공학석사 학위논문

# 10W급 PEMFC의 최적운전조건에 관한 연구



부경대학교 산업대학원

기계공학과

황보 구 영

공학석사 학위논문

# 10W급 PEMFC의 최적운전조건에 관한 연구



부경대학교 산업대학원

기계공학과

황보 구 영

# 황보 구 영의 공학석사 학위논문을 인준함.

2012年 1月 5日



주	심	공학박사	강	대	민	(印)
위	원	공학박사	곽	재	섭	(印)
위	원	공학박사	٥]	도	형	(印)

목	차
---	---

Abstract	iii
Nomenclature	v
List of Figures	vi
List of Tables	vii

- 제 1 장 서 론
   1

   1.1 연구의 배경
   1

   1.2 연구의 목적
   4
- 제 2 장 PEMFC의 이론
   5

   2.1 연료전지의 종류와 특징
   5

   2.2 PEMFC의 원리와 구조
   12

   2.3 PEMFC의 지본 이론
   14

   2.4 분극곡선을 이용한 성능해석
   27

제	3 >	장 실	험장:	치 및	방법	] ·····2	9
	3.1	실험	장치		•••••	······2	9
	3.2	실험	방법	•••••	•••••		3
	3.3	운전	조건				5

제	4 장 결과 및 고찰	37
	4.1 가역 개회로 전위(OCV) 및 손실항에 따른 영향	37
	4.2 공급수소 화학양론비에 따른 영향	37
	4.2 공급공기 화학양론비에 따른 영향	38
	4.3 연료 및 공급공기 온도에 따른 영향	39
	4.4 Manufacturer Reference data과 비교	39



## A Performance Study on the Optimum Operating Conditions of 10W PEMFC

Gu-young Hwang bo

Department of Mechanical Engineering, Graduate School

Pukyong National University

Abstract

Recently energy crisis and environmental problems have been raised as the important problem for future human society. Korea has also entered activity on the alternative energy as a member of the G20.

In 1970th, alternative energy was just used on the meaning that could be substituted for fossil fuel. But alternative energy has signified as Clean Energy of Renewable Energy, New Energy, Green Energy and so on because of environmental pollution by use of fossil fuel and atomic energy after 1980. From 1997, alternative energy has been developing by Law for Promoting the Dissemination of New and Renewable Energy and it was separated into 8 Renewable Energies (Solar, Photovoltaic, Biomass, Wind Power, Small Hydro Power, Geothermy, Ocean Energy, Waste Energy) and 3 New Energies(Fuel Cell, Coal Liquefied Gas, Hydrogen Energy).

Among them, fuel cell will be the role of a new breakthrough in the field of new and renewable energy. Especially, PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell) is most frequently used fuel cell due to its drive that can be used in low temperature condition. But it doesn't have definite drive condition of the stack. Therefore, its final price will be gone up because it can't turn out goods on a mass production basis. To compensate the defect, variety of study will be necessary.

The purpose of this study is to find out basic materials for its commercialization. As one means to this end, we had certified ideal performance curve based on ratio of stoichiometry on hydrogen and oxygen. And also, we had analyzed optimum stack drive condition on the PEMFC which has a single cell of 10W class based on the change of temperature 50, 70, 80 and 60 celsius degree.

In consequence,  $\lambda_{H_2} = 1.8$ ,  $\lambda_{Air} = 1.5$  and temperature 70°C was the optimum operating condition in this study.

## Nomenclature

$\overline{g_f}$	깁스 자유 에너지 [kJ/mol]
$\overline{h_f}$	엔탈피 [kJ/mol]
F	패러데이 상수 (96485[C])
V	전위 [V]
Ι	전류 [A]
i	전류밀도 [A/cm²]
e /	전자
N	아보가드로수 (6.022 x 10 <sup>23</sup> [분자/mol])
$\lambda_{H_2}$	공급수소 화학양론비
$\lambda_{Air}$	공급공기 화학양론비 🖉
$V_c$	단 셀 운전 전위 [V]
$P_e$	스택 운전 출력 [W]
	* अ म थ म

## List of Figures

- Fig. 1 Reaction system and inner structure of PEMFC
- Fig. 2 Structure of PEMFC stack
- Fig. 3 fuel cell characteristics and energy relationships
- Fig. 4 Ideal and actual fuel cell voltage/current density characteristic
- Fig. 5 Definition of effective operating region
- Fig. 6 On the 10W PEMFC (BCFC Co.)
- Fig. 7 Schematic drawing of the PEMFC experimental system
- Fig. 8 PEMFC test station
- Fig. 9 Electric load
- Fig. 10 Load profile imposed in test session
- Fig. 11-1, 2, 3 i-V curve (variable Air stoichiometry)
- Fig. 12-1, 2, 3 Power curve (variable Air stoichiometry)
- Fig. 13-1, 2 i-V curve (variable H<sub>2</sub> stoichiometry)
- Fig. 14-1, 2 Power curve (variable H<sub>2</sub> stoichiometry)
- Fig. 15 i–V curve & power curve( $\lambda_{H_2} = 1.8$ )
- Fig. 16 i-V curve & power curve (variable temperature)
- Fig. 17 i-V curve & power curve (Manufacturers Reference data)

## List of Tables

- Table 1 Various type of Fuel Cell
- Table 2  $\Delta \overline{g_f}$  of  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  reaction on various temperature
- Table 3 Specification of 10W PEMFC stack
- Table 4Measurement range and accuracy of the measurement<br/>devices of the test facility
- Table 5 Operating conditions



## 제1장서론

#### 1.1 연구의 배경

전 세계적으로 에너지와 환경문제에 대해 관심을 가지고 있으며 특히 우리 나라는 G20의 회원국으로 활동하면서 관련된 산업기반 및 제반에 대해 많은 투자를 하고 있다. 이는 시대적 흐름과 변화에 맞추어 갈 수 밖에 없는 필연 적 요소인 것이다. 빠른 경제성장과 발전에 따라 전자기기의 활용범위가 넓어 지고 실 생활에 많은 부분을 차지하는 것이 현실이다. 그러나 우리나라의 에 너지 소비량 세계 11위, 석유 소비량 9위권의 에너지 다소비 국가이다. 최근 10년간 우리나라의 에너지 소비는 매년 10%라는 세계 최고의 증가율을 기록 하고 있으며, 온실가스배출량 증가율 역시 세계 1위를 기록하고 있다. 다행히 세계기후협약 이행이 늦추어지고는 있지만 머지않아 우리도 여기에 참여하지 않을 수 없는 형편이어서 대체에너지 개발의 필요성은 더욱 무게 중심을 더해 가고 있는 실정이다.

현재 선진각국에서 활발히 기술개발이 진행되어 실용화 단계에 접어든 대체 에너지로는 태양에너지, 풍력에너지가 주종을 이루며, 바이오매스, 지열, 파력, 조력 등을 이용한 대체에너지 개발이 활발히 진행되고 있다. '98년 미국 조지 워싱턴대에서 발표한 '미국의 미래기술'에 의하면 미국은 2010년쯤 에너지 소 비량의 10%를 대체에너지로 충당하게 된다고 하며, 또 유럽연합(EU)이 97년 발간한 '에너지백서'는 2010년까지 대체에너지 비중을 현재의 2배인 12%까지 끌어올리려는 계획을 갖고 있다. 또한 풍력발전의 메카라 할수 있는 덴마크의 경우 4,900개의 풍력터빈에서 1,135MW의 전기를 생산 전기소비량의 7%를 충 당하고 있으며, "에너지 21" 계획에 의하면 2000년에 10%, 2030년까지 50%를 풍력으로 대체한다"는 목표아래 대체에너지 개발과 활성화에 노력하고 있다. 이에 비해 우리나라는 여전히 원자력 위주의 에너지정책에서 탈피하지 못하 고 오히려 2015년까지 원자력발전의 비중을 '98년 27.5%에서 34.2%로 늘릴 계획이며, 원자력 또한 우수한 에너지원 중 하나이지만 일본 원자력 발전소의 문제가 대두되면서 국민들의 반감이 늘어나고 있는 추세에 있지만 대체에너지 개발은 초보단계를 벗어나지 못한 채 97년부터 "에너지 기술개발 10개년 계획" 에서야 비로소 현재 0.82%에 불과한 대체에너지 비율을 2%까지 끌어올리겠다 고 한 정도이다. "앞으로 20년 후면 에너지 수급 불균형, 50년 후에는 거의 고 갈상태" 이러한 상황이 벌써 현실적으로도 나타나고 있는 상태에서 대체에너 지 개발은 더욱 시급한 과제이다.

