

## 고분자 전해질 연료전지용 바이폴라 플레이트의 유로 연구

고재철·조영도\*·†안범중  
한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원  
\*한국가스안전공사 시설연구실  
(2004년 4월 12일 접수, 2004년 5월 4일 채택)

### Study on the channel of bipolar plate for PEM fuel cell

Jae-Churl Ko · Young-Do Jo\* and Bum Jong Ahn  
Graduate school of Knowledge Based Technology and Energy,  
Korea Polytechnic University  
\*Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation  
(Received 12 April 2004 ; Accepted 4 May 2004)

#### 요 약

본 논문은 상용 프로그램인 Fluent를 이용하여 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)의 바이폴라 플레이트 위에 새겨진 유로형상을 분석함으로써 연료전지의 성능을 향상시키는데 그 목적이 있다.

수소 소모량이 가장 많은 유로크기를 구하기 위하여 0.5 ~ 3.0mm의 범위에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 유로너비, 지면너비, 유로깊이가 적을수록 아노드에서 수소이용율이 높음을 알 수 있었다. 유로너비가 증가하면 유로의 전체길이를 감소하므로 유로에서 압력하락이 감소하게 되며, 지면너비를 증가시키면 수소가 지면 밑으로 확산하여 수소의 순 소비가 감소하기 때문이다. 또한 유로너비를 변화시키는 것은 지면너비를 변화시키는 것보다 수소 소모에 민감하게 영향을 끼침을 알 수 있었다. 유로깊이에 따른 수소 소모량의 변화는 유로너비에 비해 크지 않으나 유로깊이는 바이폴라 플레이트의 부피에 크게 영향을 미치므로 가능한 한 적게 하여야 한다. 그러나 현실적으로 기계가공이 가능한 1mm이상의 유로에서는 유로너비 1.0mm, 지면너비 1.0mm, 유로깊이 0.5mm에서 수소 이용율이 가장 높았으며 최적 유로크기로 판단된다.

시뮬레이션결과로부터 최적 유로크기로 성형한 2cm×2cm크기의 대각선형과 S자형 유동장에 MEA를 결합한 단위전지의 성능을 100W 연료전지평가시스템을 이용하여 측정하였다. 측정결과는 대각선형과 S자형에서 유사하게 높은 OCV가 나타났으며, 전류밀도는 0.6V이하에서는 대각선형이 2~40mA/m<sup>2</sup> 더 높았으나 0.7~0.8V에서는 S자형이 5~10mA/m<sup>2</sup> 더 높게 나타났다.

**Abstract** - The purpose of this paper is to improve the performance of polymer electrolyte fuel cell(PEMFC) by studying the channel dimension of bipolar plates using commercial CFD program "Fluent".

Simulations are done ranging from 0.5 to 3.0mm for different size in order to find the channel size which shows the highest hydrogen consumption. The results showed that the smaller channel width, land width, channel depth, the higher hydrogen consumption in anode. When channel width is increased, the pressure drop in channel is decreased because total channel length is decreased, and when land width is increased, the net hydrogen consumption is decreased because hydrogen is diffused under the land width. It is also found that the influence of hydrogen consumption

is larger at different channel width than it at different land width. The change of hydrogen consumption with different channel depth isn't as large as it with different channel width, but channel depth has to be small as can as it does because it has influence on the volume of bipolar plates. however the hydrogen utilization among the channel sizes more than 1.0mm which can be machined in reality is the most at channel width 1.0, land width 1.0, channel depth 0.5mm and considered as optimum channel size.

The fuel cell combined with 2cm×2cm diagonal or serpentine type flow field and MEA(Membrane Electrode Assembly) is tested using 100W PEMFC test station to confirm that the channel size studied in simulation. The results showed that diagonal and serpentine flow field have similarly high OCV and current density of diagonal flow field is higher( $2\sim 40\text{mA}/\text{m}^2$ ) than that of serpentine flow field under 0.6 voltage, but the current density of serpentine type has higher performance( $5\sim 10\text{mA}/\text{m}^2$ ) than that of diagonal flow field under 0.7~0.8 voltage.

