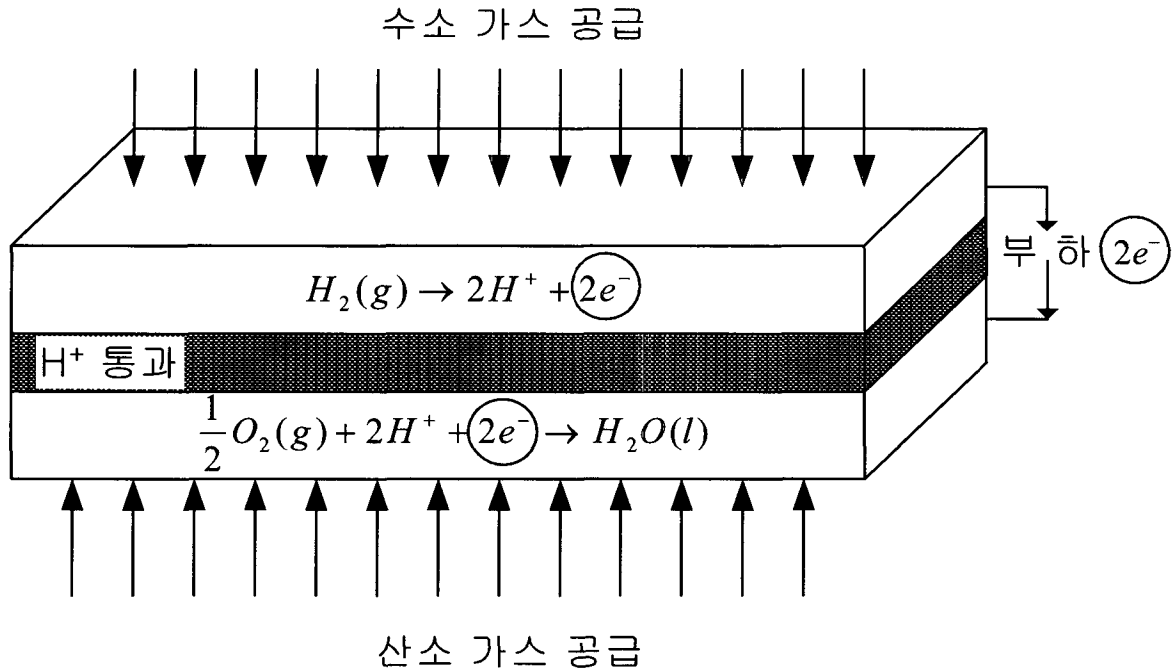


[그림 4-1] 고분자전해질 연료전지 스택 구성

2. 이론적 배경 및 지배방정식

가. 연료전지의 구성 및 작동원리

기본적으로 단위전지는 [그림 4-1]과 같이 전극/전해질막 접합체에 의하여 분리된 연료극 및 공기극의 두 분리판으로 구성되어 있으며, 각각의 분리판과 전해질 막 사이에는 다공성 확산층의 역할을 하는 carbon paper 혹은 carbon cloth가 놓여져 있어서 반응가스의 확산 및 전자의 이동통로역할을 한다. 연료전지의 작동원리는 수소와 산소의 반응에 의하여 생성되는 전자의 이동으로 설명할 수 있다. [그림 4-2]에서 보는 바와 같이 수소는 연료극 다공성 확산층을 통과하면서 수소이온으로 변환되는데, 이 수소이온은 전해질 막을 통과한 후 공기극 반응면에서 산소와 전기화학반응을 일으켜 물과 전류를 발생시킨다.

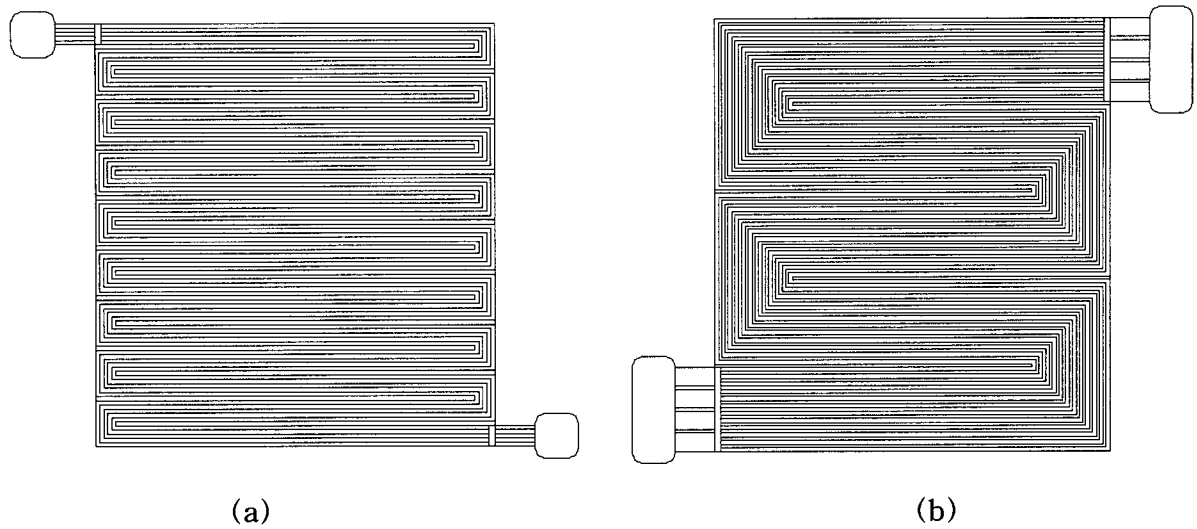


[그림 4-2] 고분자 전해질 연료전지 전극 반응 및 전기 흐름

분리판 내부의 채널은 반응 가스의 공급과 수분의 공급·배출에 중요한 역할을 하기 때문에 연료전지의 성능에 큰 영향을 준다. 현재까지 고분자 전해질 연료전지를 위해서 다양한 채널 형상이 제안되어 사용되고 있으나, 본 연구에서는 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 직사각형 단면을 갖는 다중 사행 형상의 채널을 선택하여 사용하였다. ([그림 4-3])

[그림 4-3]과 같은 다중 사행 형상의 채널은 입·출구 매니폴드와 채널 연계부분의 분기점을 제외하고는 각 채널에 독립적으로 유량이 공급되기 때문에 유동장과 압력장이 균일하며, 채널 간 압력차이가 균일하기 때문에 설계가 용이하다. 이에 본 연구에서는 매니폴드 설계 및 해석에 앞서 원활하고 균일한 유체 공급과 배출, 수분 배출 조건을 만족하는 채널의 설계 및 검증 단계를 통하여 최종적으로 채널형상을 선택하였다.

본 해석에서는 매니폴드의 종류 및 형상에 대한 영향을 고찰하고자, [그림 4-4]와 같이 분리판을 적층하여 실제 연료전지 시스템에 사용하는 스택과 동일한 형상을 갖는 모델을 사용하였다.



[그림 4-3] 활성 면적 100cm^2 . 연료극(a)와 공기극(b) 분리판 형상

나. 지배방정식 및 경계 조건

본 연구에서는 해석에 소요되는 계산시간을 단축하고, 요구되는 메모리 용량을 줄이기 위해서 몇 가지 가정을 도입하여 최대한 해석모델을 단순화하였다.

- 연료극에 공급되는 반응 가스는 연료개질장치로부터 공급되며, 수소 70%와 이산화탄소 30%의 조성으로 이루어져 있다.
- 개질 가스 및 공기는 이상기체, 비압축성이다.
- 개질 가스 및 공기는 채널의 전 구간에 걸쳐 농도구배가 일정하게 유지된다.
- 채널 내부의 유동은 층류유동이다.
- 매니폴드 및 채널 전 구간에 걸쳐 개질 가스 및 공기는 완전포화 상태이다.
- 매니폴드의 기본 형상은 직사각형 형태이다. (가공성의 편이 고려)
- 스택 및 채널의 작동온도는 일정하다.

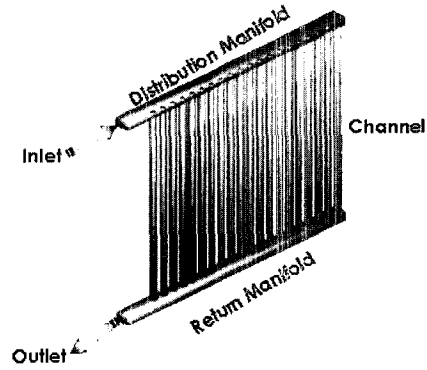
본 해석에서는 채널 및 스택의 유동장을 해석하기 위해서 기본적으로 연속방정식과 운동량 방정식을 사용하여, 정상상태에 대한 3차원 전산모사를 수행하였다. 해석에 앞서 식 (1)-(3)을 이용하여 채널 및 매니폴드의 형상에 대한 유동특성을 판단하였다. 가로 길이 a , 세로 길이 b 인 직사각형 단면을 갖는 경우, 접수주변길이와 수력직경은 식

(4-1)-(4-2)과 같다. 본 논문에서는 식 (4-3)에서 계산된 Re 수가 임계 Re 수(원형 관 유동의 경우 대략 2300)보다 작으면 층류, 이보다 크면 난류 유동특성을 갖는다고 보았다[23].

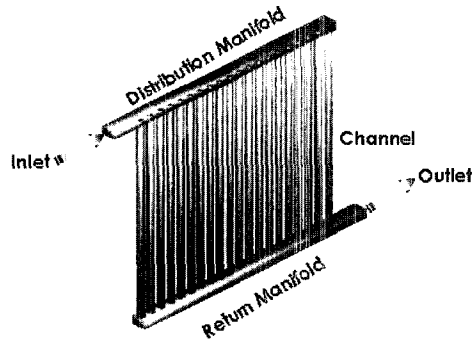
$$P_c = 2(a + b) \quad (4-1)$$

$$D_h = 4 \times \left(\frac{A_c}{P} \right) \quad (4-2)$$

$$Re = \frac{\rho u_m D_h}{\mu} \quad (4-3)$$



(a) U-shape manifold



(b) Z-shape manifold

[그림 4-4] 60개의 단위셀로 구성된 스택의 가스 입출구 패턴

<표 4-1> 표준 k-ε 난류 모델에서의 실험상수 값

C_μ	0.09	σ_h	0.9	$C_{\varepsilon 2}$	1.92
σ_k	1.0	σ_m	0.9	$C_{\varepsilon 3}$	1.44
σ_ε	1.22	$C_{\varepsilon 1}$	1.44	$C_{\varepsilon 4}$	-0.33

여기서 A_c 는 채널 단면적이며 a ,와 b 는 각각 채널 가로와 세로이며 U_m 은 유속 D_h 는 수력 직경 그리고 μ 는 점성계수이다.

스택의 유동 해석 시에 매니폴드 공급부의 유동 불안정 구간을 최소화하기 위해서, 식 (4-4)를 이용하여 층류 및 난류의 완전발달에 필요한 입구 길이를 계산한 후 완충 장치 설계에 이용하였다.

$$L_{e,laminar} \approx 0.06D_h Re$$

$$L_{e,turbulent} \approx 4.4D_h Re^{\frac{1}{6}} \quad (4-4)$$

매니폴드 및 채널의 내부유동이 층류인 경우에는 식 (4-5)-(4-6)의 지배방정식을 사용하였고, 난류인 경우에는 일반적인 난류모델 해석에 많이 사용되는 Standard k-ε 모델을 사용하였다. 이 모델은 Reynolds stress와 strain 간의 비선형적인 관계를 고려한 모델이다. 본 해석에서는 난류모델 선정에 있어서 매니폴드 도입부에서의 sudden expansion에 의한 벽면 부근의 유동의 영향 및 재순환 영역 발생과 같은 물리적 유동 특성, 해석시간 및 요구 메모리, 정확도 등을 고려하여 선정하였다. 표준(Standard) k-ε 모델의 실험적으로 결정된 난류 상수는 <표 4-1>과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4-5)$$

$$u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4-6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) \\ = & \mu_t (P + P_B) - \rho \varepsilon - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \mu_t P_{NL} \end{aligned} \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) \\ = & C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} [\mu_t P - \frac{2}{3} (\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}] + C_{\varepsilon 3} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_B \\ & - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 4} \rho \varepsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t P_{NL} \end{aligned} \quad (4-8)$$

$$P = 2s_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad P_B = -\frac{g_i}{\sigma_{h,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}, \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t$$

$$P_{NL} = -\frac{\rho}{\mu_t} \overline{u_i u_i} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - [P - \frac{2}{3} (\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\rho k}{\mu_t}) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}]$$

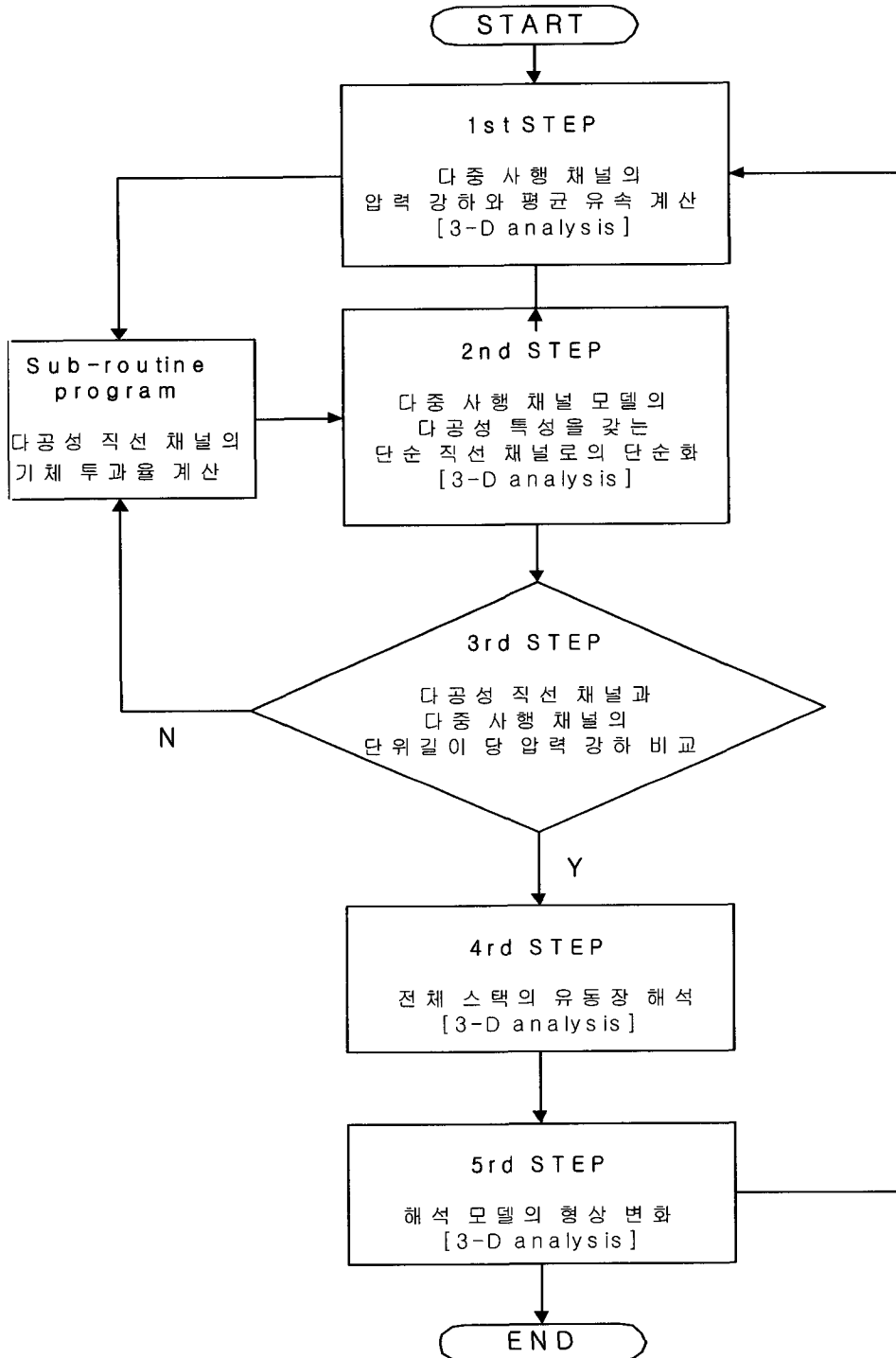
연료전지 전체 스택을 실제 형상과 동일하게 격자를 생성한 후 해석하기 위해서는 고사양의 시스템이 요구되며, 계산비용과 시간소요가 크다는 단점이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 축소모델을 도입하였다. 다중 사행 형상의 채널에 대한 유동해석 결과를 직선 채널에 적용하여, 식 (4-9)-(4-10)와 같은 채널 흐름방향으로의 마찰계수 항을 적용하였다. 이 해석과정은 부 프로그램을 적용하여 단위 길이 당 압력강하가 실제 모델의 해석결과와 일치할 때까지 수치적으로 반복 계산된다. 해석 절차는 [그림 4-5]와 같다.

$$f = C_1 \text{Re}^n (1 + \frac{C_2}{\text{Re}}) \equiv \frac{\tau}{\rho V'^2} \quad (4-9)$$

$$\frac{dP}{L} = -\frac{PC_1 \rho U^2 \text{Re}^n}{2\varepsilon^3 A} - \frac{PC_1 C_2 \mu \text{Re}^n}{2\varepsilon^2 A D_h} \quad (4-10)$$

여기서 f 는 저항손실계수이며 C_i 는 난류 상수이며, P 는 정압, 그리고 ε 은 난류 소산 계수이다.

본 해석에서는 채널의 단면에 수직인 방향인 k 방향의 저항 성분만을 고려하기 때문에 다음의 구속조건을 주었다.



[그림 4-5] 스택 유동장 해석을 위한 흐름도

$$\alpha_i = \alpha_j = \beta_i = \beta_j = 1 \times 10^5$$

여기서 α_i, β_i 는 각각 투과계수 [kg/m^4], [kg/m^3s]이다.

또한 채널 전 구간은 모두 유체가 통과할 수 있는 영역으로 가정하고, $\varepsilon_p = 1.0$ 의 조건을 사용하였다. α_k 는 식 (4-10)의 우변 첫 번째 항으로부터 계산되며, β_k 는 동일한 식의 우변 두 번째 항으로부터 구할 수 있다. 단, 이 두 값은 격자에 대한 의존성을 갖고 있으므로 해석에 사용한 격자의 종류에 따라 그 값이 변하게 된다. 해석모델은 기본적으로 입구와 출구의 경계조건을 갖는다. 매니폴드 공급관의 입구 경계조건은 주어진 유량으로부터 산출된 일정한 속도와 난류운동에너지, 난류 소산율을 주었다. 난류운동에너지는 주류 운동에너지의 10%로 가정하였고, 소산율은 난류의 길이 스케일을 확대 유로 폭의 7%에서 산출하였다. 출구 경계조건은 각 값의 유동방향 구배가 "0"라는 조건과 압력 경계조건을 사용하였다.

$$k = 1.5 \times (U \times l)^2 \quad (4-11)$$

$$\varepsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{k^{1.5}}{l_{mix}} \quad (4-12)$$

공급유량은 스택의 설계 및 작동조건에 의해서 이론적으로 계산한 값을 사용하였다. 설계조건 및 채널 및 매니폴드 형상에 대한 정보는 <표 4-2>와 같다. 식 (4-13)-(4-14)을 이용하여 각 단위 전지에 공급되는 반응 가스의 질량유량을 계산하였다[24].

$$\dot{m}_{H_2, cell} = (1.05 \times 10^{-8}) \times \frac{P_c}{V_c} \times \frac{1}{\xi_a} \quad (4-13)$$

$$\dot{m}_{Air, cell} = (3.57 \times 10^{-7}) \times \frac{P_c}{V_c} \times \frac{1}{\xi_c} \quad (4-14)$$

여기서 ξ_i 는 연료극과 공기극에서의 가스 이용율을 나타낸다.

<표 4-2> 분리판과 스택의 제원 및 운전 조건

Variable	Value
Nominal Power [kW]	1.2
Number of Cells	60
Gas-flow Type	U & Z Shape
Diameter of Supply Pipe	10.8 [mm]
Channel Width [mm]	1.0
Channel Depth [mm]	0.7 or 0.5
MEA thickness [μm]	620
Number of Channels	3(anode), 12(cathode)
Reformed Fuel Input	H ₂ 70% + CO ₂ 30%
Oxidant Input [Air]	N ₂ 79% + O ₂ 21%
The Usage of H ₂ Gas	0.7
The Usage of O ₂ Gas	0.4
Active Area [mm×mm]	100(W)× 100(H)
Expected Current Density	600 mA/cm ²
Cell Voltage [V]	0.7
Operating Temperature [°C]	60
Operating Pressure [Pa]	101,325

이론식에 의해 계산한 질량유량과 공급부의 단면적을 이용하여 입구 경계조건을 결정하였다. 수소 및 공기 채널, 매니폴드, 원형 공급 관에 대한 수력직경과 유동특성은 <표 4-3>과 같다. Re 수를 계산할 때, 개질 가스 및 공기 혼합 가스에 대해 이상기체 법칙과 Raoult의 분압 법칙을 적용하여 계산한 ρ_{mix} 와 μ_{mix} 을 사용하였다.

$$\rho_{mix} = \left[\sum_i \left(\frac{MW_i}{\rho_i} \right) \right]^{-1} \quad (4-15)$$

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_i \mu_i Y_i MW_i^{\frac{1}{2}}}{\sum_i Y_i MW_i^{\frac{1}{2}}} \quad (4-16)$$

식 (4-15)와 (4-16)에서 MW_i 는 반응 가스 각각의 분자량을 나타낸다. 여기서 각 반응 가스에 대한 ρ_i 와 μ_i 는 온도와 함수관계에 있다고 보았다[25]. 모든 반응 가스는 질량보존에 의해 질량분율(혹은, 몰 분율)의 합이 1로 유지된다.

<표 4-3>수력직경과 레이놀즈 수(Reynolds number)

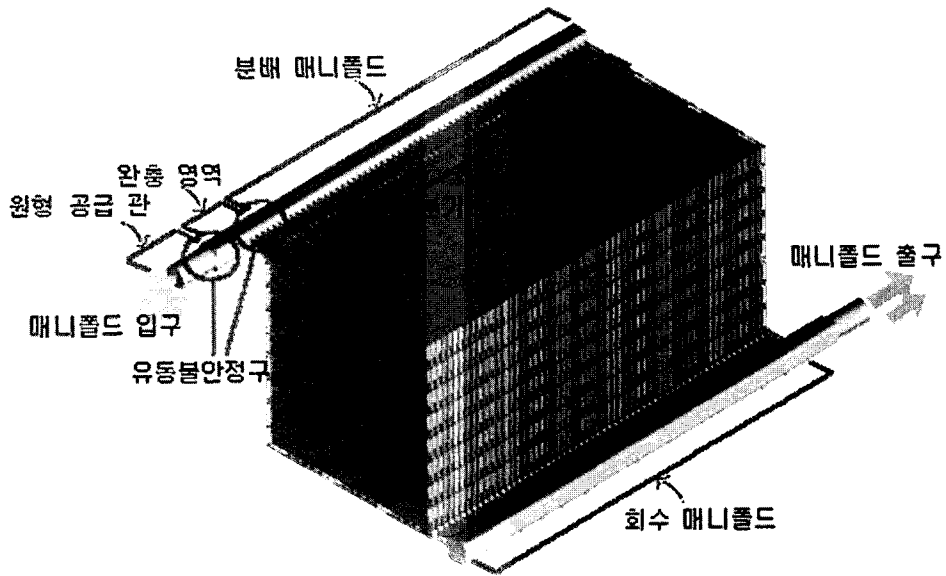
		Channel	Manifold	Supply Pipe
H2 +CO2	D_h [m]	0.000824	0.0109	0.0108
	Re	116	1625	2087
Air	D_h [m]	0.000824	0.0153	0.0108
	Re	132	4474	9509

$$\sum_i m_i = 1 \quad (4-17)$$

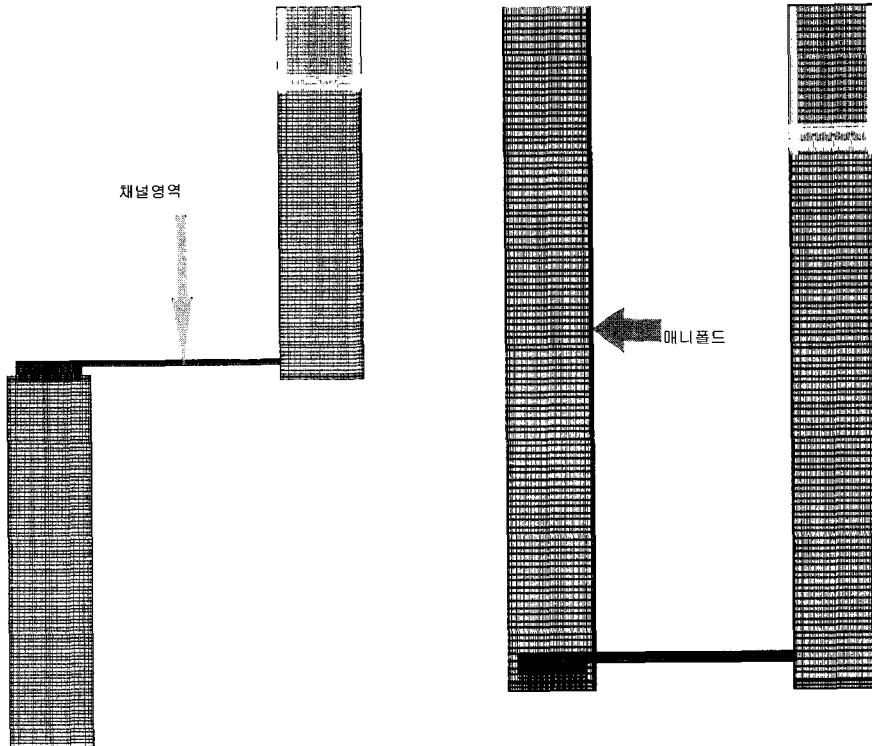
본 해석은 앞서 기술한 경계조건을 이용하여 SIMPLE 해법의 순서에 따라 해를 얻었다. 즉, 연속 및 운동량 지배방정식의 무차원화된 잔차가 10^{-5} 이하의 수렴조건을 만족시킬 때까지 반복계산을 수행하여 정상 해를 구하였다.

3. 계산 결과 및 고찰

고분자 전해질 연료전지에 반응 가스와 냉각수를 공급하거나 배출시키는 매니폴드는 일반적으로 분리판과 일체형으로 설계 제작되는 내부 매니폴드이다. 스택의 동력밀도를 높이기 위해서는 단위전지로 공급되는 유체의 배분율이 균일해야 하는데, 이를 위해서는 채널형상 설계, 매니폴드 종류, 매니폴드 형상, 공급 관의 형상, 유동의 안정화를 위한 완충 장치의 길이 등에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 매니폴드와 채널 간 유동특성을 분석하기 위해서 [그림 4-6]과 같이 단위전지가 적층된 전체 스택에 대한 해석을 수행하였다.



[그림 4-6] 고분자 전해질 연료전지 매니폴드와 스택 3차원구조

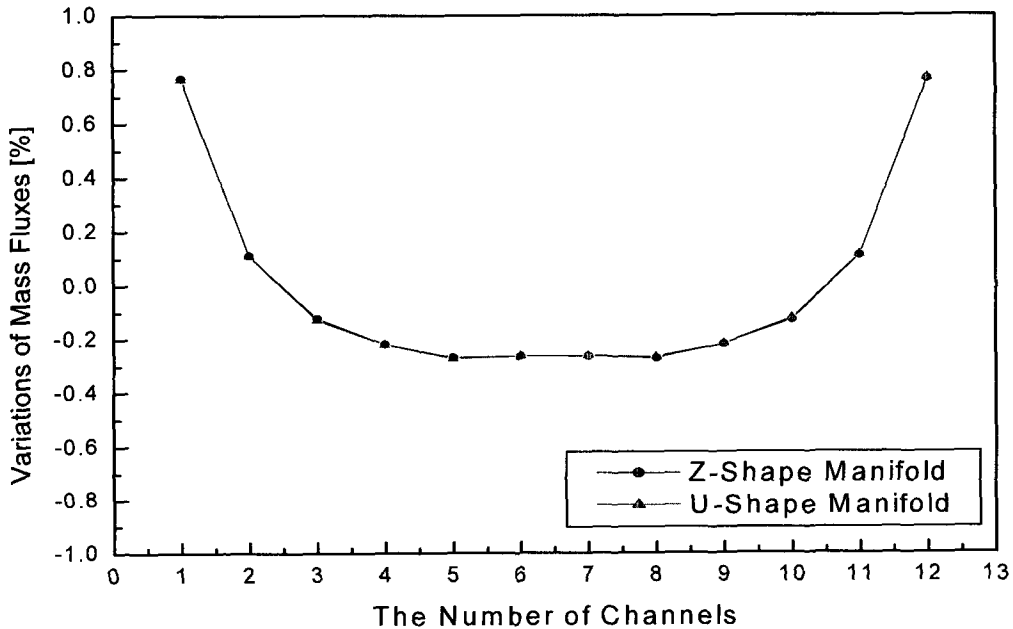


(a) Z자형 매니폴드

(b) U자형 매니폴드

[그림 4-7] 단위셀 모델에서의 그리드(grid) 구성

[그림 4-7]과 같이 해석모델은 매니폴드 형태와 매니폴드/채널 연결부의 기하학적 형상에 대한 효과를 포함하고 있다. [그림 4-8]의 해석 결과로부터 단독으로 단위 전지의 채널을 해석하는 경우, 채널 당 유량 분배는 매니폴드의 형상(U자형과 Z자형)과는 무관함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 채널에 대한 정상 상태의 유동 해석을 수행하는 과정에서 유동 발달 구간인 매니폴드의 길이를 유동 안정화에 필요한 입구길이 만큼 증가시켜 주었기 때문인 것으로 사료된다. 본 해석 결과로부터 매니폴드가 채널의 유동장에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 독립적인 채널에 대한 유동 해석이 아닌 전체 스택에 대한 유동 해석이 필요함을 알 수 있다.

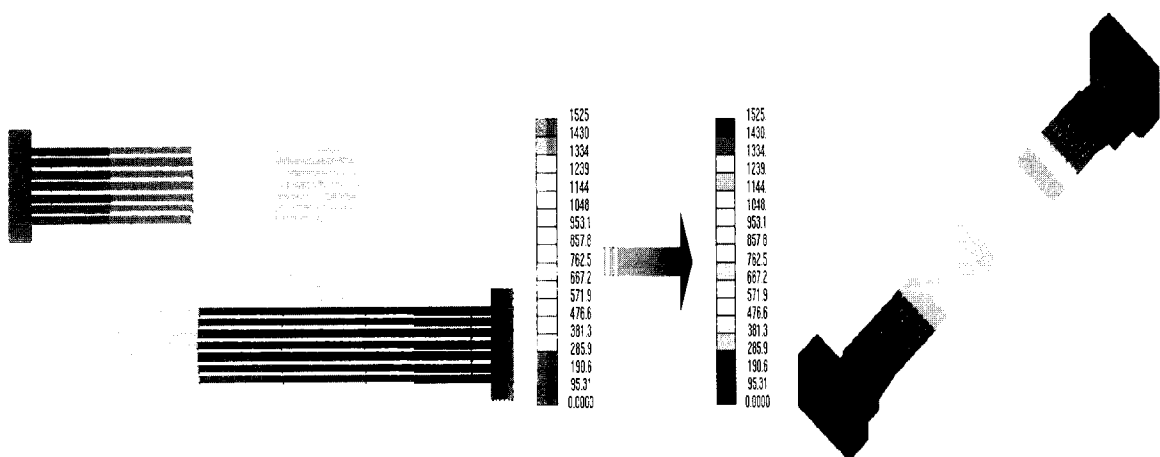


[그림 4-8] Z자형 매니폴드와 U자형 매니폴드 스택에서의 분리관 채널당 유량 분포

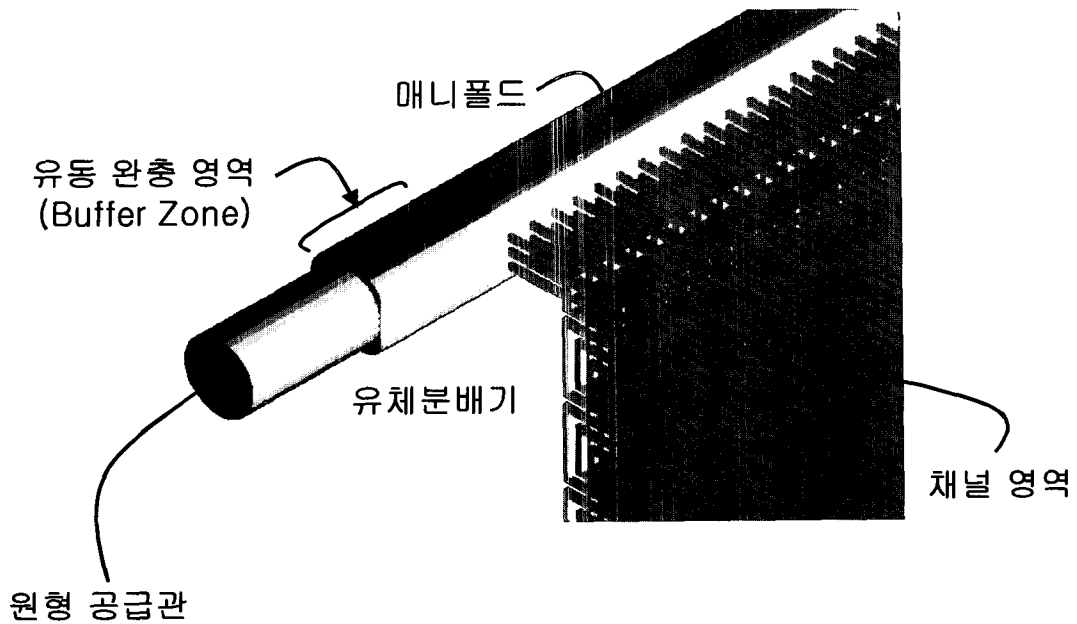
이를 위해서는 공기 채널의 유동뿐만 아니라 매니폴드, 원형 공급 관에 대한 유동을 모두 포함하고 있는 실제 스택과 동일한 모델을 구성해서 해석을 수행해야 하는데, 이와 같은 full model에 대한 해석을 수행하기 위해서는 과도한 해석 시간 및 고성능 컴퓨터 요구 등과 같은 여러 가지 문제점이 뒤따른다. 그러므로 본 연구에서는 [그림 4-9]와 같이 공기 채널 영역을 직선 채널로 단순화 시킨 모델을 사용하여 유동장 해석을 수행하였다. 공기 채널의 경우 공급 유량에 비례해서 개질 가스의 경우보다 채널

의 개수가 증가되는데, 이를 실제 다중 사행 형상과 동일하게 구현하기 위해서는 많은 수의 격자가 요구되므로, 스택 전체에 대한 유동장을 해석하기 위해서는 이 구간에 대한 모델 축소 작업이 필요하다. 이를 위해 본 해석에서는 다중 사행 형상의 채널을 단일 직선 채널로 대체하고, 단일 직선 채널에 porous 속성을 부여하였다. 이와 같은 해석 방법을 도입하면 단일 직선 채널이 다중 사행 형상에서 계산한 압력 차이와 평균 유속의 특성을 그대로 갖게 되므로, 원형 공급 관과 매니폴드 영역에 난류 모델을 적용하더라도 채널에서의 유동은 층류로 유지된다. 전체 스택의 유동장은 매니폴드 및 채널의 유동 정보 교류에 의해서 형성되므로, 이와 같은 해석 방법을 도입하면 매니폴드와 채널에서의 설계 변화가 전체 스택의 유동에 미치는 영향을 좀더 단시간에 정확히 예측 가능하다.