한편, 빠른 경제성장과 산업혁명이후 세계적으로 관심을 가지고 있는 것이 이상기후현상의 원인에 대해 많은 학자들이 의견을 제시하고 있고 그 중 지구온난화가 가장 큰 원인이 되는 것으로 많은 연구 결과들에 의해 밝혀졌 다. 이를 방지하기 위해 1992년 UN 환경개발회의에서 기후변화에 관한 국제 연합기본협약이 채택, 교토의정서(Kyoto Protocol)가 러시아의 비준(2004년 11 월)으로 2005년 2월16일 발효됨에 따라 온실가스 배출억제를 위한 국제적 환 경규제가 더욱 강화되고 있다.

이를 해결하기 위한 방안으로 비고갈적이고 친환경적인 신·재생에너지에 대 한 연구가 전 세계적으로 진행되고 있으며 우리나라는 2004년에 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급촉진법을 개정하였다. 이는 신·재생에너지를 적극적으로 도입하고 적용하겠다는 정부의 공식적인 입장을 잘 보여주고 있다.

현재 우리나라에서 연구되고 있는 신·재생에너지의 종류로는 태양광, 태양 열, 풍력, 연료전지, 수소, 바이오, 폐기물, 석탄가스화·액화, 지열, 수력, 해양 의 총 11개 분야가 있다. 그 중 연료전지는 다른 분야들에 비해 효율이 높기 때문에 각광받고 있으며, 특히 고분자연료전지(PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)의 경우 낮은 온도에서 구동할 수 있다는 이점 때문에

- 2 -

자동차나 가정용 열병합발전설비로의 선택도가 높다.

그러나 연료전지 Cell이나 운전조건에 대해 정해진 기준이 아직 없는 상태 이고 연구자 및 스택의 급에 따라 적용 기준이 상이한 것이 일반적이다. 따 라서 대량생산이 불가능하므로 상용화 단계에서 단가의 상승으로 이어진다. 이를 해결하기 위해서는 기준의 정립화가 반드시 필요하며, 최적의 운전조건 찾아내는 다양한 실험이 뒷받침 되어야 한다.

다양한 스택의 성능분석을 비교하고 수치해석적 연구들이 이어져 오고 있 으나 현재 10W급 단일셀에 대한 연구를 통해 소형 및 휴대용 연료전지의 기준의 정립 및 실용화를 위한 기초적인 자료를 반영하고자 한다.



#### 1.2 연구의 목적

국내·외에서 연료전지(PEMFC)에 대한 많은 수치해석적 연구, 실험적 연 구, 가시화를 통한 연구, 각종 보조기기에 관한 연구 등 연구가 이루어졌다. 그러나 각 스택에 대한 기준의 정립화를 위해서는 아직도 많은 연구가 진행 되어야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 PEMFC운전을 위해 제작된 10W급 단일셀 스택의 운전 특성을 파악하여 이후에 수행될 소형 및 휴대용 연료전 지에 대한 해석적 연구 및 개발의 자료로 활용하는데 있다.

이를 위해서는 10W급 단일셀 스택의 운전조건을 다양하게 바꾸어 봄으로 써 그에 따른 성능의 변화를 확인해 볼 필요가 있으며, 이를 통해 기존 스택 과의 충분한 비교 또한 같이 이루어져야 한다. 또한 단일셀 연료전지의 상용 화가 가능한지 소형 및 휴대용으로 사용이 가능한지에 대한 지표가 되기위 한 기초적인 자료로 활용하는데 있다.

본 연구에서는 연료(수소) 및 공기의 화학양론비와 온도를 다양하게 바꾸 어 그에 따른 성능의 변화를 확인해 봄으로써 각 조건이 스택의 운전에 미 치는 영향을 알아보고자 한다. 또한 단일셀 스택 성능평가의 가장 기본적인 지표가 되는 분극곡선과 출력곡선을 각 조건에 대해 구해보고 최적의 운전 조건을 찾고자 한다.

## 제 2 장 PEMFC의 이론

#### 2.1 연료전지의 종류와 특징

#### 2.1.1 연료전지의 종류

연료전지(Fuel Cell)는 연료(수소)의 화학에너지가 전기에너지로 직접 변환 되어 직류 전류를 생산하는 능력을 갖는 전지로 정의되며, 종래의 전지와는 다르게 외부에서 연료와 공기를 공급하여 연속적으로 전기를 생산한다. 연료 전지의 기본 개념은 수소와 산소의 반응에 의하여 생성되는 전자의 이용으로 설명할 수 있다. 위의 그림에서 보는 바와 같이 수소는 (+)극를 통과하고 산소 는 (-)극을 통과한다. 수소는 전기 화학적으로 산소와 반응하여 물을 생성하면 서 전극에 전류를 발생시킨다. 전자가 전해질을 통과하면서 직류 전력이 발생 하며 열도 부수적으로 생산된다. 직류 전류는 직류 전동기의 동력으로 사용되 거나 인버터에 의해 교류 전류로 바꾸어 사용된다. 연료전지에서 발생된 열은 개질을 위한 증지를 발생시키거나 냉난방 열로 사용될 수 있으며, 사용되지 않을 경우에는 배기열로 배출된다.

Anode :  $H_2 \rightarrow 2H + 2e^-$ 

Cathode :  $O_2 + 2H + 2e^- \rightarrow H_2 O$ 

전체반응 : H<sub>2</sub> + 1/2O<sub>2</sub> → H<sub>2</sub> O + 전류 + 열

수소는 백금 촉매가 들어 있는 다공성 전극을 통해서, 그리고 산소는 촉매

가 들어 있는 다공성 탄소 전극을 통해서 전지 안으로 들어가고, 가운데에는 뜨거운 수산화칼륨 용액이 들어 있다.

오늘날 사용되고 있는 연료전지는 여러 종류가 있으며 각 특징을 Table 1에 나타내었다.

종 류	동작온도	이 온	특 성
알칼리(AFC)	50~200℃	ОН⁻	아폴로와 우주왕복선 등 우주용으로 사용
수소이온교환막(PEMFC)	30~100℃	$H^+$	자동차용, 모바일기기용, 저출력 CHP시스템
직접메탄올(DMFC)	20~90℃	$H^+$	저출력으로 장시간 이용하는 휴대용 전자시스템
인산(PAFC)	약 220°C	$H^+$	다수의 200kW CHP시스템
용융탄산염(MCFC)	약 650℃	$CO_3^{2-}$	중·대규모 CHP시스템에 적합
고체산화물(SOFC)	500~1000℃	$O^{2-}$	2kW이상의 모든 크기의 CHP시스템에 적합

Table 1. Various type of Fuel Cell

#### 가. 인산형 연료전지

인산형 연료전지 기술은 20년 이상 개발되고 개선되어 왔고, 전기 생산에 비교적 순수한 수소(70% 이상)를 요구한다. 인산형 연료전지 내의 전극은 탄 소 지지체의 표면적 위에 촉매로써 백금이나 백금 혼합물을 포함한다. 인산형 연료전지의 운전 온도는 약 200℃ 이다. 이것은 인산 전해질의 안정도를 위하 여 허용하는 최대값이다. 이 기술로 현재까지 순수한 발전 효율은 40~50% 정도이다. 이 수준보다 높은 효율을 갖기 위해서는 전지와 스택 구성품의 지 속적인 개발에 의한 종합시스템 제어에 의존하여야 한다. 일례로 인산형 연료 전지의 반응이 발열 반응이므로 연료전지가 반응온도인 200℃로 유지함이 최 적의 운전 조건이 된다. 따라서 연료전지 반응시 반응열을 냉각시켜야 하며 이때 생성되는 반응열을 이용하면 효율을 70%이상 높일 수 있다.

