

## 가정용 고분자 연료전지의 모델과 특성해석

조영래, 김남화, 한경희, 주경돈, 윤신용, 백수현  
 동국대학교 전기공학과

### The characteristic analysis and model of PEM fuel cell for residential application

Y.R.Cho, K.D.Joo, N.H.Kim, K.H.Han, S.Y.Yun, S.H.Baek  
 Dongguk Univ. Electric Department

**Abstract** - The imbalance of energy demand and supply caused by rapid industrialization around the world and the associated environmental issues require and alternative energy source with possible renewable fuels. Political instability and depletion of cruel oils are other factors that cause fluctuation of oil price. Securing a new alternative energy source for the next century became an urgent issue that our nation is confronting with

As a matter of fact, the fuel cell technology can be widely used as next generation energy regardless of regions and climate. Specially, the ability of expansion and quick installation enable one to apply it for distributed power, where the technology is already gaining remarkable attentions for the application. Particularly, leading industrialized nations are focusing on the PEM fuel cell with anticipation that this technology will find their place of applications in the vehicles and homes. In this study, demonstrate the multi physics modeling of a proton exchange membrane(PEM) fuel cell with interdigitated flow field design. The model uses current balances, mass balance(Maxwell-Stefan diffusion for reactant, water and nitrogen gas) and momentum balance(gas flow) to simulate the PEM fuel cell behavior.

## 1. 서 론

지구전역의 급격한 산업화와 이로 인한 에너지 수급의 불균형 및 최근 환경문제의 대두와 더불어 대체 연료 및 재생 가능한 에너지의 실용화가 요구되고 있다. 또한 21세기 미래의 에너지 수급이 전략적인 확보를 위해 신 에너지 산업사회의 이행이 요구된다.

연료전지는 지역조건이나 기후조건 등의 제약이 없거나 대규모로 활용이 가능한 제 4세대 발전기술이다. 사용목적에 따라 다양한 용량으로 제작할 수 있고 쉽게 설치할 수 있어 소형 및 이동용 분산전원으로서의 주목을 받고 있다.

특히 자동차 및 주택용으로 적합한 고분자 연료전지는 선진국에서 대규모로 개발 중이며, 연료전지시장을 선도해 나갈 전망이다.

수 kW에서 수백 kW의 출력규모를 가지는 고분자 연료전지는 소형에서 중형의 수송수단에서부터 주택이나 공공시설에 사용할 수 있는 다양한 용도로 사용할 수 있어 그 시장성 성장이 매우 밝다.

그러나 현재까지의 연구들은 주로 연료전지 제어시스템의 설계 분석에 있어 정상상태 운전점, 컴퍼넌트들의 용량크기 산정 및 연료전지 효율을 결정하는데 주목적을 두고 있어 연료전지 스택의 급격한 부하변동, 시동(startup) 및 정지

(shutdown), 시의 과도상태에 대한 연구 및 스택의 성능평가, 스택의 건강상태 및 수명분석, 에 대한 한계를 나타내고 있다. 즉, 연료전지의 적용 및 최적운동을 위한 자동화에 대한 기본적인 타당성연구 등이 수행되고 있으나, 실용화를 위한 연료전지 제어 및 성능평가기술개발 연구는 수행되고 있지 않는 실정이다.

본 연구에서는 연료전지 작용의 현상학적 모델을 통해 보다 정확한 연료전지 특성분석을 하는 것을 목표로 하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 고분자 연료전지 시스템의 연구동향과 전망

고분자 전해질연료전지에 대한 연구는 1955년 미국의 General Electric(GE)에서 처음으로 시작되었다. 현재 GM, Ford 및 Chrysler가 주축이 된 산업계에서는 10에서 50kW급 연료전지 시스템을 개발하고 있으며 특히 메탄올 연료전지 시스템, 가솔린 연료전지 시스템, 그리고 수소연료전지 시스템 등 다양한 연료전지 시스템을 개발하고 있다. 이밖에도 캐나다의 경우, 1995년 연료전지 버스의 제작에 성공하여 시범행이 성공적으로 끝나면 상업적 생산에 들어갈 예정이다. 독일 또한 압축수소를 연료로 사용한 미네벤을 이미 1994년에 DaimlerChrysler에서 개발하였고, 이외에 프랑스, 영국, 스웨덴 등이 공동으로 혹은 단독으로 스택 개발이나 응용 프로그램에 참여하고 있다.