**Key words** : fuel cell, polymer electrolyte fuel cell(PEMFC), analysis of flow field, bipolar plate, simulation

## 1. 서 론

산업혁명 이후 인류문명은 석탄, 석유, 원자력 등의 에너지를 바탕으로 지속적인 발전을 거듭하고 있으나, 지구온난화, 산성비, 공기오염 등 화석연료의 사용으로 인한 문제들이 야기되고 있다. 선진국을 중심으로 오염원 배출을 규제하기 위해 기후변화협약과 같은 국제사회의 움직임이 가시화되고 있으며, 안정적인 에너지 공급과 지속적인 발전을 위한 태양력, 풍력, 연료전지 등 새로운 에너지원이 대두되기 시작하였으며, 수소에너지를 이용한 연료전지가 화석연료의 고갈과 지구환경문제를 해결할 미래의 주요 에너지원으로서 중요한 역할을 할 것으로 전망되고 있다[1,2].

연료전지는 열역학적 제한(Carnot cycle)을 받지 않기 때문에 높은 효율을 낼 수 있고, 시스템의 모듈화가 가능하며, 연료가 전지에 공급되는 한 전기에너지와 열을 계속 생산할 수 있는 장점을 가지고 있기때문에, 인산형(PAFC), 고분자 전해질형(PEMFC), 알카리형(AFC), 용융탄산염형(MCFC), 및 고체 산화물형(SOFC) 등 다양하게 개발되고 있다[3,4].

고분자 전해질 연료전지는 많은 장점-빠른 시동, 전력수요 변화에 대한 즉각적인 응답, 낮은 온도(80℃)에서 작동 등-에도 불구하고 연료에 포함되어 있는 일산화탄소에 의한 촉매의 피독, 전해질 막 운전온도의 한계, 짧은 수명, 고비용 재질(material)과 시스템작동 비용 등의 몇몇 기술적인 문제들이 존재한다[5,6]. 따라서

연료전지가 상업적으로 경쟁할 수 있는 장치가 되기 위해서는 적당한 수명(lifetime)과 소형화를 통한 비용절감이 이루어져야 하며, 최적의 디자인 설계를 통하여 구성요소들의 성능과 효율을 최대로 향상시킴으로써 가능하다.

바이폴라 플레이트(bipolar plate)의 주재료인 Graphite는 낮은 기계적 특성과 다공성 성질 때문에 스택 전체무게의 80%이상을 차지하고 있다[7]. 또한 Direct Technologies Inc(DTI)와 Arthur D. Little(ADL)의 연료전지 비용모델에서는 전체 비용의 약 29%를 차지하는 것으로 알려졌다.[8]. 따라서 바이폴라 플레이트의 유동장(flow field) 디자인을 최적화하여 연료전지 스택의 부피와 무게를 최소화할 필요가 있다.

바이폴라 플레이트는 수소를 흐르게 하는 유동장(flow field)과 수소 산화에 의해 생성된 전자를 외부회로로 이동하도록 하는 집전층(current collector)의 역할을 한다[9]. 연료전지로 들어가는 수소는 유동장을 통하여 MEA(Membrane Electrode Assembly)의 표면에 고르게 분포되며 촉매 표면으로 많은 양이 빠르게 확산된다. 수소가 일정하게 공급되지 않으면 반응위치에서 수소분압의 하락으로 인하여 물질이동제한에 기인한 과전압(overvoltage)이 발생하게 되며, 이는 연료전지의 성능을 저하시키게 되고, 바이폴라 플레이트에 새겨진 유동장의 형태와 유로의 크기에 따라 많은 영향을 받게된다. 최적의 유동장 설계는 연료전지의 성능향상에 중요한 기술이 되며[10], 재질비용 감소와 성능향상을 위한 유동

장의 디자인에 대한 연구가 필요하다.