본 연구에서는 [그림 4-9]에서 알 수 있는 바와 같이 전체 스택을 해석하기에 앞서 다중 사행 형상을 갖는 실제 채널 형상과 동일한 모델에 대한 유동 해석을 수행하여, 해석 결과를 단일 직선 채널에 적용하였다. 다중 사행 형상을 갖는 공기채널의 유동 해석 결과로부터 채널의 입·출구 전체의 압력 강하는 1,163 Pa, 채널 내부의 평균 유속은 5~6 m/s가 됨을 알 수 있다. 채널의 단위 길이 당 압력 강하를 이용하여 채널 내부 흐름과 수직인 방향으로의 마찰 저항을 계산한 후 단일 직선 채널에 적용하여, 앞서 해석한 다중 사행 형상의 채널과 동일한 유동 특성을 갖도록 하였다. 이와 같이 하는 경우, 단일 직선



[그림 4-9] 단순화된 연료전지 분리판 채널 형상

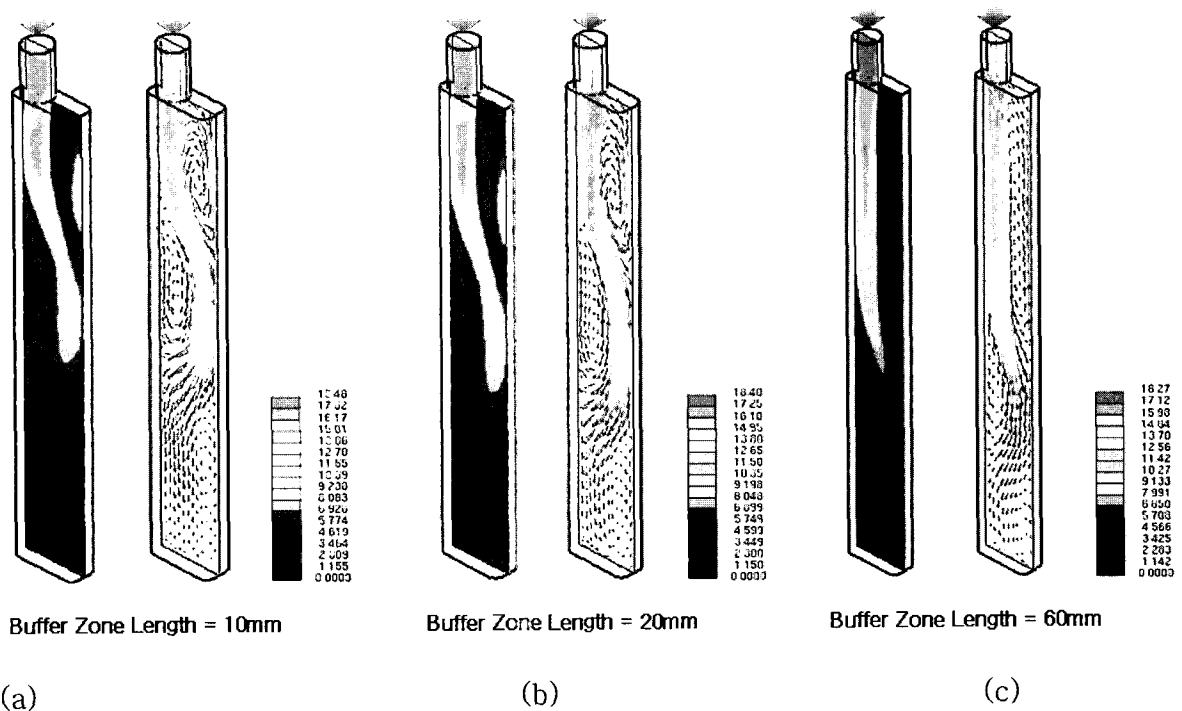


[그림 4-10] 스택 유체 공급 매니폴드 형상 및 구조

채널은 채널의 단면과 수직한 유동 흐름 방향에 대하여 1,505의 기체 투과율의 값을 갖게 된다. 본 해석에서는 전체 스택의 유량 분배 정도가 스택을 구성하고 있는 요소의 형상과 치수에 매우 민감하게 변화한다는 특성을 감안하여, 매니폴드와 단일 직선 채널의 연계 부분과 같이 기하학적 형상이 급변하는 구간에서는 실제와 동일한 형상의 모델을 사용하였다.

단순화된 연료전지 분리판 형상을 적용하여 스택 매니폴드에서의 유체 유동에 대해서 고찰하고자 한다. 효과적인 매니폴드 설계를 위해서는 [그림 4-10]에서 보이는 유체의 안정적, 효과적 공급을 위한 유동 완충 영역(Buffer Zone) 길이와 연료전지 출력 변화에 따른, 즉 매니폴드 입구 유속 변화에 따른 매니폴드 유동 현상 및 동특성적 매니폴드 유동 특성을 면밀히 분석하여 최적의 유량 분배 구조를 확보하여야 한다.

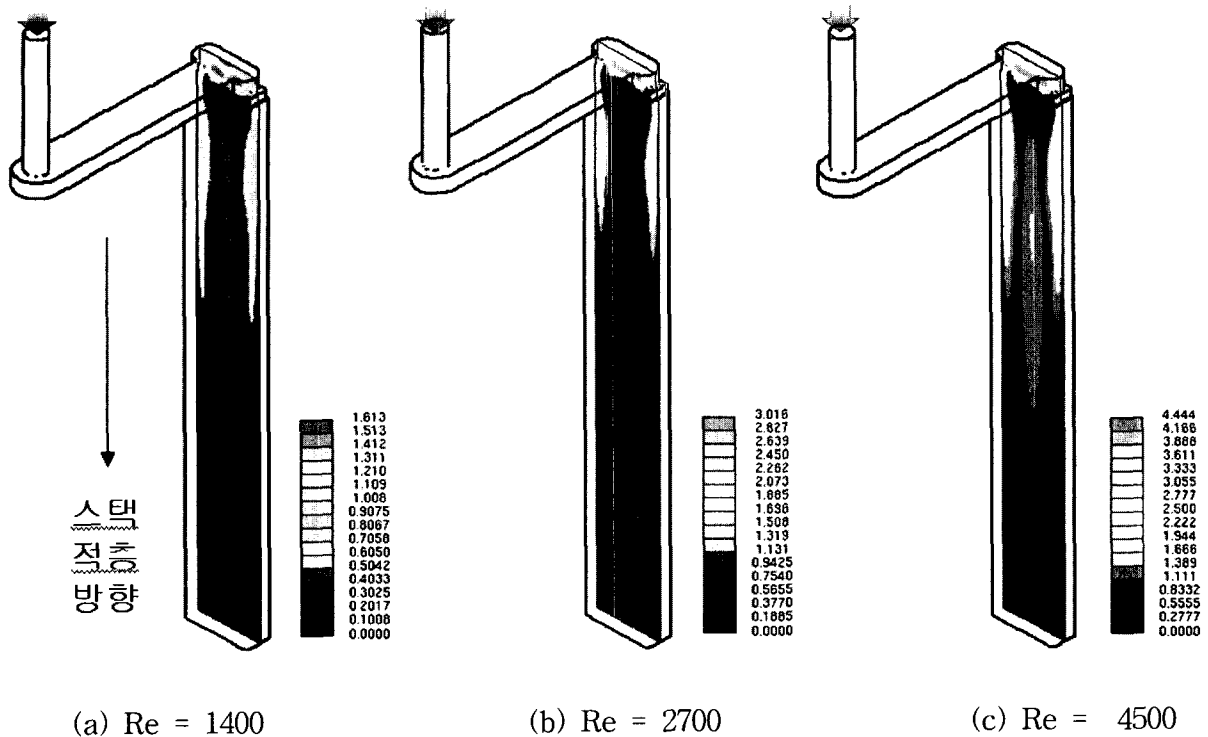
[그림 4-11]은 60 셀 스택에서의 유량 완충 영역 길이 변화에 따른 매니폴드 유동 벡터를 보여주고 있다. 매니폴드에서의 이상적인 유동은 채널 부위를 지나는 주유동층이 매니폴드 입구에서 출구 영역까지 안정되게 진행되는 유동 형상이다. [그림 4-11]을 보면 매니폴드 인입부로 진입한 주유동이 lumped flow pattern을 지님을 볼 수 있고 또한 주유동이 매니폴드 유로를 따라 진행하다가 2차 유동에 의한 영향으로 유동 형상이 휘어지



[그림 4-11] 완충 영역 길이가 매니폴드 유동에 미치는 효과

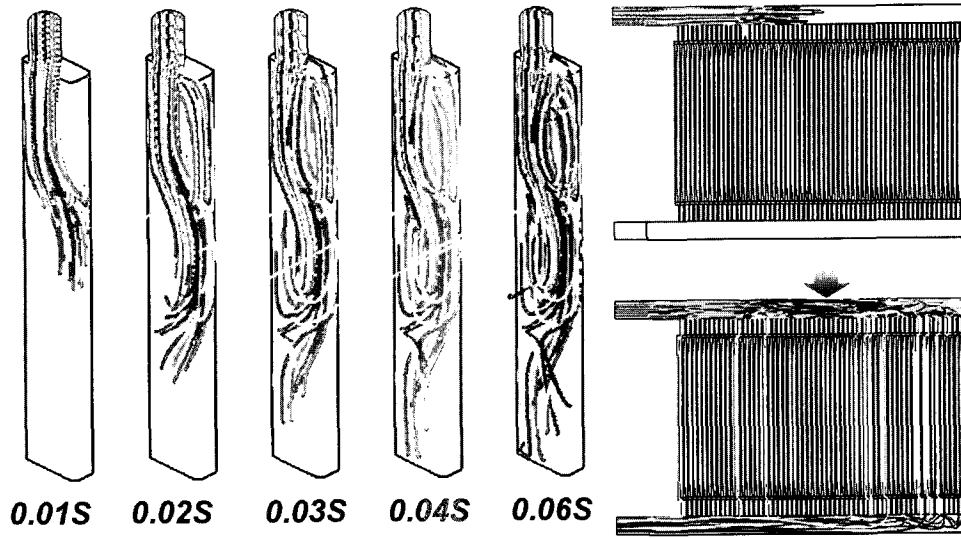
는 현상이 나타난다. [그림 4-11]로부터 완충영역의 길이가 증가할수록 ([그림 4-11] (a) → (c)) 입구 영역에서의 2차 유동의 영향이 감소하여 스택의 구성하는 셀의 끝부분에 가까운 곳에서 이러한 유동 휨 현상이 나타나는 결과를 보여주고 있다. 반대로 유량 완충 영역의 길이가 짧아지는 경우 ([그림 4-11] (a)의 경우) 매니폴드 입구 영역에서 2차 유동층이 주 유동의 주변에서 일찍 발달하여 스택을 구성하는 많은 셀이, 예를 들면 매니폴드 유로 시작점으로 부터 1/3지역부터 2/3지역에 있는 셀들은 주 유동과 접촉하지 못하고 있어서 결국 이 영역의 셀들은 유동 기근 현상 (flow starvation phenomena)을 겪게 되어 전체적으로 불균일한 매니폴드로부터 셀로의 유동 분배현상과 함께 스택 성능을 저하시키는 원인을 제공하게 된다.

[그림 4-12]는 연료전지 스택의 출력이 증가하여 매니폴드로 진입하는 스택 유량이 증가하는 경우를 모사한 60셀 스택의 스택 적층 방향으로의 유체 역학적 속도 분포 [m/s] 결과를 보여준다. 특히 매니폴드에서 각각의 셀로 분배되는 현상을 모사하기 위하여 유동이 진행되는 방향으로 셀이 적층되어 있다고 가정한 벽면에 유동 소멸향 조건을 부여하였다. [그림 4-12] (a)는 Re수가 2300보다 작은 층류 매니폴드 유동을 보여주고 있



[그림 4-12] 스택 유량 증가에 따른 매니폴드 유동 패턴

으며 (b)는 천이영역, (c)는 난류영역에서의 유동 패턴을 대표한다. [그림 4-12]에서 보듯이 연료전지 스택 출력이 증가할수록 매니폴드 유로 단면을 지나는 속도의 크기도 비례하여 증가하고 있으며 층류영역에서 난류유동으로 유동의 특성이 변화하고 있다. [그림 13]은 유동 완충 영역의 길이가 10mm인 스택/매니폴드 유동의 시간에 따른 유동 전파 형상을 보여주고 있다. 차량용 연료전지의 경우 운전자의 가속 또는 감속 패턴에 따라 매우 큰 단위시간당 유동 변화를 겪을 수 있다. 특히 유량이 갑자기 증가하는 경우에는 매니폴드 입구 영역에서 유동 기근 현상이 발생할 수 있는데 이를 예측하고 방지하기 위한 최선의 방편으로 연료전지 모델링 기술이 활용될 수 있다. 특히 1/100초 단위의 시간에 따른 유동 특성 분석을 통해서 매니폴드 입구 영역의 설계를 변경하거나 또는 연료전지 운전 제어 프로그램을 효율적으로 구성하여 유동 기근 현상에 따른 차량 오작동을 예방할 수 있다.



[그림 4-13] 시간 변화에 따른 매니폴드 유동 발달 현상

제 2 절 스택 설계 및 해석 기술

1. 스택의 매니폴드 내 유동해석 및 설계

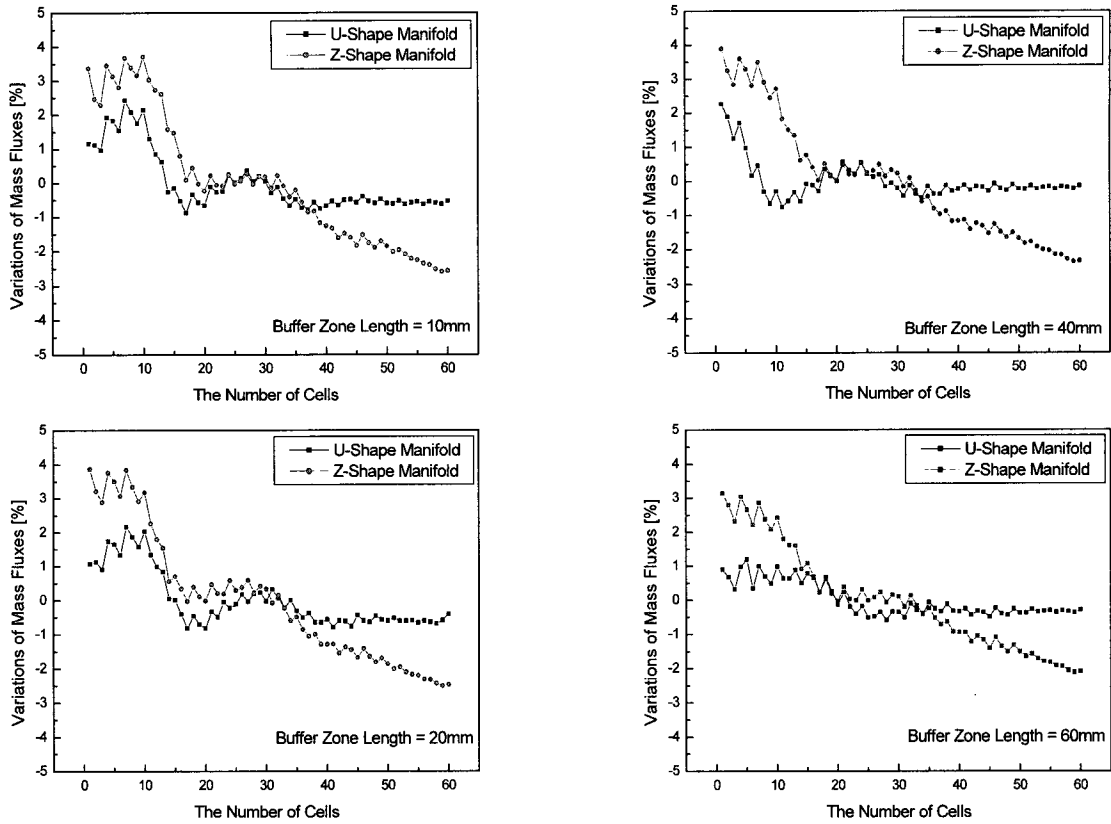
본 해석에서는 난류에 의해 발생하는 응력은 속도 구배에 비례한다고 가정하고, 일반적으로 널리 사용되는 standard $k-\epsilon$ 난류 모델을 도입하여 원형 공급 관을 통해 매니폴드에 공급되는 공기 유량이 각 단위 전지로 분배되는 정도를 확인하였다.

[그림 4-14]는 매니폴드의 형상과 완충 영역의 길이가 각 단위 전지 당 유량 분배율에 미치는 영향을 보여주고 있다. 이 경우 채널의 깊이는 0.7mm로 설정하였고, 원형 공급 관은 매니폴드의 하부에 위치해 있는 것으로 설정하였다. 고분자 전해질 연료전지의 경우 작동 온도가 60~80℃ 정도로 낮기 때문에, 가습을 위해 입구에서 공급한 수증기가 매니폴드 내부에서 응결하여 반응 가스의 공급을 저해하는 요소로 작용할 수 있으므로, 본 논문에서는 이와 같은 현상을 방지하기 위해서 원형 공급 관을 매니폴드의 하부에 연결하여 응축되어 있는 액체 상태의 물을 밀어낼 수 있도록 설계해 주었다. 이 경우 원형 공급 관과 매니폴드 연결 부분의 급격한 기하학적 형상 변화에 의한 불안정한 유동이 발생할 수 있다.

[그림 4-6]의 스택의 구조를 살펴보면 반응 가스 및 냉각수를 공급해 주는 공급 관과 매니폴드가 연결되어 있고 다시 매니폴드로부터 각 단위 전지의 채널로 유동이 분기되는

형태를 하고 있는데, 유동의 균일성을 저해하는 요인은 대부분 공급 관과 매니폴드의 연결부와 매니폴드와 채널의 연결부에서 발생한다. 특히 매니폴드와 원형 공급관이 인접한 부분에서는 많은 유량이 좁은 면적을 통해서 공급되기 때문에 유속이 빠르고 기하학적 형상의 급변으로 인해서 유동 재순환 영역이 발생하는 등 많은 유체역학적 불안정 요소들을 포함하고 있기 때문에, 매니폴드 내부의 유동을 안정화시키기 위해서는 매니폴드와 원형 공급관의 연계 부분 사이에 완충 영역이 필요하다. 완충 영역은 길이가 너무 길게 설계되었을 경우 완충 영역 자체에서 발생하는 압력 손실이 문제가 될 수 있고, 또한 실제 스택의 공간 제약에 의해 구현하기가 어렵기 때문에 적절한 길이를 설정해 주어야 한다. 본 연구에서는 기본적으로 실제 스택으로 구현 가능한 완충 영역 길이 범위를 10, 20, 40, 60mm로 설정한 후, 이에 대한 해석을 수행하였다. 이 경우 단위 전지와 매니폴드의 연결부는 계단 형상의 형태로 모델링 해주었는데, 이는 스택이 체결되는 경우 가스켓이 채널 내부로 파고 들어가 매니폴드와 채널의 연결 부분에서 단면적이 변하는 것을 방지하기 위한 덮개를 나타낸다. 스택의 매니폴드 내부의 유동은 난류이지만 이와 같은 불연속적인 계단 형상을 통과하면서 점차 층류로 천이되어, 채널로 공기가 공급될 때는 완전 층류의 특성을 갖게 된다.

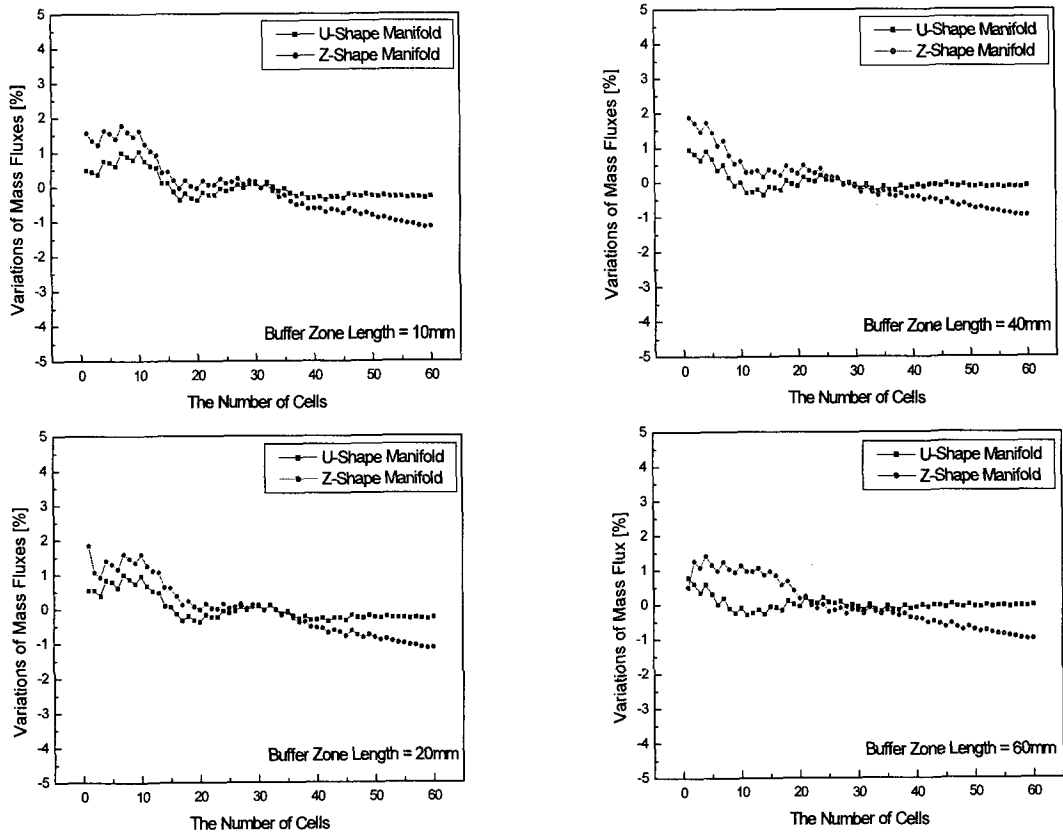
[그림 4-14]의 유량 분배 편차는 전체 공급 유량과 스택을 구성하고 있는 단위 전지의 개수를 이용하여 계산한 기준 유량에 대한 해석 결과의 차이를 비교한 것으로, (+) 부호는 기준 유량에 비해 적은 유량이 공급되는 것을 의미하고, (-) 부호는 기준 유량에 비해 많은 유량이 공급되는 것을 나타낸다. 해석 결과로부터 완충 영역의 길이와 무관하게 스택의 전단 부분 즉, 매니폴드의 입구 부분과 인접한 위치에 있는 단위 전지에 공급되는 유량이 평균 유량에 비해 2% 정도 적다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 원형 공급 관과 매니폴드의 연결 부분의 기하학적 형상의 급격한 변화에 의해 발생하는 유동 재순환에 의한 영향으로부터 기인한다. 이 구간에서는 유로의 급격한 확대에 따라 압력이 급상승하게 되어 매니폴드 전단 부분에서 박리 유동이 발생하게 되고, 이것이 매니폴드 전단 부분에 위치한 단위 전지에 공급되는 공기의 흐름을 방해하여 평균 유량에 비해 다소 적은 유량이 공급되도록 한다.



[그림 4-14] 60셀 스택에 있어서 U자형과 Z자형 매니폴드에 따른 유량 분포 비교
(Channel Depth = 0.7mm)

공기 공급용 Z자형 매니폴드를 장착한 경우, 완충 영역의 길이를 10mm, 20mm, 40mm, 60mm로 증가시켜 주면, 스택의 전단 부분에서 발생하는 평균 유량 대비 단위 전지 당 최고 유량 편차가 3.71%, 3.87%, 3.9%, 3.14%로 감소하는 경향을 갖는다. 마찬가지로 U자형 매니폴드 형태를 갖는 스택의 경우에도 완충 영역의 길이를 10mm, 20mm, 40mm, 60mm로 증가시켜 주면, 최고 유량 편차가 2.43%, 2.16%, 2.26%, 1.12%로 감소한다. 이를 통해 완충 영역의 길이를 증가시켜 주면 유동의 불안정에 의한 영향이 직접적으로 매니폴드 내부로 유입되지 않으므로, 각 단위 전지로 유입되는 공기의 유량이 좀 더 균일해진다는 사실을 알 수 있다. 해석 결과로부터 U자형 매니폴드를 사용하는 경우, Z자형 매니폴드를 사용하는 경우에 비해 47~70% 정도 최고 유량 편차가 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 본 연구에서 주어진 설계 요구 조건 및 스택 운전 조건을 이용하여 설계한 스택에 대해서

는, Z자형 매니폴드 형태보다는 U자형 매니폴드를 사용하는 것이 스택의 공간 활용도 및 구조적 안정성, 균일한 유량 분배 측면에서 매우 유리하다.



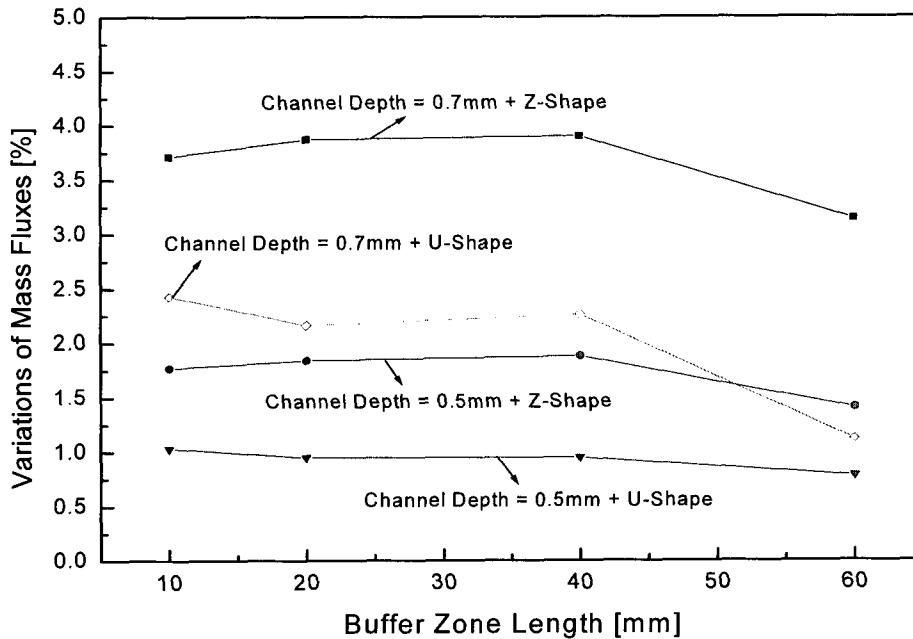
[그림 4-15] 60셀 스택에 있어서 U자형과 Z자형 매니폴드에 따른 유량 분포 비교
(Channel Depth = 0.5mm)

[그림 4-15]는 앞서 다루었던 스택에 대하여 분리판 내부의 채널 깊이의 변화가 U자형과 Z자형 매니폴드를 장착한 스택의 전체 유동장에 미치는 영향을 비교해서 보여주고 있다. 이와 같은 해석을 수행하기 위해 스택의 채널의 깊이를 0.7mm에서 0.5mm로 변경시켜 주었고, 스택 전체의 유동장을 해석하기 위한 절차는 앞서 사용했던 방법과 동일하게 하였다. 채널의 깊이가 0.5mm로 얕아지면 채널의 단면적 또한 감소하기 때문에, 채널의 깊이가 0.7mm일 때 공급했던 공기와 동일한 유량을 공급하게 되면 채널 내부의 평균 유속이 증가하게 되어 채널 전체의 압력 강하가 커지게 된다. 이를 위해 porous 채널 모델을 도입하기에 앞서 실제 형상과 동일한 다중 사행 형상의 채널에 대한 유동 해석을 수행하였다. 채널의 입·출구 전체 압력 차이는 2,558[Pa]로 기존의 채널 깊이 0.7mm인 경우에 비해 2.2배 증가하였다. 이 경우 채널의 단위 길이 당 압력 차이를 이용하여 단일 직선 채널에서의 단

면에 수직한 유동 방향에 대한 기체 투과율(gas permeability)을 재계산한 후 전체 스택에 대한 유동 해석에 적용하였다.

해석 결과로부터 Z자형 매니폴드를 장착한 스택의 경우, 완충 영역의 길이를 10mm, 20mm, 40mm, 60mm로 증가시켜 주면, 최고 유량 편차가 1.77%, 1.84%, 1.88%, 1.41%로 변하는 것을 알 수 있다. Z자형 매니폴드를 사용하는 경우에는 매니폴드의 맨 끝 부분이 폐쇄(dead end)되어 있으므로, 이 구간에서는 유동 관성에 의해 매니폴드 길이 방향을 따라서 흘러간 공기가 집중되는 현상이 발생하게 되어, 스택의 후단 부분으로 갈수록 각 단위 전지에 공급되는 유량 간 편차가 증가하는 경향을 갖게 된다. U자형 매니폴드 형태를 사용하는 스택의 경우에는 완충 영역의 길이를 10mm, 20mm, 40mm, 60mm로 증가시켜 주면, 최고 유량 편차가 1.03%, 0.95%, 0.93%, 0.78%로 감소한다. U자형 매니폴드를 장착한 스택의 경우, Z자형 매니폴드를 장착한 경우에 비해 스택의 후단부로 갈수록 유량 분배 편차가 감소하는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두 채널의 깊이가 0.7mm인 경우에 비해 최고 유량 편차가 50% 정도 감소한 것을 알 수 있으며, 단위 전지 당 유량 분배가 매우 균일해지는 것을 알 수 있다. 그러나 스택의 전단 부분, 즉 매니폴드의 입구 부분에는 여전히 유동 박리에 의한 유동 불균일성이 존재하는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 현상은 채널의 깊이를 감소 시킴에 따라 그 변동 폭이 감소하게 된다는 사실을 확인할 수 있다. 본 해석 결과로부터 채널의 깊이를 0.5mm로 하는 경우, 완충 영역의 길이를 20mm 혹은 40mm로 설계하는 것이 연료전지 시스템의 공간 활용도 및 유동의 균일성 측면에서 매우 유리하다는 결론을 얻을 수 있다.

[그림 4-16]은 U자형 매니폴드와 Z자형 매니폴드 형상을 갖는 스택에서 완충 영역의 길이와 채널의 깊이 변화가 각 단위 전지의 유량 분배에 미치는 영향을 비교해서 보여주고 있다. 채널의 깊이가 0.7mm인 경우와 0.5mm인 경우 모두 완충 영역 길이에 대한 유량 분배 편차 경향은 동일하게 유지되지만, 채널의 깊이가 감소하면 변화 폭이 50% 이상 감소하여 유동의 균일성이 증대되는 것을 알 수 있다. 그리고 두 경우 모두 완충 영역의 길이가 60mm인 경우에 유량 분배 편차가 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, U자형 매니폴드 형태를 사용하는 것이 Z자형 매니폴드 형태에 비해 각 단위 전지 당 유량 분배의 균일성 측면에서 상당히 우수하다는 것을 알 수 있다.



[그림 4-16] 버퍼존(buffer zone) 길이에 따른 유량 분포 변이

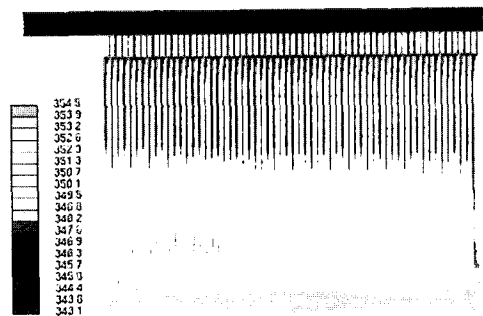
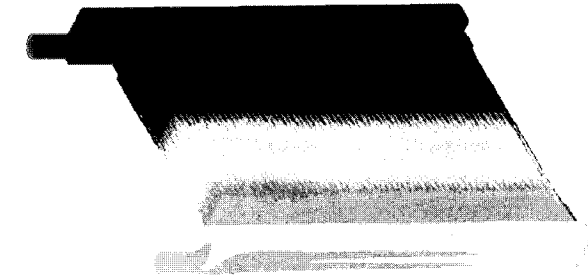
2. 스택 냉각수 공급용 매니폴드 내 열전달 해석

단순히 효과적 스택 냉각을 위한 냉각수 공급량과 스택 단위에서의 개략적 온도 분포만을 전산 해석의 대상으로 간주하는 경우에는 단순화된 모델로도 충분한 정보를 얻을 수 있다고 본다. 본 연구에서는 냉각 분리판을 제외한 영역을 단순화된 열 생성원으로 취급하였으며 전산 해석의 적용단계에서는 냉각 분리판의 제어 체적 면에 균일한 열 유속을 적용하는 방식으로 모델링하였다.

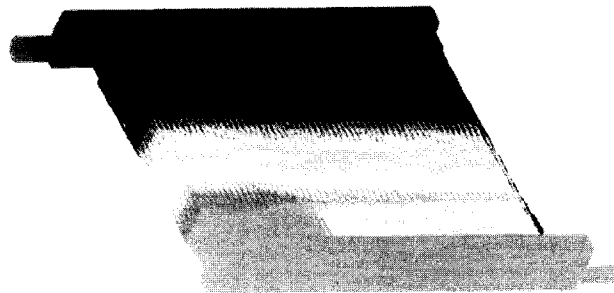
[그림 4-17]은 스택 규모로 확대한 스택 전체에서의 온도 분포를 보여준다. 스택의 매니폴드에서는 빠른 냉각수 유속으로 인하여 냉각수 도입부와 배출부에서의 온도구배는 거의 존재하지 않으며, 대부분의 온도 구배는 스택 냉각과정에서의 열 교환으로 인하여 단위 냉각 채널에서 발생한다는 것을 명확히 알 수 있다.



(a) U-shaped manifold feed-stream pattern



(b) Z-shaped manifold feed-stream pattern.



냉각수 공급용 스택 내부의 온도 분포 ($\Delta T = 10^\circ\text{C}$)

[그림 4-17] 60셀 연료전지 스택에서의 온도 분포

본 연구에서는 실제 고분자 전해질 연료전지에 적용이 가능한 채널 및 매니폴드 내부의 유동 설계와 전산해석을 통한 설계 검증에 대한 내용을 다루고 있다. 이를 위해 우선 유체 역학적 특성을 고려하여 분리판 내부의 채널을 설계한 후 전산 해석을 통해 유동 특성을 검증하였고, 이 해석 결과를 토대로 매니폴드를 설계하여 전체 스택의 유동 특성에 대한 전산 해석을 수행하였다. 전체 스택의 유동 해석 검증에 사용한 모델은 매니폴드와 원형 공급 관의 연계 부분의 형상, 완충 영역의 길이, 분리판 채널의 깊이, 매니폴드 형태에 대한 영향을 모두 고려하였다. 또한 본 연구에서는 해석 소요 시간 및 컴퓨터 하드웨어의 제한을 줄이기 위해서 일정 부분 가정을 도입하여 모델을 단순화시킨 후 해석을 수행하였는데, 이와 같은 해석 방법은 다른 스택의 전산 해석에 바로 적용이 가능하다. 본 연구로부터 매니폴드 형상에 대한 유동 특성을 고찰하기 위해서는 반드시 스택 전체에 대한 해석이 필요하며, 스택의 유동 특성은 공급 관과 매니폴드 연계 부분의 기하학적 형상에 따라 변한다는 사실을 확인할 수 있었다. 공급 관과 매니폴드 연계 부분의 형상에 의해 변화하는 마찰 손실 계수는 분배 및 회수 매니폴드 내부의 압력 분포에 영향을 주며, 이로 인해 U자형 혹은 Z자형 매니폴드 형태의 각 단위 전지 당 유량 분배 경향이 변하게 된다.

본 해석모델에 대해서는 U자형 매니폴드가 Z자형 매니폴드에 비해 각 단위전지로 공급되는 유량 분배가 균일한 것을 알 수 있었으며, 스택의 분리판 채널 깊이를 감소시킬 경우 채널전체의 압력 손실은 증대되나 유량분배 성능은 향상되는 것을 알 수 있었다. 스택 내부의 유량분배특성은 매니폴드와 채널의 기하학적 형상 변화에 따라 달라지므로, 본 해석모델과 다른 유동구조를 갖고 있는 스택에 대해서는 U자형보다 Z자형의 매니폴드를 사용했을 때 보다 균일한 유량분배 성능을 보일 수 있다. 이러한 스택 유동 특성 연구와 더불어 본 연구에서는 단순화된 열전달 모델을 적용한 스택 내 온도 분포에 대한 수치적 모델을 개발하였다. 온도 구배를 고려한 경우, 매니폴드로부터 채널로의 유동분배 편차가 줄어들 수 있었으며 이는 온도 증가에 따른 냉각수 점성 감소에 따른 유량 분배 특성 향상으로 유추될 수 있다. 이와 같은 해석 결과는 본 연구에 사용한 스택에 국한해서 활용할 수 있는 자료이며, 만약에 연료전지 시스템의 운전 조건 혹은 스택의 설계 조건이 변경되면, 그에 따라 채널의 형상 및 매니폴드의 크기가 달라지므로 스택의 유동 특성도 바뀐다. 따라서 본 연구 이외의 스택 유동장 설계를 위해서는 각각의 경우에 대한 개별적 전산 해석이 수반되어야 한다. 이 경우, 본 논문에서 제시한 전산 해석 기법을 도입하면, 컴퓨터 하드웨어적인 제약 및 해석 소요 시간을 줄일 수 있다.