국내에서는 1987년 에너지관리공단 산하 에너지자원기술지원센터에 의해 연료전지 개발 기본계획이 확정되었으나 연구기관의 사정에 따라 이 계획은 계속 수정이 가해져 현재까지 진행되어 오고 있다. 고분자 전해질 연료전지 연구개발에 있어서 국내 우수기업 및 연구기관의 빠른 기술성장이 있었음에도 불구하고 국내의 연구개발 수준은 아직 연구경험 및 기술수준의 열세 등으로 인해 선진국에 비해 크게 뒤떨어져 있는 상태이다. 구성요소 제조에 대해서는 기본적인 기술습득이 이루어진 상태라고 볼 수 있으나, 연료전지의 성능향상을 위한 시스템 수준의 제어기술 및 스택 수명과 모니터링 기술 등에 대한 연구가 보다 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

가정용 곱누자 연료전지는 전기를 만드는 과정에서 발생하는 가정용 온수와 전기를 동시에 공급할 수 있는 장점이 있다. 특히, 일반 화력발전소의 발전효율이 20% 대에 머무르는데 반해 발전효율이 최대 32%에 달하고 열 회수효율까지 포함된 총 효율은 70%이상이다. 실용화가 이루어질 경우 기존의 발전소를 통한 전기 생산보다 송전 및 배전시설 비용을 절감하면서 청정에너지를 안정적으로 공급할 수 있게 된다.

### 2.2 고분자 연료전지 시스템의 향후 연구방향

고분자 연료전지 시스템은 4가지 주요한 제어문제로서, 첫째

는 공기와 연료의 공급시스템, 둘째는 물 관리시스템, 셋째는 열관리시스템, 넷째는 파워관리 시스템 등이 있다. 연료 전지 시스템의 제어측면에서 보면 파워, 압력 및 유동과 같은 빠른 동특성을 가진 인자가 전체 시스템의 특성을 결정짓게 된다. 이러한 특성들로 인해 연료전지 시스템을 위한 제어기법들은 체계적이고 통합적이어야 하며, 다양한 운전 환경 변화에 있어서도 연료전지스택의 보호와 견실한 성능을 갖는 알고리즘으로 통합 설계 되어야 한다. 즉, 제어입력의 포화조건 등 시스템을 불안정하게 할 수 있는 요인들을 모두 고려해서 알고리즘이 개발되어야 한다. 핵심부품의 건강상태 모니터링, 고장진단을 통한 치명적 고장의 판별 등을 수행 할 수 있고, 그 결과 스택의 수명연장과 고 효율 운전을 할 수 있는 제어로직 기능도 포함해야 한다.

### 2.3 고분자 연료전지의 개요

고분자 전해질형 연료전지의 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체(Membrane)로써 다른 연료전지와 구별된다. 인산형 및 알칼리형 연료전지 시스템과 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 유지하여야 만 한다.

고분자 전해질 연료전지는 연료(수소)의 화학에너지가 전기 에너지로 직접 변환되어 직류 전류를 생산하는 능력을 갖는 전지(Cell)로 정의되며, 종래의 전지와는 다르게 외부에서 연료와 공기를 공급하여 연속적으로 전기를 생산한다.

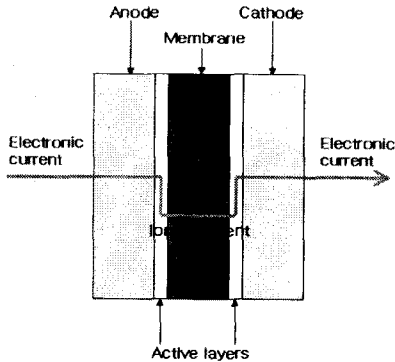


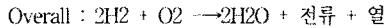
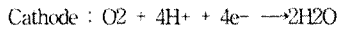
그림 1. 고분자 전해질 연료전지의 기본 개념도

고분자 전해질 연료전지의 기본 개념은 수소와 산소의 전기 화학 반응에 의하여 물이 생성되며, 동시에 발생하는 전기를 이용하는 것으로 설명할 수 있다.