인산은 저온 연료전지를 위한 전해질로써 필요한 수명을 가진 그런 유일한 물질로 알려져 있다. 이것이 낮은 이온 도전율을 가지고 있다 할지라도 이것 의 안정도는 전류 상태를 증진시키는 전지 개발에 기여하였다. 인산형 연료전 지 응용은 휴대용, 자동차용 및 고정용 전원을 포함한다.

#### 나. 알칼리형 연료전지

알칼리 연료전지는 전해질로써 수산화칼륨과 같은 알칼리를 사용한다. 연료 로서 순수 수소를 쓰며, 산화제로써는 순수 산소를 쓴다. 운전 온도는 대기압 에서 60~120℃이다. anode의 촉매는 니켈망에 은을 입힌 것 위에 백금-납을 사용하고, Cathode는 니켈망에 금을 입힌 것 위에 금-백금을 쓴다. 알칼리 연 료전지의 고효율화의 기본적인 목적은 자동차 산업의 전원 공급용이다. 알칼 리 연료전지는 알칼리가 이산화탄소에 민감하기 때문에 인산형 연료전지의 개 발보다 늦게 개발되었다.

알칼리 연료전지 시스템에서 수소의 저장과 이산화탄소의 경제적인 제거는 알칼리 연료전지의 상업화에 가장 중요한 요소이다. 자동차의 경우에 알칼리 연료전지가 확보할 수 있는 시장 비율은 경쟁성 기술에 의하여 영향을 받을 것이다. 알칼리 연료전지 기술 전망은 수소 저장과 대규모 상업화를 시작하기 전에 유통망(distribution)의 개량을 필요로 한다. 과학자들에 의하여 오랫동안 주장되어 온 수소를 기초한 미래 자동차의 경제성은 알칼리 연료전지의 상업 화를 선호하게 될 것이다.

- 7 -

#### 다. 고분자전해질형 연료전지

고분자전해질형 연료전지의 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체 (Membrane)로써 다른 연료전지와 구별된다. 인산형 및 알칼리형 연료전지 시 스템과 비슷하게 멤브레인을 이용하는 연료전지는 촉매로써 백금을 사용한다. 멤브레인 연료전지의 개발 목표는 최소 1.5g/kW의 백금 촉매를 쓰는 것이다. 이 백금 촉매는 일산화탄소에 의한 부식에 민감하므로 일산화탄소의 농도는 1000ppm 이하로 유지하여야만 한다.

고분자전해질형 연료전지 시스템의 소형화는 자동차 응용에 가장 중요한 역 할을 한다. 개발 사업은 인산형 연료전지보다 약 10년이 뒤져 있지만, 인산형 에 비해 저온에서 동작되며, 출력 밀도가 크므로 소형화가 가능하며, 기술이 인산형과 유사하여 응용 기술의 적용이 쉽기 때문에 현재는 고분자전해질형 연료전지의 이용 규모가 적을지라도 상업화할 수 있다. 더욱이 현재 몇 개의 시범용 고분자전해질형 연료전지의 전원에 의한 자동차는 실험 결과 우수성이 입증되어 더 많은 연구 계획을 진행 중에 있다.

#### 라. 용융탄산염형 연료전지

용융탄산염형 연료전지의 전해질은 낮은 용융점을 가지는 탄화리튬과 탄화 포타슘의 혼합물이다. 전극은 다공성 니켈로 만든다. 전극의 부식성과 내구성 은 아직 개발에 중요한 애로점이다.

용융탄산염형 기술의 산 또는 알칼리 연료전지 기술 보다 뚜렷한 장점은 일 산화탄소, 이산화탄소 및 수소에 대하여 내성이 있는 점이다. 이것은 일산화탄 소와 이산화탄소를 분리하는 공정을 필요로 하는 다른 것들보다 초기 투자비 가 낮고 시스템 설계가 매우 단순해지는 결과를 가져온다. 용융탄산염형 연료 전지의 운전 온도는 약 650℃이고, 전지 스택의 열로 전지 내부의 탄화수소 기체의 개질을 허용한다. 내부 개질의 장점은 30% 또는 그 이상의 비용을 감

- 8 -

소시킨다.

용융탄산염 연료전지를 상업화하기 전에 내구성과 신뢰도를 개량시킬 필요 가 있다. 운전온도가 높아 정상운전 되는 동안 용융탄산염 전해질의 결핍과 증발로 인하여 양이 줄어들기 때문이다. 이것이 운전의 안정성과 현재 용융탄 산염형 연료전지의 유효 수명의 제한점이다.

#### 마. 고체산화물형 연료전지

고체산화물형 연료전지의 특징은 탄화수소를 직접 전기로 변화시킬 수 있는 데 있다. 전해질은 안정화된 산화이트늄으로 가스가 스며들지 않은 산 이온이 효율적으로 접촉하고 있는 얇은 산화지르코늄 층이다. Cathode는 안정된 산화 이트늄으로 된 지르코늄으로 만들어졌고, anode는 니켈-지르코늄 세라믹 합금 으로 만들어졌다. 고체산화물형 연료전지의 가장 톡특한 특성은 운전 온도는 약 1000℃ 로써 매우 높다는 것이다. 이 온도에서는 수소와 일산화탄소의 전 기 화학적 산화 반응이 일어나고 촉매없이 연료가 개질된다. 운전 온도 100 0℃에서 금속 재료의 적당한 열적-기계적 강도를 요구하기 때문에 가스 누출 방지가 가장 중요한 애로 사항이다. 세라믹 재료 기술의 개발은 고체산화물형 연료전지가 상업적으로 발전을 시작하기 전에 필요한 기술이다. 고체산화물형 연료전지는 상업적으로 자동차 응용에 연구되어지고 있다. 자동차에 사용하기 위한 이 전지 기술의 모형화가 밧데리 전원 공급형 자동차가 아닌 전위밀도를 요구하는 것과 접목시키는 것이 궁극적인 목적이다.

#### 바. 직접메탄올연료전지

DMFC는 메탄올을 직접, 전기화학 반응시켜 발전하는 시스템이다. 전해질은 이온 교환막에 인산을 담지시킨 것이다. 작동 온도는 150℃로 비교적 저온이 다. PEFC와 비교하여 개질기를 제거할 수 있으며, 시스템의 간소화와 부하 응답성의 향상이 도모될 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 반응 속도가 낮은 것이 의한 저출력 밀도, 다량의 백금 촉매의 사용과 메탄올과 산화제의 Cross Over(고체 고분자 막을 통과하는 것) 등의 단점도 있다. 연료전지는 작동온도 에 따라 두 종류로 나눌 수 있는데, 300℃이하인 것을 저온형 연료전지, 그 이 상의 것을 고온형 연료전지라 한다. 또한 발전효율의 향상을 꾀한 것이나 귀 금속 촉매를 사용하지 않는 고온형의 용융탄산염 연료전지를 제2세대, 보다 높은 효율로 발전을 하는 고체전해질 연료전지를 제3세대의 연료전지라고 한다.



#### 2.1.2 연료전지의 특징

연료전지의 대표적 특징은 다음과 같이 정리된다.

#### 가. 저공해 고효율 에너지원

연료전지는 도심지에서의 대기 공해를 환상적으로 줄일 수 있다. 연료전지 는 동력원의 시스템 효율이 50% 이상이고(기존 내연기관의 효율은 25% 이하 이다), NOx, SOx 등의 유해 가스의 배출이 1% 이하인 청정 고효율 발전 시 스템이다.

#### 나. 차세대 에너지원

70년대의 오일쇼크 이래로 선진 각국에서 꾸준히 대체에너지원의 개발에 노력을 경주하여 왔는데, 연료전지는 석유에너지 이외에 메탄올, 에탄올, 천연 가스 등의 대체에너지를 이용하여 발전할 수 있다. 따라서 절대적인 자원이 부족한 우리나라의 현실에서 볼 때, 연료전지는 차세대 동력원으로 주목받을 것이다.