1990년대 초기에 개발된 Bernardi et al[11,12]의 가스확산 수직과 화학종 이동 메카니즘, 그리고 Springer et al[13]의 전해질막내의 수소이온과 물분자의 이동 및 전기삼투이동(electro-osmotic drag)에 관한 1차원 모델은 향후 연료전지 모델 개발에 크게 기여하였으며, 연료전지의 유로와 횡단면을 따라 물과 열관리의 중요성이 인식되면서 2차원 모델에 대한 연구가 요구되었다.

Fuller and Newman[14]은 전류밀도와 공기 유량(flow rate) 변화에 따른 물의 이동과 연료 이용율을 조사하였고, Nguyen and White[15]는 연료전지의 성능과 막 수화를 유지하는데 있어 가습시스템들과 공기(air) 운전의 효과를 조사하였다. Yi and Nguyen[16]은 다양한 가습디자인과 운전변수들의 영향을 평가하였으며, Dannenberg et al[17]은 다양한 가습온도, 화학양론계수와 몇몇 열전달 계수의 효과를 조사하였다.

2차원 모델의 발전된 형태로서 Gurau et al[18]은 가스확산체의 다공도, 입구 공기속도, 셀 온도가 성능에 미치는 효과와 유로에서 산소, 물의 농도분포 등을 조사하였으며, Um et al[19]은 유한체적(finite volume)에 기초한 단일 도메인 CFD 모델을 적용하여 개질가스로 운전하는 연료전지의 수소 희박(dilution) 효과를 조사하였다.

최근에는 2차원 모델에서 조사할 수 없었던 유로의 local 전류밀도와 질량(mass) 농도분포, 유로디자인의 효과, 전류의 불균일 분포 등과 같은 실제 운전시에 나타나는 영향들을 3차원으로 모델화하여 연료전지의 성능을 향상시키고 있다. Dutta et al[22]은 직선유로에서 전해질 막의 전류밀도를 예측하기 위한 확산층을 포함하는 모델변수(Fuller and Newman)와 포함하지 않는 모델변수(Yi and Nguyen)에 기초하여 전류밀도 발생을 비교하였으며, Um and Wang[23]은 interdigitated 유동장과 재래적인 유동장을 가진 연료전지의 물 흐름, 반응표면에서 물 증기농도와 전지 분극커브 등을 조사하였고, Pasaogullari and Wang[24]는 세 개의 서로 다른 유동장에 대하여 일정한 전지 전압에서 평균 전류밀도를 측정 비교하였다. 그리고 Zhou and Liu[25]는 개질 탄화수소를 사용할 경우 아노드 촉매층에서 개질된 가스의 희박효과와 CO에 의한 촉매 피독효과를 조사하

였다. 한편, 가스흐름 분배시스템에서 수소소비의 영향을 조사한 모델로는 다공성 재질과 grooved plate 가스 분배시스템을 조사한 Hontanon et al[26]과 유동장에서 유로의 크기와 모양을 조사한 Kumar and Reddy[27]등이 있다.

이상의 논문에서와 같이 연료전지의 전체 성능에 직접 영향을 주는 여러 연구들이 수행되고 있지만, 연료전지 성능향상에 중요한 영향을 미치는 유동장의 유로에 대한 연구는 미비하며, 이미 상업용으로 개발된 유로 디자인 기술들은 기술독점을 이유로 자료공개를 기피하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 상용 전산유체역학 코드인 Fluent를 이용하여 바이폴라 플레이트에서 유로의 크기와 형태를 시뮬레이션하고, 실제 실험을 통하여 그 결과를 비교해보고자 하였다.