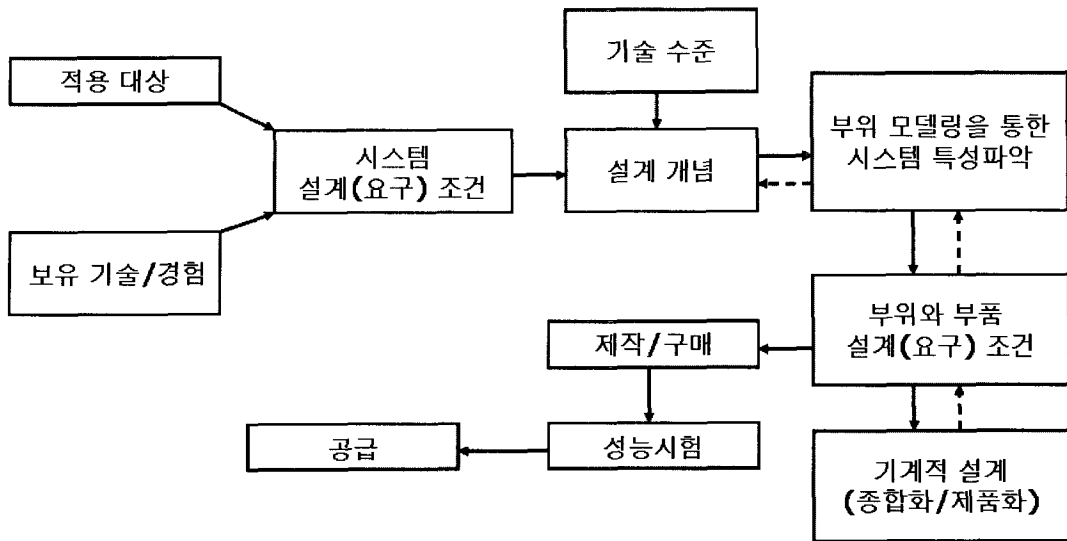
제 5 장 연료전지 시스템 설계 및 해석

제 1 절 시스템 해석 기술 개요

연료전지 시스템은 연료전지 스택 이외에, 연료변환장치, 급기설비, 열 및 물관리 설비, 전력변환장치 그리고 제어 장치 등으로 구성된다. 연료전지 시스템 성능은 연료전지 자체의 성능뿐만 아니라 주변 운전장치의 성능에 영향을 받으며 제어방법에 따라서도 성능이 변할 수 있다. 따라서 설계 단계에서 부품은 물론 전체 시스템의 정격상태 성능과 전 운전 영역에서의 평균성능을 예측하는 것이 필요하다. 실제로 연료전지 스택 자체만을 고려할 경우 전기 변환 효율이 약 40~60% 정도로 매우 높으나, 부속 설비의 동력을 고려할 경우에 효율이 30-40% 정도로 감소하며 시스템을 최적 구성하기 위해서는 종합화된 시스템 측면에서의 운전까지 고려한 설계와 성능 예측이 필요하다.

코제너레이션의 연료 절감율은 성능을 나타내는 주요한 척도이다. 보일러와 계통선에서 열과 전기를 공급받는 기존방식에 비해 연료전지 코제너레이션 시스템의 경우 20% 이상 에너지 절감율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 10kW이하의 작은 용량 발전설비의 경우 기존 내연기관이나 마이크로 가스터빈 등으로는 대형 발전소와 같은 수준인 30% 이상의 전기 효율을 기대할 수 없으나 고분자 전해질 연료전지를 적용할 경우 1kW급에서도 35%의 전기 효율을 기대할 수 있으며 열회수까지 고려할 경우 80%에 가까운 열효율을 달성할 수 있다. 열과 전기에 대한 에너지 수요를 만족시키면서 이와 같이 시스템을 고효율로 유지하기 위해서 시스템 설계는 물론 운전방법에 이르기까지 최적화가 필요하다.

독립 운전되는 연료전지의 경우 수시로 변하는 에너지 수요에 대비하여 에너지저장 시스템과 복합적으로 연계하여 구성하는 것이 바람직하다. 전원으로서 연료전지와 축전지를 복합적으로 구성하는 경우 연료전지의 출력에 의해 축전지의 충전이 이루어지며 충전된 축전지와 연료전지로 수요 부하를 분담하게 된다. 수요부하와 축전지 충전 상태, 그리고 연료전지 시스템 성능을 복합적으로 고려하여 부하 분배율을 정할 수 있으므로 부품은 물론 시스템 전체의 해석이 필요하다. 연료전지 시스템의 경우 정격상태에서의 성능도 중요하지만 운전 조건과 환경에 따라 계속적으로 변하는 전체 부하 영역에 걸쳐 계산되



[그림 5-1] 연료전지 시스템 설계 및 해석 과정

는 평균 효율이 더욱 중요하다. 따라서 자동차용의 경우는 운전패턴에 따른 평균 성능, 분산형 전원의 경우는 계절간이나 연간 성능을 분석하는 것이 필요하다.

코제너레이션으로서의 연료전지 시스템 설계 및 구성에 관한 연구는 Wallmark[26.27], Inaka[28] 등에 의해 수행되었으며 실증 운전에 대해서는 Hamada[29] 등에 의해 수행되었다. Mehmet[30]은 미국의 대표적인 기후 조건과 전기히터 등 미국의 사용조건에 맞는 종합 에너지 시스템을 구성하여 연료전지 시스템 및 열저장조 온도에 따른 운전 방법을 설정한 후 열 해석 위주로 가정용 코제너레이션 연료전지 시스템의 계절별 성능을 분석하였으며 Lee[31]는 운전방식에 따른 성능을 분석하였으나 간이화된 모델식을 사용하였으며 개질기 등에 대해서 상세한 해석식이 사용되지 않았다. 본 연구에서는 연료전지와 축전지 복합전원으로 설계된 고분자 전해질 연료전지 코제너레이션 시스템에 대하여 실험을 기반으로 하는 모델식 사용과 개질기에 대한 상세한 열역학적 해석식을 이용하여 실질적으로 시스템 설계와 해석에 적용할 수 있는 프로그램을 개발하여 정격상태는 물론 계절별 성능을 분석하였다.

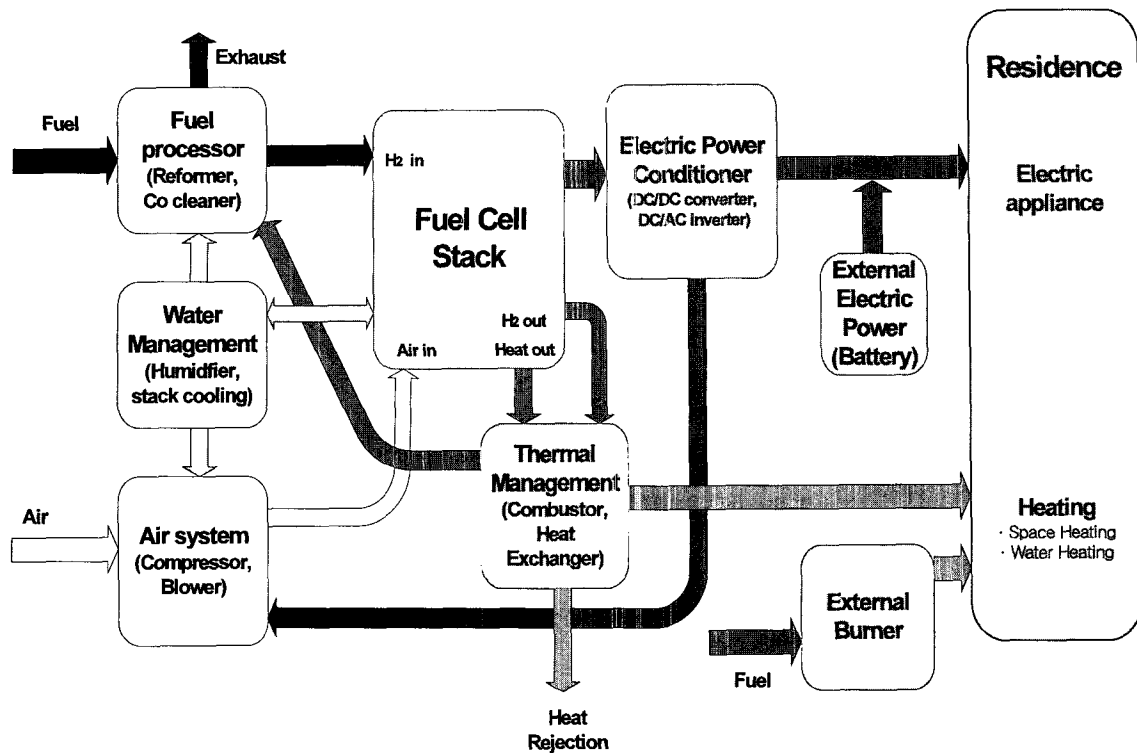
연료전지 시스템의 설계를 위한 방법은 일반적인 설계 과정과 크게 다르지 않으며 [그림 5-1]과 같이 나타낼 수 있다. 적용시스템에 대한 자체 경험과 보유 기술을 기반으로 개념설계를 수행한 후 부품의 모델식을 구하면 전체 시스템 성능을 분석할 수 있으며, 이를 통해 부품과 시스템의 설계 조건을 확립할 수 있으며 부품을 선정하거나 기계적인 상세 설계를 수행할 수 있다. 최종적으로는 설계자료를 바탕으로 부품과 시스템을 제작하여 성능 평가를 수행한다. 설계와 해석의 단계에서 반복적인 계산이 필요하며 제품 선정

을 위해서는 경제성과 성능을 고려한 절충과정이 필요하다. 본 연구에서는 구입가능한 제품의 경우 실험 자료를 바탕으로 특성방정식을 유도하였으며, 실험자료 확보가 어려운 경우에 이론적인 모델식을 사용하여 유용한 해석 프로그램을 구성하였다. 해석 프로그램은 새로운 시스템의 설계와 성능예측은 물론 시스템을 위한 부품 선정 및 제어 전략을 수립하는데 활용할 수 있도록 구성되어 있어서 용량이나 용도에 따라 시스템 구성품의 특성이 바뀔 경우에도 모델의 특성 자료의 용이한 변경에 의해 이들 부품으로 구성된 시스템의 성능을 미리 예측 평가 할 수 있다. 본 연구를 통해 주택용 연료전지 시스템의 성능을 예측할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였으며 이를 통해 설계된 시스템의 성능검증과 운전방식에 따른 시스템의 성능을 비교하여 최적의 운전제어 전략을 수립하는 방법을 확립하였다.

제 2 절 시스템 모델 및 부하 분석

1. 연료전지 코제너레이션 시스템 구성

본 연구에서는 열과 전기 설비로 포괄적으로 구성된 독립 운전 코제너레이션 시스템에 대한 해석을 수행하였다. 계통선에 연계되어 보조전원이 필요하지 않거나, 자동차와 같이 적극적인 열부하 제어가 필요하지 않는 경우에는 축전지나 열 저장조와 같은 부품을 제외시키고 시스템을 해석할 수가 있다. 고분자 전해질 연료전지 시스템의 대표적인 적용분야가 가정용 전원과 자동차용 전원이다. 본 연구에서는 독립 운전되는 가정용 코제너레이션 시스템에 대한 모델식 정립과 해석을 수행하였다. 연료전지 코제너레이션의 기본적인 개념도는 [그림 5-2]와 같다. 열과 전기를 생성하는 연료전지 스택, 열을 저장하는 온수 저장조, 전기에너지를 변환하기 위한 DC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터, 전기에너지를 저장하고 출력 부족 시 보충하기 위한 축전지, 겨울철과 같이 열부하가 급증하는 경우 부족한 열에너지를 보충하기 위한 보조 보일러, 가정으로 공급되는 천연가스를 수소로 전환하기 위한 개질기 등으로 전체 시스템이 구성된다.

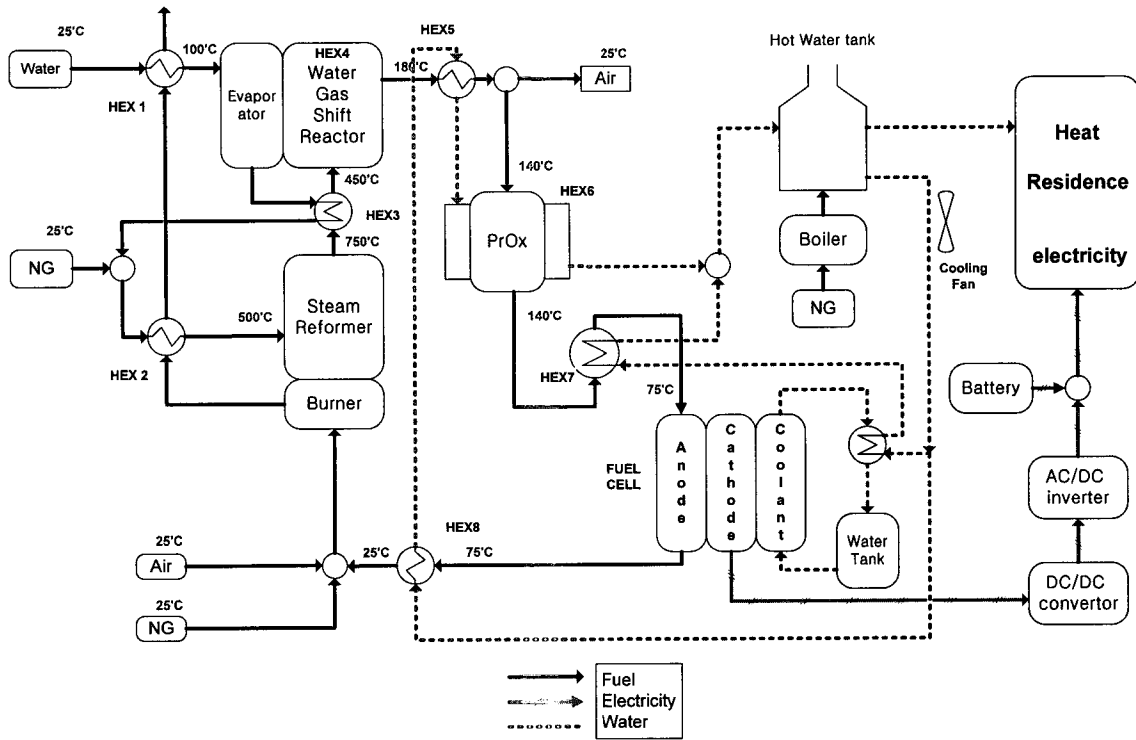


[그림 5-2] 연료전지 코제너레이션 시스템의 개념도

해석을 위한 가정용 연료전지 코제너레이션 시스템의 구성도는 [그림 5-3]과 같다. 주요 부위의 특성 방정식은 성능 실험자료를 바탕으로 유도하였다. 실제 측정자료가 없는 개질기의 경우는 이론적인 모델식을 사용하였다.

종합 연료전지 시스템은 연료전지, 전력변환장치, 축전지, 연료변환장치(수증기 개질기, 전이반응기, 선택산화기), 온수 저장조, 열교환기와 냉각팬, 보조보일러 등으로 구성되어 있으며 각 부위별로 에너지 위주의 모델식을 유도하여 사용하였다.

연료전지 출력은 다양한 제어 방식에 의해 결정될 수 있으며 본 연구에서도 다양한 운전 방식을 검토하여 최종적으로 평균적인 계절별 운전 성능이 가장 우수한 방법으로 온수 저장조와 축전지의 상태에 따라 출력조건을 결정하는 방식을 사용하였다. 연료전지의 출력량이 제어 전략에 의해 결정되어 조절되면 이에 따라 연동되는 부품의 사용에너지를 계산하여 시스템의 손실 에너지를 결정하였다.

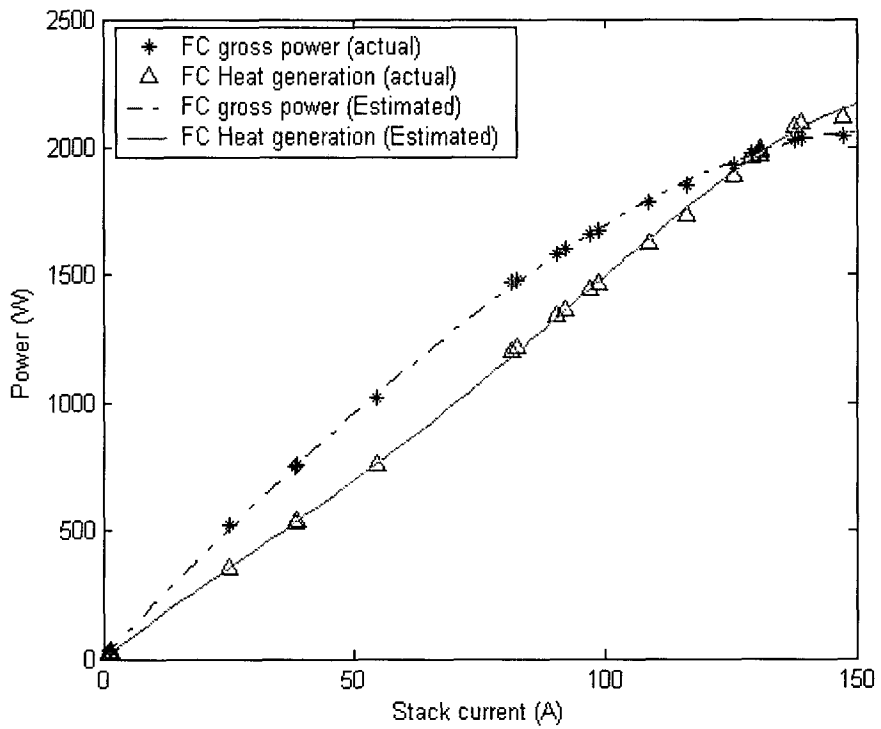
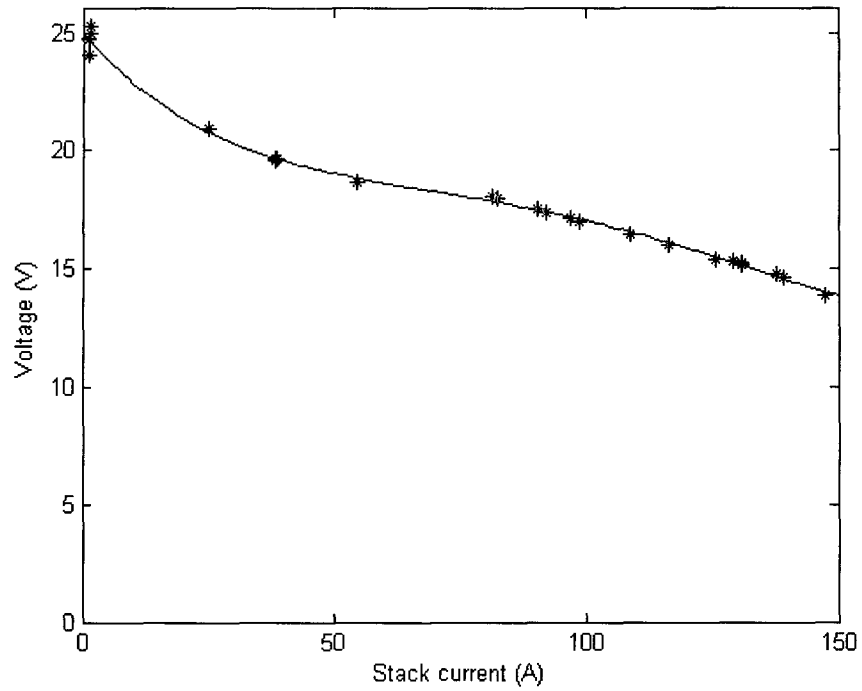


[그림 5-3] 전체 시스템 해석 모델

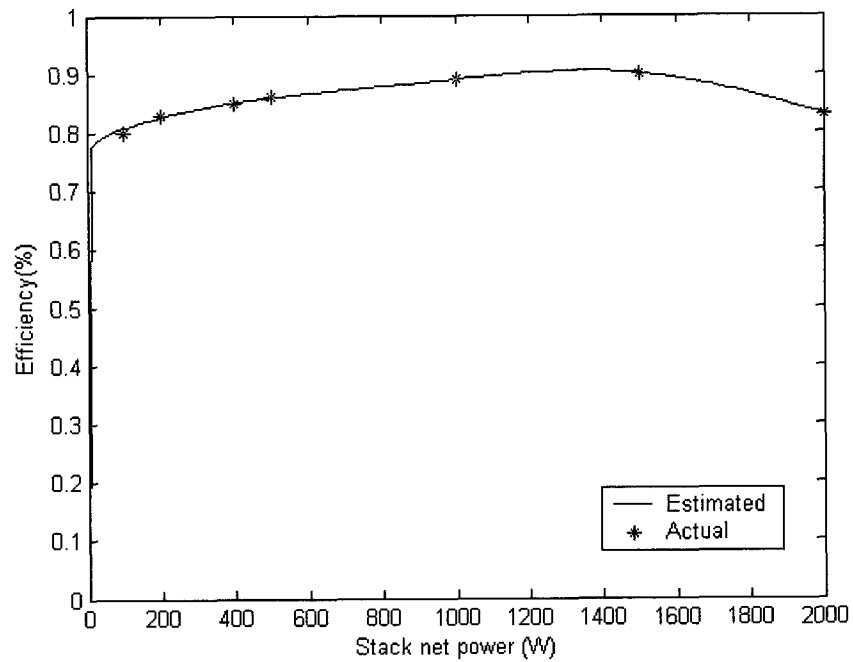
2. 시스템 모델 및 부하 분석

가. 연료전지

연료전지는 전기와 열을 동시에 생산하는 장치이다. 연료전지의 성능식은 실제 연료전지의 실험자료를 바탕으로 구하였다. [그림 5-4]가 해석에 사용된 1kW 연료전지의 전류-전압(IV) 특성곡선과 출력 특성이다. 연료전지 스택의 전극면적은 250cm^2 이며 셀의 개수는 30셀을 기준으로 해석하였다.



[그림 5-4] 1kW급 연료전지의 IV곡선 및 출력 곡선



[그림 5-5] 입력 전력에 따른 전력변환장치의 효율

나. 전력변환기

[그림 5-5]는 연료전지 출력에 따른 DC/DC 컨버터 및 DC/AC 인버터의 통합 효율을 나타낸 것이다. 해석을 위해 실제 제작된 전력변환기의 실험자료를 이용하여 특성식을 구하였다. 전력변화 장치의 효율은 전류가 500 ~ 900W 범위에서 85%에서 90%로 높게 나타나고 있으며 나머지 영역에서는 80 ~ 85% 정도이다.

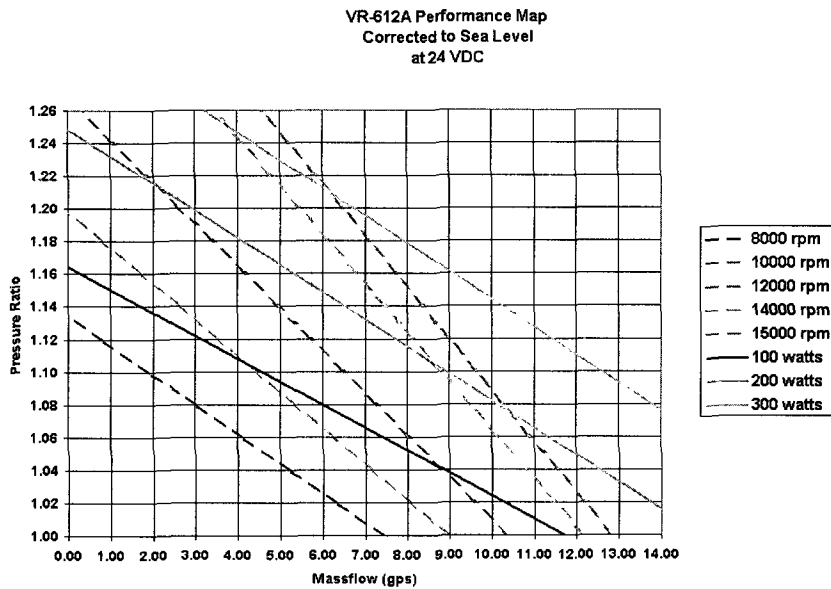
다. 운전 장치(Balance of Plant, BOP)

연료전지 시스템은 스택 이외에도 스택에 공기와 연료를 공급하고 온도 제어 등을 위한 운전 장치들로 구성된다. 운전장치로는 전력변환기와 연료를 공급하기 위한 연료공급 장치를 제외하더라도 산화제인 공기를 공급하기 위한 공기 압축기와 냉각 및 열관리를 위한 열교환기와 물 펌프, 시스템 제어를 위한 구동기와 센서 등으로 구성된다. [그림 5-3]에서 알 수 있는 바와 같이 별도의 동력을 필요로 하는 공기 및 도시가스 압축기, 펌프, 냉각 팬 등에 대하여 소비전력의 해석이 필요하다.

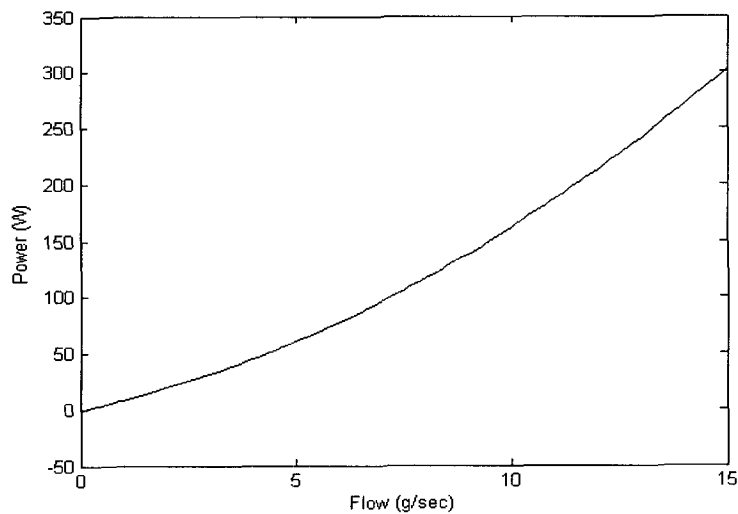
1) 공기 압축기

운전장치 중에서 가장 동력을 많이 사용하는 부위가 스택에 산화제를 공급하기 위한 공기 압축기로 실제 제작회사에서 제공하는 성능 자료를 이용하여 필요한 동력을 구하였다.

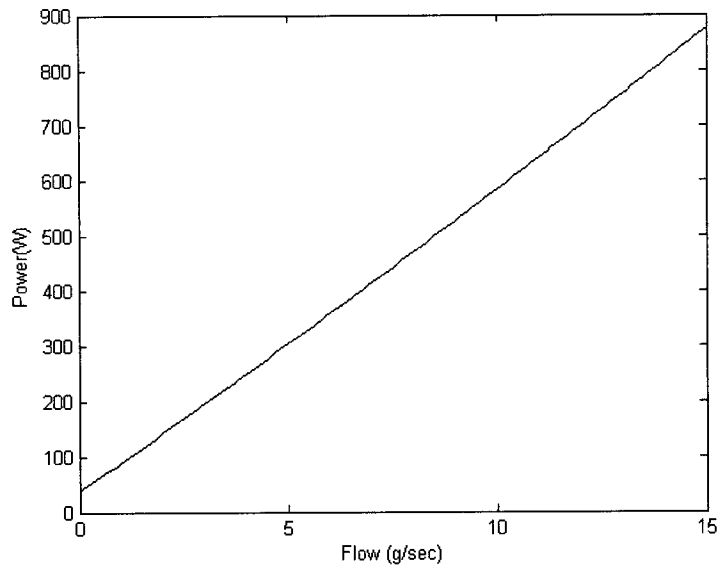
사용된 압축기의 데이터는 Vairex사의 VR-612A 모델로 공기 압축기이다. 제품의 특성곡선은 [그림 5-6]과 같다. [그림 5-6]의 성능을 이용하여 연료전지 운전에 필요한 공기량에 따른 소요 동력을 구한 것이 [그림 5-7]이다. 공기 압축비는 1.06bar로 하였다.



[그림 5-6] 사용된 공기 압축기 성능 곡선



[그림 5-7] 사용공기량에 따른 압축기 소비 동력



[그림 5-8] 유량에 따른 연료 압축기의 소비동력

2) 연료 압축기

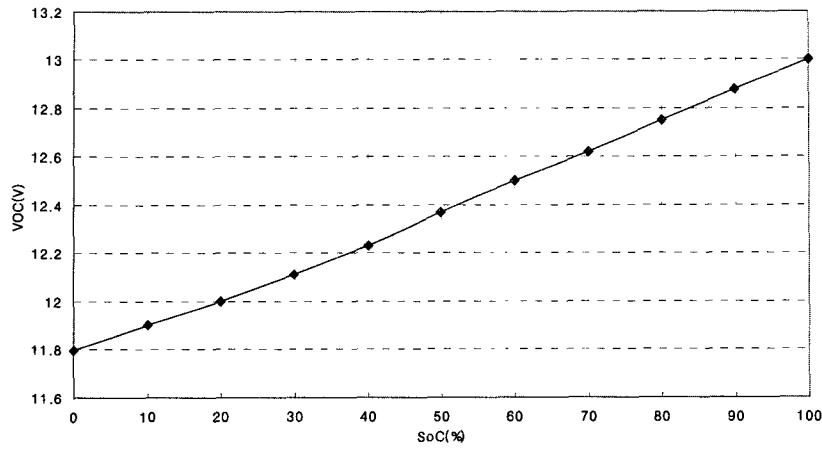
공기 압축기와 마찬가지로 제작회사의 성능 자료를 기반으로 특성식을 만들었다. 사용된 압축기는 Vairex사의 Vv520 모델이다. 연료 압축비는 약 1.3으로 하였으며 유량에 따른 소비동력은 [그림 5-8]과 같다.

압축기를 제외한 펌프 및 냉각팬의 소비 동력은 다음과 같이 가정하였다. 펌프의 소비 전력은 정격상태에서 21W이며, 냉각팬은 25W로 가정하였다.

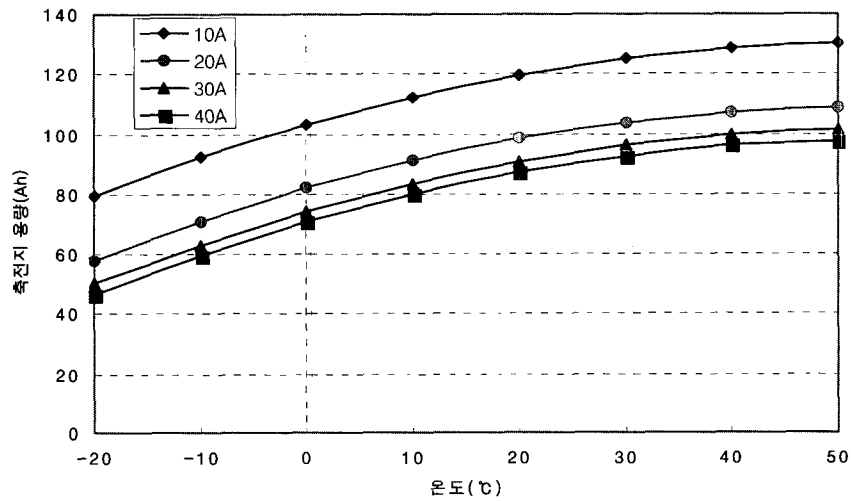
라. 축전지

전기 저장을 위한 축전지 팩은 4개의 60Ah 연축전지를 직렬로 연결하여 구성하였다. 축전지 관리를 위한 가장 중요한 변수가 축전지의 충전 상태를 나타내는 SoC(State of Charge)로 연료전지 출력을 제어하기 위해서는 운전 중에 계속적으로 축전지의 SoC 값을 예측하고 있어야 한다.

축전지의 개회로 전압은 충전상태에 따라 변화하며 정상상태의 개회로 전압을 측정하여 축전지의 충전량을 계산할 수 있다. [그림 5-9]는 축전지의 정상상태 전압과 충전량과의 관계를 나타낸 것이다.



[그림 5-9] 축전지 VOC vs.SoC



[그림 5-10] 온도와 방전전류에 따른 축전지 용량

축전지의 전류가 적은 경우 충전지의 용량은 크고 방전전류가 증가 할수록 축전지의 용량은 감소한다. [그림 5-10]은 축전지의 방전 시 온도와 방전 전류에 따른 축전지의 용량을 나타낸 것이다. 온도의 변화에 따른 축전지의 용량은 제조회사의 참고자료를 이용하였다. 식 (5-1)은 이 자료를 이용하여 축전지의 방전전류와 온도에 따른 축전지 용량의 관계를 식으로 나타낸 것이다. 이 식은 Peukert식에 전류(I)에 관한 exponential 항을 추가하였으며 축전지의 온도(T)에 따른 용량관계를 2차식의 형태로 표현하였다.

$$c_i = A * I^{-B} + 74.646 * e^{-C * I} + (D * T^2 + E * T - F) \quad (5-1)$$

여기서 축전지 A, B, C, D, E, F는 실험으로 정해지는 계수값이다.

축전지 SoC의 계산은 충전 시와 방전시의 용량 및 충전량 관계를 고려하여 계산하였다.

- 방전 시

단위 시간당의 전류의 세기를 알면, 그 순간의 SoC의 변화량을 구할 수 있다.

$$\Delta SoC = - \frac{\Delta C_i}{C_i} = - \frac{I_i \cdot \Delta t}{3600 C_i} \quad (5-2)$$

여기서 축전지 용량 C_i 는 온도와 방전 전류에 따른 축전지의 용량이며 식(5-1)을 사용하여 계산하였다.

- 충전 시

축전지 충전 시 충전량의 변화는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다. 여기서 a 는 <표 5-1>의 온도, SoC, 전류에 따른 충전계수이고 C_{ref} 는 기준값으로 20°C, 0.1C에서의 축전지 용량이다.

$$\Delta SoC = \frac{\Delta C}{C_{ref}} = \frac{a \cdot I_i \cdot \Delta t}{3600 C_{ref}} \quad (5-3)$$

<표 5-1> 축전지 충전 계수 (a)

SoC	Current	10°C	20°C	30°C	40°C
0~70%	0.1C	0.9	1.0	0.98	0.95
	1C	0.73	0.8	0.77	0.73
71~90%	0.1C	0.87	0.95	0.93	0.91
	1C	0.71	0.75	0.72	0.71
91~96%	0.1C	0.85	0.93	0.9	0.89
	1C	0.68	0.71	0.7	0.69
96~100%	0.1C	0.80	0.91	0.88	0.87
	1C	0.65	0.68	0.66	0.64

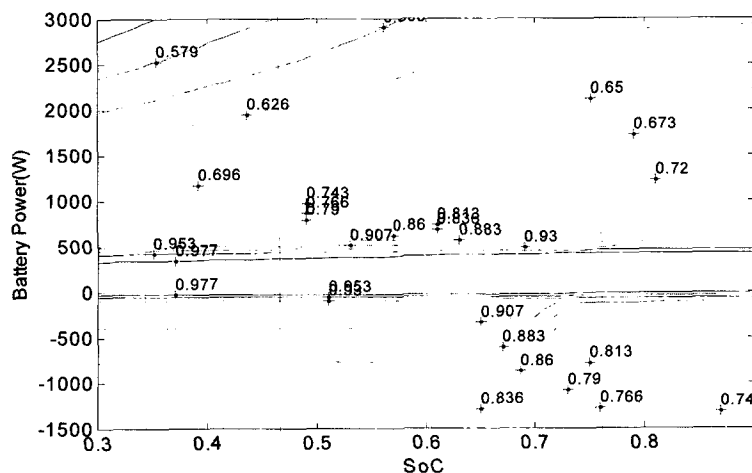
특정 시간 t에서 SoC는 다음과 같다.

$$SoC = SoC_{initial} + \int_0^t \Delta SoC dt \quad (5-4)$$

축전지의 충전량이 높은 경우 충전저항은 증가하고 방전 저항은 감소한다. 반면 충전량이 낮은 경우 방전저항이 증가하고 충전 저항은 감소한다. [그림 5-11]은 축전지의 충전-방전시의 축전지 내부 저항에 의한 에너지 손실과 충전전류에 따른 충전량의 손실을 고려한 효율을 나타낸 것이다. 축전지의 전류가 낮고, 충전 시는 SoC가 낮을 때, 방전 시에는 SoC가 높을 때 축전지의 효율은 높게 나타난다.

마. 연료변환 시스템 (개질기)

연료전지의 연료는 최종적으로는 수소이지만 현재로서는 수소를 생산하기 위해 원료로서 탄화수소를 사용하는 것이 실용적인 방법으로 일반적으로 천연가스를 이용하는 수증기 개질 방법이 발전용으로는 일반적으로 많이 사용되고 있다. 이외에 LPG, 나프타, 등유, 메탄올 등 경질탄화수소 등에서도 수증기개질에 의해서 수소를 얻는 것이 가능하다. 개질과정에서 CO가 발생할 수 있는데 고분자 전해질 연료전지와 같이 저온형 연료전지에서는 CO가 전극촉매에 피독이 되므로 CO를 일정농도 이하로 낮추는 공정이 필요하다.



[그림 5-11] 축전지의 SoC와 출력에 따른 효율

인산형 연료전지의 경우에는 운전온도가 200℃ 정도로 고분자 연료전지의 60~70℃에 비해서 높으므로 CO의 허용치가 다소 높아 전이반응(Shift reaction)(CO+H₂O=CO₂+H₂)만으로 끝날 수 있으나 고분자 전해질 연료전지의 경우 10PPM 미만의 CO만이 허용되므로 전이반응만으로는 불충분해서, 선택산화(CO+1/2O₂=CO₂)처리를 한다. 이를 위해서 소량의 공기를 넣지만 CO만을 완전하게 선택적으로 산화시킬 수가 없으므로 일부의 수소도 연소된다.