#### 다. 새로운 시장 잠재력

연료전지는 금속, 전기, 전자, 기계 및 제어 산업과 부수적인 장치를 공급 하는 새로운 시장이 창조될 수 있다. 이것은 역시 수십만의 전문직 직업을 창 조해 낼 수 있으며, 무역 수지에 엄청난 기여를 할 것이다.

#### 2.2 PEMFC의 원리와 구조

#### 2.2.1 PEMFC의 원리

PEMFC는 수소와 산소(공기)를 연료로 하여 전기를 발생시키는 연료전지이 며, 그 원리는 Fig.1과 같다. 수소가 Anode측으로 들어가면 Membrane에 의해 이온화되어 전자와 이온으로 분리된다. 이때 이온은 Membrane을 통과해서 Cathode측으로 이동하지만 전자는 이를 통과하지 못하고 외부로 흘러 전기를 발생 시킨다. 이 반응을 다음과 같이 나타낼 수 있다.



Fig. 1 Reaction system and inner structure of PEMFC

#### 2.2.2 PEMFC의 구조

Fig. 2과 같이 PEMFC에서 전기를 발생시키는 Cell의 구조는 크게 세 부분 으로 나눌 수 있다.

제일 외부에 위치해 있는 End-Plate는 연료의 이동통로이자 전극의 역할을 한다. 공급된 연료는 End-Plate의 유로를 따라 이동하는데, 이 유로가 Plate의 양 면에 형성되어 있어 필요 할 경우 Fig. 2 와 같이 직렬로 적층하여 출력을 높일 수 있다. 이렇게 Cell을 적층시켜놓은 구조를 Stack이라고 한다.

GDL(Gas Diffusion Layer)는 다공질의 섬유성분으로 이루어져 있으며 연료 를 Membrane로 균일하게 공급하는 역할을 한다. 원활한 화학반응을 위해 대 부분의 경우 GDL의 표면을 촉매로 도포한다.

Membrane은 수소이온만 통과시키는 역할을 하는 Cell에서 가장 핵심이 되는 부분이다. 대량의 수분을 흡수하게 함으로써 수소이온전도율을 높인다.



Fig. 2 Structure of PEMFC stack

2.3 PEMFC의 기본이론

2.3.1 개회로전위(OCV)

PEMFC의 기본적인 반응은 다음과 같다.



$$\Delta \overline{g_f} = (\overline{g_f})H_2O - (\overline{g_f})H_2 - \frac{1}{2}(\overline{g_f})O_2$$
[2-6]

여기서  $\Delta \overline{g_f}$ 을 Table 2에 나타냈다.

생성되는 물의 상태	온도[℃]	$\Delta \overline{g_f}$ [kJ/mol]
액체	25	-237.2
액체	80	-228.2
가스	80	-226.1
가스	100	-225.2
가스	200	-220.4
가스	400	-210.3
가스	600	-199.6
가스	800	-188.6
가스	1000	-177.4

Table 2  $\Delta \overline{g_f}$  of  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$  reaction on various temperature

만약 연료전지에 손실이 없으면 모든 깁스의 자유에너지가 전력으로 변화한 다. 또한 수소연료전지에서는 한 분자의 수소를 사용하여 한 분자의 물이 생 성될 때, 두 개의 전자가 외부회로를 흐른다. 여기서 1mol의 수소가 사용되어 2N 개의 전자가 외부회로를 흐른다. 단, N은 아보가드로수이고 F는 패러데 이상수로 1[mol] 전자의 전하(96485[C])이다. 한 개의 전자의 전하가 -e(즉, 1.602 x 10<sup>-19</sup>[C]) 일 때, 전하의 흐름은 아래와 같다.

 $-2Ne = -2F \quad [C(Coulomb)]$ [2-7]

E를 연료전지의 전위라 했을 때, 외부회로를 흐르는 전하에 따라 행해지는 일은 다음 식으로 구해진다.

전기적 일 = 전하×전압 = 
$$-2F \cdot E[J(Joule)]$$
 [2-8]

만약 가역반응이라고 가정하면 전기적 일은 방출되는 깁스의 자유에너지 $\Delta g_f^-$ 와 동일하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \overline{g_f} = -2F \bullet E$$
[2-9]

이로부터



혹은 가역 개회로전위(OCV)을 나타낸다.

#### 2.3.2 연료전지의 System 설계 기초

#### 가. 기초식

연료전지의 시스템 설계를 위한 기초 자료로써 아래의 값들을 계산한다.

○ 산소 사용량	○ 입구공기 유량	○ 출구공기 유량
○ 물의 생성량	○ 열의 발생량	○ 수소 사용량

○ 화학양론비 λ

 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ 

- 위 반응에서 2mol의 수소가 1mol의 산소에 공급된다. 이를 화학양론 이라 한다.
- 수소 1분자 당 2 개의 전자가 이동하므로, 1mol당 4F의 전하를 만들어 낸다.
- 산소는 일반적으로 화학양론보다 많이 공급한다. 산소 대신 공기를
   공급할 때는 특히 그러하다. 만약 화학양론 만큼 공급하면 공기가
   셀을 나갈 때는 완전히 산소가 없는 상태로 된다.
- 반응물질의 필요량이 매 초 n이면, 실제 공급량은 매 초 λn mol 이 된다.

○ 연료전지 전체 스택의 전력 P<sub>e</sub>와 스택 각 셀의 평균전압 V<sub>e</sub>

- 전력 값은 연료전지 시스템에서 가장 중요한 정보이므로 대부분
   알고 있다.
- V<sub>c</sub>가 명확하지 않으면, 0.6~0.7V로 가정할 수 있다.

효율을 알면 V<sub>c</sub>를 계산할 수 있다. 수치가 분명하지 않을때는
 근사치 V<sub>c</sub> = 0.65 V를 사용한다. 고압의 연료전지에서는 약간 더
 높게 평가한다.

#### 나. 산소와 공기의 사용량

- 산소 사용량 계산 전류 혹은 전력 값으로 계산한다.
  - 수소연료전지에서는 하나의 산소분자에 대해 4개의 전자가 이동
     하므로, 산소 몰수에 대한 총 전하량은

전하 $=4F \times O_2$ 

 F: 1몰의 전자의 전하량(전자 하나의 전하량 e 1.602×1019C와

 1 몰의 아보가드로수 6.022×1023개의 곱)

 O2: 산소의 몰수

 전하량을 시간으로 나누면 전류(I)가 되고, 정리하면

 Q2사용량 = I/4F
 [mol/s]

 이것은 하나의 셑에 대한 값이다. n 개의 셑에 대해서는

 Q2사용량 = In/4F
 [mol/s]

- 전력 값을 아는 경우 산소사용량 계산 :

전력  $P_e = V_c \times I \times n$  이므로,

$$I = \frac{P_e}{V_c \times n}$$

이 값을 식 2-11에 대입하면, 셀 수는 알 필요가 없게 된다.

$$O_2 ^{\text{A}-용-당} = \frac{P_e}{4 \cdot V_c \cdot F} \quad [mol/s]$$
[2-12]

mol/s를 kg/s로 변경하면 산소분자량 32×10-3을 적용하여

$$O_2^{\lambda} = \frac{32 \times 10^{-3} \cdot P_e}{4 \cdot V_e \cdot F} \quad [kg/s] = 8.29 \times 10^{-8} \text{ Pe} / \text{Vc}$$
 [2-13]

여기서, 만약 각 셀의 평균전압  $V_e$ 가 분명하지 않다면 효율로부터 계산하 거나, 근사치로써 0.65V 를 사용한다.

- 공기 사용량 계산
- 대부분 산소는 공기에서 얻으므로, 식 2-12를 공기사용량으로 맞춘다. 산소의 공기 속의 몰 비는 0.21이고, 공기의 분자량은 29.27x10<sup>-3</sup> kg/mol이다. 따라서,

$$\vec{\mathcal{F}}^{7} [\lambda] \stackrel{\text{B}}{\Rightarrow} \vec{\mathcal{F}}^{\epsilon} = \frac{28.97 \times 10^{-3} \times P_{e}}{0.21 \times 4 \times V_{C} \times F} [kg/s]$$
$$= 3.57 \times 10^{-7} \times \frac{P_{e}}{V_{c}} [kg/s]$$

- 입구공기 유량(실제 공기사용량)
- 위 값은 화학양론 값이다. 실제로는 화학양론비 λ(일반적으로는 2배)
   로써 공급한다. 실제의 공기사용량 즉, 입구공기 유량은 다음과 같이
   쓸 수 있다.