### 1.1. 연료전지의 구조

고분자 전해질 연료전지는 아노드(anode), 캐소드(cathode), 그리고 전해질막으로 구성되어 있으며, 연료인 수소는 아노드측에서 전해질막으로 흘러 들어가고 캐소드측에서 공급되는 산소와 외부회로를 통하여 이동하여 온 전자와 결합하여 전기와 물을 생성하는 전기화학 장치로서 Fig. 1과 같다. 연료전지의 아노드와 캐소드측은 각각 바이폴라 플레이트의 유동장(flow field), 확산층(diffusion layer), 그리고 촉매층(catalyst layer)의 세 층으로 구성되어 있다. 바이폴라 플레이트는 일반적으로 ①연료와 산화물을 셀내에 분포하게 하는 유동장, ②셀로부터 전류를 내보내는 집전층(current collector), ③스택에서 개개의 셀 분리, 그리고 ④셀내에서 물과 열제거를 용이하게 하는 4가지 역할을 한다[9].

재질로는 전기 전도성이 좋은 흑연, 탄소, 금속 등이 주로 사용되며, 유동장은 바이폴라 플레이트내에 기계가공된 또는 압력을 가해서 생김이 만들어진 통로로서 확산층의 외부표면과 접촉하고 있으며 연료전지로 들어가는 연료를 막전극 어셈블리(membrane electrode assembly, MEA)의 표면에 고르게 분포시키기 위해 사용된다. 대표적인 유동장에는 S자형과 병렬형이 있으며 유로의 형태와 크기가 연료전지의 효율에 크게 영향을 미치기 때문에 그밖에 여러 형태들이 시도되고 있다[10,28].

확산층은 유동장과 촉매층사이에 위치한 다

공성매체로서 반응에 의해 생성·소모되는 전자의 전도와 촉매층으로 반응물을 확산시키는 역할을 한다. 확산층의 다공성재질은 흐름저항을 증가시켜 유동장으로 들어가는 반응물이 촉매가 위치한 반응장소로 효과적으로 확산하도록 하며, 더 큰 반응면적을 생성하여 더 높고 균일한 전류밀도를 생산하게 한다. 일반적으로 전도성 재질인 carbon paper 또는 carbon cloth로 만들어지며 전형적으로 100~300 $\mu$ m의 두께이다[9,29].

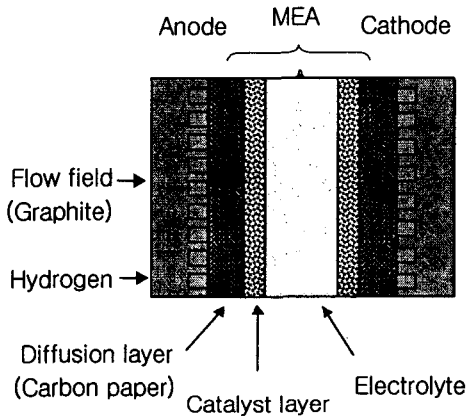


Fig. 1. Schematic diagram of the PEM fuel cell.

촉매층은 전형적으로 10~15 $\mu$ m의 두께로서 확산층과 전해질막 사이에 위치하며, 촉매로는 Pt based 촉매에 CO 피독문제를 해결하기 위하여 합금이 사용된다. 아노드 촉매층에서 가스상의 수소는 수소분자의 분리, 촉매표면위로 흡착 및 반응에 의해 전자와 수소이온으로 분리되며 이러한 수소산화반응은 Pt-based 촉매 위에서 쉽게 일어난다[30].

고분자 전해질 연료전지에 사용되는 전해질막은 고체 고분자로서 Nafion이 일반적으로 사용되며 아래와 같이 세 지역으로 이루어져 있다[4,10].

- (1) Fluorocarbon backbone으로 CF<sub>2</sub>-CF-CF<sub>2</sub>-가 반복적으로 연결된 구조
- (2) Side chain으로 -O-CF<sub>2</sub>-CF-O-CF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>-이 연결되어 있음.
- (3) 전도성을 높이기 위하여 sulfonic acid ion 이 결합되어 있음.

음이온(SO<sub>3</sub><sup>-</sup>)은 계속해서 측면 체인과 연결되어 움직이지 못하나 전해질 막이 수화될 때 수소이온들은 물 분자와 결합되어 음이온으로부터 다른 음이온으로 이동할 수 있게 된다.