개질 시스템은 수증기 개질기, 전이반응기, 선택산화기, 증발기, 연소기로 구성되며 본 연구에서는 열역학적 모델을 이용하여 해석하였다.

- 수증기 개질기(Steam Reformer)

공급된 천연가스를 수증기 개질하는 것으로 반응기에서 <표 5-2 >과 같은 개질반응이 일어난다. 천연가스의 주성분을 메탄(90%), 에탄(5%), 프로판(3%), 부탄(2%)로 가정하였다.

<표 5-2> 개질 반응식

천연가스의 조성[%]	개질반응식
CH ₄ : 90	CH ₄ + H ₂ O = CO + 3H ₂
C ₂ H ₆ : 5	C ₂ H ₆ + 2H ₂ O = 2CO + 5H ₂
C ₃ H ₈ : 3	C ₃ H ₈ + 3H ₂ O = 3CO + 7H ₂
nC ₄ H ₁₀ : 1	C ₄ H ₁₀ + 4H ₂ O = 4CO + 9H ₂
iC ₄ H ₁₀ : 1	C ₄ H ₁₀ + 4H ₂ O = 4CO + 9H ₂

개질기 반응기는 주로 700~750℃에서 일어난다.

반응기에 공급되는 수증기와 탄소의 비는 S/C=3으로 하였다.

$$F_{STEAM} = S/C \times (F_{CH_4} + 2 \times F_{C_2H_6} + 3 \times F_{C_3H_8} + 4 \times F_{nC_4H_{10}} + 4 \times F_{iC_4H_{10}}) \quad (5-5)$$

개질기 출구 가스 조성(shift reactor 전단 가스조성)을 계산하기 위하여 설정온도에 따른 화학평형계수를 구하고 이를 부분압력에 따른 화학평형계수식과 비교하여 반응이 일어나는 몰수를 구하였다.

도시가스의 주성분은 메탄이므로 반응 후 조성을 구하기 위한 화학평형계산을 간소화

하기 위하여 메탄 이외의 성분은 매우 소량이므로 모두 100% 개질된다는 가정으로 계산하였다. 반응기의 운전온도를 700°C로 정하여 메탄의 수증기 개질반응 시 Gibbs 에너지를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta G &= 45364.52 + 45.974T - 15.132T \ln(T) + 6.716 \times 10^{-3} T^2 + \\ &\quad 2.3318 \times 10^{-7} T^3 - 1.9453 \times 10^{-10} T^4 \\ &= -4816.04 \quad (T = 973.15K)\end{aligned}\tag{5-6}$$

Gibbs 에너지에 의한 화학평형 정수는 다음과 같다.

$$K_s = \exp\left(\frac{\Delta G}{1.9865 \times T}\right) = 12.08\tag{5-7}$$

부분압력에 의한 화학평형 정수는 다음과 같이 몰분율에 의해서 계산된다.

$$K_p = \frac{P_{CO} \times P_{H_2}^3}{P_{CH_4} \times P_{H_2O}} = \frac{(CO+Z)(H_2+3Z)^3 P^2}{(CH_4-Z)(H_2O-Z)(T_m+Z)^2}\tag{5-8}$$

따라서 K_s 와 K_p 가 같아질 때의 반응 몰수 Z 값을 구할 수가 있다. 반응에 의해 Z 몰수만큼 각각의 조성이 변한 것이다. P 는 운전압력 1.2atm이고, T_m 은 총 몰수이다. 이를 계산하기 위해서 시행착오법으로 반복계산을 하여 K_s 와 K_p 가 같아지는 Z 값을 구하였다.

또한 수증기 개질시 동시에 전이반응($CO+H_2O=CO_2+H_2$)이 일어나므로 이를 고려하여 전이반응 후의 가스조성을 다시 구하면 마찬가지로 700°C에서 반응이 일어나는 것으로 자유에너지를 이용하여 계산된 이때의 평형계수는 K_s 는 다음과 같다.

700°C에서 전이반응 시 Gibbs 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta G &= -9678 - 0.9241T + 2.158T \ln(T) - 6.484 \times 10^{-3} T^2 + 1.8683 \times 10^{-6} T^3 \\ &\quad - 2.4713 \times 10^{-10} T^4 \\ &= -768.0695 \quad (T = 973.15K)\end{aligned}\tag{5-9}$$

Gibbs 에너지에 의한 화학평형 정수는 다음과 같다.

$$K_s = \exp\left(\frac{\Delta G}{1.9865 \times T}\right) = 1.4878 \quad (5-10)$$

부분압력에 의한 화학평형 정수는 다음과 같이 물분율에 의해서 계산된다.

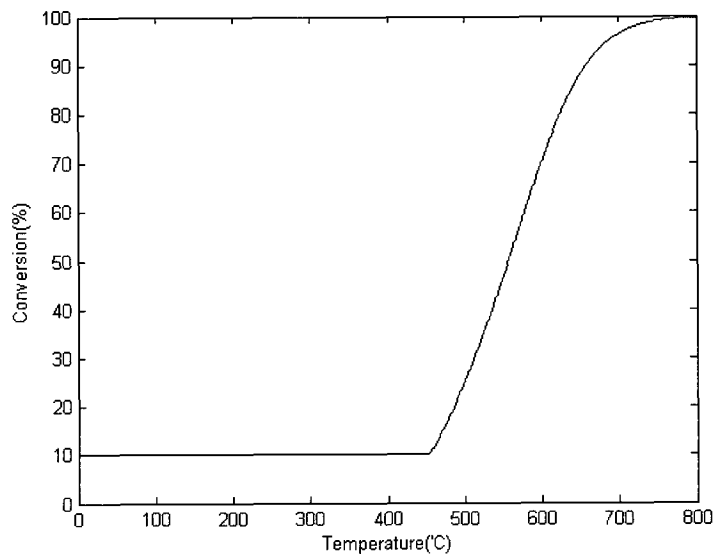
$$K_p = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} = \frac{(CO_2 + Z)(H_2 + Z)}{(CO - Z)(H_2O - Z)} \quad (5-11)$$

위와 마찬가지로 K_s 와 K_p 가 같아질 때의 반응 몰수 Z 값을 구한다. 위와 같은 과정을 통해 개질기 출구에서의 가스조성을 구할 수 있다.

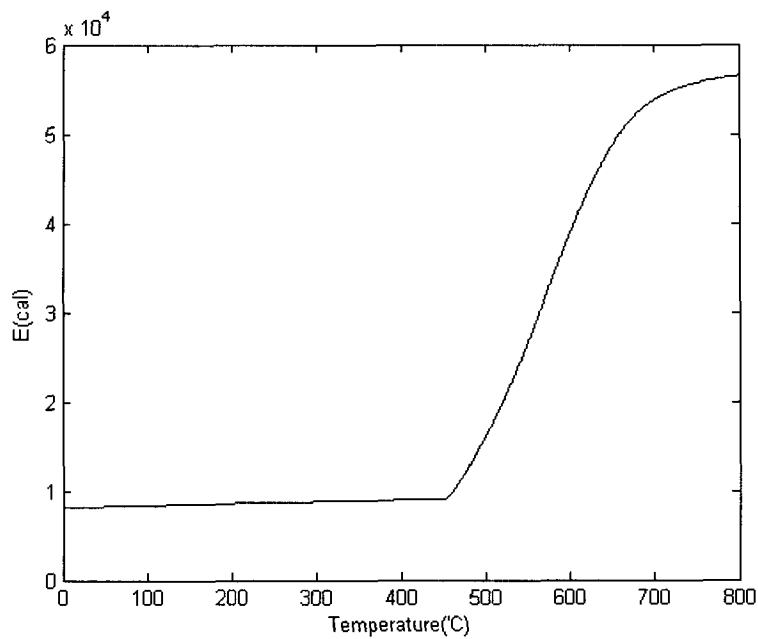
개질반응은 흡열반응, 전이반응은 발열반응으로 반응 시 열량을 공급해주어야 하는데 이 반응열량을 구하기 위하여 온도에 따른 엔탈피식을 적용하여 유량을 곱하여 필요열량을 구한다. 반응 온도는 $700+273.16=973.16K$ 로 가정하였다.

개질반응에 필요한 열량은 전이반응의 발열반응열량과 수증기개질의 흡열반응열량의 합이 된다.

계산된 반응기의 전환율은 [그림 5-12]이며 반응에 필요한 열량값은 [그림 5-13]과 같다. 온도에 따른 반응정수와 반응열을 정리한 것이 <표 5-3>이다.



[그림 5-12] 온도에 따른 Steam Reformer의 전환율



[그림 5-13] 온도에 따른 수증기 개질반응의 필요 열량

<표 5-3> 평형정수와 반응열

온도 [°C]	개질반응		전이반응	
	평형정수	반응열 [kcal/kg-mol]	평형정수	반응열 [kcal/kg-mol]
350	2.49×10^{-6}	52161	19.92	-9297
400	5.76×10^{-5}	52485	11.44	-9180
450	8.75×10^{-4}	52778	7.14	-9058
500	9.47×10^{-3}	53042	4.76	-8933
550	7.75×10^{-2}	53278	3.35	-8805
600	5.03×10^{-1}	53485	2.47	-8675
650	2.68	53667	1.89	-8546
700	12.08	53824	1.49	-8416
750	47.16	53956	1.20	-8288
800	162.67	54066	1.00	-8161
850	503.58	54156	0.84	-8037

- 전이반응기 (Water Gas Shift Reactor)

전이반응은 개질 가스 중에서 CO의 농도를 낮추기 위한 것으로 위의 수증기 개질과정에서의 전이반응 계산과정과 동일하다. 온도 범위가 다른 2종류의 전이 반응기가 사용되며 300~500℃에서는 고온전이로 200℃전후에서는 저온전이가 일어난다. 본 연구에서는 해석의 편리성을 위하여 고온 반응기만을 고려하였다. 작동온도는 50℃이다.

450℃에서 전이반응 시 Gibbs 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta G &= -9678 - 0.9241T + 2.158T \ln(T) - 6.484 \times 10^{-3}T^2 + 1.8683 \times 10^{-6}T^3 \\ &\quad - 2.4713 \times 10^{-10}T^4 \\ &= -2824 \quad (T = 723.15K) \end{aligned} \quad (5-12)$$

Gibbs 에너지에 의한 화학평형 정수는 다음과 같다.

$$K_s = \exp\left(\frac{\Delta G}{1.9865 \times T}\right) = 7.1408 \quad (5-13)$$

부분압력에 의한 화학평형 정수는 다음과 같이 물분율에 의해서 계산된다.

$$K_p = \frac{P_{CO_2} \times P_{H_2}}{P_{CO} \times P_{H_2O}} = \frac{(CO_2 + Z)(H_2 + Z)}{(CO - Z)(H_2O - Z)} \quad (5-14)$$

위와 마찬가지로 Ks와 Kp가 같아질 때의 반응 몰수 Z값을 구한다. 따라서 위의 과정을 통해 전이반응기 출구에서의 가스조성을 구할 수 있다.

전이반응은 발열반응으로 반응에 의해 발생하는 열량을 구하면 다음과 같다.

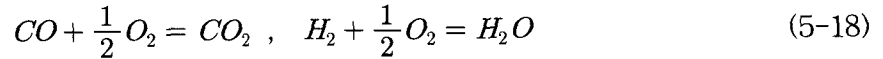


$$\begin{aligned} HR_{sft} &= -9678 - 2.158 \cdot T + 6.484 \cdot (10^{-3}) \cdot T^2 \\ &\quad - 3.7367 \cdot (10^{-6}) \cdot T^3 + 7.4138 \cdot (10^{-10}) \cdot T^4 \end{aligned} \quad (5-16)$$

$$Q_{sft} = HR_{sft} \cdot Z_{sft} \quad (5-17)$$

- 선택적 산화기 (PROX)

선택적 산화기 역시 CO의 농도를 10 PPM이하로 줄이기 위한 반응기로서 이산화탄소의 산화와 더불어 수소의 산화도 일어나게 된다.



PROX는 주로 100~200℃에서 반응이 일어난다. PROX의 열역학적 평형 모델을 사용하여 공급된 산소에 의해 CO 전부가 반응하고 나머지 산소가 수소와 반응하는 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 반응온도는 140℃로 설정하고 공연비가 2배가 되도록 산소 공급량이 CO 생성량과 같은 양을 공급하였다. 즉 반응 당량비가 2배가 되도록 하였다. PROX는 산화반응으로 열이 발생한다.

- 증발기

개질기에 공급하는 물은 기체이므로 수증기 생성을 위한 기화열이 필요하다. [그림 5-3]에서 알 수 있는 바와 같이 전이반응기에서의 생성된 열을 이용하여 물을 증발시킨다. 즉 700℃의 개질가스 450℃로 냉각시키면서 회수하는 열량(HEX3)과 전이반응기 출구에서 450℃의 가스가 180℃까지 낮추면서 회수하는 열량(HEX4)이 기화열로 이용된다. 물의 기화열은 10.4kcal/mol로 계산하였다.

각각의 공급받은 열량에서 물의 기화열을 제외한 나머지 열량이 수증기의 온도를 올리게 된다.

$$Q_{vapor} = F_{H_2O} \times 10400 \quad [cal] \quad (5-19)$$

$$Q_{eva} = Q_{hex} - Q_{vapor} \quad (5-20)$$

증기의 온도에 따른 엔탈피식은 다음과 같다.

$$H_{H_2O} = 7.7 \cdot T + 2.297 \times (10^{-4}) \cdot T^2 + 8.4033 \times (10^{-7}) \cdot T^3 - 2.1468 \times (10^{-10}) \cdot T^4 \quad (5-21)$$

$$Q_{H_2O} = [H_{H_2O}(T) - H_{H_2O}(373.16)] \times F_{steam} \quad (5-22)$$

$Q_{eva} = Q_{H_2O}$ 의 관계에서 증발기 출구 온도를 계산할 수 있다.

- 연소기

연소기에서 공급해야할 열량은 [그림 5-3]에서 알 수 있는 바와 같이 물을 100℃까지 끓이는 열량(HEX1)과 부족한 기화열을 공급하며 수증기와 도시가스를 500℃까지 예열하는 열량(HEX2), 도시가스와 수증기 혼합물을 개질반응온도 700℃까지 예열하는 열량, 그리고 개질반응에 필요한 흡열량을 합한 값이다.

전이과정에서 충분한 기화열을 공급하지 못할 경우 부족한 만큼을 연소기에서 공급한다. 연소기의 연료는 연료전지에서 사용되고 남은 출구 가스를 사용한다. 이 출구 가스에 잔류하고 있는 수소와 일부 탄화수소 가스가 연소에 사용된다. 만약 출구 가스로 충분한 열량을 공급할 수 없을 경우에는 추가로 도시가스가 공급된다.

바. 열교환기 및 열회수 시스템

시스템과 개질기에는 열교환과 열회수를 위하여 8개 정도의 열교환기가 사용되고 있다. 열교환기에서의 출입 열량을 계산을 통하여 연료변환장치에 공급해야할 열량과 열저장탱크로 회수되는 열량을 구할 수 있다.

- 열교환기

[그림 5-3]의 전체 시스템 모델을 보면 열교환기1(HEX1)은 개질과정에 필요한 물을 예열시켜 증발기(HEX4)에 공급하는 역할을 한다. 계산을 위해 출구온도는 100℃로 설정하였다.

열교환기2(HEX2)는 연소 배기가스를 이용하여 도시가스와 수증기의 혼합가스를 예열시키는 역할을 하는 열교환기이다. 예열기 출구의 온도는 500℃로 설정하였으며 도시가스는 25℃로 공급된다. 수증기는 증발기 출구온도(Tvap)에서부터 500℃로 승온된다.

스팀 개질기 출구 가스온도는 반응기의 온도와 동일하다. 개질기 출구의 700~750℃ 개질가스의 온도를 전이반응에 필요한 온도인 450℃까지 낮추게 된다. 이 때 회수되는 열량은 증발기로 전달하게 된다.

열교환기4(HEX4)는 전이반응기의 출구 가스를 180℃까지 낮추는 역할을 한다. 이때 교환기를 통하여 전달되는 열량은 증발기에서 사용된다.

열교환기5(HEX5)는 열교환기4를 거친 180℃의 개질가스를 140℃까지 온도를 낮추는 역할이다. 이때 회수된 열량은 온수탱크로 공급된다.

열교환기6(HEX6)은 PROX의 발열량을 그대로 회수하는 역할을 하며 이 회수된 열 또한 온수탱크로 공급된다.

열교환기7(HEX7)은 140℃ 개질가스를 스택 작동온도인 75℃까지 낮추는 역할을 하며 동시에 개질가스에 포함된 수증기를 응축시키는 역할을 한다. 따라서 열교환기 7에서는 교환되는 열량과 응축되는 물량을 계산할 필요가 있다. 과포화일 경우 개질가스의 온도가 75℃로 떨어졌을 경우 포화수증기량을 제외한 나머지는 응축된다고 가정하여 수증기량의 변화를 계산할 수 있다. 열교환기 8은 75℃인 연소에 사용될 스택 출구 가스의 온도를 낮추어 가스에 포함된 수증기를 줄이는 응축기의 역할을 한다.

- 온수탱크의 온도 변화

온수탱크로 공급되는 열량은 연료전지의 발열량과 열교환기 5, 6, 7, 8에서 회수된 열량이다.

$$Q_S = Q_{FC} + Q_{HEX5} + Q_{HEX6} + Q_{HEX7} + Q_{HEX8} \quad (5-23)$$

따라서 온수탱크의 온도 변화는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{TS-2} = \frac{Q_S - Q_D + Q_{gb} - Q_{rej}}{m_{TS} C_P} + T_{TS-1} \quad (5-24)$$

단, 여기서 Q_D 는 가정에서의 수요 열부하이며, Q_{gb} 는 온수저장탱크가 설정온도보다 낮을 때 보조 보일러를 통한 입열량이며 Q_{rej} 는 온수저장탱크가 설정온도보다 높을 때 방열기를 통해 방출되는 열량이다.

3. 해석

가. 해석순서

연료전지 코제너레이션 시스템을 [그림 5-3]과 같이 구성하여 해석 하였다. 연료전지 스택, 축전지, 전력변환기, BOP 등에서 확보가 가능한 경우는 직접 측정하거나 제작자로부터 주어진 성능 자료로 특성식을 유도하여 사용하였다. 사용될 연료전지, 축전지, 온수탱크 등의 운전 범위를 결정한 후, 축전지의 상태 및 온수의 온도를 기중으로 연료전지의 운전 조건을 결정하였으며, 열 및 전기부하를 입력하고, 연료전지의 작동조건에 따른 연

료전지, 축전지, 전력변환기 등의 운전 조건 및 손실 에너지를 계산 하였다. 온수의 온도에 의해 열부하와 연료전지 발생열의 크기를 비교하여 냉각기에 의한 열 방출이나 보일러의 작동여부를 결정한 후 열에너지 수지를 계산하였다.

부분별 해석 순서는 다음과 같다.

1) 전기에너지 계산 순서

- ① 전기 부하 수요 패턴 입력
- ② 효율을 고려한 AC/DC 인버터의 입력 전력 계산
- ③ 축전지와 온수탱크의 상태에 따른 연료전지의 출력 비율 결정
- ④ DC/DC 컨버터의 출력 계산
- ⑤ 축전지의 출력 계산
- ⑥ 연료전지 출력 계산

2) 연료 계산 순서

- ① 연료전지 출력에 따른 이론 수소량 계산
- ② 이용률에 따른 공급 수소량과 공기량 계산
- ③ PROX의 입구 조성 계산
- ④ 전이반응기의 입구 조성 계산
- ⑤ 수증기 개질기의 입구 조성 계산.
- ⑥ 개질기에 공급되는 천연가스, 수증기 공급량 계산

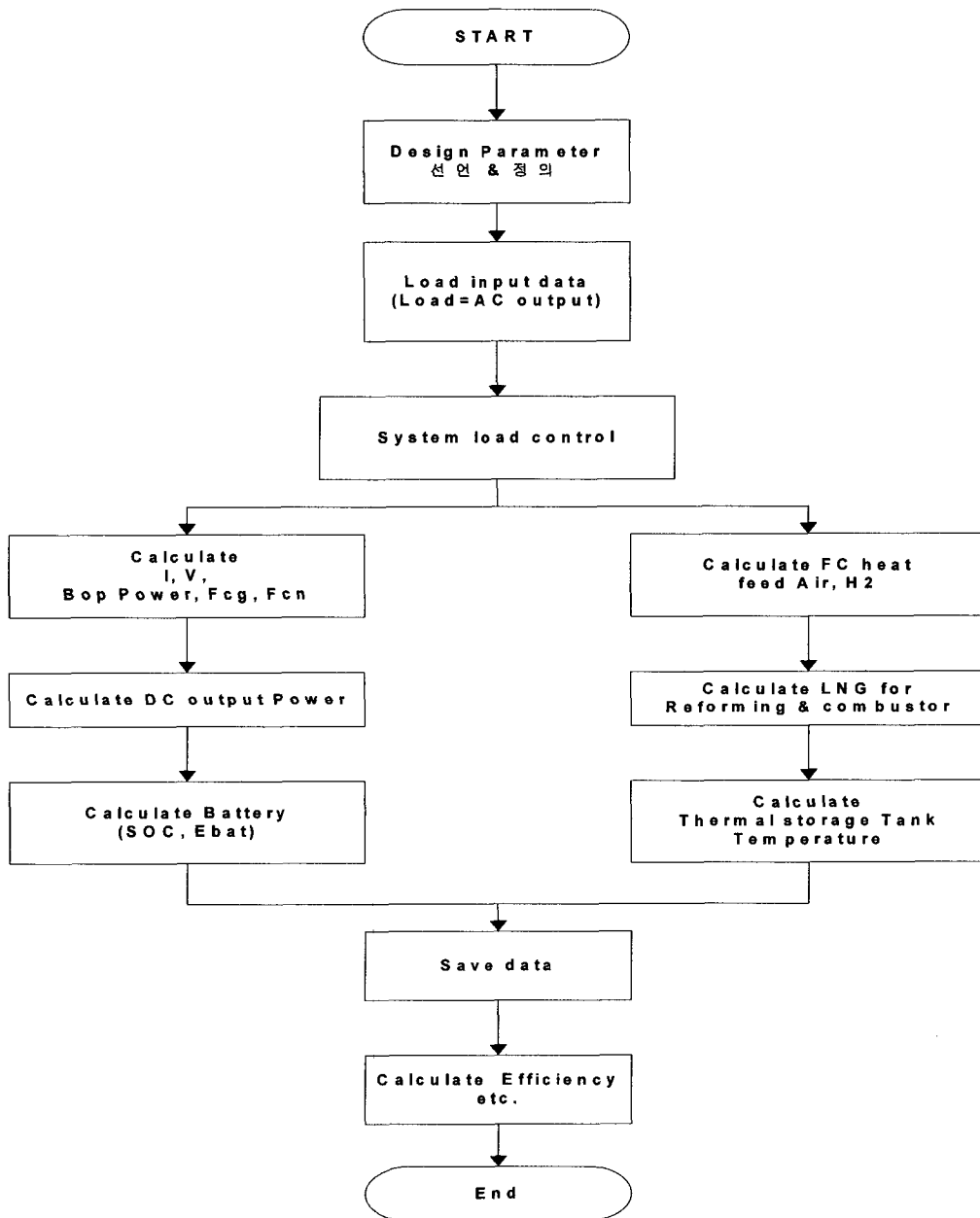
3) 개질기 열수지 계산 순서

- ① 열교환기8(HEX8) 열교환량 계산
- ② 열교환기7(HEX7) 열교환량 계산
- ③ 열교환기6(HEX6) 열교환량 계산
- ④ 열교환기5(HEX5) 열교환량 계산
- ⑤ 증발기 필요열량 및 공급열량 계산
- ⑦ 연소기에서 필요한 열량 계산
- ⑧ 연소기에 공급할 연료량 및 공기량 계산

4) 열에너지 계산 순서

- ① 열부하 수요 패턴 입력
- ② 연료전지 발생한 열량 계산

- ③ 각 열교환기에서 회수한 열량 계산
- ④ 회수한 열량과 공급한 열부하에 따른 온수탱크의 온도 계산
- ⑤ 온수탱크의 온도에 따라 보조 보일러 및 냉각팬의 작동여부를 결정

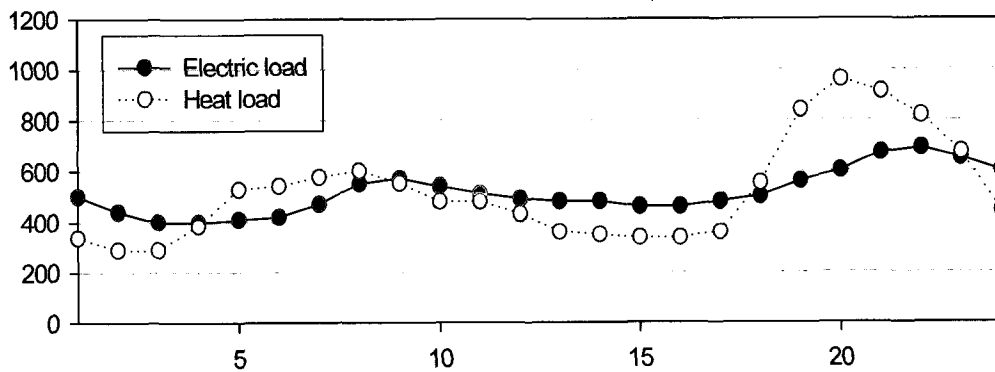


[그림 5- 14] 시스템 해석 순서도

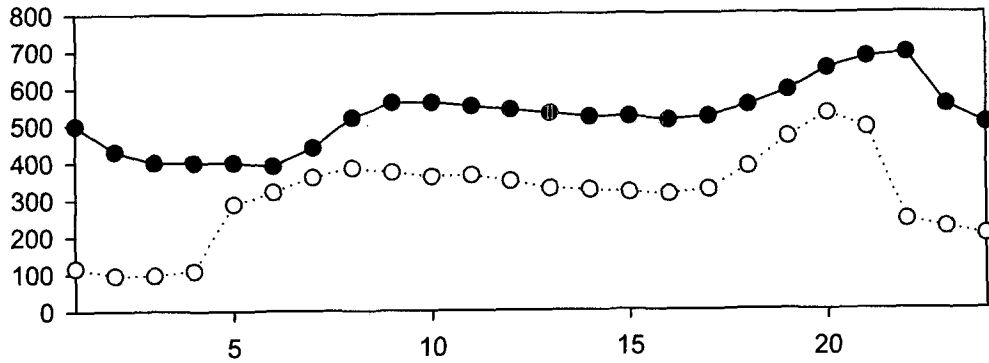
나. 열 및 전기 부하 수요 분석

시스템 설계 시 가정에서 필요한 열과 전기 수요량 패턴에 맞는 연료전지 시스템, 온수 탱크, 보조 보일러와 축전지의 용량 설정은 물론, 온수탱크와 축전지, 연료전지 등의 전체 시스템의 운전방법을 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 24평형 주택의 계절별 전기 및 열에너지 사용량을 기준으로 시스템의 해석과 제어전략을 비교 평가하였다. [그림 5-14] [그림 5-15], [그림 5-16] 그리고 [그림 5-17]이 계절별 전기 에너지 및 열에너지의 수요 패턴의 예를 나타낸 것이다. <표 5-4>는 계절별 하루 동안의 전기 및 열에너지의 사용량과 시간당 평균 열 및 전기 부하를 나타낸 것이다.

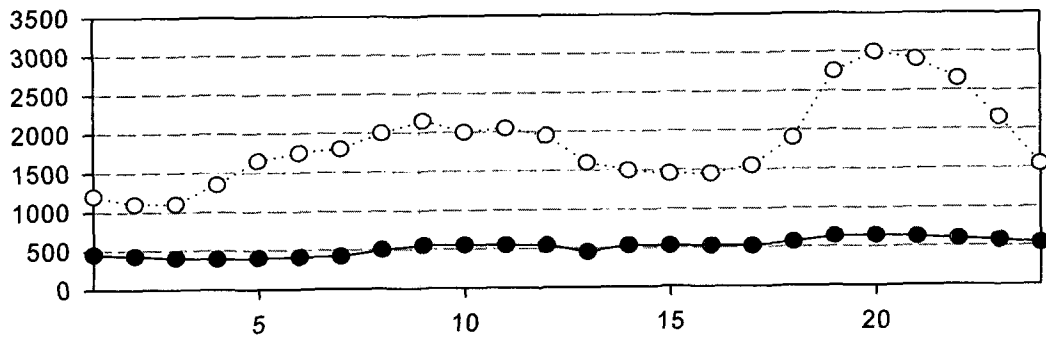
전기부하의 경우는 계절별로 큰 차이가 없었으며, 평균적으로 500W정도였다. 시간대 별로는 오전2-5시대에 사용량이 400W로 낮았고, 20-23시간대에 가장 높게 나타나고 있다. 반면에 열부하의 경우는 계절별로 차이가 크게 나타났다. 여름철의 경우 평균 열부하는 300W였고 겨울철은 1850W로 여름철의 부하의 6배정도였다. 열과 전기 부하의 비율은 봄, 가을철의 경우 1:1정도였으며 여름철의 경우 전기부하가 열부하의 2배, 겨울철의 경우 열부하가 전기부하의 3배 정도로 나타났다. 연료전지 시스템 해석을 위하여 [그림 5-15], [그림 5-16], [그림 5-17]과 같은 열 및 전기부하 패턴을 입력 자료로 사용하였다.



[그림 5-15] 봄, 가을철 가정에서의 열과 전기 부하



[그림 5-16] 여름철 가정에서의 열과 전기 부하



[그림 5-17]. 겨울철 가정에서의 열과 전기 부하

<표 5-4> 계절별 열 및 전기 사용량

구분	봄, 가을철		여름철		겨울철	
	전기	열	전기	열	전기	열
총부하(kWh)	12.330	12.420	12.500	7.340	12.260	44.550
평균부하(kW)	0.514	0.518	0.521	0.306	0.511	1.856

다. 부하조절방법

연료전지의 시스템 해석 프로그램을 개발하는 목표는 스택뿐만 아니라 시스템 수준의 효율을 높일 수 있는 최적 설계 값과 운전 조건을 찾기 위한 것이다. 본 연구의 연료전지 시스템은 외부전원과 연계 없이 독립적으로 시동되고 운전되는 독립적인 시스템이기 때문에 필요한 전력과 열에너지를 연료전지시스템에서 항상 공급할 수 있어야 한다.

방열판과 보조 보일러가 포함된 연료전지 시스템에서 수저장조의 온도를 제어변수로 하는 열관리를 채택 할 경우 온도가 허용범위보다 높으면 냉각 팬을 이용해 방열시키고 수요열량에 비해 연료전지에서 발생하는 열량이 모자라 수저장조의 온도가 감소하는 경우에는 보일러를 작동하여 온도를 상승할 수 있으므로 전기부하와 관계없이 열 시스템이 수요에 대응하여 운영할 수 있다. 이 경우 전체 시스템 열효율에는 문제가 있을 수 있으나 열관리와 독립적으로 축전지의 충전상태나 전기 부하만을 고려하여 연료전지 시스템을 운전할 수 있으며 일정범위내에서 열에너지나 전기에너지를 공급할 수 있다. 외부와의 계통 연계 없이 독립적으로 전기에너지를 공급하기 위해서는 축전지가 항상 적절한 충전상태를 유지하고 있어야 필요한 전기를 공급시킬 수가 있다. 축전지에 충전에 필요한 전기는 연료전지 시스템 운전 중에 요구되는 외부 수요 부하가 적을 때에 공급될 수 있다. 축전지가 과충전되거나 과방전되면 축전지의 효율이 낮을 뿐 아니라 수명도 단축된다. 축전지의 과충전 상태 이하의 범위를 유지할 경우 온수 저장조의 온도가 설정 온도 이하로 내려가면 연료전지의 출력을 증가시켜 열 발생량을 올려서 온수의 온도를 상승시키며 축전지를 충전시킬 수가 있다. 또한 축전지가 과방전 상태가 아닌 경우에 온수 저장조의 온도가 설정온도 이상으로 상승하면 연료전지의 출력을 낮추어 별도의 방열기 작동 없이 연료전지의 열발생량을 줄여 온수조의 온도를 낮출 수 있다. 이와 같이 온수조의 온도만을 기준으로 연료전지의 출력을 결정하는 경우에는 항상 축전지의 충전상태가 일정 범위 내에 있을 경우에 가능하며 축전지가 과충전되거나 과방전되면 축전지의 충전 상태를 기준으로 연료전지의 운전 조건을 조절하여야 한다. 마찬가지로 개념으로 온수조의 온도가 허용범위를 벗어나지 않는 경우는 연료전지의 출력을 가감시켜 외부 부하 출력에 대응하면서 축전지의 충전량을 조절할 수 있다. 즉 축전지의 충전량의 함수로 연료전지의 출력을 제어할 수 있다. 이 경우 전기 부하 추종은 축전지가 담당하게 된다.

본 연구를 위해 앞에서 제시한 축전지 위주의 제어와, 온수저장조 위주의 제어 등 다양한 제어 방법을 검토하였으며 최종적으로 연중 평균 성능이 우수한 축전지의 충전상태와

온수탱크의 온도 2개 변수를 입력하여 연료전지의 출력을 4단계로 조절하는 방법을 사용하였다. <표 5-5>의 case 1은 연료전지를 100%, 80%, 50%, 10%로 운전하는 경우이며, <표 5-6>의 case2는 등간격으로 100%, 75%, 50%, 25%로 운전하는 경우의 예이다.

<표 5-5> 연료전지 출력 제어 조건 Case 1

온수탱크 온도 (Tts)	축전기 충전상태 (SoC)				
	SoC≤0.4	0.4≤ SoC <0.5	0.5≤ SoC <0.6	0.6≤ SoC <0.7	0.7≤ SoC
Tts<60℃	100	100	80	80	10
60℃≤Tts<61℃	100	80	50	50	10
61℃≤Tts<62℃	100	80	50	10	10
62℃≤Tts	100	50	10	10	10

<표 5-6> 연료전지 출력 제어 조건 Case 2

온수탱크 온도 (Tts)	축전기 충전상태 (SoC)				
	SoC≤0.4	0.4≤ SoC <0.5	0.5≤ SoC <0.6	0.6≤ SoC <0.7	0.7≤ SoC
Tts<60℃	100	100	75	75	25
60℃≤Tts<61℃	100	75	50	50	25
61℃≤Tts<62℃	100	75	50	25	25
62℃≤Tts	100	50	25	25	25

라. 시스템 성능 계산

일반적인 시스템의 효율은 입력에너지에 대한 출력에너지의 비율이다. 전기적인 에너지를 얻는 시스템의 효율은 다음과 같이 표시한다.

$$\eta_e = \frac{W_e}{m_f H} \quad (5-25)$$

열을 이용하는 시스템의 효율은 입력에너지에 대한 출력된 열에너지의 비율이다.

$$\eta_{th} = \frac{Q}{m_f H} \quad (5-26)$$

열과 전기 에너지를 동시에 사용하는 코제너레이션 시스템의 효율은 입력된 에너지에 대한 생성된 열과 전기 에너지의 비율이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_e + \eta_{th} = \frac{W_e + Q}{m_f H} \quad (5-27)$$

따라서 본 전체 시스템의 효율은 개질시스템에 공급된 천연가스의 에너지에 대한 연료전지에서 출력된 전기에너지 및 열에너지와 온수탱크로 회수한 열에너지의 비로 나타낼 수 있다. 시스템에 입력된 에너지는 추가로 연소기공급 천연가스 에너지 및 충·방전된 축전지 에너지, 보조보일러 에너지가 있다.

$$\text{전체시스템의 효율} = \frac{\text{전기에너지} + \text{사용 열에너지} + \text{온수탱크 열에너지}}{\text{개질기 공급 연료 에너지} + \text{보조보일러 연소 에너지} + \text{축전지 에너지} + \dots} \quad (5-28)$$

전기에너지는 연료전지의 출력 전기에너지로 가정에 공급한 전기 에너지이며 사용열에너지는 가정에 공급한 열에너지, 온수탱크 열에너지는 가정에 공급하고 남은 열에너지를 온수탱크에 공급할 때의 에너지이다. 연소기 에너지는 개질기 연소기에 공급된 연료의 에

너지이며 개질기 에너지는 수소가스를 위해 개질기에 공급된 천연가스의 에너지이다.
천연가스의 에너지는 다음과 같이 반응열에 공급된 유량의 곱으로 구할 수 있다.