실제 공기사용량 = 
$$3.57 \times 10^{-7} \times \lambda \times \frac{P_e}{V_c}$$
 [kg/s] [2-14]

- 일반적으로 '표준상태에서의 체적'의 유량단위가 유용하다. 식 2-14에서
   얻어지는 유량에 다음을 곱하면 유량 단위를 바꿀 수 있다.
  - 3050을 곱하면 표준상태 유량 m<sup>3</sup>/h

- 1795를 곱하면 유량 SCFM(또는 표준상태 ft<sup>3</sup>/min)
- 5.1x10을 곱하면 유량 slm(또는 표준상태 *l*/min)
- 847을 곱하면 유량 sls(또는 표준상태 *l/s*)

#### 다. 출구공기 유량

- 출구공기의 유량과 입구공기의 유량[식 2-14]의 차이는 산소의 소비
   식 2-13에 의해서 결정된다.
- 출구공기의 유량은 습도를 계산할 때 특히, PEMFC에서 중요하다.
- 일반적으로 출구공기 속에는 수증기가 포함되어 있으나, 일단 '건조공기'
   를 생각한다. 물의 생성은 부록 식 2-5에 나타내었다. 명확히,

출구·경기 유량 = 3.57×10<sup>-7</sup>×λ×
$$\frac{P_e}{V_c}$$
 = 8.29×10<sup>-8</sup>× $\frac{P_e}{V_c}$  [kg/s]  
= (3.57×10<sup>-7</sup>×λ-8.29×10<sup>-8</sup>)× $\frac{P_e}{V_c}$  [kg/s] [2-15]

#### 라. 수소 사용량

전류 혹은 전력 값에 의한 수소의 사용량 계산은 산소와 유사한데,
 차이는 수소 한 분자를 기준으로 하면 두 개의 전자가 생기는 것이다.
 식 2-11과 2-12에서,

$$H_2^{\lambda} \stackrel{\text{a.s.}}{\to} \stackrel{\text{c.s.}}{\to} = \frac{In}{2F} \qquad [mol/s] \qquad [2-16]$$

또한, 전력 값을 포함하면

$$H_2^{\lambda} + \frac{9}{5} = \frac{P_e}{2F \cdot V_c \cdot F} \qquad [mol/s] \qquad [2-17]$$

- 수소의 분자량은 2.02x10<sup>-3</sup>kg/mol 이므로 수소 사용량은 다음과 같다.

H₂사용량 = 
$$\frac{2.02 \times 10^{-3} \cdot P_e}{2 \cdot V_c \cdot F}$$
 = 1.05 × 10^{-8} ×  $\frac{P_e}{V_c}$  [kg/s]
 [2-18]

 - 이 값은 화학양론이다.
 - 이 공식은 수소를 연료로 하는 연료전지에서만 적용 가능하다. 개질한 수소/일산화탄소의 혼합가스인 경우에는 상황은 다르다.

- 마. 물의 생성
- 수소연료전지에서는 두 개의 전자에서 1mol의 비율로 물이 생성된다.

식 2-11를 적용하면,

물의 생성량 = 
$$\frac{P_e}{2 \cdot V_c \cdot F}$$
 [mol/s] [2-19]

물의 분자량은 18.02x10<sup>-3</sup>kg/mol 이므로

물의 생성량=9.34×10<sup>-8</sup>×
$$\frac{P_e}{V_c}$$
 [kg/s] [2-20]

- 수소 연료전지에서 물의 생성은 거의 화학양론비가 된다.
- 수소/일산화탄소의 혼합가스인 경우에는 물의 생성은 혼합가스 속의
   일산화탄소의 양에 비례해서 적게 된다.
- 계산 예: 1kW의 수소연료전지가 0.7V의 셀전압으로 한 시간 운전했을 때
   생성되는 물의 양을 계산한다. 식 2-9에 대입하면

또한,

바. 발생하는 열

- 수소연료전지의 반응엔달피 모두 전력으로 변환되었다면 출력은
  - 생성되는 물이 액체인 경우 : 1.48V

생성되는 물이 증기인 경우 : 1.25V

- 실제의 셀전압과 이 전압의 차이는 전력으로 변환되지 않는 에너지 즉,
   열이다.
- 연료전지를 나오는 에너지는 세 가지 형태 : '전력', '현열', '수증기의 잠열'이다.
- 전류 I, n 개의 셀의 스택에서 발생하는 열은 다음과 같이 된다.

생성열량 = 
$$nI(1.25 - V_c)$$
 [W]

- 전기적 출력으로 나타내면

생성열량 = 
$$P_e \left( \frac{1.25}{V_c} - 1 \right)$$
 [W] [2-21]

2.3.3 연료전지의 비가역성(전압강하의 원인)

#### 가. 활성화손실

전극의 표면에서 발생하는 반응이 늦기 때문에 생긴다. 전극 쪽으로
 또는 전극으로부터, 전자를 이동시키는 화학반응을 진행시키기 위해
 발생 전압의 일부가 손실되는 것이다. 이 전압강하는 상당히 비선형
 이다.

## 나. 연료 크로스오버와 내부전류

- 이 에너지 손실은 연료가 이온화되지 않고 전해질을 통과하기 때문에 생긴다. 좁은 범위로는 전해질을 통과하는 전자의 이동(내부전류)에 의해서 생긴다.
- 전해질은 셀을 통해서 이온만을 통과시켜야 하지만 어느 정도의
   연료의 확산과 전자의 흐름이 늘 존재하기 때문이다.
- DMFC 이외에는 연료의 교차와 내부전류는 작기 때문에 그 효과는
   그다지 중요하지 않다. 그러나 저온 셀의 OCV에는 상당히 영향을
   미친다.

#### 다. 오옴손실

- 전해질을 통한 이온의 흐름에 대한 저항 및 전극과 각종 접속부의
   재료를 통과하는 전자의 흐름에 대한 직접적인 저항이다.
- 이 전압강하는 전류밀도에 비례하여 선형이므로 '오옴손실' 혹은
   '저항손실'이라한다.

#### 라. 물질수송손실 혹은 농도손실

- 화학반응에 의해 연료가 소비될 때 전극 표면에서 반응물질의 농도가
   변화하기 때문에 생기는 것이다.
- 농도가 전압에 영향을 끼치기 때문에, 이 비가역성은 농도손실'이라
   고도 한다.
- 농도의 감소는 충분한 반응물질을 전극표면으로 수송할 수 없기
   때문에 발생하므로, 이 손실을 '물질수송손실'이라고도 한다.
- 또한, '넬른스티안(Nernstian)'이라고도 한다. 이 값이 농도에 관계
   하고, 또 농도의 영향은 넬른스트의 식에 의해 모델화되기 때문이다.



Fig. 3 fuel cell characteristics and energy relationships

#### 2.3.4 효율 및 효율의 한계

연료전지의 효율은 일반적으로 다음과 같이 생각할 수 있다.

식 2-22에서 가역반응이라 가정하면 이 효율은 100%가 된다. 그러나 실제 로 이러한 반응은 여러 화학 반응들 중 일부분일 뿐이다. 따라서 식 2-23와 같이 나타내는 것이 더 바람직하다고 할 수 있다.

연료전지의 효율 = 
$$\frac{1mol의 연료에서 생성되는 전기에너지}{-\Delta h_f}$$
 [2-23]

여기서 Δh<sub>f</sub>는 발열량으로 생성된 물이 증기 일 경우 저위발열량, 액체로 응 축했을 경우 고위발열량이다. 또한 이용 가능한 최대의 전기에너지는 깁스자 유에너지의 변화와 같으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

가능한 최대효율 = 
$$\frac{\Delta \overline{g_f}}{\Delta \overline{h_f}} \times 100$$
 [%] [2-24]

#### 2.3.5 효율과 연료전지의 전위

식 2-10에서 고위발열량을 적용시켰을 경우 1.18[V]이다. 이것은 100%의 효율이 되는 전위이므로 실제의 효율은 다음과 같이 구할 수 있다.