## 2. 지배방정식

연료전지의 유동해석을 위한 지배방정식의 해를 구하기 위해서는 연속방정식, 운동량방정식과 수소가 반응에 의하여 없어지거나 확산에 의하여 시스템에서 없어지는 관계식이 결합된 해를 동시에 구해야 한다. 식(1)과 식(2)는 등온 점성 유체의 연료전지 유로에서 3차원 가스 흐름과 이동을 묘사하는 연속방정식과 운동량 방정식을 나타낸 것이다.

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot v) \quad (1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (2)$$

확산층에서는 다공성 매체(porous media)를 통하여 기체가 확산할 때 압력하락이 나타나며, 식(3)과 같이 Darcy's law로 표현된 운동량 source (S<sub>p</sub>) 항이 운동량 방정식에 추가되어야 한다[31].

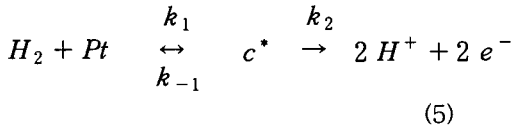
$$S_p = -\frac{\mu}{\alpha} v \quad (3)$$

이 source 항은 점성손실항과 관성손실항으로 이루어져 있으나 낮은 가스흐름속도에서 압력하락은 점성손실에 의해서만 영향을 받으며, 다공성 매체에서 유체의 속도에 비례하여 압력하락을 일으킨다. 식(4)의 다공성매체의 투과도(permeability)  $\alpha$ 는 Darcy's law와 packed bed를 통한 층류흐름에서 압력하락을 나타내는 Blake-Kozeny 방정식의 관계로부터 규정되며, 실험으로 주어진 매체의 공간 체적분율(void fraction,  $\theta$ )과 평균입자직경(D<sub>p</sub>)을 가지고 계산될 수 있다[32].

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\theta^3}{1 - \theta^2} \quad (4)$$

본 연구에서 확산층의 투과도는 74%의 다공도와 15 $\mu$ m의 직경을 가진 섬유질의 흑연천(graphite cloth)을 대상으로 하였기 때문에  $5.5 \times 10^{-11}$  m로 하였다[26,33].

촉매층에서 수소산화는 분자수소의 분리와 백금표면에서의 흡착(adsorption), 백금표면으로부터 탈락(desorption)과 수소이온과 전자로 분리되며 식(5)의 Michaelis-Menten type의 두단계 반응속도(kinetics)에 의해 묘사된다고 가정되었다[34].



여기서,  $H_2$ 는 반응물, Pt는 촉매,  $c^*$ 은 원자상태의 수소흡착물이며,  $H^+$ 는 수소이온을 나타낸다. 속도상수  $k_1$ 은 분자수소가 분리되어 원자상태로 백금표면에 흡착되는 속도 상수,  $k_{-1}$ 은 수소원자의 탈락과 재결합 하는 역반응 속도상수, 그리고  $k_2$ 는 원자 수소의 산화속도 상수를 나타내며, 전체 반응속도를 지배하는 반응은 원자수소의 산화반응이다. 촉매층에서 전기화학반응에 의한 수소의 산화속도는 수소의 소비에 해당되므로 연속방정식에 식(6)이 추가되어야 한다.

$$S_{H_2} = - \frac{\lambda [H_2]}{x + [H_2]} \quad (6)$$

여기서  $x$ 와  $\lambda$ 은 촉매층에서 반응상수를 나타낸다. 따라서 연료전지의 아노드에서 소모되는 수소의 양은 아래의 지배방정식은 식(7)~식(11)과 같다.

$$\text{연속 방정식 : } \frac{D\rho}{Dt} = -\rho(\nabla \cdot v) = S_m \quad (7)$$

운동량 방정식 :

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + S_p \quad (8)$$

$$\text{- 유 로 : } S_m = 0, \quad S_p = 0 \quad (9)$$

- 확산층 :

$$S_m = 0, \quad S_p = -\frac{\mu}{\alpha} v(S_{P_2} = S_{P_1} = S_{P_0}) \quad (10)$$