위의 그림에서 보는 바와 같이 수소는 연료극(Anode)으로 공급되고 산소는 공기극(Cathode)으로 공급된다. 연료극으로 공급된 수소는 전극촉매상에 수소이온(H+)과 전자(e-)로 분해되고, 이 중 수소이온만이 선택적으로 고분자 전해질막을 통과하여, 공기극으로 전달된다. 동시에 전자는 외부도선을 통해서 공기극으로 이동하는데, 이들이 공기극에 공급된 산소와 만나서 물을 생성하는 반응을 일으킨다. 이때에 일어난 전자의 흐름으로 인해 전류가 생성되고, 물생성 반응에서 열도 부수적으로 발생한다. 이렇게 생성된 전류는 직류 전류로써, 직류 전동기의 동력으로 사용되거나 전력변환기를 통해 교류 전류로 바꾸어 사용하기도 한다. 연료전지 반응에서 생성되는 부가적인 열은 난방용으로 사용될 수도 있다.

연료전지의 연료인 수소는 순수 수소를 이용하거나, 도시가스, 메탄올, 에탄올 같은 탄화수소를 이용하여 개질이라는 과정을 통해 생산된 수소를 이용한다. 공기극으로 공급되는 산소의 경우, 순수한 산소를 이용하면 연료전지의 성능을 높일 수 있지만 산소 저장에 따른 비용과 무게가 증가하는 문제가 있다. 따라서 공기를 그대로 이용하는 방식을 이용한다.

고분자 연료전지의 전극 반응은 아래의 식과 같으며, 최종적으로 전기와 열 및 물이 동시에 생성된다.



### 2.4 고분자 연료전지의 모델

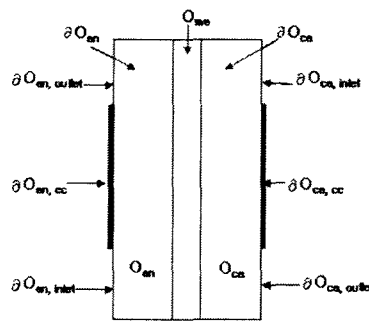


그림 2. 고분자 전해질 연료전지의 모델

그림 2에서 볼 수 있듯이, 애노드( $\Omega_{an}$ ), 멤브레인( $\Omega_{me}$ ), 캐소드( $\Omega_{ca}$ )로 연료전지의 모델된 부분은 3개의 영역으로 이루어져 있다. 각 침투극은 가스분산장치와 접촉되어 있다. 이는 투입채널( $\delta\Omega_{an, inlet}$ ), 전류컬렉터( $\delta\Omega_{an, cc}$ ), 배출채널( $\delta\Omega_{an, outlet}$ )으로 이루어져 있으며, 캐소드에 대해서도 동일하게 이루어져 있다. 습도를 가지는 수소와 공기가 애노드와 캐소드의 투입채널로 각각 공급된다. 캐소드로 이온전류를 이동시키는 양자를 형성하기 위해서 애노드의 활성층에서 수소가 반응하여 소모된다. 애노드로부터 캐소드까지 3개의 물분자를 끌어들이기 위해 각 양자를 가정한다. 캐소드에서 산소는 활성층에서 물을 형성하기 위한 양자를 가지고 반응한다. 공급된 가스(수분이 포함된 수소와 공기)모두 이상적인 것으로 취급되며, 발산과 대류하여 이동한다. 전극은 다공도, 투자율과 같은 동일한 형태론적 특성을 가지는 균질 침투 매체로 취급된다. 그 각각의 전극 안에 가스는 연속적인 단계로 존재한다. Darcy의 법칙이 적용된다.

활성층에서 전극 반응은 집적모델로 묘사되어 질 수 있다. 이 집적물은 폴리머 전해질 막 안에 촉매와 탄소입자로 구성한다. 집적모델에 대한 수식은 구형침투극에서의 발산작용 문제의 해석적 해로부터 파생되었다. 애노드 활성층에서 수소는 집적물에서 발산하고 반응하는 물질이다. 반면 산소는 캐소드에서의 집적물에서 발산하고 반응하는 물질이다.