셀의 효율 = 
$$\frac{V_c}{1.48} \times 100$$
 [%] [2-25]

여기서 V<sub>c</sub>는 실제전위이다. 또한 실제로는 연료전지에 공급되는 연료 중 일부는 반응하지 않고 통과해 버리기 때문에 모두 사용되는 것이라고 볼 수 없다. 따라서 연료이용도 μ<sub>f</sub>는 다음과 같이 정의한다.

이것은 연료전지의 실제 전류와 모든 연료가 반응했을 때의 전류비와 동일 한 의미를 나타낸다. 여기서 연료이용도를 고려하여 연료전지의 효율 η을 나 타내면 다음과 같다.

$$\eta = \mu_f \times \frac{V_c}{1.48} \times 100 \quad [\%]$$
[2-27]

#### 2.4 분극곡선을 이용한 성능 해석

연료전지의 성능은 셀 전위와 전류밀도의 관계를 나타낸 분극곡선으로 특 성화할 수 있으며(Fig. 3 참조) 분극곡선의 비교를 통하여 셀의 성능을 평가, 비교할 수 있다. 이러한 분극곡선에는 3가지 특이한 영역이 있다.

- 가. 전류밀도가 낮은 영역에서는 활성화 손실에 의해 셀 전위가 급격히 감
   소한다.
- 나. 전류밀도가 중간인 영역에서는 셀 전위가 전류에 따라 선형적으로 감소 하는데, 이는 옴손실(셀저항)의 결과이다.
- 다. 전류밀도가 높은 영역에서는 셀 전위가 전류밀도에 따라 비선형적으로 감소하는데, 이는 농도 손실의 결과이다.



Fig. 4 Ideal and actual fuel cell voltage/current density characteristics

PEMFC를 실제 시스템에 적용 시에 부하에 따른 스택의 조작이 쉬울수록 좋다. 대부분의 스택의 i-V커브는 전류밀도와 전위와의 관계가 옴손실이라 고 불리는 영역에서는 거의 선형적인 관계를 보이며, 농도분극손실이라고 불 리는 영역에서는 비선형적인 관계를 보인다. 따라서 스택의 시스템 적용 시 유효한 운전영역은 옴손실 영역이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 옴손실이 지배하는 영역에서 농도분극 손실 이 지배하는 영역으로 바뀌는 부분까지를 유효운전영역(Effective operating region)라고 정의하겠다. Fig. 4와 같이 유효운전영역 안에는 그 운전조건에 서의 최대 출력이 포함된다. 그리고 유효운전영역은 정확한 전류밀도나 전위 를 통한 것이 아니라, i-V커브의 경향을 보기 위한 것으로 목적은 각 운전 조건의 비교분석에 있음을 언급한다.



Fig. 5 Definition of effective operating region

## 제 3 장 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구에 사용된 Fig. 6의 PEMFC 스택은 Nano사의 강제 공급 방식 스 택으로써 최대 10W의 출력을 내며, 자세한 스펙은 Table 3 와 같다. 그리고 실험을 위한 Fig. 8의 Test station은 최대 허용 스택의 용량은 150W이다. Test station은 MFC(Mass flow controller) 및 Line heater, 온도 콘트롤러, 냉각 모듈 등으로 구성되어 있다. 가습 조절은 PID 자동 온도 조절에 의한 노점 포화 방식(Bubble mode)으로 가습기로써 물의 온도를 제어하여 노점온 도를 통하여 상대습도를 제어하는 방식이다. Fig. 9는 스택의 부하를 걸기 위한 Electric load는 K사의 PLZ-70UA 모델이다. 실험장치의 전체 계통도는 Fig. 7과 같고, Test station에 설치된 측정장비 및 Electric load의 자세한 스펙은 Table 4와 같다.

CH OT U



Fig. 6 10W PEMFC

## Table 3 Specification of 10W PEMFC stack

Membrane	NR 212		
GDL	E-Tek		
Number of cells	1		
Area	25cm²		
Power	10W		
Reactants	hydrogen/air		
Weight	about 1.8kg		
Dimension	6.5 cm (L) x 11 cm (W) x 11 cm (H)		
Cooling	required		



Fig. 7 Schematic drawing of the PEMFC experimental system



Fig. 8 PEMFC test station



Fig. 9 Electric load(K사 PLZ-70UA) UNA

## Table 4 Measurement range and accuracy of the measurement devices of the test facility

11

Measurement device	Measurement range and accuracy
Electric load	Current range: 0 A $\sim$ 45 A Accuracy : $\pm 0.2$ % of full scale
	Voltage range : 0 V $\sim$ 150 V Accuracy : ±0.2 % of full scale
	<anode></anode>
	Full scale : 1 L/min
Mass flow controller	Accuracy : $\pm 0.2$ % of full scale
Mass now controller	<cathode></cathode>
	Full scale : 5 L/min
	Accuracy : $\pm 0.2$ % of full scale
	Range : −200°C ~ 300°C
T-Type thermocouple	Accuracy : $\pm 0.5$ °C

#### 3.2 실험방법

본 실험에 사용된 수소 및 공기는 순도가 99.999% 이상이며, 상대습도 조 절을 위하여 수분이 포함 되어있지 않은 가스를 사용하여 외부 가습을 한다. 한편, 측정 이전에 스택 및 공급 가스 온도, 버블러 가습기의 온도, 냉각수 온도 등이 정상상태에 도달해야 한다. 따라서 측정 이전에 질소를 공급하여 수 분간 운전하여 냉각수 온도 등이 정상상태와 가깝도록 만든 후, 수소와 공기를 주입하여 완전한 정상상태를 만들며, 그 시간은 보통 20여분 정도가 소요된다. 정상상태의 판정은 공급가스의 온도, 버블러 가습기 온도 변동이 ±0.1℃, 냉각수 온도의 변동이 ±0.3℃ 정도가 될 때로 하였다. 이러한 정상상 태 판정의 기준은 사전 테스트를 통하여 실험 시간 및 콘트롤러, 계측기의 오 차를 고려한 값이다. Electric load를 통한 스택의 성능 측정은 전위를 0.4~ 8.6[V](8.6[V]=OCV)사이를 0.2V간격으로 나누고, Sampling time을 1초로 하여 한 스텝 당 15초 동안 측정하였다. 측정을 위한 Electric load의 전위 스텝 입 릭은 Fig. 9와 같다. 전위는 줄이는 방향으로 측정한 후 다시 올리는 방향으로 입력하였다. 그 원인은 수분 생성에 대한 이력현상을 감안하기 위함이다.

Electric load에 의해 측정된 값은 컴퓨터로 데이터가 저장이 되며, 저장 된 데이터를 정리하여 i-V커브 및 출력곡선 등을 구하여 성능을 해석하고자 하 였으며, 각 실험 후 질소를 공급하여 스택을 수 분간 퍼지 시킴으로써 스택 내부에 남아있을 가능성이 있는 수소 및 공기를 완전히 제거하였다.



- 34 -

#### 3.3 운전조건

본 PEMFC 스택의 운전조건은 Table 5와 같다. 유량은 스택 제조사에서 권장하는 전류값인 15A일 때를 기준으로 부록의 식을 이용하여 구하였고, 화학양론비는 수소는 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 공기는 1.0, 1.5, 2.0으로 변화 시켰다. 입구 라인에서 온도 하강으로 인한 수분이 응축되어 스택의 성능에 영향을 주는 것을 방지하기 위하여 상대습도는 100%로 정하였다. 냉각수 출 구온도는 사전 테스트에 의해 스택이 좋은 성능을 나타내는 60℃로 하였다.

각 조건별 실험결과 분극곡선과 출력곡선이 이상적인 조건으로 산소를 고정 비를 두고 산소를 조절하여 성능에 영향을 확인하고 그 중에서 성능조건이 우 수한 수소를 고찰한 결과에 산소비를 조절하여 성능을 확인 하였다.

화학양론비에 의한 실험결과 가장 이상적인 조건을 확인한 후 온도 변화를 50℃, 60℃, 70℃, 80℃에 따른 성능변화를 확인 하였다.