<표 5-7> 도시 가스 발열량 계산

ΔH_{CH_4} (메탄의 반응열)	191759 kcal/kg-mol (LHV, 25°C)
$\Delta H_{C_2H_6}$ (에탄의 반응열)	341476 kcal/kg-mol
$\Delta H_{C_3H_8}$ (프로판의 반응열)	488528 kcal/kg-mol
$\Delta H_{nC_4H_{10}}$ (n옥탄의 반응열)	635385 kcal/kg-mol
$\Delta H_{iC_4H_{10}}$ (i옥탄의 반응열)	633745 kcal/kg-mol
$\Delta H_{NG}(\text{천연가스의 반응열}) = 0.90 * \Delta H_{CH_4} + 0.05 * \Delta H_{C_2H_6} + 0.03 * \Delta H_{C_3H_8} + 0.01 * \Delta H_{nC_4H_{10}} + 0.01 * \Delta H_{iC_4H_{10}}$ $= 217004 \text{ kcal/kg-mol (LHV, 25°C)}$	

또한, 연료전지 시스템의 효율은 연료전지를 작동하기 위한 공급된 연료의 에너지에 대한 출력된 전기 에너지, 연료전지로부터 생성된 열에너지중 사용하거나 온수탱크로 저장된 열에너지의 비로 온수탱크의 보조보일러의 에너지 관계를 배제하고 연료전지와 축전지의 관점에서만 계산하였으며 다음과 같다.

$$\text{연료전지 시스템의 효율} = \frac{(\text{전기에너지} + \text{열에너지})}{(\text{연료전지공급에너지} + \text{축전지에너지})} \quad (5-29)$$

또한, 연료변환시스템(개질기)의 효율은 개질기에 공급된 연료의 에너지에 대한 개질된 수소에너지의 비로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{rfm} = \frac{\Delta H_{NG} \times F_{NG}}{\Delta H_{H_2} \times F_{H_2}} \quad (5-30)$$

여기서 H는 형성엔탈피, F는 유량이다. 연소기에 공급되는 연료는 수소극쪽 스택 출구 가스 중 메탄과 수소가 주를 이루며 추가로 열량이 부족할 경우 천연가스를 직접 공급

할 수도 있다. 본 연구에서는 여러 가지 부하조건에 따른 1kW 연료전지시스템의 해석을 위한 운전과 설계 조건은 다음과 같다.

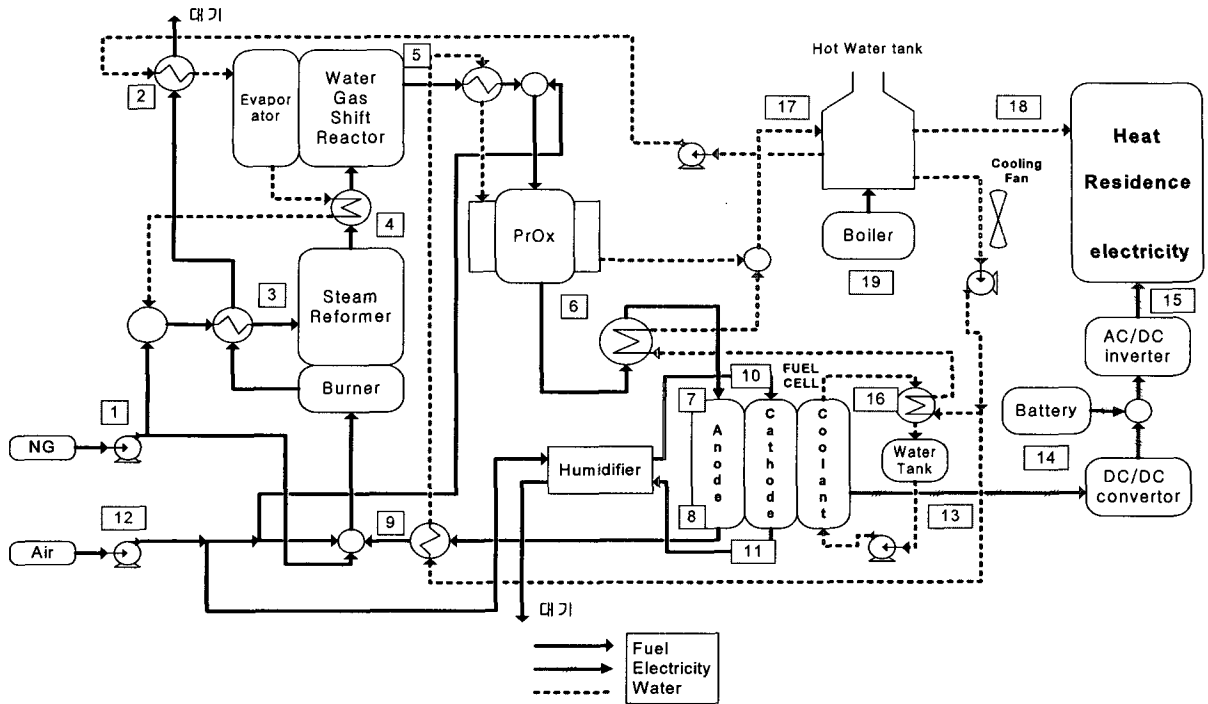
<표 5-8> 해석 모델의 운전 조건

연료전지 최대 출력	1kW
축전지 최대 출력	3kW
연료이용률	75%
공기이용률	45%
수증기 개질기 온도	750℃
전이반응기 온도	450℃
PROX 온도	120℃
스택운전온도	75℃
S/C(Steam/carbon ratio)	3
최대 설정 온수탱크온도	62℃
온수탱크 용량	350kg

제 3 절 해석 결과 분석

1. 정상상태 해석결과

정상 상태 해석을 수행하여 주어진 부하 패턴과 온수탱크와 축전지의 SoC 상태에 따라 몇 가지 운전조건으로 나누어 시스템의 효율과 각 부분별 열 및 물질수지와 에너지 수지를 분석하였다. [그림 5-18]은 주요 부분의 상태를 나타내기 위한 위치 번호이다.



Stream No.	위치	Stream No.	위치	Stream No.	위치
1	연료압축기 출구	8	Anode 출구	15	인버터 출력
2	증발기 입구	9	연소기 입구	16	PEFC 생성 열량 회수
3	개질기 입구	10	Cathode 입구	17	온수탱크 공급 열량
4	개질기 출구	11	Cathode 출구	18	가정의 열부하
5	전이반응기 출구	12	공기압축기 출구	19	보조 보일러 공급 열량
6	PROX 출구	13	PEFC 전기 출력		
7	Anode 입구	14	축전지 충·방전 량		

[그림 5-18] 열 및 물질 수지 계산을 위한 다이어그램

가. 연료전지만으로 정격 1kW 전기출력을 하는 경우

축전지를 사용하지 않고 연료전지만으로 인버터 출력이 1kW가 되는 경우에는 부하분 배전략에 관계없이 순수 연료전지만으로 출력하는 경우이다. 해석결과 연료전지 출력은 1224W, BOP 소모 동력은 107.5W이며, 개질기에 들어가는 천연가스의 양은 3.34mmol이며 회수한 열량은 1190W이다. 따라서 축전지를 포함하지 않는 연료전지 시스템의 전기 효율은 33%이며 열효율은 39.3%인 것으로 해석되었다.

나. 연료전지 출력으로 부하를 모두 감당하는 경우

2 번째 경우는 온도조건이 제어 조건을 만족한 상태(온수저장조 온도= 61℃)에서, 축전지의 SoC가 0.57로 낮은 경우로 앞에서 <표 5-5>로 설정한 부하분배전략에 따라 연료전지의 출력이 50%로 결정된다. 연료전지 출력은 500W이며 열 생성량은 369W이다. 이때의 수요 부하는 각각 전기 430W, 열 96W로 연료전지의 출력만으로 모두 감당할 수 있고 남은 전기는 축전지로 충전이 되며 남은 열 또한 온수탱크로 공급되어 온수탱크의 온도를 올리게 된다.

다. 온수탱크 온도가 낮아 보조보일러가 작동하는 경우

3 번째 경우는 온수탱크의 온도가 설정온도보다 낮아 보조 보일러가 작동하는 경우이다. 온수저장조 온도 58℃, 축전지의 SoC가 0.63인 경우를 계산하면 <표 5-5>의 부하 조절 방법에 따라 연료전지의 출력은 25%로 결정되었다. 수요 부하는 각각 전기 500W, 열 116W로 연료전지의 출력이 부하를 만족 시키지 못하고 있으므로 요구 부하 중 연료전지 출력 250W를 제외한 나머지를 축전지에서 담당하고 온수저장조의 온도를 높이기 위하여 보조 보일러가 작동하게 된다.

위의 3가지 정상상태 해석을 통해 온수저장조의 온도와 축전지의 SoC에 따른 부하제어방법이 효과적으로 수행되는 것을 확인 할 수 있다. 2번째 경우와 같이 연료전지 이외에 추가로 동력을 공급하게 되는 특히, 겨울철의 경우 열수요가 큰 경우에는 시스템에서 회수되는 열량으로는 수요를 감당하기 어려우며 보조 보일러가 작동하게 되어 시스템의 효율이 떨어지게 된다. 다음의 열물질 수지 표는 계절별 성능해석 결과를 요약한 것으로 제어전략에 따라 100%, 75%, 50%, 25%로 부하를 분배한 결과를 나타낸다.

<표 5-9> 연료전지 출력 100% 부분부하 시 열·물질 수지

Number	1	2	3	4	5	6
온도[°C]	25	25	500	750	180	140
압력[atm]	1.35		1.23	1.18	1.16	1.14
유량[mmol/s]	2.68	9.4	12.08	18.3	18.3	20.47
조성[mol%]						
CH4	90		65	0.2	0.2	0.1
C2H6	5		1.2			
C3H8	3		0.6			
nC4H10	1		0.2			
iC4H10	1		0.2			
H2				54.8	62.3	55.1
CO				10.6	3.2	
CO2				6.4	13.8	14.9
H2O		100	77.8	28	20.5	19.4
N2						10.4
O2						

Number	7	8	9	10	11	12
온도[°C]	75	80	65	75	80	25
압력[atm]	1.13	1.12	1.06	1.06	1.045	1.06
유량[mmol/s]	20.47	12.1	16.43	50.1	51.6	63.1
조성[mol%]						
CH4	0.1	0.2	0.1			
C2H6						
C3H8						
nC4H10						
iC4H10						
H2	55.1	22.9	12.4			
CO						
CO2	14.9	25.6	13.8			
H2O	19.4	33.4	18.1		15.4	
N2	10.4	17.9	45.9	79	73.1	79
O2			9.7	21	11.5	21

Number	온수탱크온도	58°C	축전지 SoC	0.47
13	PEFC 출력		1000W	
14	축전지 충·방전 량		314.9W (충전)	
15	인버터 출력		500W	
16	PEFC 생성 열량		737.6W	
17	온수탱크 공급 열량		934.5W	
18	가정의 열부하		1200W	
19	보조보일러 공급 열량		0	
20	BOP 소비 동력		105.7W	
21	개질기 효율		85.7%	
22	연료전지 효율		52.3%	
23	전체시스템 효율		67.8%	

<표 5-10> 연료전지 출력 75% 부분부하 시 열·물질 수치

Number	1	2	3	4	5	6
온도[℃]	25	25	500	750	180	140
압력[atm]	1.35		1.23	1.18	1.16	1.14
유량[mmol/s]	2.08	7.30	9.38	14.2	14.2	15.89
조성[mol%]						
CH4	90		65	0.2	0.2	0.1
C2H6	5		1.2			
C3H8	3		0.6			
nC4H10	1		0.2			
iC4H10	1		0.2			
H2				54.8	62.3	55.1
CO				10.6	3.2	
CO2				6.4	13.8	14.9
H2O		100	77.8	28	20.5	19.4
N2						10.4
O2						

Number	7	8	9	10	11	12
온도[℃]	75	80	65	75	80	25
압력[atm]	1.13	1.12	1.06	1.06	1.045	1.06
유량[mmol/s]	15.89	9.42	12.76	38.87	42.05	49
조성[mol%]						
CH4	0.1	0.2	0.1			
C2H6						
C3H8						
nC4H10						
iC4H10						
H2	55.1	22.9	12.4			
CO						
CO2	14.9	25.6	13.8			
H2O	19.4	33.4	18.1		15.4	
N2	10.4	17.9	45.9	79	73.1	79
O2			9.7	21	11.5	21

Number	온수탱크온도	58.4℃	축전지 SoC	0.67
13	PEFC 출력		750W	
14	축전지 충·방전 량		68.1W (충전)	
15	인버터 출력		500W	
16	PEFC 생성 열량		529.9W	
17	온수탱크 공급 열량		722.82W	
18	가정의 열부하		336W	
19	보조보일러 공급 열량		0	
20	BOP 소비 동력		103.9W	
21	개질기 효율		85.7%	
22	연료전지 효율		55.2%	
23	전체시스템 효율		69.5%	

<표 5-11> 연료전지 출력 50% 부분부하 시 열·물질 수지

Number	1	2	3	4	5	6
온도[℃]	25	25	500	750	180	140
압력[atm]	1.35		1.23	1.18	1.16	1.14
유량[mmol/s]	1.156	4.05	5.2	7.88	7.88	8.82
조성[mol%]						
CH4	90		65	0.2	0.2	0.1
C2H6	5		1.2			
C3H8	3		0.6			
nC4H10	1		0.2			
iC4H10	1		0.2			
H2				54.8	62.3	55.1
CO				10.6	3.2	
CO2				6.4	13.8	14.9
H2O		100	77.8	28	20.5	19.4
N2						10.4
O2						

Number	7	8	9	10	11	12
온도[℃]	75	80	65	75	80	25
압력[atm]	1.13	1.12	1.06	1.06	1.045	1.06
유량[mmol/s]	8.82	5.23	7.08	21.57	23.34	27.2
조성[mol%]						
CH4	0.1	0.2	0.1			
C2H6						
C3H8						
nC4H10						
iC4H10						
H2	55.1	22.9	12.4			
CO						
CO2	14.9	25.6	13.8			
H2O	19.4	33.4	18.1		15.4	
N2	10.4	17.9	45.9	79	73.1	79
O2			9.7	21	11.5	21

Number	온수탱크온도	59.5℃	축전지 SoC	0.69
13	PEFC 출력		500W	
14	축전지 충·방전 량		67.4W (충전)	
15	인버터 출력		400W	
16	PEFC 생성 열량		341.3W	
17	온수탱크 공급 열량		425.2W	
18	가정의 열 부하		528W	
19	보조보일러 공급 열량		0	
20	BOP 소비 동력		101.76W	
21	개질기 효율		85.7%	
22	연료전지 효율		60.4%	
23	전체시스템 효율		73.8%	

<표 5-12> 연료전지 출력 25% 부분부하시 열·물질수지

Number	1	2	3	4	5	6
온도[℃]	25	25	500	750	180	140
압력[atm]	1.35		1.23	1.18	1.16	1.14
유량[mmol/s]	0.479	1.68	2.75	4.17	4.17	4.66
조성[mol%]						
CH4	90		20	0.2	0.2	0.1
C2H6	5		1.2			
C3H8	3		0.6			
nC4H10	1		0.2			
iC4H10	1		0.2			
H2				54.8	62.3	55.1
CO				10.6	3.2	
CO2				6.4	13.8	14.9
H2O		100	77.8	28	20.5	19.4
N2						10.4
O2						

Number	7	8	9	10	11	12
온도[℃]	75	80	65	75	80	25
압력[atm]	1.13	1.12	1.06	1.06	1.045	1.06
유량[mmol/s]	4.66	2.77	3.75	11.38	12.3	14.3
조성[mol%]						
CH4	0.1	0.2	0.1			
C2H6						
C3H8						
nC4H10						
iC4H10						
H2	55.1	22.9	12.4			
CO						
CO2	14.9	25.6	13.8			
H2O	19.4	33.4	18.1		15.4	
N2	10.4	17.9	45.9	79	73.1	79
O2			9.7	21	11.5	21

Number	온수탱크온도	59.9℃	축전지 SoC	0.693
13	PEFC 출력		256W	
14	축전지 충·방전 량		311.3W (방전)	
15	인버터 출력		400W	
16	PEFC 생성 열량		171W	
17	온수탱크 공급 열량		206W	
18	가정의 열부하		288W	
19	보조보일러 공급 열량		0	
20	BOP 소비 동력		100W	
21	개질기 효율		85.7%	
22	연료전지 시스템 효율		71.9%	
23	전체 시스템 효율		80.9%	

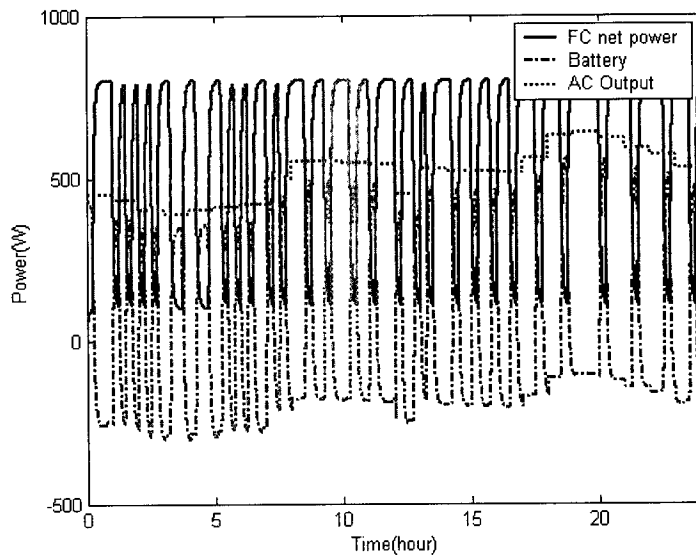
2. 계절별 성능 평가

설계된 연료전지의 계절별 성능과 운전방식에 따라 성능평가를 수행하기 위하여 <표 5-5>와 <표 5-6>에 주어진 제어 방식을 기반으로 성능 해석을 수행하였다. <표 5-13>이 연료전지 부하분담 방식에 따른 계절별 성능을 나타낸 것이다. 전체 효율은 보일러까지를 포함한 시스템의 효율을 계산한 것이며, 연료전지 시스템 효율은 보일러의 열에너지 공급량 및 효율을 배제한 것으로 연료전지, 축전지, 전력변환기가 포함된 시스템의 성능을 나타낸다. 전체 시스템 열효율은 보일러에서 공급되는 에너지 비율이 높은 겨울철이 가장 높았다. 이는 보일러의 효율이 85%로 부하 패턴을 고려한 연료전지 시스템의 효율에 비하여 높은 값을 유지하기 때문이다. 연료전지 시스템의 효율은 봄과 겨울이 60% 정도로 높고 여름은 열에너지의 사용량이 거의 없어서 연료전지에서 생성된 열을 외부로 방출하기 때문에 상대적으로 그 효율이 낮다.

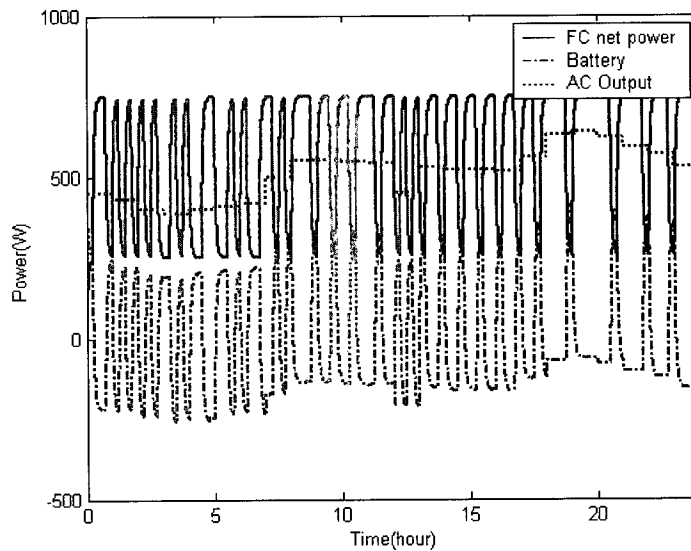
< 표 5-13> 연료전지 부하 제어방법에 따른 효율

구분	계절	case 1	case 2
전체 효율 (%)	봄, 가을	67.9	68.3
	여름	54.1	54.5
	겨울	71.1	71.6
연료전지 시스템 효율 (보일러 제외) (%)	봄, 가을	57.8	58.1
	여름	48.9	49.4
	겨울	56.5	58.1
연료 사용량 (mol)	봄, 가을	142.3	140.3
	여름	140.9	139.2
	겨울	152.4	148.6
공기 사용량 (kmol)	봄, 가을	106590	106130
	여름	105211	102810
	겨울	112443	110410

연료 사용량 측면에서 CASE 2가 CASE 1보다 사용량이 적은 것으로 나왔다. 이는 부하 분배 방식에 따른 연료전지의 출력이 다르기 때문이다. 가장 연료사용량 차이가 많이 나는 겨울의 연료전지 출력특성 결과를 보면 CASE1의 연료전지 출력이 80%가 주를 이루고 있으며 CASE2의 연료전지 출력은 75%가 주를 이루고 있음을 볼 수 있다. 이와 같은 출력 특성에 따라 연료 사용량은 차이를 보이게 된다.



[그림 5-19] CASE 1의 시스템 전기 출력 특성 (겨울)



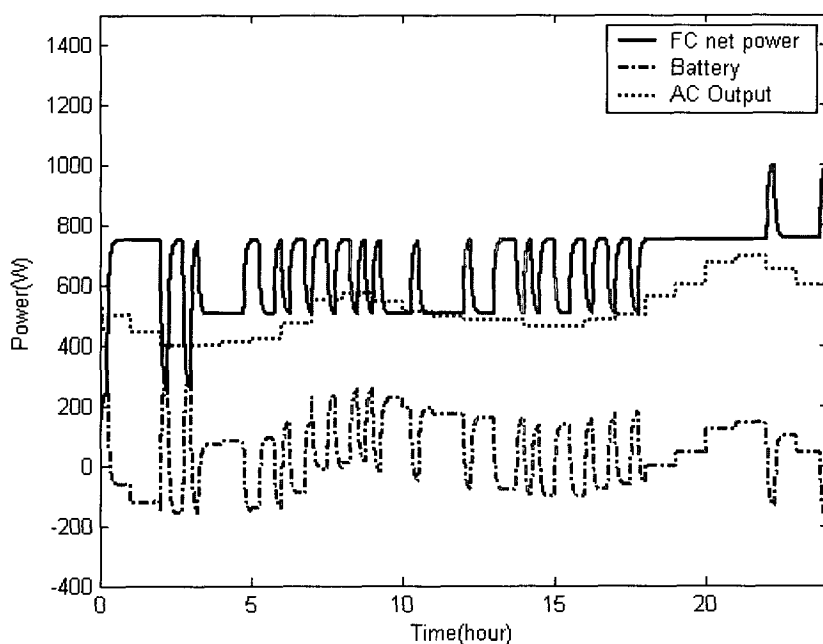
[그림 5-20] CASE 1의 시스템 전기 출력 특성 (겨울)

운전 전략에 따른 연료전지와 축전지 하이브리드 종합시스템의 출력특성을 파악하고, 축전지, 온수저장조 제어특성과 요구부하에 열 및 전기부하 추종 성능 등을 파악하기 위하여 모델링과 컴퓨터 프로그램을 통해 해석한 결과를 분석하였다. 계절별로 봄/가을, 여름, 겨울로 구분하여 해석하였으며 봄/가을철 결과를 위주로 설명하였다.

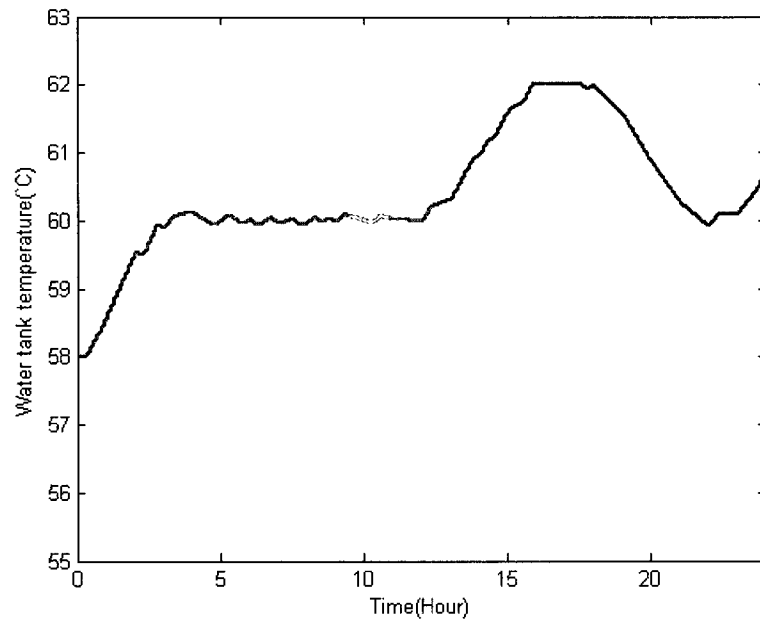
CASE 1에 비해 성능이 다소 우수한 CASE2의 부하 분배방식에 의한 결과를 분석하면 다음과 같다.

[그림 5-21]은 연료전지 부하와 축전지 부하 그리고 인버터의 교류 출력량을 나타내고 있다. 연료전지와 축전지가 부하를 분담하는 것을 알 수 있으며 AC 출력 부하보다 연료전지 출력이 많은 경우에는 축전지로 충전이 일어나고 축전지의 충전용량이 커서 연료전지 출력이 낮아진 경우에는 축전지가 일부를 분담하여 전체적으로 출력 부하를 추종하고 있다.

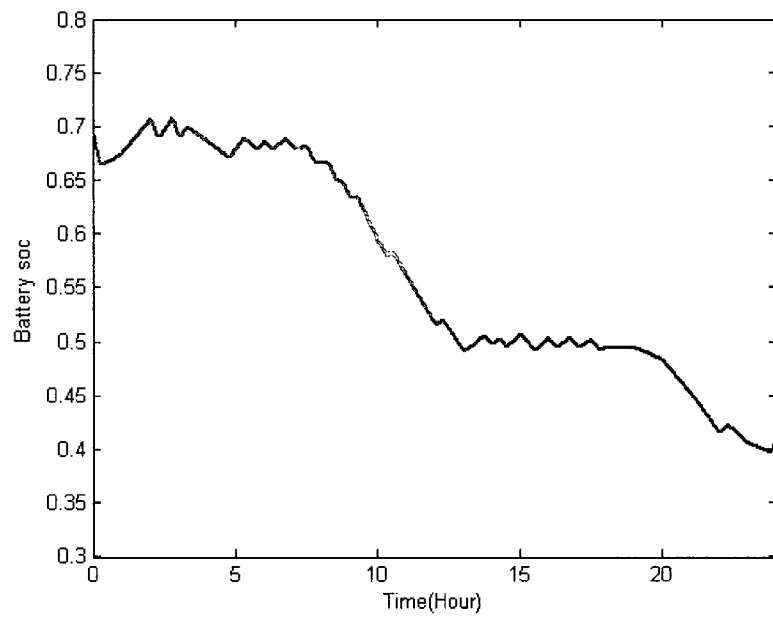
[그림 5-22]은 온수저장조의 온도를 나타내고 있는 것으로 초기 온도인 58 °C에서 시작하여 제어 범위인 60-62°C 사이를 유지하고 있다. [그림 5-23]은 축전지의 충전 상태를 나타내고 있으며 운전 범위는 주로 0.4에서 0.7 사이에 놓여있으며 초기에 높은 충전상태에서 시작하여 외부 전기부하에 따라 축전지에서 출력되고 영역에서도 SoC가 0.5이상을 유지하고 있다.



[그림 5-21] 시스템 전기 출력 특성(봄, 가을)

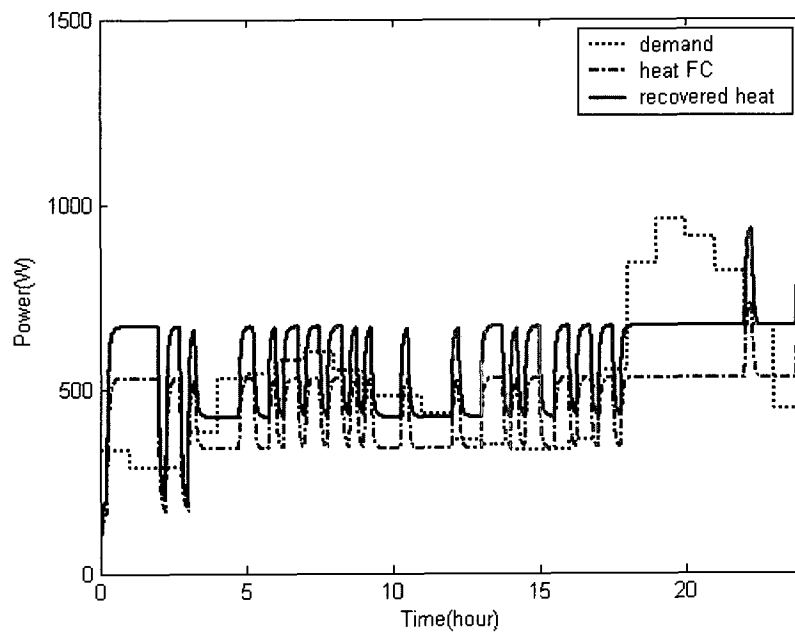


[그림 5-22] 온수탱크 온도 변화(봄, 가을)



[그림 5-23] 축전지의 SoC 변화(봄, 가을)

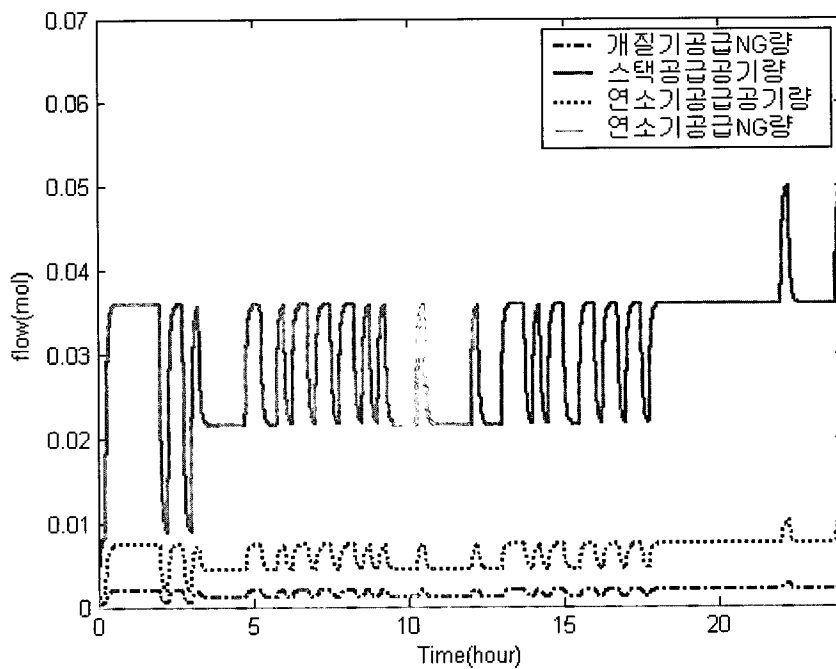
[그림 5-24]는 연료전지 코제너레이션 시스템의 열부하 특성을 나타내고 있는 것으로 초기에는 요구열부하 보다 연료전지 스택과 시스템에서 회수되는 열량이 크므로 수저장조의 온도를 상승시키게 되면 요구열량이 큰 영역에서는 온수조에 저장되어있던 온수가 사용된다. 이것은 [그림 5-22]에서 확인할 수 있으며 요구열량이 적은 경우에는 온도가 상승하고 요구열량이 생산 열보다 많은 경우에는 수조의 온도가 감소하게 된다. 이 시기에는 온수조에 저장되어 있던 양 이상을 사용하지 않으므로 보조 버너는 작동되지 않고 있으며 열량 생산량이 수저장조의 용량을 초과하여 수저장조의 온도가 62℃를 이상 상승하게 되면 수저장조의 온도를 62℃ 이하로 유지하기 위해 방열이 시작된다. 이와 같은 방식에 의해 온수조의 온도가 일정한 범위를 유지하고 가정에서 필요로 하는 열을 저장하였다가 공급하게 된다.



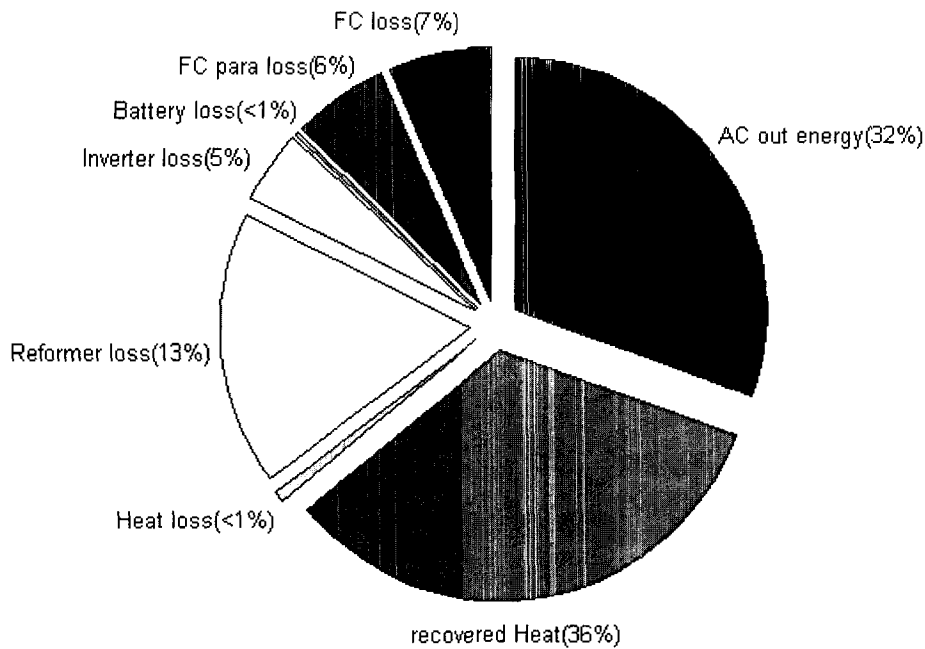
[그림 5-24] 시스템의 열 출력 특성 (봄, 가을)

[그림 5-25]은 연료전지시스템에서 사용되는 반응가스와 연소가스의 유량을 나타내고 있다. [그림 5-21]의 스택출력에 비례하여 연료와 공기가 공급된다. 개질기 연소를 위한 도시가스는 거의 공급되지 않고 있으며 스택 출구의 잔여 개질 가스가 개질기에 반응열을 공급하기 위해 사용되고 있다.

[그림 5-26]은 입력 에너지에 대한 연료전지 시스템의 유효 에너지와 손실을 나타내고 있는 것으로 정격상태에서의 성능이 아니고 하루 동안의 평균값을 나타내고 있는 것이다. 최종 연료전지 시스템의 평균 전기효율은 32%이며 열 회수율도 36% 정도로 전체 시스템 효율은 68%정도가 된다. 이것은 시스템 설계 시 요구사항인 연료전지 전기 효율 35%, 열효율 45%보다 낮은 값이다. 정격상태에서의 연료전지 자체 효율은 설계 조건을 만족하나 시스템 효율은 축전지가 포함되어 충방전이 일어나고 있어 전기적인 손실이 나타나고 있으며 열량의 경우에도 필요이상으로 발생한 열을 방출시켰기 때문에 시스템 측면에서 열회수 효율이 감소하였기 때문이다.



[그림 5-25] 연료 및 공기 공급량(봄, 가을)



[그림 5-26] 시스템 열 및 전기 에너지 출력 및 에너지 손실율(봄, 가을)

본 장에서는 독립적으로 운전되는 주택용 연료전지 시스템의 성능 예측 프로그램을 통해 설계된 시스템의 성능평가와 운전 제어 방법을 평가하였다. 시스템은 정격 1kW급 연료전지와 축전지로 하이브리드 전원시스템을 구성하였으며 도시가스에서 수소로 개질하기 위한 수증기 개질기 그리고 개질기와 연료전지의 열을 회수하기 위한 열관리 설비와 고온 열저장조로 열 시스템을 구성 하였다. 봄/가을, 여름, 겨울철의 대표적인 열과 전기 에너지 소비 패턴을 이용하여 부하가 동시에 변하는 상태에서의 연료전지의 운전 전기효율과 시스템 효율을 분석하였다. 부하와 연계된 시스템 해석을 통해 연료전지/축전지 하이브리드 시스템의 평균 운전 성능과 최적 운전방식을 결정할 수 있었다.

해석 결과에 따르면 전체 시스템의 효율은 계절에 따라 다소 차이를 보이지만 전반적으로는 전기변환 효율 30% 이상, 종합 열효율 70%의 성능을 보이고 있으며 이는 실제 시스템의 성능과 일치하는 결과임을 확인하였다. 본 연구에서 적용한 방법은 주택용과 같은 분산형 전원 시스템은 물론 추후 자동차와 휴대용 연료전지 시스템의 설계단계에 적용하여 시스템의 성능 예측과 최적화에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

제6장 연구 결과 목표 달성도 및 활용계획

제 1 절 연구 결과

본 과제는 고분자 전해질 연료전지 시스템의 실용화를 위해 필요한 체계적인 설계 및 성능예측 기술을 개발하기 위한 것으로 유체역학과 구조 설계가 필요한 스택과 분리판의 경우 유동장과 응력 해석기법을 그리고 에너지 분석을 통한 최적설계가 필요한 시스템의 경우 열역학적 해석기법을 개발하였다. 연료전지 스택과은 형상과 반응 공정의 복잡성으로 인해 컴퓨터를 이용한 해석기법이 필요하다. 설계 기술은 이론적인 기반으로 개념설계를 수행한 후 해석을 통한 성능 예측과 실험을 통한 검증 과정을 통해 확립될 수 있으며 본 연구에서는 고분자연료전지를 위해 수치해석을 기반으로 하여 컴퓨터 기반 설계 기술을 확립하였다. 본 연구는 중국 과학 아카데미 소속 대련물리화학 연구원(Dalian Institute of Chemical Physics, DICP)의 연료전지 연구개발센터(Fuel Cell R & D Center)와 국제 공동 연구로 수행되었다.