Potential 분포는 3개의 내부후우영역에서 Conductive media DC의 응용모드를 사용하여 모델화 된다.

[참 고 문 헌]

[1]W. He, J.S.Yi and T.B.Nguyen, "Two-Phase Flow Model of the Cathode of PEM Fuel Cells Using Interdigitated Flow Fields", AIChE Journal, 46, pp.2053-2063,2000.  
 [2]C.Marr and X.Li, "Composition and Performance Modelling of Catalyst Layer in a Proton Exchange Membrane Fuel Cell", Power Sources, 77, pp17-27, 1999  
 [3]D.M Bernardi and M.W.Verbrugge, " Mathematical Model of a Gas Diffusion Electrode Bonded to a Polymer Electrolyte", AIChE Journal, 37, pp.1151-1163, 1991.  
 [4]R.B.Bird, W.E. Stewart and E.N. Lightfoot, Transport Phenomena, John Wiley & Sons, 1960.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (-k^{s,eff} \nabla \phi_s) &= 0 & \text{in } \Omega_{an} \\ \nabla \cdot (-k^{m,eff} \nabla \phi_m) &= 0 & \text{in } \Omega_{me} \\ \nabla \cdot (-k^{s,eff} \nabla \phi_s) &= 0 & \text{in } \Omega_{ca} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $k^{eff}$ 는 유효전도도(Sm<sup>-1</sup>)이다. 전극에서 포텐셜 [V]는  $\phi_s$ 로 표시된다. 멤브레인에서는  $\phi_m$ 으로 표시된다.

가스의 막에서의 가스의 흐름은 Darcy법칙을 적용하여 모델화된다. 가스의 속도는 연속적인 수식에 의해 주어진다.

$$\nabla \cdot (c^g \mathbf{u}) = 0 \quad \text{in } \Omega_{an} \text{ 과 } \Omega_{ca} \quad (2)$$

여기서  $c^g$ 는 가스의 모양의 전체 집중도이다.  $\mathbf{u}$ 는 가스의 속도[m/s]를 나타낸다. 침투 매질에 대한 Darcy의 법칙은, 압력의 변화, 유체의 점성, 그리고 침투매질의 구조가 속도벡터를 결정한다는 것을 말한다.

$$\mathbf{u} = -\frac{k_p}{\eta} \nabla p \quad (3)$$

여기서,  $k_p$ 는 전극의 투과율[m<sup>2</sup>],  $\eta$ 는 가스의 속도[kg/m/s]를, p는 압력[Pa]를 나타낸다. 이상적인 가스에 대하여 총 집중도를 다음과 같이 준다.

$$c^g = \frac{p}{RT} \quad (4)$$

여기서 R은 가스상수[J/mole/K]를 T는 온도[K]를 의미한다. 압력은 투입, 방출에서 결정된다.

3. 특성해석과 결과

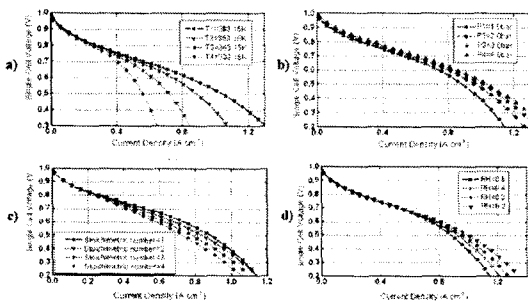


그림 3. 해석결과(정상상태)-(a)동작온도 (b)가스압력 (c)stoichiometric number (d)캐소드 투입 RH

이상에서는 가정용 연료전지의 연구동향과 나아갈 방향을 알아보았고, 그 모델을 제시하여 그에 대한 정상상태 특성을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 그림 3은 앞서 제시한 연료전지 모델의 동작온도, 가스압력 등의 변수요소에 따른 전류밀도와 전압을 나타낸 것이다.

향후 이러한 고분자 연료전지의 정상상태 해석과 더불어 과도상태 해석 및 연료전지 스택의 세부 모델화 기법에 대한 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 보인다.