Table	5	Operating	conditions
-------	---	-----------	------------

Condition		Gas supply						
		H <sub>2</sub>			Air			사대
		$\lambda_{H_2}$	유량 ( <i>l</i> /min)	입구 온도 (℃)	$\lambda_{Air}$	유량 (ℓ/min)	입구 온도 (℃)	8 대 습도 (%)
Changes in gas supply hwahakya ngronbi	case1	1	0.12	60	1	2.8	60	- 100
	case2				1.5	4.4		
	case3				2	5.6		
	case4	1.2	0.14	60	1	2.8	60	
	case5				1.5	4.4		
	case6	1	TIO	NA	2	5.6		
	case7	N			1	2.8	60	
	case8	1.4	0.17	60	1.5	4.4		
	case9				2	5.6		
	case10	1.6	0.19	60	1	2.8 4.4	60	
	case11				1.5			
	case12				2	5.6		
	case13	1.8	0.21	60	1	2.8		
	case14				1.5	4.4		
	case15				2	5.6		
	case16	2	0.24	60	X	2.8	60	
	case17				1.5	4.4		
	case18				-2	5.6		
Changes in gas temperature	case19	1.8	0.21	50	1.5	4.4	50	100
	case20			70			70	
	case21			80			80	
Reference data comparison	case22	1.6	0.19	60	1.75	5	60	100

### 제 4 장 결과 및 고찰

#### 4.1 가역 개회로 전위(OCV) 및 손실항에 따른 영향

Fig. 11-1, 2, 3과 Fig. 12-1, 2, 3은 화학양론비에 의해 공급 수소 및 산 소를 변화에 따른 i-V curve의 경향을 잘 나타내고 있다. 초기 전류밀도는 가역 개회로(OCV) 계산에 의거 전압은 1.18[V]가 정상이나 이번 실험에서는 0.84[V]로 활성화 손실이 크게 작용하여 셀 전위가 급격한 감소가 나타났다. 그리고 전류밀도가 0.6~0.7A/cm 이상일때 비선형적으로 감소되는 경향으로 보아 농도손실에 따른 전류밀도의 출력 손실이 크게 나타났다.

#### 4.2 공급수소의 화학양론비 변화에 따른 영향

Fig. 13-1, 2 는 동일한 공급공기의 화학양론비에서 공급수소의 화학양론비 변화에 따른 i-V커브를 나타낸 것이다. λ<sub>Air</sub> = 1.0으로 고정하고 λ<sub>H2</sub>의 공급량 을 변화한 결과 전체적으로 0.6A/cm<sup>2</sup>이하 미비한 성능의 차이를 보였지만 0.6A/cm<sup>2</sup>이상 운전시에는 성능이 급격하게 변화는 것을 알 수 있었고 이것은 농도손실에 따른 성능분포를 확인 할 수 있었다. 그리고 λ<sub>H2</sub> = 1.0,1.2,1.4에서 는 0.8A/cm<sup>2</sup>이상에서 성능을 나타내지 못하였다.

 $\lambda_{Air} = 1.5$ 로 고정하고  $\lambda_{H_2}$ 공급량 변화에서는  $\lambda_{H_2}$ 의 공급량이 많을수록 좋은 성능 및 출력곡선을 나타내고 있으나,  $\lambda_{Air} = 1.0$ 과 같이  $0.5A/cm^{\circ}$ 이상에서는 농 도손실에 의해 성능의 변화를 가져오는 것을 알 수 있었다.  $\lambda_{H_2} = 1.8$ 일 때 전 체 조건에서 가장 이상적인 성능 및 출력을 나타내는 것을 확인하였다.

 $\lambda_{Air} = 2.0$ 으로 고정하고  $\lambda_{H_2}$ 의 공급량 변화는 기존 실험과 동일한 분포 곡선

을 나타내고 있어 크게 차이점을 찾을 수 없었다.

Fig. 13-1, 2에서와 같이 출력은 동일한 분포를 나타내고 있으며,  $\lambda_{H_2} = 1.8$ 에서  $\lambda_{Air} = 1.5$ 일 때 8.8W로 가장 이상적인 출력을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 공급수소의 화학양론비가 많아질수록 무조건 좋은 성능을 나타내는 것이 아니며, 최적의 운전조건을 찾는 것이 필요함을 보여준다.

#### 4.3 공급공기의 화학양론비에 변화 따른 영향

Fig. 14은 동일한 공급수소의 화학양론비에서 공급공기의 화학양론비 변 화에 따른 i-V커브이다. 전류밀도가 커짐에 따라 전위는 점점 감소하는 일 반적인 각종 손실에 의한 i-V커브의 경향을 잘 나타내고 있다. 활성화 손실 영역에서는 거의 유사한 경향을 나타났다. 그러나 0.6A/c㎡ 이상일 경우 농도 손실에 따른 출력이 급격하게 변화는 것을 λ<sub>Air</sub> = 1,0일 때 농도변화가 심하 다는 것을 확인하였다.

그 결과 공급공기의 화학양론비가 커짐에 따라 i-V곡선에서는 큰 영향을 보이지 않았으나 출력곡선에서는 공기의 화학양론비가 커짐에 따라 최대출 력이 좋게 나타났다

#### 4.3 연료 및 공기의 공급온도 변화에 따른 영향

Fig. 16은 λ<sub>H₂</sub>=1.8, λ<sub>Air</sub>=1.5, 상대습도: 100% 조건에서의 공급가스의 온 도 변화에 따른 i-V커브와 출력곡선이다. 일반적으로 PEMFC의 작동온도는 60℃~80℃정도로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 공급가스 온도를 작동온 도 부근인 50℃, 60℃, 70℃, 80℃로 구분하여 공급하였다. 그 결과 Fig. 16과 같이 온도가 높아질수록 유효운전영역 및 동일 전류밀도에서 출력이 향상되 었다. 그 결과 60℃, 70℃, 80℃는 공급온도의 상승에 따른 성능 향상이 뚜 렷이 관찰되었으나, 50℃에서는 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있었다. 그러 나 온도상승에 의한 성능 향상은 거의 미비하였다. 출력곡선에서는 60℃일 때 전류밀도 0.7A/cm이상에서 급격하게 출력이 떨어지는 것은 다른온도에 비해 농도손실이 심하다는 것을 판단할 수 있었다. 그러므로 80℃이상의 운 전로건은 스택의 내구성 등에 악영향을 미칠 가능성이 크므로 온도에 따른 성능 및 출력은 70℃일때 운전조건이 가장 이상적이다.

## 4.4 Manufacturer Reference data와 성능 및 출력곡선 비교

Fig. 17은 스택의 i-V곡선 및 출력곡선을 비교했으며 Reference data의 운 전조건은 온도 60℃일 때 산소의 비율을 1.75비율로 하였다. 수소 및 산소의 화학양론비의 공급량은 정해지지 않았다. 그 결과 i-V곡선이나 출력곡선의 경향은 비슷하나 전위와 출력의 차이는 크게 작용하였다. 그리고 최대전위가 1.1A/cm인데 비해 실험결과는 0.65A/cm정도로 나타났고, 최대 출력 또한 13W 에 비해 8.4W로 낮게 나타났다. 이는 운전조건 또는 운전성향과 조건에 따 라 많은 차이를 보인다는 것을 알 수 있다.