시스템 개발을 위해 본 연구원에서 수행해 왔던 실험적인 연구결과와 중국에서의 스택과 시스템 연구 결과를 본 연구를 위한 자료로 활용하였으며, 설계된 분리판과 연료전지의 성능 검증을 위하여 실험을 병행하였다. 양국에서 수행중인 종합적인 연료전지 시스템 개발 연구범위에 맞추어 바이폴라 플레이트 및 스택의 설계 및 해석 그리고 연료전지 통합 시스템의 해석을 수행하였다. 스택과 분리판 설계 및 해석을 위한 적용 대상으로 가정용, 자동차용 그리고 휴대용 연료전지로 하였으며, 시스템으로는 서로 다른 적용 시스템의 부품을 모두 함유하고 있는 독립 운전형 코제너레이션 연료전지로 하였다. 본 연구를 위해 공동연구기관인 DICP의 시스템 구성방안은 물론 해석 프로그램을 참조하였으며 검증을 위하여 한국 측의 연료전지 시험장치를 활용하였다. 바이폴라 플레이트와 스택 해석을 위해서는 자체적으로 사용자 프로그램을 개발하여 상용 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석 프로그램과 연계시켰으며 고분자 연료전지 시스템을 해석하기 위한 프로그램을 실험자료를 기반으로 하여 개발하여 시스템 설계시 부품선정을 위한 trade off 및 성능예측에 사용하였다. 주요 연구내용에 따른 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

○ 연료전지 기술 해외 조사

고분자 연료전지 해석 및 설계 기술의 해외 연구 동향을 분석하기 위하여 적극적으로 국제학회에 참여하였다. 15th World Hydrogen Energy Conference(일본), 2004 Fuel Cell seminar(미국), 2005 Fuel Cell Seminar(미국), 2nd International Conference on Polymer Batteries and Fuel Cells(미국)에 참가하였으며 공동연구기관인 중국의 DICP와 칭화대학 등을 방문하였다. 학회 참가를 통해 연구 결과 발표와 자료 수집은 물론 타 대학과 연구소 그리고 기업과의 정보교환을 통하여 고분자 전해질의 해석과 설계를 위해 필요한 기술을 폭넓게 조사 분석할 수 있었다.

○ 연료전지 이론 및 수치 해석 모델식 확립

이론적인 해석과 수치해석을 위하여 분리판과 스택내부의 유동방정식을 정립하여 검증하였다. 촉매층에서의 전기화학적 반응과 전해질 막에서의 물 거동을 모델식에 포함시켜 분리판 유로에서의 유동과 열전달등과 연계하여 특성을 분석하였다. 단위전지를 해석하기 위하여 분리판의 유동채널과 가스확산층의 다공성 매질 등을 구분하여 일반적인 유동방정식에 전기화학반응과 물질 전달과 관계된 소스(source)항을 포함시켜 유동과 전기화학 반응이 연계된 모델을 정립하였다.

휴대용 연료전지에 적용될 수 있는 자기 호흡식 연료전지의 경우 자연대류에 의한 공기 공급과 수분 제거 특성을 해석할 수 있는 모델을 정립하였다.

연료전지 시스템은 연료전지 스택을 중심으로 운전 장치인 압축기 등 공기 공급설비, 연료공급설비, 열 및 물관리 설비, 그리고 제어 및 전력변환기 등으로 구성되며 각부품의 특성을 이용한 종합적인 성능 해석이 필요하다. 본 연구에서는 개질기를 포함한 가정용 연료전지를 중심으로 각 부품에 대한 특성식이나 모델식을 이용한 전산 해석 프로그램을 구성하였으며 운전방식에 따른 성능을 분석하였다.

○ 분리판 및 스택을 위한 3차원 유동장 및 구조 해석 기술 정립

초기 형상 설계를 위한 간이 설계 프로그램 개발은 물론 연료전지 구조 및 유동장에 대한 정밀 해석 프로그램을 개발하였다.

연료전지 해석 프로그램은 목적에 따라 크게 2가지로 나누어 개발하였다. 첫 번째는 공기, 연료, 냉각을 위한 분리판과 스택의 기계적인 설계 및 성능 검증을 위한 유동장과 구

조 위주의 해석 프로그램이며 두 번째는 연료전지의 전기적 성능예측을 위한 전기화학반응을 고려한 단위전지의 3차원 해석 프로그램이다. 냉각판 설계를 위해서는 열전달 고려한 냉각수 유량 분배 특성을 해석 할 수 있도록 하였다. 또한 연료전지 구조 최적화와 스택 체결압에 의한 전지소재의 변형이 내부 유동장에 미치는 효과를 분석하기 위하여 소재 변형을 고려한 유동장을 계산할 수 있도록 하였다.

○ 컴퓨터 이용 분리판 유동 형상 결정 및 설계

연료전지 성능에 중요한 역할을 하는 분리판을 설계하기 위하여 우선 다양한 유동장 패턴에 대한 비교 분석을 수행하여 다중 사행채널을 고분자 전해질 연료전지를 위한 유로 형태로 선정하였다. 분리판 설계를 위해서는 각 채널로의 균일한 가스공급과 반응에 의해 생성된 물의 원활한 배출 그리고 전기와 열의 전도를 고려해야 한다. 이와 같은 기본적인 설계 요구 조건이 반영되어 개발된 설계 프로그램을 이용하여 용도에 용량에 맞는 분리판의 유동장을 설계하였다. 설계시 가스 종류와 유량, 전류밀도 그리고 활성면적에 따라 채널의 크기와 채널수 그리고 분리판의 가로세로 형상이 결정되도록 하였다. 이론적인 식에 의해 채널 입출구 사이의 압력차가 계산되므로 물배출 등 설계요구조건 만족정도를 확인할 수 있으며, 설계된 분리판은 CFD 프로그램을 이용하여 가스 공급의 균일성, 압력 분포 등을 확인하여 최종적으로 제작을 위한 설계 제원을 정하였다

○ 분리판의 응력 해석을 통한 구조 최적화

연료전지 분리판의 두께와 채널의 크기에 따른 응력 해석을 수행하여 최적의 두께를 계산할 수 있었으며 이를 통해 연료전지의 소형화 설계가 가능하였다. 또한 가스확산층의 구조 변형을 고려한 채널 유동 특성을 분석하였다. 응력해석을 통한 구조 변형을 분리판 유동 해석에 적용해본 결과 가스확산층의 변형이 유동의 흐름과 압력 구배에 영향을 미치고 있었다. 변형을 고려하는 경우가 실제 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 실제 연료전지 분리판을 설계할 경우 전극전해질 소재의 구조적 변형을 고려하여 유동장과 압력손실을 계산해야 하며 이를 고려하여 채널 단면적을 결정할 필요가 있다.

○ 3차원 단위 전지 유동 해석 프로그램 개발

설계된 연료전지 분리판의 성능을 예측하고 연료전지내부의 현상을 파악하기 위하여

공기와 연료용 분리판 사이에 확산층과 전극전해질이 있는 단위전지에 대한 해석을 수행하였다. 단위 전지 해석을 통해 각 구성부위의 유량, 압력 분포는 물론 온도와 전류 분포를 확인 할 수 있어 실험만으로 파악하기 어려운 연료전지 내부 현상에 대한 이해를 높일 수 있었으며 연료전지 전극전해질 등 소재 성능을 직접적으로 스택 유동장 설계에 반영한 최적의 유로 사이즈 등을 결정할 수 있었다.

○ 연료전지 스택 매니폴드 최적 설계 및 해석

스택 설계에 있어서 각 단위전지러 균일하게 반응가스와 냉각유체를 공급해 주기 위해서는 매니폴드와 가스 인입부의 크기와 형상 결정이 중요하다. 본 연구에서는 스택 매니폴드 크기를 연료전지의 용량과 분리판의 채널 크기와 채널 수 등을 고려하여 간이 설계 프로그램으로 계산하였다.

외부가스와 스택 매니폴드와의 연결부를 설계하기 위하여 연결부 완충길이의와 크기 그리고 매니폴드와의 연결 위치에 따른 유동장 해석을 수행하였다. 스택 공급가스와 출구가스가 동일방향인 U자형과 공급가스와 출구가스가 반대 방향인 Z자형 매니폴드의 유동 해석을 통해 가스 균일 공급에 유리한 U자형 매니폴드를 채택하였다.

○ 채널의 크기 변화와 매니폴드의 유량 분배 특성과의 상호 연관성 해석

자동차용이나 이동형 연료전지의 경우 단위 동력당 크기를 줄이는 것이 중요하며, 이를 위해 구조 해석을 통한 분리판 두께 감소는 물론 가능하면 매니폴드 크기와 채널 깊이가 작게하여 분리판의 전체적인 크기를 줄여야 한다.

매니폴드의 단면적이 작아지면 단위전지로 공급되는 유량이 불균일해질 수 있으며 이 경우 스택 전체의 균일한 성능을 기대할 수 없다. 유동의 균일성을 위해서는 채널에서의 유속보다 매니폴드에서의 유속이 상대적으로 적어야 하며 이를 위해서는 전체 채널의 단면적 합보다 매니폴드가 단면적을 크게 설계할 필요가 있다. 매니폴드와 채널과의 관계를 분석하기 위하여 주어진 매니폴드 단면적에서 분리판 채널 깊이를 변화시켜 유량의 균일 분배 성능을 비교하였다. 채널 깊이가 작아질수록 수력저항이 작아지고 평균 유속도 증가하여 입출구사이의 압력 손실은 증가하였으나 유량 분포는 균일해 지는 것을 확인할 수 있었다. 스택에서 어느 정도 압력차가 허용되는 경우 채널 깊이를 줄여서 유량 분배의 균일성을 확보하면서 동력밀도를 향상시킬 수 있을 것이다.

o 연료전지 시스템 설계 및 해석

연료전지 시스템은 스택을 중심으로 공기 공급설비, 연료변환 및 공급설비, 열 및 물관리 설비, 그리고 전력변환기 등으로 구성되며 자동차나 가정용 연료전지와 같이 적용 시스템에 따라 부품들의 사용가스 등의 특성과 조합이 달라질 수 있으므로 용도에 따른 시스템의 최적 구성과 설계가 필요하다. 본 연구에서는 개질기를 포함한 가정용 코제너레이션 연료전지를 중심으로 각 부품에 대한 특성식과 모델식을 이용한 전산 해석 프로그램을 개발하였으며 주어진 부하와 운전 방법에 따른 성능을 분석하였다. 이를 통해 설계된 연료전지 종합 시스템의 계절별 성능을 예측할 수 있었으며 운전 방법에 따른 성능 비교를 통해 최적의 운전 제어알고리즘을 확보할 수 있었다.

본 연구를 통해 분리판과 스택의 간이화된 설계 프로그램을 개발하였으며 연료전지 유동장 및 시스템 해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 사용할 경우 다양한 용도와 용량, 그리고 운전 조건이 다른 고분자 전해질 연료전지를 위해 경험을 바탕으로 제작되었던 스택 모듈과 시스템을 설계와 해석을 체계화 시킬 수 있을 것이다. 또한 다양한 전극전해질 접합체(MEA)의 특성과 적용시스템에 부합되는 대면적 유동장의 채널 설계가 가능하여 MEA 등의 소재 성능을 최대로 이용할 수 있는 고효율 고용량의 스택 구성이 가능해질 수 있으며 이와 병행하여 시스템 운전장치의 최적화도 가능해질 수 있다. 이와 같은 설계와 해석 기술을 통해 연료전지 스택과 시스템의 성능은 물론 내구성을 높일 수 있어 분산형은 물론 휴대용과 자동차용 연료전지의 상용화를 촉진시킬 수 있을 것이다.

제 2 절 연구 개발 목표 달성도 및 대외 기여도

본 연구는 중국 DICP와의 국제공동연구를 통해 고분자 전해질 연료전지의 컴퓨터를 이용한 성능해석 및 설계 기술을 개발하기 위한 것이다. 연구 대상인 분리판과 스택의 경우 유동장과 구조 최적화를 그리고 시스템의 경우 성능 예측 및 최적 운전기술을 위주로 연구가 수행되었다. 국제공동과제의 상대팀인 DICP의 연료전지 연구개발 센터는 중국을 대표하는 연료전지 연구기관으로 4개의 연구 그룹으로 구성되어 있으며 그중 2개의 그룹이 고분자 전해질 연료전지 소재와 스택/시스템을 각각 개발하고 있다. 본 연구는 DICP의 스택/시스템 개발 연구그룹과 공동으로 연료전지 설계 및 해석에 대한 연구를 수행한

것으로, 양국에서 매년 2회 이상의 방문을 통하여 실질적인 정보 교환과 공동 연구를 수행하였다.

본 연구는 궁극적으로 고분자 전해질 연료전지를 위한 실용적인 성능 예측 프로그램과 설계 프로그램을 개발하여 스택과 시스템의 설계 최적화와 운전 최적화를 이루기 위한 것으로 수행된 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 해외 기술 분석과 결과 발표 및 검증을 위한 국제학회 참석
- 분리판 해석을 위한 연료전지 내부 유동 해석 프로그램 작성
- 고분자 전해질 연료전지의 전산 해석을 위한 모델식 유도
- 분리판 유동 채널 형상 결정 및 최적 설계
- 분리판의 응력 해석을 통한 구조 최적화
- 스택을 위한 매니폴드 설계와 해석
- 채널의 크기에 따른 매니폴드의 유량 분배 특성 분석
- 시스템 개념 설계 및 열역학 해석 프로그램 개발
- 시스템 최적 설계 및 운전 제어 방법 개발

이들 내용은 연구 결과에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구를 통해 전부 성공적으로 수행되었다.

본 연구 결과를 이용할 경우 현재 개발 중인 자동차용 연료전지와, 가정용 연료전지 그리고 휴대용 연료전지를 운전 조건에 맞추어 설계하여 성능을 예측할 수 있다. 연구 결과는 선진 외국과 거의 동등한 수준에 도달하고 있으며 Fuel Cell science & Technology Conference(2005영국, 2004독일) 등 국내외 학술대회에 8회 이상 발표되었으며, Journal Of Power Source 등 국내외 저널 및 논문지에 5회 이상 게재되어 기술력의 우수성을 평가 받았다. 또한 연료이용률을 향상시키기 위한 스택 설계기술과 최적 운전 제어기술이 특허로 2건 등록된 상태로 연구 성과에 의해서도 연구의 목표를 충분히 달성한 것을 확인할 수 있다. 본 과제를 통해 고분자 전해질 연료전지 분리판과 연료전지 시스템 성능 예측과 설계 기술을 세계적인 수준으로 높일 수 있었으며 대표적인 적용 시스템인 연료전지 자동차와 가정용 연료전지 그리고 휴대용 연료전지의 기본 설계와 해석에 실용적으로 적용할 수 있게 되었다. 또한, 지금까지 연구가 거의 이루어지지 않고 있던 스택과 분리판의 응력 해석을 통한 최적화에 대한 기반을 확립하였으며 구조 변형이 채널 압력

손실에 미치는 효과를 분석하여 실질적인 분리판 유동장 설계에 반영할 수 있었다.

본 연구를 통해 개발된 고분자 전해질 연료전지 시스템 해석과 설계기술은 소형 휴대용 연료전지 시스템에서 분산형 코제너레이션 시스템까지 연료전지 동력과 전원이 필요한 부분에 광범위하게 적용될 수 있어 국내 연료전지 실용화 기술의 경쟁력을 높일 수 있을 것이다. 또한 에너지 절약과 온실가스 저감 등 환경개선에 크게 기여할 수 있을 것이며 장기적으로는 연료전지가 원동기가 되는 수소 경제사회 조기 구현에 기여할 수 있을 것이다. 기대효과를 정리하면 다음과 같다.

- 연료전지 시스템의 상용화에 기여
- 수송용 및 분산형 연료전지 산업화를 통한 고용 창출
- 연료전지를 비롯한 다양한 분야의 응용가능성으로 국내외의 새로운 시장 개척 및 수출기여
- 타 유형 및 다양한 용도의 연료전지의 성능향상에 활용 (DMFC, 휴대용, 가정용, 수송용 PEMFC)
- PEM electrolyzer 등 타 기술에 응용 가능
- 기타 관련 산업 발전에 기여
 - 고효율 연료전지 차량 개발에 의한 수입에너지 비용 감소
 - 관련 핵심원천기술의 수출 가능성
 - 연료전지 자동차(승용 및 상용차), 군용(잠수함, 비상발전), 주택 및 건물용 분산전원, 에너지저장, 소규모 특수전원 등으로 이용
 - 화학공업 계열 산업, 소재산업발전에 기여

제 3 절 연구개발 결과의 활용 계획

본 연구는 고분자 전해질 연료전지의 엔지니어링 기술력 확보를 위해 컴퓨터를 이용한 설계와 해석기술을 개발하기 위한 것으로, 연구 결과는 연료전지 자동차, 연료전지 이용 소형 코제너레이션 시스템, 무정전 전원장치, 그리고 IT용 연료전지 시스템의 설계와 성능 예측 기술로 활용될 수 있다. 컴퓨터를 이용한 고분자 전해질 연료전지의 해석 및 설계 기술을 적용할 경우 스택과 시스템을 체계적으로 설계하여 적용 시스템의 성능 향상은 물론 표준화가 가능하여 가격 저감과 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다. 또한 운전

조건을 최적화 시킬 수 있어 연료전지를 항상 최적으로 유지하여 제품의 효율 향상과 내구성 개선에도 기여할 수 있을 것이다.

제작되어 사용되는 스택을 분석하면 동일한 전극전해질 접합체와 분리판을 사용하여도 성능에 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 고분자 전해질 스택 제작에 표준화된 설계기술을 적용할 경우 전극전해질과 성능을 최대로 활용할 수 있는 균일한 성능을 기대할 수 있을 것이다. 이론적인 접근 방식에 구조 최적화와 유동 최적화를 병행하여 수행할 경우 최소의 크기로 최대의 동력을 낼 수 있는 연료전지의 분리판과 스택의 설계가 가능해질 수 있을 것이다. 이를 통해 실용화를 앞당기게 되면, 고효율 최적의 연료전지 보급 확대로 국가적으로 에너지 사용량과 온실가스 발생량을 크게 줄일 수 있게 될 것이다.

본 연구의 결과는 다음과 같이 여러 분야에 활용할 수 있다.

- 고분자 전해질 연료전지 스택 및 분리판의 독자적인 개발에 이용
 - 연료전지 자동차, 분산전원, 에너지저장, 소규모 특수전원 등으로 이용하여 고부가가치 산업의 경제성을 향상시킴.
- 가정용연료전지 등 분산형 코제너레이션 시스템 성능 예측 및 설계 기술로 활용
- 자동차, 전기 스쿠터, 잠수함 등 수송용 기계의 구동 전원 설계 기술로 활용
- IT용 연료전지 등 고효율 휴대용 전원 개발에 활용될 수 있으며 다양한 용도의 PEMFC 및 타 연료전지 개발 시 핵심기술 제공
- 고분자 전해질 연료전지 설계, 제작 표준화 기술로 활용
- 고분자 전해질 연료전지 스택 및 시스템의 성능 평가 도구로 활용
- 연료전지 운전제어기 개발에 활용
- 연료전지 설계 패키지 상용 프로그램 개발에 활용
- 틈새시장으로 레저용 전원, 옥내외 공사용 전원, 긴급 또는 재해시의 비상용 전원, 통신 계측용 휴대용 전원, 병원 등의 예비전원, 컴퓨터 백업 전원으로 사용

미국, 일본, 독일의 경우 이미 실험용 연료전지 자동차의 개발을 마치고 2010년 이후에 상용화시키려고 시도하고 있으며 주택용 연료전지의 경우도 일본에서는 2005년까지 실용화 연구를 마치고 5년간의 대규모 실증실험을 통한 도입기간을 거쳐 2010년부터 보

급시키려는 계획으로 연구개발과 보급이 가속화되고 있다. 국내의 경우도 2006년도에 실증을 통한 실용화 촉진을 위하여 가정용 연료전지와 연료전지 자동차에 대한 모니터링 사업이 시작되었다. 본 연구의 기술이 고분자 전해질 시스템 개발과 모니터링 사업과 개발 사업을 통해 제지된 문제점 개선에 적용될 경우 분리판과 스택은 물론 종합 연료전지 성능 향상은 물론 시스템의 개발비 저감을 통해 기술 경쟁력을 강화시킬 수 있으며 실용화 보급화에 기여할 수 있을 것이다.

제 7 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 세계 수소학회(World Hydrogen Energy Conference)

1. 학회 기술 개요

수소 연료전지 분야의 논문 발표와 제품 전시를 통해 기술 개발을 촉진하기 위해 열린 World Hydrogen Energy Conference(WHEC)에 참석하였으며, 같은 기간에 열린 현장답사에 참여하여 관련 기술을 분석하였다. WHEC는 2년에 한 번씩 열리는 수소분야 세계 최대 규모의 학회로 수소 생산, 저장 및 응용기술 전반에 대해 기술 발표와 현황과 전망에 대한 주제 발표가 이루어지고 있다. 15차 WHEC는 일본 요코하마에서 2004년 6월 27일부터 7월 2일까지 열렸으며 학회 참여인원 약 1,700여명 전시회 참여인원 400여명으로 총 2000명이상이 참여하여 기술교류가 이루어졌다. 학회의 주요 발표주제는 수소 연료전지 기술의 비전에서부터 기술개발까지 14개 분야로 각 분야별로 다시 세분화되어 논문이 발표되었다. 중요한 주제로 활발하게 기술이 발표된 분야는 수소 생산과 연료전지 분야로 수전해, 열분해, 개질기, 바이오 수소 생산, 신재생에너지로부터의 수소 생산기술에 대한 기술과 고분자전해질연료전지, 직접메탄올연료전지, 용융탄산염연료전지, 고체산화물연료전지에 대한 기술이 발표되었다.

연구개발이 가장 활발하게 진행되고 있는 고분자 전해질 연료전지의 경우 약 40편의 기술 논문이 발표되었으며 해석기술, 시스템 개발, 하이브리드 운전 등 시스템 분야와 촉매, 확산층, 분리판 등 등 요소 분야에 대한 기술이 각각 20 편씩 발표되었다.

학회 기간 중에 진행된 요코하마와 동경지역의 기술 견학을 통해 가정용 연료전지 실험센터와 수소 스테이션을 방문하였으며, 별도로 요코하마 대학의 연료전지 실험실인 神谷 연구실을 방문하여 주로 기초 연구가 이루어지고 있는 일본 대학의 연료전지 기초기술 수준을 파악할 수 있었다. 한국의 경우 연구소와 기업을 중심으로 스택과 시스템 기술이 동시에 연구되고 있는 반면에 일본의 경우 대학과 연구소에서는 기초연구가 진행되고 있었으며 산요, 파나소닉 등 가전기기를 개발하는 주요기업과 토요타, 혼다 자동차 회사 등 대기업을 중심으로 시스템 연구가 진행되고 있었으며, 가스 협회등과 국가가 주도가 되어 표준 기술 등을 확립하고 있어 역할분담에 따른 체계적인 연구가 진행되고 있었다.



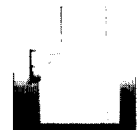




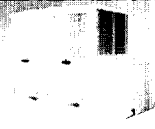

2. 기술 분석

가. 시스템 기술 분석

(1) 가정용 연료전지

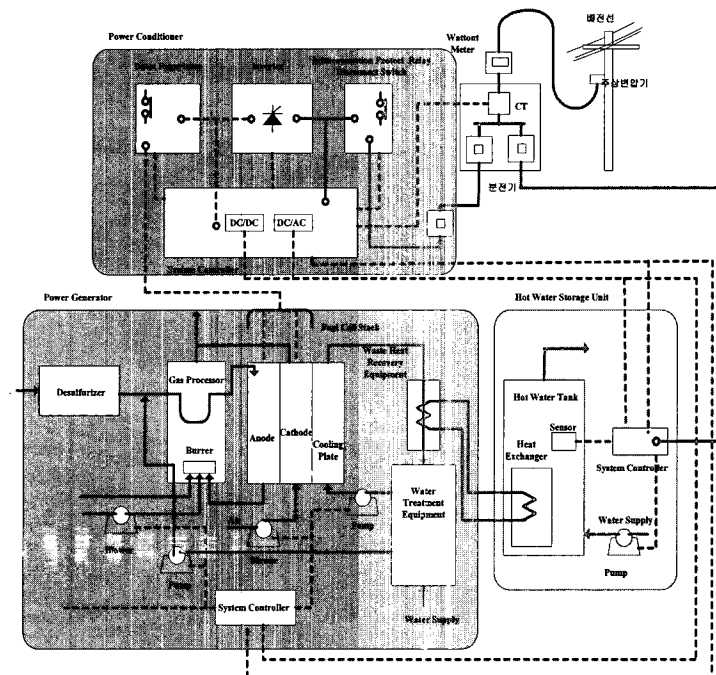
연료전지 분야에 발표된 내용은 총회에서 기술 현황과 전망을 비롯하여 오후의 기술 논문 발표 분야에서 촉매전극, 전해질, 스택, 시스템 종합화 및 운전 제어 등 모든 분야에 걸쳐 대학교와, 연구소, 기업체에서 83편 정도의 논문이 발표되었다. 이중에서 현재 상용화에 근접하여 연구 개발이 활발하게 진행되고 있는 고분자 전해질 연료전지의 경우 절반이 넘는 43편 정도의 논문이 발표되었다. 주요 발표 내용을 분류하면 촉매 저감 및 귀금속 촉매 대체기술과, 저가 분리판 기술, 전류 분포를 비롯한 연료전지 내부 특성 분석, 확산층 성능 분석, 컴퓨터를 이용한 연료전지 해석 기술, 종합화 기술, 연료전지/축전지 하이브리드 기술, 성능저하 문제, 시스템 개발 기술 등으로 40편 이상의 다양한 기술이 소개되었다. 학회기간에 실내와 실외로 나누어져 연료전지와 수소와 관련된 기술이 전시되었는데 내용으로는 주로 가정용 연료전지 시스템, 개질기 시스템, 연료전지 요소 기술과 운전장치(BOP) 관련 기술, 그리고 연료전지자동차 및 스테이션에 관한 것이었다.

가정용 연료전지 코제너레이션 시스템은 [그림 7-1]과 같이 1kW급과 5kW급 제품의 개발이 이루어지고 있다. [그림 7-2]는 고분자 전해질 연료전지 코제너레이션 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 연료전지 스택과 개질기를 포함하는 동력 발생 부분, 고온수를 저장하기 위한 저장 부분, 외부의 전력시스템과의 연계 및 가정 전원에 적합한 형태로 전원을 변환하는 부분으로 이루어진다.

 <p>EBARA Ballard Corp. Rated output: 1.0 kW Class FC unit: W900×H900×D280 Hot well Tank: 200L Fuel: Natural Gas</p>	 <p>SANYO Electric Co., Ltd. Rated output: 1.0 kW Class FC unit: W760×H1000×D330 Hot well Tank: 160L Fuel: Natural Gas</p>	 <p>Toyota Motor Corp. Rated output: 1.0 kW Class FC unit: W700×H900×D360 Hot well Tank: 150L Fuel: Natural Gas</p>
 <p>Toshiba International Fuel Cells Corp. Rated output: 1.0 kW Class FC unit: W830×H845×D300 Hot well Tank: 300L Fuel: Natural Gas</p>	 <p>Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. Rated output: 1.0 kW Class FC unit: W710×H940×D370 Hot well Tank: 150L Fuel: Natural Gas</p>	 <p>Matsushita Electric Works, Ltd. Rated output: 1.0 kW Class FC unit: W800×H1000×D370 Hot well Tank: 150L Fuel: Propane</p>
 <p>Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Rated output: 1.0 kW Class FC unit: W960×H1020×D350 Hot well Tank: 200L Fuel: Natural Gas</p>	 <p>Ping Power Rated output: 5.0 kW Class FC unit: W1990×H1735×D1059 Hot well Tank: 315L Fuel: Natural Gas</p>	 <p>Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd. Rated output: 5.0 kW Class FC unit: W1787×H1710×D752 Hot well Tank: 200L Fuel: Natural Gas</p>

(Unit: mm)

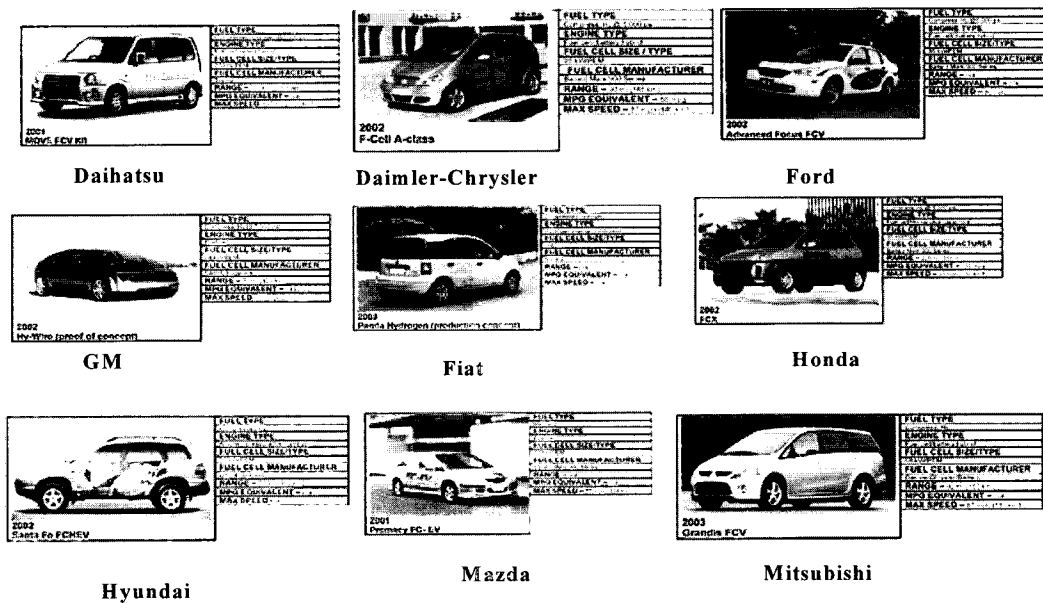
[그림 7-1] 분산형 연료전지 시스템 개발 현황



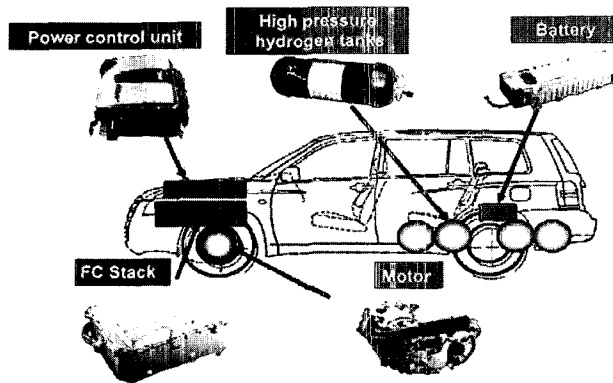
[그림 7-2] 연료전지 코제너레이션 시스템

(2) 자동차용 연료전지

[그림 7-3]과 같이 GM, 포드, Toyota, 혼다, 다임러 클라이슬러 등의 주요한 자동차 회사들이 모두 연료전지 자동차의 개발에 참여하고 있다. [그림 7-4]는 연료전지 하이브리드 자동차의 구성요소를 나타낸 것이다. 차체, 연료전지 스택과, 수소저장 탱크, 축전지, 모터, 그리고 제어기로 등으로 구성된다. GM과 Toyota는 연료전지 스택 제작기술을 확보하고 있어 자체 제작한 스택을 장착하여 사용하고 있으며, 다른 자동차 제조사들은 Ballard와 UTC 등으로부터 스택을 공급 받아 사용하고 있다. 연료전지 자동차가 상용화 되기까지는 저온과 고온에서의 운전, 수소의 저장, 가격 등 해결하여야 할 과제들이 많이 남아있다.



[그림 7-3] 연료전지 자동차 개발 현황



[그림 7-318] 연료전지 자동차 부품 구성

(3) 실증 연구

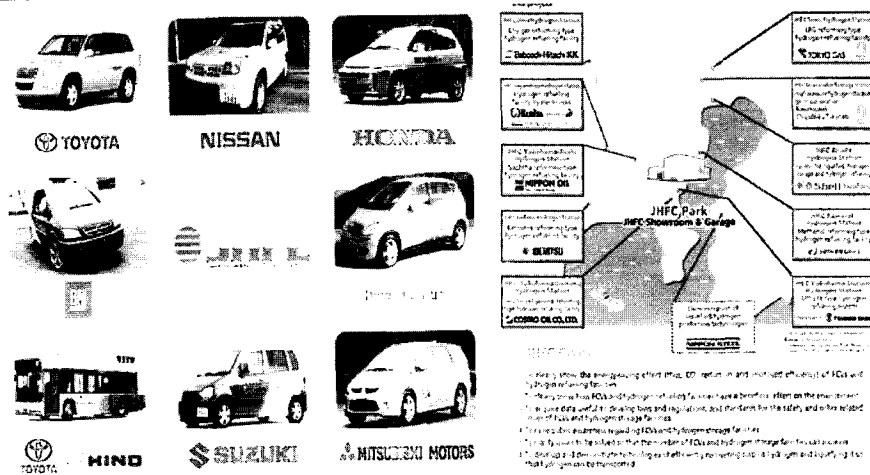
(가) 가정용 연료전지

일본은 Millennium Residential PEFC program에 의해 가정용 연료전지에 대한 실증 연구를 수행하고 있다. 이 프로그램의 목표는 성능평가, 안전 표준 개발 및 법령제정을 위한 연구를 수행하는 것이다. 현재 3곳에서 1kW, 5kW, 0.25kW급의 66unit을 대상으로 실증실험을 수행하고 있다. <표7-1>은 참여기업과 시스템을 요약한 것이다. 성과와 관련되어 전지적인 효율과, 열효율, 배기, 내구성에 대한 실증 실험을 하고 있으며, 안전과 관련하여 설치 장소의 온도변화, 가스의 누출과 같은 비정상적인 상태에서의 안전에 대한 실증 실험을 수행하고 있다.

<표 7-1> 고분자 전해질 연료전지 시스템 시범 운전 현황

Manufacture	Rated Power	Fuel	Usage	Units				
				FY00	FY01	FY02	FY03	FY04
Ebara Ballard	1kW Class	Natural Gas	Stationary	2	2	2	3	1
Sanyo Electric				2	2	2	3	1
Toshiba IFC				2	2	2	3	1
Panasonic				2	2	2	3	1
Toyota				1	1	1		1
Mitsubishi EIC					1			
Mitsubishi HI						2	2	1
Mitsubishi IFC						1		
Toshiba IFC		Propane						1

IHI	5kW Class	Natural Gas				2	2	1	
Plug Power					1	1			
UTC/TIFC					1				
Nuvera								1	
H Power				Propane	1	1			
Eneos	Naphtha					1			
Matsushita EW	0.25kW	Butan	Portable	1		1			
Total							66 Units		



[그림 7-5] 일본의 연료전지 자동차 실증 실험

(나) 자동차

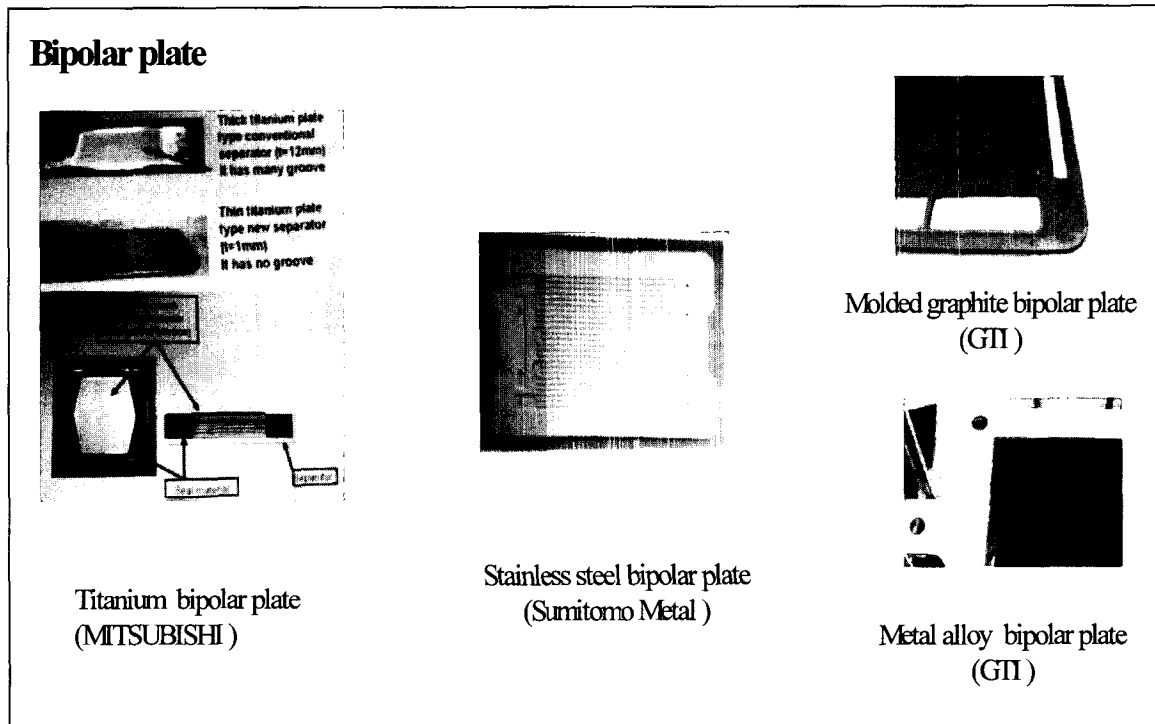
[그림 7-5]와 같이 각국은 연료전지 자동차의 실증실험을 하고 있다. 일본의 경우 JHFC(Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project)를 수행하고 있으며 미국은 캘리포니아 파트너십에 의해 그리고 유럽은 CUTE 프로그램이 진행되고 있다. 일본의 경우 14개의 수소 스테이션에서 LPG, 메탄올, 납사 등을 수증기 개질의 방법으로 수소를 생산하여 연료전지 자동차의 연료를 공급하고 있으며, 8개의 자동차 제조회사가 참여하고 있다

나. 핵심요소 기술 분석

(1) 분리판

분리판은 전극전해질접합체(MEA)에 연료와 공기를 공급하기 위한 유로를 형성하고 전기적 회로의 연결 역할을 한다. 분리판은 갖추어야 할 조건은 다음과 같다.

- 낮은 전기적 저항
- 화학적 안정성
- 기계적인 강도
- 낮은 가격



[그림 7-6] 분리판 기술 개발

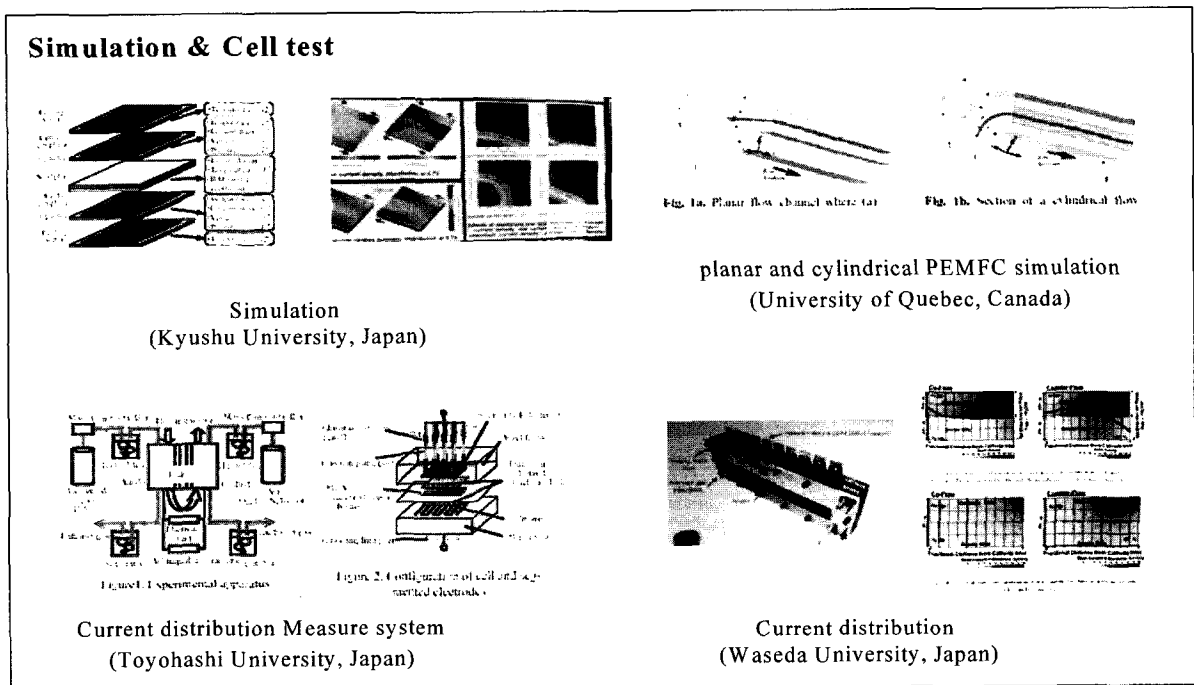
[그림 7-6]과 같이 분리판에 대해서는 Misubishi 전기에서는 Graphite-Polymer Composite와 Titanium재료에 대한 연구 결과 발표가 있었다. Misubishi 전기는 Titanium재료로 만든 일반적인 유로 형태의 분리판과 그물망(Mesh) 형태의 분리판을 연구한 결과를 발표하였다. Mesh 형태를 사용하는 경우 유로에서 압력 손실이 줄어들고, 연료전지 셀과 분리판과의 접촉력이 증가하여 전기적인 전도도가 증가한다고 발표하였다.

미국의 GTI(Gas Technology Institute)는 몰드형 그래파이트와 금속 분리판에 대한

연구를 발표하였다. 일본의 Sumitomo Metal Industries는 stainless steel 금속 분리판에 대한 결과를 발표하였다.

(2) 연료전지 해석 및 실험 기술

중국의 Tsinghua 대학, 일본의 Toyohashi, Waseda 대학에서는 연료전지 단위 셀을 격자로 나누어서 성능해석한 결과를 발표하였다. 캐나다의 Quebec 대학에서는 Cylindrical 과 Planar 형태의 고분자 연료전지에 대한 시뮬레이션 결과를 발표하였는데, Cylindrical 형태가 스택에서의 물의 제거가 용이하여 성능이 높다는 결과를 발표하였다 [그림 7-7].



[그림 7-7] 연료전지 수치 해석 및 실험장치

(3) 전극 촉매

전극촉매에 대한 연구는 크게 두 가지로 백금을 주금속으로 사용하면서 제2금속을 첨가하거나 탄소나노튜브와 같은 지지체를 사용하여 백금사용량을 줄이고자 하는 방향과 백금을 대체할 수 있는 새로운 재료에 대한 방향으로 분류된다. 백금에 첨가되는 제2금속으로는 Cu가 효과적인 것으로 보고되었으며, 백금 담체로는 탄소나노튜브, 탄소나노화이버 및 활성탄을 기본물질로 하는 큰 기공의 나노탄소재료 등이 적용되었다. 백금 대체 촉매로는 Tantalum Oxynitrides, Tungsten Carbide 등 새로운 재료들에 대한 시도들이 있

3. 요약 및 제언

제 15차 WHEC에서 연료전지 분야와, 연료변환 및 주변기기, 그리고 기타 분야 등 8개 분야로 나누어 80여편의 논문이 발표되었으며, 연료전지 자동차는 별도로 논문이 발표되었다. 선진 각국에서 경쟁적으로 개발하고 있는 고분자 전해질 연료전지 기술개발과 응용분야에 40편이상의 논문이 발표되었다. 세계 각국에서 연료전지관련 학회와 전시회가 계속적으로 열리고 있는 상황에서 수소학회에서 연료전지 관련 논문이 다수 발표되고 있는 것은 현재 연료전지 기술 개발에 대한 관심이 그대로 반영되고 있는 것을 나타내고 있다.

논문발표와 더불어 수소와 연료전지와 관련된 기술전시가 이루어졌다. 야외에서는 연료전지 자동차와 수소 스테이션 그리고 가정용 연료전지 열저장 시스템에 대한 기술이 소개되었으며, 실내에서는 다양한 수소관련 기술과 더불어 Idemitsu Kosan, Nipon oil, IHI, 후지 등에서 연료전지 시스템에 대한 전시가 이루어졌다. 일본의 경우 가정용 연료전지에 대한 공인된 성능 평가를 통해 기술을 비교평가하고, 실용화 기술 개발을 촉진하기 위해 동경, 오사카, 나고야 3군데에 가정용 연료전지 성능평가 센터를 운영하고 있으며 학회기간에 이루어진 기술견학을 통해 동경에 위치한 연료전지 성능 평가센터를 방문하여 에바라 발라드, IHI, Nuvera 등 일본과 국외에서 생산된 다양한 연료전지 시스템에 대한 성능평가 시설과 시험방법을 파악할 수 있었다.

4. 수집자료 및 참고문헌

- 15th World Hydrogen Energy Conference Abstracts, Yokohama, Japan, 2004
- NEDO Special Address, NEDO, 2004
- Gen Inoue, etc, " Numerical analysis of current distribution in PEFC and optimization of operating condition", Kyushu Uni., 2004
- Gen Inoue, etc, " Effect of channel Shape in the Separator on comprehensive performance of polymer electrolyte fuel cell- Mathematical and experimental studies," Kyushu Uni.,2004
- Fuel Cell Vehicle, Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project
- 최신의 수소 기술 II- 일본의 수소사회를 목표로 한 연구개발과 실증 프로젝트와 금후의 과제, 일본 공업 출판, ISBN4-8190-1604-0

제 2 절 2004 연료전지 세미나

1. 학회 및 전시회 개요

고분자 연료전지 기술(PEMFC)에 대한 논문발표와 최신 기술 습득을 위하여 2004년 11월 1일부터 11월 5일까지 미국 산 안토니오에서 열린 2004 Fuel cell seminar 참석하여 기술을 분석하였다.

연료전지 기술은 미국과 일본, 유럽 등이 주도적으로 개발이 이루어지고 있으며 관련 기술에 관한 국제 학술발표나 전시회가 이런 추세를 반영하여 일본과 미국등에서 대규모로 개최되어 최근의 결과들이 발표 또는 전시되고 있다. 특히 고분자 전해질 연료전지 기술은 자동차용과 가정용 전원을 중심으로 미국과 일본이 경쟁적으로 개발하는 분야로 최근에는 양국을 중심으로 실증연구가 본격적으로 이루어지고 있다. 미국에서 매년 개최되는 연료전지 세미나(Fuel Cell Seminar)는 학계, 연구소, 기업 및 사용자들 간의 정보 교류를 목적으로, 수준 높은 많은 기술 논문과 산업체의 실용화 수준과 경향이 발표되는 연료전지 기술 관련 세계 최대 규모의 학술대회로 올해에도 약 3,000여명이라는 대규모 인원이 참석하였으며 국내에서도 50여명 정도가 참석하였다. 발표된 기술 논문과 전시회를 통해 최근의 연구개발 결과와 차후의 기술 개발 방향을 어느 정도 판단할 수 있었다. 2004 연료전지 세미나에 발표된 기술 논문 분포를 살펴보면 고분자전해질연료전지(PEMFC)관련 160여편, 고체산화물 연료전지(SOFC)관련 80여편, 용융탄산염연료전지(MCFC) 관련 10편, 연료변환기관련 30여편, 직접메탄올연료전지와 휴대용관련 20여편, 수소관련 35편, 기타 25편 등이 발표되었다. 전체 발표 논문 중 PEMFC 시스템에 관련된 것이 가장 많았으며 PEMFC용 개질기를 포함할 경우 2/3 정도가 되어 최근의 연구 개발 및 실용화 추세를 그대로 반영하고 있다. 또한 세미나 기간 중 100 여개 회사에서 연료전지 소재와 BOP 및 센서 등 연료전지관련 제품을 전시하였다

2. 기술 분석

- 일시 : 2004년 11월 1일 ~ 11월 5일
- 장소 : 미국 샌안토니오 Henry B. Gonzalez Convention Center
- 주관 및 협찬 :
 - Fuel Cell Seminar Organizing Committee

- US DOE, US Army Corps of Engineers,
- Advanced Technology Program
- EPRI, Gas Technology Institute
- NASA, US Fuel Cell Council(미국)
- EC, ECN(유럽),
- FCDIC 일본)

연료전지 세미나는 미국과 일본을 중심으로 연구 개발기관, 대학, 제작사, 판매자 및 사용자들이 모여 연료전지 관련 기술의 최근 연구개발 결과, 실용화 실적 및 계획 등에 관하여 발표하는 연료전지 관련 세계 최대의 학술회의로 매년 미국에서 개최되고 있다. 올해에도 약 3,000명 이상의 많은 연료전지 관계자들이 참석하였으며, 발표논문도 350여 건이며, 기술 전시업체도 100개 이상에 이르는 등 최근 연료전지의 관심을 그대로 드러내고 있다.

연구개발 경향에 따라 많은 응용분야와 빠른 기술 개발 속도로 가까운 장래에 실용화가 가능하며 상용화시 이동형, 가정용, 자동차용 전원 등 그 파급효과가 큰 고분자 전해질 연료전지 분야의 발표에 많은 참석자들이 몰려 관심이 집중되었다. 또한 고분자 전해질 연료전지의 연료 공급을 위한 연료개질 공정기인 개질기에 대한 발표 건수가 증가하고 이에 대한 연구 개발이 가속되고 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 상대적으로 장기간 개발되어 온 MCFC(용융탄산염 연료전지), AFC(알칼리 연료전지), 그리고 PAFC(인산형 연료전지)에 대한 발표는 거의 없었다. 그리고 최근에 새로운 관심과 개발이 이루어지고 있는 SOFC에 대한 발표와 기술전시가 증가되고 있다. 현재의 기술 추세가 그대로 나타나고 있다.

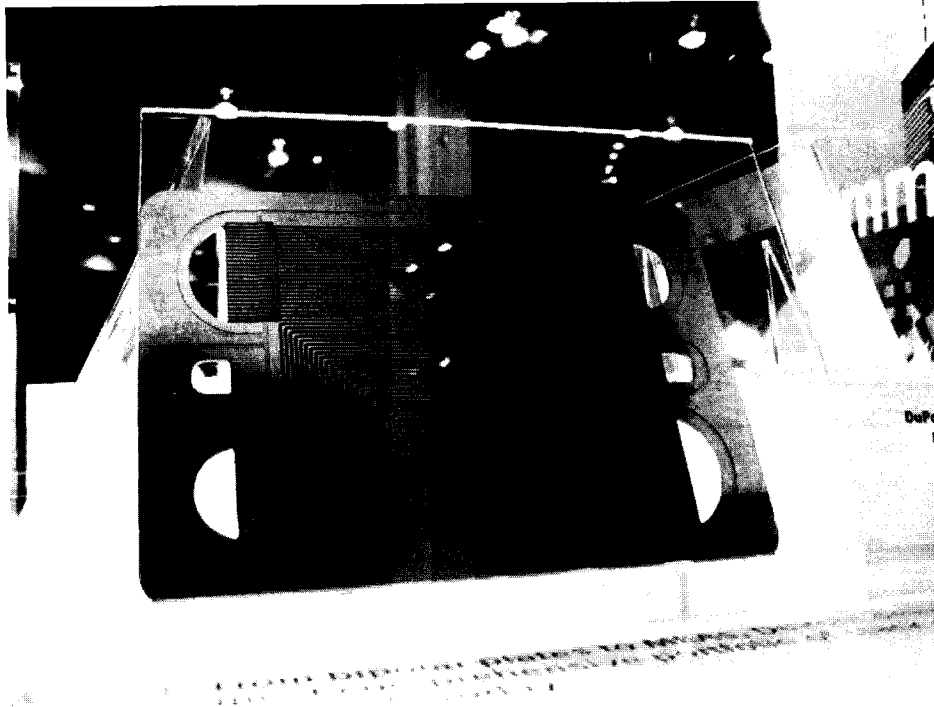
발표된 논문들은 총 구두발표 논문 350 편중 PEFC 등 고분자 전해질 연료전지 관련 기술 논문 발표수가 160편을 차지하여 이 분야에 대한 최근의 활발한 연구 개발 경향을 반영하고 있으며, 많은 참석자들이 이 분야의 발표에 많은 관심을 보이고 참여하였다. 연료 개질기 개발에 대한 발표도 30여건으로 연구 개발이 활발히 이루어지고 있었다.

발표된 논문과 전시 자료를 통해 분석된 최근의 연료전지 발전기술의 경향을 보면 다음과 같다. 가정용 및 자동차용 전원으로 응용하는 고분자 연료전지(PEFC)는 그 파급효과가 아주 크고 연구 개발 및 제조, 판매 회사들이 적극적인 투자를 하고 있어서 가까운 장래 즉 수년 내에는 상용화가 될 것으로 판단되며, 최근 대형 발전 및 복합발전, 자동

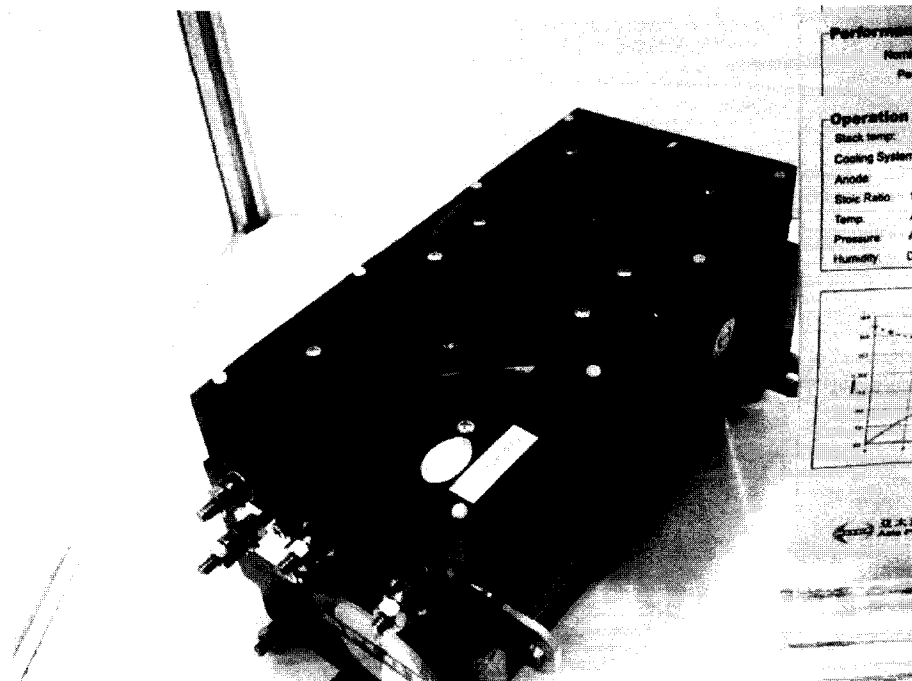
차 보조전원 등으로 응용하려는 고체 산화물 연료전지(SOFC) 분야에도 많은 기술의 진보가 이루어지고 있는 것을 확인 할 수 있었다. 발표 논문들의 대부분이 PEFC, SOFC 기술로 최근 이들 분야에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 것을 알 수 있었다. PEFC는 주로 1-5Kw급의 주택용 코제너레이션 연료전지 시스템과 70-100kW급 자동차용으로 개발되고 있다. 가정용 연료전지의 경우 실용화된 기술을 이용한 실증 실험에 대한 발표가 있었으며 자동차용 분야에서는 스택의 경우 큰 진전이 이루어지지 않고 있으며, 기술의 혁신을 위한 노력이 이루어지고 있음을 확인 할 수 있었다. 미국의 경우 주로 Plug Power사가 실용화와 실증을 위한 시스템을 주로 생산하고 있었으며 일본의 경우 다양한 회사가 연료전지 시스템을 개발하여 발표하고 있었다. 발전 플랜트에 적합한 SOFC는 초보적인 연구단계로 고분자 전해질 연료전지와 마찬가지로 소형 분산전원으로 개발되고 있으며 기술 개발에 의해 대형 플랜트에 적용될 것이다. 연료전지 세미나에서는 소재와 시스템까지 다양한 기술이 소개되었으며 그림은 듀폰사에서 전시한 바이폴라 플레이트로 듀폰사의 경우 고분자 전해질막을 비롯하여 원천 소재를 개발하고 있으며 대면적 분리판에 대한 기술을 개발하여 저가격의 몰드 분리판을 전시하였다. 듀폰사 이외에 독일의 슌크 등에서도 탄소계 분리판 기술을 전시하였다. [그림 7-10]은 이국 듀폰사에서 소개한 몰드형 탄소계 분리판이다. 기존의 기계 가공형보다 가격을 절감시킬 수 있는 몰드형에 대한 소개가 주를 이루고 있다.

고분자 전해질 연료전지는 크게 이동형, 주택용, 그리고 자동차용으로 구분되어 개발되고 있으며 [그림 7-11]은 이동형 연료전지 시스템이다. 이동형 연료전지는 휴대용 비상전원이나 스쿠터나 소형 전동카드 등에서의 전원으로 사용될 수 있다. [그림 7-11]은 아시아 퍼시픽사의 500W급 고분자 전해질 연료전지로서 전동 스쿠터에 적용되고 있다.

[그림 7-12]는 Protonex의 고분자 전해질 연료전지로서 수십 W에서 500W까지의 전력을 생산할 수 있는 소형전지이다. Protonex는 Parker사와 더불어 이동형 연료전지를 개발하고 있으며 개발된 전지는 휴대용과 스쿠터 등에 적용되고 있다. 이외에 자동차용 연료전지와 가정용 연료전지에 대한 기술이 발표 전시되었다.



[그림 7-10] 듀폰사의 몰드형 분리판

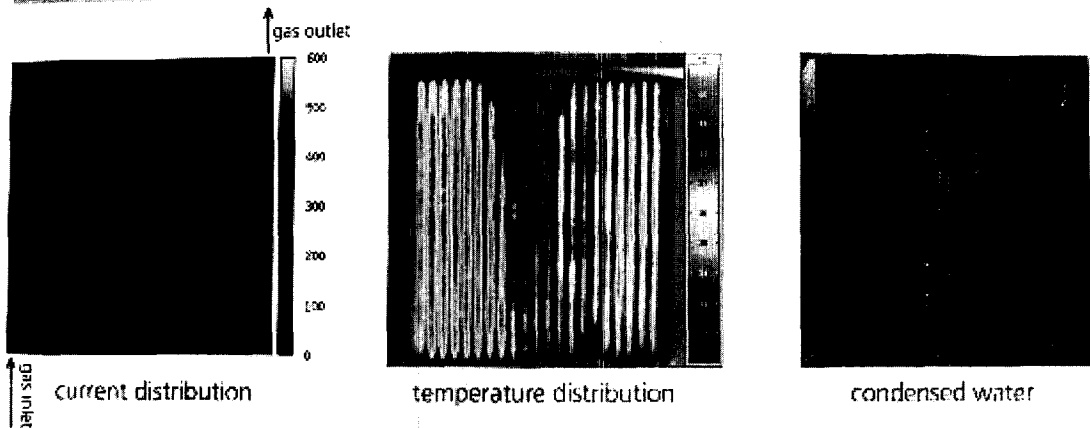


[그림 7-11] 스쿠터용 연료전지



[그림 7-12] 이동형 연료전지 스택

Distribution of Current, Temperature and Condensed Water



[그림 7-13] 전기적인 성능과 물분포 상관성

고분자 연료전지는 작동온도가 80℃ 정도로 다른 연료전지에 비해 온도가 낮고 발생되는 물이 액체 상태이므로 스택에서의 가습과 더불어 열과 물관리가 매우 중요하며 이에 대한 기술이 많이 발표되었다. [그림 7-13]은 전기적인 성능과 물 분포와의 관계를 나타내고 있는 것으로 응축수가 성능에 나쁜 영향을 주는 것을 가시적으로 보여주고 있다. 실제적으로 스택 내부에 물이 응축되면 가스 투과층을 막아 확산 손실이 증가하여 연료전지의 성능이 저하된다. 이에 대한 효과와 개선을 위한 논문들이 발표 되었으며 중성자를 이용한 물분포 분석과 물제거 개선에 대한 기술, 고분자 막의 건조와 물의 과잉에 따른 전기적인 특성을 분석한 논문들이 발표되었다.

고분자 전해질 연료전지의 분석과 설계를 위한 수치해석 기술의 발표가 증가되었으며 이것은 실용화를 위해 소재 기술 개발과 더불어 시스템 설계와 스택 설계 기술의 중요성이 증대되고 있기 때문이다. 국내에서도 시스템 실용화를 위해서는 BOP 기술 개발과 더불어 부품 및 시스템의 설계기술 개발이 필요하다.

3. 요약 및 제언

연료전지 관련 기술은 실용화가 되면 자동차 및 분산형 전원으로의 적용과, 이차전지 대체 등 무공해 발전 및 에너지절약 등에 그 파급효과가 매우 크므로 기술 선점을 위한 선진 각국의 개발의지가 매우 높다. 연료전지 세미나 참석과 연료전지 관련 전시회 참석 결과를 분석 요약하면 다음과 같다.

- 각국에서 연료전지를 실용화시키기 경쟁이 가속되고 있으며 그중에서 소형 발전설비나 자동차용으로는 고분자전해질 연료전지가 실용화에 접근하고 있으며 그리고 대형 발전 플랜트용으로 적합한 고체산화물 연료전지가 소형 발전설비를 중심으로 장래 유망한 기술로서 연구가 활발히 진행되고 있다.
- 고분자 전해질 연료전지 시스템으로 1kW 미만의 휴대용 전원, 1-5 kW급의 가정용 코제너레이션 시스템이 조만간에 실용화 될 것으로 예측되며, 기술의 관심도와는 달리 경제적인 문제점과 내구성 그리고 열관리 등의 문제점과 더불어 수소 인프라의 미비로 인해 자동차용 연료전지는 실증 실험과 병행하여 기술의 혁신이 더 요구되고 있으며 2015년 이후에 대량 생산이 이루어 질 것으로 예측된다.

- 연료전지 개발과 실용화를 위해 외국의 기업과 중소기업들의 스택, 개질기 및 BOP 관련 전시 및 기술 발표가 활발하게 이루어지고 있으며, 국내의 경우에도 스택과 개질기는 물론 압축기, 센서 등 BOP에 관한 개발에 기업을 중심으로 적극적인 참여와 개발이 필요하다.

4. 수집 자료 및 참고문헌

- 2004 Fuel Cell Seminar, Program and Abstracts, San Antonio Nov. 1-5, 2004.
- 2004 Annual Progress Report- DOE Hydrogen Program, Fuel Cells Infrastructure Tech. US DOE, Nov. 2004
- Fuel Cell Handbook, 7th edition, US DOE, Nov. 2004
- 2004 Office of Fossil Energy Fuel Cell Program Annual Report, 2004 NETL, DOE.
- Fuel Cells for Power Generation, US Fuel Cell Council
- 2004 Activities Report, US Fuel Cell Council
- 2004 Worldwide Fuel Cell Industry Survey, US Fuel Cell Council
- Media Guide 2004-2005, US Fuel Cell Council

제 3 절 2005 연료전지 세미나

1. 학회 및 전시회 개요

고분자 연료전지(PEFC)에 대한 기술 습득과 국제 과제 수행을 위하여 2005년 11월 13일부터 11월 23일까지 미국 팜스프링스에서 열린 2005 Fuel cell seminar에 참석하였다.

연료전지 세미나는 학계, 연구소, 기업 및 사용자들 간의 정보 교류를 목적으로, 수준 높은 많은 기술 논문과 산업체의 실용화 기술이 발표되는 연료전지 관련 세계 최대 규모의 학술대회로 올해에도 약 2,000명이 이상의 인원이 참석하였으며 국내에서는 연구소, 학교, 산업체를 포함하여 50명 이상이 참석하였다. 발표된 기술 논문과 전시회를 통해 최근의 연구개발 결과와 차후의 기술 개발 방향을 어느 정도 판단할 수 있었다. 미국의 경우 DOE의 연료전지 개발 프로그램으로 진행되는 과제의 결과들을 집중적으로 발표하고

있다. 2005 연료전지 세미나에 발표된 기술 논문 분포를 살펴보면 고분자 전해질 연료전지 (PEFC) 관련 90여편, 고체산화물 연료전지(SOFC) 관련 40여편, 용융탄산염 연료전지 (MCFC) 관련 6편, 직접메탄올 연료전지와 휴대용 관련 20여편, 기타 수소 관련 기술 등 70편 등이 발표되었다. 전체 발표 논문 중 PEFC 시스템에 관련된 것이 가장 많았으며 PEFC의 경우 정책분야 14편, 개질기 3편, 스택 및 단위전지 31편, 촉매 10, BOP 5편이 발표되었으며 전반적으로 실증시스템과 신뢰성 향상 기술이 주로 발표되어 최근의 연구 개발 경향을 그대로 반영하고 있다. 또한 세미나 기간 중 예년과 마찬가지로 100 여개 회사에서 연료전지 소재와 BOP 및 센서 등 연료전지 관련 제품을 전시하였다

2. 기술 분석

가. 연료전지 세미나 개요

- 일시 : 2005년 11월 13일 ~ 11월 18일
- 장소 : 미국 팜스프링스 Convention Center

연료전지 세미나는 미국과 일본을 중심으로 연구 개발기관, 대학, 제작사, 판매자 및 사용자들이 모여 연료전지 관련 기술의 최근 연구개발 결과, 실용화 실적 및 계획 등에 관하여 발표하는 연료전지 관련 세계 최대의 학술회의로 매년 미국에서 개최되고 있다. 매년 2,000 - 3,000명 정도가 참가하고 있으며 올해에도 약 2,000명 이상의 많은 연료전지 관계자들이 참석하였으며, 발표논문도 200여건이며, 기술 전시 업체도 100개 이상에 이르고 있다.

연구개발 경향에 따라 많은 응용분야와 빠른 기술 개발 속도로 가까운 장래에 실용화가 가능하며 상용화시 이동형, 가정용, 자동차용 전원 등 그 파급효과가 큰 고분자 전해질 연료전지 분야와 고체 산화물 연료전지 분야에 관심이 집중되었다. 또한 고분자 전해질 연료전지의 연료 공급을 위한 연료개질 공정기인 개질기에 대한 발표 건수가 증가하고 이에 대한 연구 개발이 계속되고 있는 것을 알 수 있었다.

발표된 논문과 전시 자료를 통해 분석된 최근의 연료전지 발전기술의 경향을 보면 다음과 같다. 가정용 및 자동차용 전원으로 응용하는 고분자 연료전지는 그 파급효과가 아주 크고 연구 개발 및 제조, 판매 회사들이 적극적인 투자를 하고 있어서 2005년을 기준으로 미국과 일본에서 상용화 보급을 추진하고 있으며 가까운 장래에

상용화가 될 것으로 판단되고 있다. 발표 논문들의 2004년과 마찬가지로 대부분이 PEFC, SOFC 기술로 최근 이들 분야에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 것을 알 수 있었다. PEFC는 주택용 코제너레이션 연료전지 시스템과 자동차용으로 주로 개발되었으나 최근에는 틈새시장으로 선박, 스쿠터, 지게차 등 다양한 분야로의 적용이 진행되고 있다. 가정용 연료전지의 경우 실용화된 기술을 이용한 실증 실험에 대한 발표가 있었으며 자동차용 분야에서는 혼다의 FCX 기술을 바탕으로 성능 향상이 이루어진 스택 기술이 발표되었다. 미국의 경우 주로 Plug Power사가 실용화와 실증을 위한 시스템을 주로 생산하고 있었으며 일본의 경우 다양한 회사가 가정용 연료전지 시스템을 개발하여 발표하고 있었다. 올해 발표된 내용을 중심으로 고분자 전해질 연료전지 분야의 두드러진 특징을 살펴보면 신뢰성기술에 대한 발표가 급격히 증가하였다는 것으로 이것은 실용화를 위하여 가격 저감과 신뢰성 향상을 위해 연구가 집중되는 것을 그대로 반영한 결과이다.

나. 연료전지 기술별 정리

(1) 고분자 연료전지 막 개발 및 지원

- o GrafTech: Grafoil을 이용한 새로운 개념의 가스확산층 개발결과를 발표하였다. 가스 확산층 개발시 고려해야할 성능 지수는 다음과 같다.
 - 낮은 전기 저항
 - 우수한 가스 투과성
 - 흡수성과 기수성 조절
 - 엔지니어링 flexibility
- o 발라드: 불순물, CO, NO₂, H₂S 등이 연료전지 성능저하에 미치는 효과 모델화
- o 3M: NSTF (nano structured thin film) catalyst의 안정성 향상 기술 발표
 - 기존의 촉매들과 비교 검토
 - 실험 방법: CV cycling (0.6-1.2V)에 의한 가속화 실험
 - 분석: 촉매 전기화학적 표면적 변화
 - 결론: NSTF를 담체로 사용하는 Pt촉매의 내구성이 보다 우수
- o 하와이대학: CO등 불순물에 의한 연료전지 성능 저하 현상 분석
- o E-TEK: ELAT 전극 설계 변수 소개

- o 모토롤라, JM: 내구성 향상을 위해 SWNT 재료의 촉매 담체 가능성 검토
- o Gore: 가속화 실험에 의한 MEA 내구성 테스트

(각 부분별 독립적 모니터링 우선 수행)

- 전해질막

- 기계적 손상: 습도 변화에 따른 swelling으로 인한 물리적 손상
(1200사이클 시험을 통해 확인) H₂ crossover 측정
- ionomer 화학적 성능저하: 고온, 고압, 낮은 상대습도, 낮은 전류 밀도

- 전극

원인: 탄소 부식, 백금 용출, 촉매 sintering

가속운전: 고전압운전

측정방법: CO₂ 생성량 측정, 전기화학적 표면적 감소, 성능 측정

(2) 고온 전해질막

- o Asahi Kasei: 100°C 이상, 낮은 습도에서 안정한 막 개발 과정 소개 물성 제시 및 OCV에서의 가속화 실험 소개
- o Nissan, JM: Kynar polyvinylidene fluoride (PVDF) 막 소개 및 Nafion 112와 비교
- o Asahi Glass: 100°C 이상, low RH에서 안정한 막 개발 과정 소개
120°C, 상대습도50%, 0.2A/cm² 4000시간 연속운전, F⁻ 배출 미미,
cathode catalyst layer 두께 44% 감소
- o Motorola: 메탄올 개질기 연계 소형 고온 스택, 160oC, 25W, 1% CO 400시간 운전
anode 채널 깊이 제어 : 수소 이용률 향상
cathode 채널 : 공기 공급량으로 스택 온도 제어
- o NIST: 중성자 이용 셀 내부에서의 물 거동 가시화
- o Polyfuel: HC 막 개발 소개 (95°C까지 운전 가능)
- o Paul Scherrer institute (스위스): Radiation Grafted 고분자 막 소개, 저온용

(3) 고분자 연료전지 주택 적용

- o Arizona State University: Plug Power시스템 이용 사막기후에서의 테스트 결과보고

- o Ishikawajima-Harima Heavy Industries : 5kW급, 2010년 출시 예정
- o Tokyo Gas : 2005년 "LIFUEL" 상품명으로 제품개발, Ebara Ballard와 Matsushita 전기와 공동 개발, 현재까지 2,000번 start-up and shutdown 운전
- o Toshiba: 현재까지 50여기 보급, 10,000시간 실증 운전
- o Plug Power: 2001년 이후로 425개의 시스템 실증 운전
모델 V2: 2005년 7월 이후로 향후 4년간 차세대 GenSys 개발 진행 중
- o Ida Tech: 5kW급 열병합 시스템

(4) 수송용 적용

DaimlerChrysler, Honda FCX, ISE (San Diego), 현대, TIAXLLC 등에서 연료 전지 개발 현황 발표

- o Honda: 새로운 기술 연료전지 FCX 소개
 - 막: Aromatic 계열, -20℃까지 운전 가능
 - 분리판: Stainless Steel, 표면 passivation 후 conductive material 삽입
 - 스택: 일체형 실링, 체결 rod 대신에 panel로 체결, 2kW/L에 근접된 출력밀도

(5) 요소기술

- o 다나카: Pt-Co cathode catalyst, 1000시간 durability test
- o AIST: Pt-Ru 촉매전극의 성능저하 메커니즘 연구
- o PEMEAS사의 고온 MEA 기술 소개
- o ANL:
 - Aligned Carbon nanotube 귀금속 대체 전극촉매 연구, 안정성 측면 접근
 - Pt 촉매의 deactivation 원인 규명, 대체 촉매 연구 현황
 - 동결 온도 이하에서의 빠른 자체 시동
(큰 열용량 조건에서 초기 시동이 용이: 얇은 막, 낮은 운전 전압)
 - HR TEM 이용해서 MEA 구조 설명
 - HPA이용한 막 제조: 고온용 또는 저가습용
 - cathode 에서의 물 생성 및 이동 현상을 CCD camera를 이용하여 관찰
- o Ballard: voltage reversal현상을 설명하고 내구성 있는 anode 전극 제조방안 제시

(6) 내구성(Durability)

가습과 셀 성능 저하 상관관계 확인

o Nuvera : 10000시간 장기 테스트 과정에서 각 시점마다 셀의 CV/EIS, SEM/EDS, C/F ratio 등 분석

o Asahi Glass:

- Perfluorinated membrane 성능 저하 구조 분석
- 가속화 실험: OCV 실험t, 막을 H₂O₂에 노출 실험, N₂ carrier gas 이용)
- 막 성능저하 구조 제시
- 금속 분리판 부식 실험 방법 제안
- On-off cycle에 의한 성능 저하 정도 확인
- 촉매 내구성 실험: 열처리(120, 150℃), 1.2V운전
- 셀 성능저하와 Flourine 양 사이의 상관관계 연구 :

o LANL:

- GDL 및 MEA의 물질전달 측면에서의 내구성 관찰
- 동결-해동 조건과 장기 운전 과정에서 전극과 막 사이의 경계분리 현상 조사
- 막 성능저하와 불소이온 생성과의 상관관계 규명

o 3M :

- MEA 가속 실험과 수명 모델링, 10개의 단위셀을 동시에 운전할 수 있는 테스트 스테이션 기술 소개
- 3가지 모드의 부하 모드 설정 실험
 - OCV 포함 부하 사이클,
 - 정격 전류 부하
 - OCV 미포함 부하 사이클
- 셀 온도, 가습, F-이온 배출량과 상관관계 유도

3. 요약 및 제언

각국에서 연료전지를 상용화시키기 위한 경쟁이 진행되고 있다. 고분자 전해질 연료전지의 실용화를 위해 필요한 신뢰성 향상과 가격 저감을 위한 연구가 급격하게 증가하고 있다. 전시회를 통해 연료전지 개발과 실용화를 위해 연료전지 본체는 물론 핵심 소재

와 주변기기에 대한 기술 개발이 활발히 진행되고 있음을 확인 할 수 있었으며 국내의 경우에도 경쟁력 확보를 위해 스택 부품과 개질기 개발과 더불어 공기공급 시스템, 열 및 물관리 시스템 그리고 제어기와 센서등 주요 부품에 대해 산업체를 중심으로 적극적인 개발이 필요하다.