Fig. 11-1 i-V curve (variable Air stoichiometry)



Fig. 11-2 i-V curve (variable Air stoichiometry)



(f)  $\lambda_{H_2} = 2.0$ 

Fig. 11-3 i-V curve (variable Air stoichiometry)



Fig. 12-1 Power curve (variable Air stoichiometry)



Fig. 12-2 Power curve (variable Air stoichiometry)



Fig. 12-3 Power curve (variable Air stoichiometry)



Fig. 13-1 i-V curve (variable H<sub>2</sub> stoichiometry)





Fig. 14-1 Power curve (variable H2 stoichiometry)





(b)  $\lambda_{H_2} = 1.8$  Power curve

Fig. 15 i-V curve & power curve( $\lambda_{H_2} = 1.8$ )



Fig. 16 i-V curve & power curve (variable temperature)



Fig. 17 i-V curve & power curve (Manufacturers Reference data)

## 제 4 장 결 론

본 연구의 목적은 PEMFC운전을 위해 제작된 10W급 스택의 운전 특성을 파악함으로써 이후에 수행될 연료전지에 대한 해석적 연구 및 개발의 실제 적 자료로 활용하는데 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 연료 및 공기의 화 학양론비와 온도조건을 다양하게 바꾸어 그에 따른 성능의 변화를 확인해 봄으로써 각 조건이 스택의 운전에 미치는 영향을 알아보고자 하였고 실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 개회로 전위(OCV)의 기본이론 값이 1.18V인데 비해 실험 초기 동작 전압이 0.84V로 활성화 손실이 크게 작용하는 것을 고찰할 수 있었고 농도손실 또한 0.6~0.7Acm'이상의 전류밀도에서 출력 손실이 크게 나타 났다.
- 수소의 화학양론비를 고정하고 공기의 화학양론비를 변화시킨 결과 공 급공기의 화학양론비가 커짐에 따라 i-V곡선에서는 큰 영향을 보이지 않았으나 출력곡선에서는 공급공기의 화학양론비가 커짐에 따라 출력이 좋게 나타났다.
- 3. 공기 화학양론비를 고정하고 수소의 화학양론비를 변화시킨 결과 λ<sub>H2</sub>의 용량이 많을수록 높은 효율과 성능을 나타내었고 λ<sub>H2</sub> = 1.8이 λ<sub>H2</sub> = 2.0보다 전류밀도가 0~0.6A/c㎡영역에서 더 좋았다. 그리고 λ<sub>H2</sub> = 1.0,1.2,1.4는 0.8A/c㎡이상영역에서는 출력을 나타내지 못하는 것을 알 수 있었다. 현재의 실험조건에서는 최대출력은 λ<sub>H2</sub> = 1.8, λ<sub>Air</sub> = 1.5에서 8.8W로 나타났다.

- 4. 연료 및 공급공기의 온도를 변화시킨 결과, 온도가 높아질수록 성능이 향상되는 경향을 보였다. 하지만 70℃에서 80℃의 온도상승에 의한 성능 향상은 거의 미비하였고, 따라서 스택의 적정한 한계치가 존재하고 가습 문제를 고려한 결과 최적의 운전조건은 70℃이다.
- 5. Manufacturer Reference data와 비교 결과, i-v곡선과 출력곡선의 경향은 비슷하게 나타내고 있으나 전위와 출력의 차이는 크게 작용하였다. 최대 전위가 1.1A/cm인데 비해 실험결과는 0.65A/cm로 나타내었고 출력 또한 13W에 비해 8.4W로 낮게 나타났다.

이상의 결론을 조합하여 본 결과 λ<sub>H₂</sub>=1.8, λ<sub>Air</sub>=1.5, 온도 70℃일때 가장 좋은 운전조건이었다. 하지만 적용되는 시스템 및 상황에 따라 본 연구 기초 를 토대로 유연하게 운전조건을 적용해야 할 것으로 생각한다.

Ot u

#### 참 고 문 헌

- John Nolan, Jason Kolodziej, "Modeling of an automotive fuel cell thermal system", Journal of Power Sources, Vol. 195, pp.4743-4752, 2010.
- Yuyao Shan, Song-Yul Choe, Seo-Ho Choi, "Unsteady 2D PEM fuel cell modeling for a stack emphasizing thermal effects", Journal of Power Sources, Vol. 165, pp.196–209, 2007.
- 3. 고재준, 이종현, 김세훈, 안병기, 임태원, "운전조건에 따른 PEMFC 스택 냉시동 특성 연구", 한국수소 및 신에너지학회, Vol. 20, No. 3, pp.224-231, 2009.
- 4. 윤종진, 조규택, 이종현, 안병기, "중성자 가시화를 통한 연료전지 분리판 평가", 한국 신·재생에너지학회 추계학술대회, pp14-16, 2008.
- Jay H. Lee, Jin Hoon Choi, Kwang Soon Lee, "Overview of Process Control", pp.20–31, 1997.
- Gene F. Franklin, J.David Powell, Abbas Emami-Naeini, "Feedback Control of Dynamic Systems", pp.215–230, Prentice Hall, 2002.
- Chi-Tsong Chen, "Linear System Theory and Design", pp.5–37, Oxford, 1999.
- 장한근, 김진태, 장수진, 이태원, 이병국, 원충연, "연료전지 발전시스템용 ZVS 하프브리지 컨버터 설계", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp.234~238, 2004.
- 원오정, 이기문, 오병수, "BJT를 이용한 1.2kW급 PEMFC용 정전압 회로에 관한 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp.1289~1294, 2004.
- 10. 전윤석, 류태규, 구본웅, "연료전지 차량용 스택 전압 모니터링 시스템", 한국자동차공학회 심포지엄, pp.56~61, 2005.
- 11. Xianguo Li, "Principles of Fuel Cells", Taylor&Francis, 2006.

- Frano Barbir, "PEM Fuel Cells Theory and Practice", Elsevier Academic Press, 2005.
- J. Larminie, A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons, 2000.
- 14. 산업자원부(지식경제부), "신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법", 부칙 <제7284호,2004.12.31>
- 15. 최치환, 문정은, 이규정, "채널 단면형상 변화에 따른 PEMFC 성능 수치 연구", 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp.186~192, 2005.
- 16. 안상열, 소순용, 신석재, 오인환, 하흥용, 홍성안, 이용철, 임태원, "1kW급 고부자전해질 연료전지 스택의 성능 및 연속운전 특성 연구", 한국에너지 공학회추계학술발표회논문집, pp.257~262, 2001.
- 17. 이동훈, 김한상, 방정환, 민경덕, 김민수, 조영만, "주변장치를 포함한 상압형과 가압형 고분자전해질형 연료전지 시스템 성능 비교", 한국자동 차공학회 춘계학술대회눈문집, pp.1767~1772, 2004.
- 18. 김한상, 하태훈, 박성진, 민경덕, "고분자전해질형 단위 연료전지의 Cathode Flooding 현상 가시화 연구", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp.538~543, 2004.
- 19. 김한상, 조준현, 민경덕, "PEM 단위 연료전지 가시화 셀을 이용한 작동 온도에 따른 동적 조건에서의 물 수송 특성 가시화 연구", 한국자동차공 학회 춘계학술대회논문집, pp.2296~2301, 2007.

## 감사의 글

먼저 논문을 쓸 수 있는 기회주시고 인생에서 새로운 가족을 만나 행복한 시간을 가질 수 있게 해 주신 이도형 교수님과 많은 지인분들께 감사의 마음을 전합니다.

항상 아낌없는 지도와 관심을 가져주신 교수님 다시 한 번 감사의 말씀을 올리며, 바쁘신 와중에도 양질의 논문으로 거듭날 수 있도록 세심한 지도와 조언을 해주신 강대민 교수님과 곽재섭 교수님께 감사 드립니다. 그리고 부족한 저에게 아낌없는 조언과 응원 해주신 연구실 식구 마음속 키다리 아저씨 윤봉석 선배님, 예비 교수 박재민 선배 님, 대기업 회장이 될 염으뜸군, 에너지 분야 신 지식인 허수빈군에 게 감사의 뜻을 전합니다.

중대장이 대학원 진학을 할 수 있도록 여건을 마련해 주시고 부족 함이 많고 사고도 많이 치는 후배 장교를 믿고 신뢰해 주신 손휘민 대장님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 그리고 중대장 보직이래 부족함이 많고 실수도 많은 지휘관을 믿고 따라와 주신 부대 장병 및 군무원분들께 감사의 마음을 전합니다.

항상 남편을 뒷바라지 하고 믿고 따라 와준 사랑스런 아내 홍보배 그리고 아들 황보주한에게 사랑하고 존경합니다.

마지막으로 정신적 지주이신 아버지 황보 광 수, 사랑이 무엇인지 가르쳐 주신 어머니 김임숙께 이 논문을 드립니다.

2012년 2월

황보 구 영 拜上