4. 수집 자료 및 참고 문헌

- 2005 Fuel Cell Seminar abstract book, Program and Abstracts, Palm Springs Nov. 13-18, 2005.
- DOD, Fuel Cell Test and Evaluation Center
- Fuel Cell Magazine, 2005 8/9
- 각종 연료전지 기술 관련 팸플렛 40여종

제 4 절 중국 연료전지 기술

1. 방문 기관 기술 개요

연료전지 자동차 기술 분석을 위하여 국제 공동과제기관인 중국 DICP의 연료전지 연구 개발센터(대련)와 Qingyuan 전기자동차 회사(천진), 그리고 청화대학(북경)을 방문하였다. 연료전지 연구 개발센터에서는 연료전지 시스템과 연료전지 버스에 대해 Qingyuan 전기자동차 회사에서는 전기 버스에 대해, 그리고 청화 대학에서는 대련 연료전지센터에서 제작한 연료전지 시스템을 이용하여 구성한 연료전지 버스에 대한 기술을 분석하였다.

2. 기술 분석

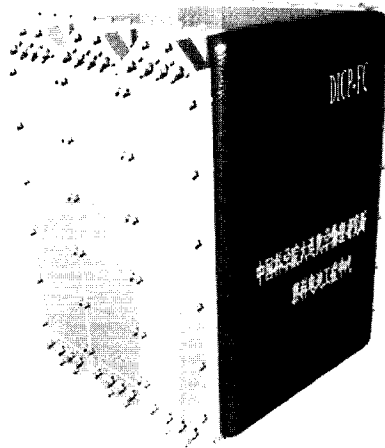
가. 중국 DICP 연료전지 연구 개발 센터

국제 공동연구과제의 대상기관인 중국 대련에 위치한 연료전지 연구 개발센터를 방문하여 연료전지 버스관련 기술협의를 국제공동과제로 수행하고 있는 고분자 전해질 연료전지 시스템의 설계 및 해석 기술에 대한 사항을 협의하였다. 연료전지 센터의 연구인력은 70여명으로 그중 30여명의 다양한 분야의 전공자들이 버스용 75kW급 연료전지 시스템

개발을 수행하고 있었다. 핵심기술인 연료전지 본체 제작은 물론, 연료 순환장치, 가습설비 등을 직접 설계 제작하여 사용하고 있다. 스택을 위한 분리판으로는 일반적인 탄소재료가 아닌 스테인레스를 사용하고 있었으며 25kW급 모듈로 연료전지 스택을 제작하고 있었다. [그림 7-14]가 버스용으로 개발한 75kW급 연료전지 시스템 이다.

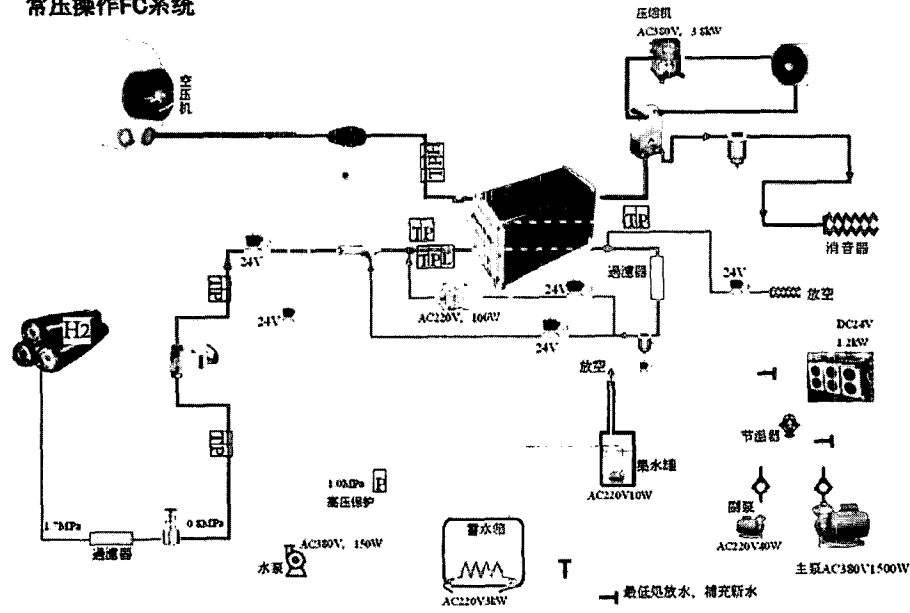
나. 대련 연료전지 연구개발센터의 시스템 구성 기술

대련 연료전지 연구개발센터에서는 연료전지 자동차에 장착되는 주변장치인 BOP 시스템을 실제 확인하고, 시스템에 관련된 주요 기술에 대해 습득하였다. 스택제어에 관련되는 주요 부분은 [그림7-15]과 같이(1)수소 공급부, (2) 공기 공급부, (3)냉각수 공급부로 구성되어 있다. 각 부분을 나누어 시스템 구성을 설명하면 다음과 같다.



[그림 7-14] 대련 연료전지 연구센터의 75kW급 연료전지 시스템

常压操作FC系统



[그림 7-15] 연료전지 운전장치 계통도

(1) 수소공급

수소라인은 350기압 수소실린더에서 압력조절기를 통해 1.7기압으로 압력을 감압시켰다. 전단의 압력변화에 영향을 받지 않는 특수 정압 레귤레이터를 통해 다시 0.8기압으로 낮춰진 후, 비례제어밸브(proportional valve)를 통해 유량을 제어한다. 이후 스택에서 미반응된 수소기체는 포함된 물을 제거한 후, 이젝터를 통해 재순환시켜 수소이용률을 극대화한다.

(2) 공기공급(air supply)

연료전지 부하에 연동하여 공기량이 제어되어 스택에 공급되어야 하며 이를 위하여 모터제어기를 통해 송풍기의 회전수를 제어하게 된다. 송풍기에서 공급된 공기는 온도/습도/압력을 모니터링하며, 스택에서 반응이후, 가습된 물을 교환한 후 소음기를 통해 배출된다.

(3) 물 공급(water supply)

스택의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 수냉식 시스템이 사용되고 있으며 물온도는 방열기의 냉각팬을 on/off 시켜 조절하게 된다, 특이점은 동결방지를 위해 정차시 저장된

물의 일부를 히터를 통해 가열한 후 공급라인 내에서 순환시킨다는 점이다.

또한 수소와 공기 공급선에서 과도하게 가습된 물을 회수하여 재사용하도록 되었으며, de-ionizer를 통과시켜서 스택의 성능을 유지하도록 한다.

다. 운전장치 부품

(1) 이젝터(Ejector)

연료전지 시스템의 효율을 높이기 위해서는 수소 연료 사용률을 향상시켜야 한다. 이 같은 방법의 일환으로 대용량 연료전지 스택에서는 미반응 수소를 재순환시켜 다시 반응시키는 방법을 사용한다. 이 때, 이젝터를 사용하면, 펌프같은 추가적인 동력소모장치가 필요없이 수소를 순환시킬 수 있다.

이젝터는 베르누이 방정식에 의해 유체의 속도에 따른 압력의 차이를 이용하여 유체를 흡입하게 된다. 스택의 운전범위 내의 유량을 미리 계산하여 이젝터 직경을 설계하면, 별도의 구동장치 없이 연료의 재순환이 가능하다.

연료전지 버스용 스택에서 미반응된 수소연료를 재순환하기 위한 이젝터는 Stainless Steel을 이용하여 가공되었으며, 전후단 압력에 따라 재순환율 50% 전후의 범위를 갖는다.

(2) 집수기 (Water Collector)

스택에서 미반응된 가습된 수소에서 물을 뽑아서 Flooding을 막고, 물을 재사용하기 위한 장치이다.

(3) 공기 송풍기

스택에 공기를 공급하기 위한 것으로 0.5마력, 20~120lpm의 송풍능력을 가지고 있으며, 송풍압은 1~1.5기압이다.

(4) 가습기

회전식 가습장치는 일정 회전속도로 제어하며, 세라믹 하니콤을 통해 연속적인 엔탈피 교환을 구현할 수 있다. 스택을 통과한 공기는 가습장치를 통과한 후 배출되고, 교환된

열과 수분을 함유한 새로운 공기가 스택으로 들어간다.

라. Qingyuan 전기자동차

연료전지 하이브리드 자동차 기술을 위해 중국 천진에 있는 Qingyuan 전기자동차 회사를 방문하여 전기 버스 본체와 연료전지 연계 제어기에 관한 기술을 습득하였다.

Qingyuan 전기자동차 중국 천진에 위치한 회사로 전기자동차와 하이브리드 자동차를 연구 개발하여 판매하는 공립연구소 겸 벤처 회사로 제어기 기술을 중심으로 전기버스에 대한 제품 개발을 완료하여 판매하고 있다. 연료전지 하이브리드 미니버스는 기본적으로 배터리와 연료전지를 병렬로 연결하여 효율적 출력 제어를 통하여 최대의 효율을 추구하는 차세대 자동차 구동방식이다. 특히 배터리가 주동력원으로 사용되는 경우는 하이브리드 동력원 구성시 기본적으로 배터리 운전·제어 기술이 중추적 역할을 담당하게 되며 연료전지 동력원은 동력 부하 추종시 보조동력원으로 작동하게 된다.

천진 Qingyuan 전기자동차 회사는 2001년 설립되었으며 중국 자동차 기술 연구소, 천진 리셴 배터리 Joint-stock 회사, 천진 란티안 High-tech 전력 주식회사, 그리고 천진

<표 7-2> 미니 전기 버스 제원

번호	항목	내용
1	길이×폭×높이(mm)	7190×2100×2765
2	차량 무게(kg)	5175
3	승차 인원(人)	21+ 1
4	축간 거리(mm)	3765
5	축길이(전 / 후)(mm)	1760/1602
6	최소회전반경(m)	≤15
7	최대속도 (km/h)	≥70
8	가속성능	0-50km/h 가속시간≤17s 50-70km/h 가속시간≤35s
9	최대등판도	>20%
10	운전거리(km)	등속≥85 , 변속≥45
11	전동기	교류 유도전동기
12	전동기정격출력/최대출력(kw)	45/90
13	회전속도(r/min)	2000
14	최대토크(N•m)	630
15	축전지	납축전지
16	축전지전압(V)	288
17	축전지 용량(Ah)	100

자동차 공업 주식회사의 공동출자로 출범하였다. 이 회사는 차량 개발, 배터리 전기자동차 성능시험, 하이브리드 전기자동차 개발, 연료전지 및 대체연료 자동차분야의 특화된 기술을 보유하고 있다.

연료전지 하이브리드 미니버스를 위한 천진 Qingyuan 자동차 회사에서 개발한 22인승 전기 미니 버스 구성내용은 <표 7-2>와 같다.

마. 淸華대학교 Automotive Safety and Energy 실험실 방문

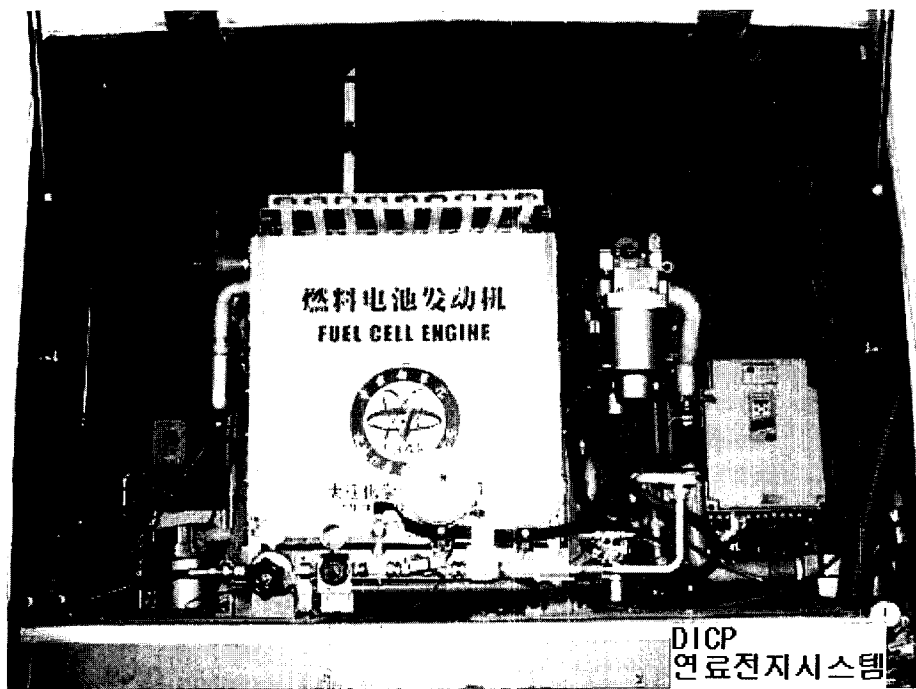
중국은 1990년대 중반부터 연료전지 자동차 개발에 본격적인 관심을 가지기 시작하였다. 특히 2008년 베이징 올림픽과 2010년 상하이 국제 박람회에서 연료전지 버스와 자동차를 사용할 계획을 가지고 있다. 이러한 국가적인 목표의 일환으로 중국 이공계 제일의 대학교인 淸華대학교의 자동차 관련 실험실에서 자동차용 연료전지 시스템 운용 실험 및 연료전지 버스 운전을 해오고 있는 중이다.

<표 7-3> 중국 연료전지 버스 제원 비교

		A형	B형
크기		11,020(L)×2,490(W)×3,420(H)mm	11,020(L)×2,490(W)×3,420(H)mm
무게		15,500kg	15,500kg
출력계통		연료전지+축전지	연료전지+축전지
연료전지	종류	고분자 연료전지	고분자 연료전지
	출력	75kW	100kW
	효율	약40%	약40%
축전지		80Ah	35Ah (납축전지)
모터		120kW	120kW
좌석수		31	38
최고속도		67.6km/h	65km/h
가속성능		35.3.sec (0 -> 50km/h)	40sec (0 -> 50km/h)
등판능력		15%	15%

淸華대학교 대련 연료전지연구센터, 상해 연료전지 연구소 등 등 중국의 대표적인 연료전지 연구소와 합작으로 제작되고 운용되고 있다. 출장 중에 제작된 연료전지 버스는 물론

연료전지 성능 실험장치와 부하장치에 대한 기술을 분석할 수 있었다 시험 중에 있는 연료전지 버스는 A, B형 2가지 종류로 A형은 대련 연료전지 센터에서 제작한 시스템이 장착되어 있으며, B형은 상해 연료전지 연구소가 제작한 연료전지가 장착되어 있다. A형 시스템은 DICP에서 핵심기술인 연료전지 본체 제작은 물론, 연료 순환장치, 가습설비 등을 직접 설계 제작한 것으로 스택을 위한 분리판으로는 일반적인 탄소재료가 아닌 스테인레스와 grafoil을 사용하고 있었으며 25kW급 모듈로 연료전지 시스템이 구성되어 있었다. [그림 7-16]이 DICP의 75kW급 연료전지 시스템이며 [그림 7-17]은 제작된 연료전지 버스로 3000시간 이상 운전을 수행한 상태이다.



[그림 7-16] 중국 DICP에서 제작한 연료전지 시스템



[그림 7-17] DICP 연료전지가 탑재된 연료전지 하이브리드 버스

제 5 절 PBFC2 고분자 연료전지기술

1. 학회 개요

2005년 6월 12일부터 17일까지 미국에서 열린 PBFC2(2nd international conference on Polymer Batteries and Fuel Cells)에 참석하여 관련 기술을 분석하였다. PBFC2(2nd international conference on Polymer Batteries and Fuel Cells)는 고분자막을 이용하는 연료전지와 전지를 위한 전문학회로서 포스터 발표 포함 약 200편의 논문이 발표되었다. 최근에 이차전지와 연료전지분야에서 가장 활발히 연구 개발되는 것이 고분자 전해질 연료전지(PEFC)와 리튬이온 고분자전지(LPBs)로서 LPBs는 상용화되어 시장에 진입하는 단계이며, PEFC는 수소사회를 위한 원동기로서 자동차용 엔진과 분산형전원, 그리고 소형 이동형 전원으로 선진국에서 경쟁적으로 개발되고 있다. 관련분야의 활발한 연구에도 불구하고 아직까지 소재와 제조측면에서 기본기술과 적용 기술 측면에서 해결해야할 문제가 많이 남아있는 실정으로, PBFC2는 기술적인 공통점과 적용 분야의 유사성에도 불

구하고 거의 교류가 이루어지지 않고 있는 이차전지분야와 연료전지분야의 전문가들의 기술과 정보의 교류를 촉진시키기 위한 것으로 250여명 이상의 전문가가 참석하여 기술 발표와 토의가 이루어졌다.

2. 기술 분석

고분자 전해질 연료전지의 원천소재와 시스템 개발과 관련하여 선진각국에서 발표된 기술들을 주요기술별로 정리하면 다음과 같다.

가. 고분자 전해질 연료전지 자기가습막의 나노 구조와 물관리

(미국 Stonehart Associates Inc.)

고분자 전해질 막 개발을 위하여 필요한 주요 조건은 다음과 같다

- i) 전해질의 이온 전도도
- ii) 막 안정성과 가스 투과성, 전극촉매의 응집과 용해에 의한 성능 저하
- iii) 전극과 전해질막 경계에서의 전자전도율

본 기술은 전해질내의 수분 정도를 측정 제어하면서 불소계 전해질막의 나노 구조를 분석한 것이다. 연료전지가 작동되는 동안에 연료극은 osmotic drag에 의해 건조가 이루어지는 반면에 공기극쪽은 생성된 수분에 의해 flooding 현상이 발생한다. osmotic drag 형태로 물을 동반하여 수소 이온이 이동되기 때문에 막을 통한 이온 전도와 수분에 대한 관계에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 고분자 전해질 연료전지의 초기 개발단계에서는 연료극으로 수분을 분무하여 공급하였지만 현재는 촉매의 재구성과 더불어 흡습성 무기질 충전제를 추가하여 자기가습이 가능한 막에 대한 개발이 이루어지고 있다.

분산 전원용으로는 도시가스와 같은 탄화수소계통의 연료가 사용되어야 하므로 200℃ 정도에도 작동되는 인산형 연료전지 기술이 개발되어 상용화되었으며 인산형 연료전지에서 개발된 백금촉매에 대한 기술이 PEFC에 그대로 적용되고 있다. 인산형과 크게 다른 점은 PEFC의 경우 작동온도가 100℃ 이하로 물이 생성되므로 물배출을 원활하게 수행하기 위해 혐수성인 Teflon을 이용하여 촉매층을 방수처리 한다는 것이다.

실험적으로 전기화학촉매와 불소계막에 첨가된 다양한 혼합체에 대한 성능 실험이 이루어지고 있으며 전극의 괄목할만한 성능향상이 이루어지고 있다.

이론적으로는 현재까지 백금촉매와 이온막 구조에 대한 정확한 이해가 없는 상태이다. Double layer 이론은 금속과 고분자 경계를 설명하기에 부적절하다. 또한 백금을 위한 탄소 지지체에 의해 과산화수소와 hydroperoxy free radicals 등이 생성되어 고분자막의 성능을 저하시킨다. UTC Fuel Cells Co.에서 제시한 Tafel 기울기는 65°C에서 70 mV 이다. 0.9V에서 산소와 공기의 비율은 예측된 값인 5가 아니고 $5^{1/2}$ 에 가깝게 나타나고 있다. kinetic 제어환경하에서 $I_s = nFk_s C_o$ 이며 여기서 k_s 는 반응률이며 C_o 는 전해질에서의 산소농도이다. C_o 는 $(C_o \cdot D_o)^{1/2}$ 로 수정하여 나타낼 수도 있다. Ralph 등에 의한 실험에 의해 산소환원을 위한 specific activity 은 80°C에서 10A/m²Pt로 접근할 수 있다. 이정도 수준에서는 k_s 는 10^{-2} cm/sec 정도가 된다.

나. 자동차용 연료전지 냉각유체(Honeywell CPG)

자동차용에 적용되는 고분자 전해질연료전지의 작동온도는 60°C에서 95°C 범위내에서 조절되어야 하며 연료전지가 전지를 발생시키면서 열을 발생시키므로 운전 조건을 일정하게 유지하기 위해 냉각제나 열전달 유체가 사용되어야 한다. 자동차에서 필요로 하는 충분한 동력을 위하여 작동전압 0.6에서 1volt 정도의 단위전지를 적층하여 스택으로 사용되게 되며 일반적으로 100개 이상에서 600개 정도까지 전지가 적층되며 작동 전압은 100V에서 600V정도까지 될 수 있다. 연료전지의 냉각을 위한 냉각제는 입출구에 공통으로 설치된 매니폴드를 통해 직렬로 연결된 각 단위전지 사이에 분기되어 공급되므로 같은 정도의 전압이 걸릴 수 있다.

따라서 전기적 쇼크를 최소화하거나 제거하기 위해서는 냉각제의 전기전도도가 매우 적어야 한다. 낮은 전기전도도에 의해 분기전류를 최소화시킬 수 있으며 따라서 전지의 성능저하를 최소화시킬 수 있다. 1)연료전지 냉각제는 동결을 방지하기 위해 빙점이 가능한 낮아야 하며, 2)끓어 넘치는 것을 방지하기 위해 증발온도가 높아야 하며, 3)열교환기의 크기를 줄이기 위하여 높은 열전도도와 비열 특성을 가지고 있어야 하며, 4)압력손실을 줄여 펌프동력을 최소화시키기 위하여 점성이 작아야 한다. 또 다른 중요한 특성으로는 5)부식성이 적어야 하며 기존 연료전지 재질과 호환성이 높아야 한다. 연료전지 냉각 시스템은 여러 종류의 금속과 비금속 물질로 구성되며 금속 물질로는 철과 비철금속 합금, 즉 stainless steel, aluminum, brass, braze 합금과 같은 것이 사용될 수 있다. 이와 같은 물질들은 연료전지 냉각제와 접촉하여 부식될 가능성이 높다. 따라서 금속제 연료전

지 냉각부품의 부식을 최소화하고 비금속계와 조화될 수 있는 반응이 억제된 냉각제가 필요하다. 내연기관의 냉각제를 위한 부식방지제는 높은 전기전도도로 인하여 연료전지에 적용할 수 없다. 부식방지제로는 silicates, nitrites, polybdates, nitrates, carboxylates, phosphates, borates와 같은 것이 사용되고 있는데 매우 낮은 전기전도도를 요구하는 연료전지에는 사용할 수가 없다. 따라서 연료전지를 별도의 새로운 부식 방지 냉각제의 개발이 필요하다.

다. 연료전지 내의 물 분포 측정

(Istituto di Struttura della Materia - CNR, Italy)

고분자막(PEM)내의 수화도는 PEM의 이온 전도도를 결정한다. 운전 중인 연료전지 내 PEM의 물함량은 지금까지는 몇 가지 방법들-small angle neutron scattering, magnetic resonance imaging, neutron radiography-등으로 측정되어왔다. 그러나 이러한 기존 기술들은 공간/시간 분해능이 일반적으로 낮다. 이 논문에서는 90keV에 달하는VHEXD(Very High Energy X-ray Diffraction)을 이용한 방법을 사용했다. 실제로 이 방법은 특유의 파워와 유연성의 덕분으로, 어떠한 연료전지의 운전조건 (electrical parameters, temperature, gas flux, humidity, pressure)에서도 시스템적인 연구가 가능하다. VHEXD는 운전변수의 변화에 의해 유도된 물의 함량변화를 추적할 수 있으며, 0.01mm 이상의 분해능으로 PEM내 물분포를 측정할 수 있다. PEM으로부터의 High Energy X-ray Beam의 회절을 사용하는 것은 연료전지로부터의 기하학적 제약을 극복할 수 있다. 사실, 빔은 x-ray 흡수물질의 두꺼운 층(수 cm)을 관통해야 되고, 게다가 그러한 물질들은 비균일적이며, 복잡한 복합체 구조를 갖는다. 또한, 물을 머금은 막은 정형질 물질이 아니며, 따라서 bragg peak을 나타내지 못하고, diffuse halo만 나타내며, 이것은 측정과 분석이 어렵다.

이러한 어려움에도 불구하고, VHEXD는 ESRF의 ID15의 beamline에서 다음 종류의 측정을 우선 수행하였다.

- 1) 정상상태 조건: 10 마이크로미터 분해능에서 물의 함량분포를 측정. 두 개의 실험이 역방향으로 실행됨.
- 2) 비정상상태 조건: 셀 전압에 따른 PEM의 평균 물 포함량. (막, 물 거동의 응답시간에 따른 시간 분해능)

라. 고분자연료전지 전기촉매 내구성 측정(Los Alamos National Laboratory, USA)

연료전지의 내구성은 분사형 전원 또는 수송용 전원 공급 시스템의 상업화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 상업적인 가시화는 연료전지의 부품들이 시스템의 신뢰성을 증가시키고 시스템의 수명비용을 감소시킬 내구성에 도달하느냐에 달려있다.

내구성은 장시간의 테스트뿐만 아니라, 부품들의 상호작용과 아직 충분히 이해가 되지 않은 다양한 운전조건들 때문에 정량화시키고 향상시키기 어렵다. 단순히 연료전지 스택 또는 단위전지에 대한 5000시간이 요구되는 내구성 시험은 성능저하 구조의 이해에 대한 전반적인 이해를 이끌어내지는 못한다. 시간에 따른 부품들의 성능과 물성을 규명하는 실시간 진단 실험이 매우 필요하다. 본 연구에서는, 연료전지 부품과 전기촉매를 단위전지 테스트 중 발생하는 전기화학적 표면적 감소를 측정함으로써 내구성을 시험하였다. 단위 셀들은 정전압과 자동차 운전사이클을 모사한 전압 조건에 맞추어서 운전되었다. MEA의 전위 스위핑(sweeping) 역시 가속 테스트 방법을 통해 수행되었다. 전위 스위핑에서, 양극은 음극이 질소에 노출되어 있는 동안 수소에 노출되었다. 음극 전위는 10 mV/sec 에서 0.1V/sec까지 1.0과 1.2V를 포함하여 변화시켰다. 사이클 간격 후에, MEA와 촉매 표면의 극성 커브들이 측정되었다. 온도 60°C와 80°C)촉매들은 전기촉매 sintering의 정도를 결정하기 위해 XRD를 사용했다. 양극 촉매의 크기는 일반적으로 2.2nm 이며, 1.2V 사이클, 80°C에서 성장이 관찰되었다. 반면, 음극 입자 입자는 온도, 테스트 시간, 전위 스위핑에 따른 모든 실험에서 성장을 보였다. 음극 촉매 입자 크기의 성장은 전위 스위핑 실험에서 가장 컸고, 전위에 따라 비례했다. 단위 셀 내구성 실험에서, 음극 촉매 입자 사이즈는 3.5nm까지 커졌다. 자동차 운전 사이클 실험에서는 900시간시, 2.6nm, 3500 시간시 3.1nm까지 커졌다. 온도와 촉매담지량, 상대습도에 따른 백금 구조의 성장을 실험할 계획에 있다.

마. 전해질내 수분 이동에 관한 주요현상

(Chemical & Biological Systems, Sandia National Laboratories)

PEFC 내의 물 거동과 성능에 대한 영향은 새로운 물질들(막, 촉매구조, 가스확산층)의 설계와 셀의 이상적인 기하학 구조, 운전조건들을 결정하기 위한 주요한 고려 사항이 될 수 있다. 본 연구에서는 PEFC 음극의 액체 물 형성 문제에 초점을 맞추었다. 고전류밀도

에서 액체 물이 생성되어 제거되지 않는다면, 홍수(flooding) 현상이 일어난다. 홍수는 촉매층 자체에서 일어날 수 있으며, 가스 확산층(GDL)에서도 가능하다. PEFC 내에서 액체 물의 거동을 규명하는 기술은 다양하게 연구되고 있다. GDL 접촉면에서의 액체 물의 형성과 제거는 컴퓨터 모델과 실험으로 조사되었다. GDL의 내부 다공 구조와 조성은 레이저 스캐닝 초점 현미경으로 알아낼 수 있다. 이 기술로부터 GDL 구조의 삼차원 데이터와 통계학적 묘사가 추출될 수 있다. GDL의 물리적, 화학적 성질이 일단 그려지면, 액체와 기체의 이송이 공극 공간에서 실험적으로 제작된 구조 데이터를 통해 모델링 될 수 있다. 여러 조건에서 작동 중인 연료전지 내의 액체 물의 양을 정량화 할 수 있는 중성자 이미지 실험이 수행되고 있으며 연료전지 성능 모델을 평가하고 전류 부하와 전지 조건, 물의 양과 분포 변화가 어떻게 일어나는 가를 확인할 수 있는 정보를 제공할 것으로 기대된다.

3. 요약 및 제언

PEFC는 선진각국에서 국가적인 지원에 의해 활발하게 연구가 진행되고 있으나 아직까지 자동차 적용 등을 위해서는 소재와 시스템 기술 측면에서 근본적으로 해결해야 할 문제가 많이 남아있으며 이에 대한 분석과 기술 혁신이 필요하다. 본 절은 PBFC2에서 발표된 논문을 통해 고분자 연료전지 관련하여 습득한 소재 기술을 정리 한 것이다. 현재까지 고분자 전해질 연료전지를 위해서는 듀퐁의 나피온막이 전해질로 일반적으로 사용되고 있으며 저온 연료전지 특성상 백금이 전극 촉매로 사용되고 있다. 나피온막의 특성상 열 및 물관리의 어려움이 있으며 탄소로 지지된 백금촉매의 경우도 등 성능저하 등의 문제가 있어 이를 해결하거나 성능 저하 원인을 파악하기 위한 다양한 연구결과들이 발표되었다. 전해질막의 경우 고온과 저가습 상태에서 작동될 수 있는 새로운 소재와 구조의 전해질 기술이 주로 소개되었으며 백금 촉매의 응결에 따른 성능저하 현상에 대한 기술이 분석되었다. 고분자 전해질 연료전지의 실용화를 위해서는 성능, 내구성, 신뢰성이 확보되어야 하며 시스템 측면에서 요구하는 설계 요구조건을 만족해야 한다. 개발되고 있는 새로운 전해질의 현재 수준으로는 연료전지 자동차 등 상용시스템에 적용하기에 어려움이 있으며 한 단계 높은 기술이 요구되고 있다. 앞으로 전개될 수소사회에서는 고분자 전해질 연료전지가 내연기관을 대신하여 원동기 역할을 담당할 것이며 이를 위해서는 시스템 기술과 원천 소재에 대해서도 혁신 기술이 필요하며 이를 위한 집중 투자와 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. S. Aricò, P. Cretì, V. Baglio, E. Modica and V. Antonucci, *Journal of power source* 91 (2000) 202-209.
- [2] J. Solera, E. Hontañóna and L. Daza, *Journal of power source*, 118(2003), issues 1-2 172-178
- [3] E. Hontañóna, M. J. Escuderoa, C. Bautistaa, P. L. García-Ybarraa and L. Daza, *Journal of power source* 86(2000), issues 1-2 363-368
- [4] Joyce S. Cooper, *Journal of Power Sources*, xxx (2004) xxx - xxx
- [5] Atul Kumar, Ramana G. Reddy, *Journal of Power Sources* 113 (2003) 11 - 18
- [6] Atul Kumar, Ramana G. Reddy, *Journal of Power Sources* xxx (2004) xxx - xxx
- [7] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, *Transport phenomena*, second ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, 2002.
- [8] C.Y. Chen., P. Yang, *Journal of Power Sources* xxx (2003) xxx - xxx
- [9] Deryn Chu , Rongzhong Jiang, *Journal of Power Sources* 83 (1999) 128 - 133
- [10] PEi-Wen Li, Tao Zhang, Qing-Ming Wang, Laura Schaefer, MinKing K, Chyu, *Journal of Power Sources* 114 (2003) 63-69.
- [11] Tero Hottinen., Mikko Mikkola, Peter Lund, *Journal of Power Sources* xxx (2004) xxx - xxx
- [12] S.Dutta, S.Shimpalee, J.W. Van Zee, *J. Appl. Electrochem.* 30 (2000) 135-146
- [13] S.Dutta, S.Shimpalee, J.W. Van Zee, *International journal of heat and mass transfer* 44 (2001) 2029-2042
- [14] S.Um, C.Y.Wang, *J. Electro-chem. Soc.* 147 (12) (2000) 4485-4493
- [15] S.Um, C.Y.Wang, *Proceeding of the ASME Fuel Cell Division The 2000 ASME IMECE Nov. 5-10, Walt DISney World Dolphin, Orlando, FL.*
- [16] Andreas Schmitz, C. Ziegler, J. O. Schumacher 2nd European PEFC Forum, *Proceedings, Volume 1* 297-310
- [17] PEi-Wen Li, Laura Schaefer, Qing-Ming Wang, Tao zhang, Minking K. Chyu, *Journal of Power sources* 115 (2003) 90-100

- [18] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, An introduction to computational fluid dynamics, Longman Group ltd, 1995
- [19] T.E.Springer, T.A.Zawodzinski, and S. Gottesfeld, J .Electrochem. Soc. 138(8) 2334:2341, August 1991
- [20] Mennola, T., Design and Experiment Characterization of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *Master's Thesis*, Helsinki University of Technology, 2001.
- [21] Boersma, R. J. and Sammes, N. M., Computational analysis of the gas-flow distribution in solid oxide fuel cell stacks, J. Power Sources 63(1996), 215-219.
- [22] Koh H. J., Seo K. H., Lee G. C., Lim C. H., Pressure and flow distribution in internal gas manifolds of a fuel cell stack, J. Power Sources 115(2003), 54-65.
- [23] Frank M., White, *Fluid Mechanics*, 4th Edition, McGraw-Hill, Inc., 2000.
- [24] Larminie, J. E. and Dicks, A., *Fuel Cell System Explained*, John Wiley & Sons, Chichester, England 2000.
- [25] Kuzman R., *Handbook of Thermodynamic Tables and Charts*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [26] Wallmark, C. and Alvfors, P., "Design of stationary PEFC system configurations to meet heat and power demands," Journal of Power Sources, Vol. 106(2002), pp. 83-92.
- [27] Wallmark, C. and Alvfors, P., "Technical design and economic evaluation of a stand-alone PEFC system for buildings in Sweden", Journal of Power Sources, Vol. 118(2003), pp. 358-366.
- [28] Inaka H., Sumi S., Nishizaki K., Tabata, T. Kataoka, A. and Shinkai, H., "The development of effective heat and power use technology for residential in a PEFC co-generation system," Journal of Power Sources, Vol. 106(2002), pp. 60-67.
- [29] Hamada, Y., Nakanura M., Kubota, H. Ochifuji, K., Murase, M., Goto, M., "Field performance of a polymer electrolyte fuel cell for a residential energy system," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 9(2004), pp.345-362.
- [30] Mehmet Burak Gunes, "Investigation of a Fuel Cell Based Total Energy System for Residential Applications," MS Thesis, VIT, 2001.

[31] 이원용, 정귀성, 유상필, 엄석기, 김창수, “가정용 고분자연료전지 시스템의 운전 방법에 따른 성능 비교”, 한국수소 및 신재생에너지학회 16(2005),pp. 364-371,