- 촉매층 :

$$S_m = -\frac{\lambda [H_2]}{x + [H_2]}, \quad S_p = -\frac{\mu}{\alpha} v(S_{P_2} = S_{P_1} = S_{P_0}) \quad (11)$$

### 3. 수치해석

미분방정식에 대한 수치적 방법은 계산영역 내의 유한한 갯수의 위치(격자점)에서 속도의 값을 미지수로 취급하여 이것에 대한 연립 대수방정식을 구성하고 이 식의 해를 구성하는 알고리즘을 만드는 과정이다. 그러나 주어진 유동장에서 속도에 관한 미분방정식은 아주 특별한 경우를 제외하면 유동장을 지시하기가 불가능하며 운동량방정식을 이용하여 local 속도 성분과 밀도분포를 계산해야 하지만, 운동량방정식에서 생성항의 일부를 구성하는 압력구배를 구할 방법이 없어 속도장을 계산하기가 어렵다. 따라서 예측된 압력장으로부터 얻은 속도장이 점차적으로 연속방정식을 만족시키도록 예측된 압력을 개선하는 방법을 이용한다. 그리하여 정확한 압력장이 운동량방정식에 대입되면 이 운동량방정식을 풀어서 구한 속도장이 연속방정식을 만족시키게 되며, 압력-속도 결합에 사용된 SIMPLE 알고리즘의 과정은 다음과 같다. ① 예측된 압력장  $P^*$ 를 가정한다. ② 운동량방정식을 풀고  $u^*$ ,  $v^*$ ,  $w$ 를 구한다. ③ 압력수정(pressure correction)  $P'$ 에 관한 방정식을 푼다. ④  $P^*$ 에  $P'$ 를 더하여 개선된 압력  $P$ 를 계산한다. ⑤ 속도수정(velocity correction)식을 이용하여  $u$ ,  $v$ ,  $w$ 를 구한다. ⑥ 개선된 압력  $P$ 를 다시 새로운 예측값  $P^*$ 로 보고 ②로 돌아가 수렴된 결과를 얻을때까지 과정을 반복한다.

연료전지 모델의 유동해석에는 상용 컴퓨터 프로그램인 "Fluent"를 사용하였으며, 촉매층에서 수소소비를 나타내는 항은 C 언어로 작성하여 사용하였다. 수치해석방법(numerical method)은 질량과 모멘텀 보존방정식을 계산하고 순차적으로 필요한 에너지와 다른 값들에 대한 지배방정식을 계산하는 segregated

solver를 이용하였다. 지배방정식의 이산화(discretization)는 제어체적에 기초한 기법(control volume based technique)을 사용하여 속도에 대한 정상상태 보존방정식을 고려하여 묘사하였다. 지배방정식을 선형화(linealization)하는 방법으로는 각 셀에서 알려지지 않은 값이 존재하는 값과 인접 셀로부터 온 존재하지 않는 값을 포함하는 관계를 사용하여 계산하는 "implicit" 형태가 사용되었으며, 지배방정식의 비선형성 때문에 각 반복계산에서 계산된 변수의 갱신을 조절하기 위하여 under-relaxation factor를 사용하였다.

수치해석과정은 Fig. 2에 나타난 것처럼 ① 현재 해에 기초한 유체특성 갱신. ② 속도장을 갱신하기 위하여 압력과 face mass flux의 현재값을 사용한 모멘텀 방정식 해결. ③ 연속방정식이 만족되도록 하기 위하여 압력-속도에 대한 보정과 연속방정식을 만족하는 face mass flux를 얻기 위한 압력보정 방정식 해결. ④ 설정된 방정식의 수렴여부 점검과정을 거치며 해의 수렴(convergence)은 반복계산동안 나머지(residual)와 그래프를 확인함에 의해 판단하였다. 본 연구에서는 나머지가  $10^{-6}$  이하가 될 때 공급되는 수소량과 촉매층에서 소모되는

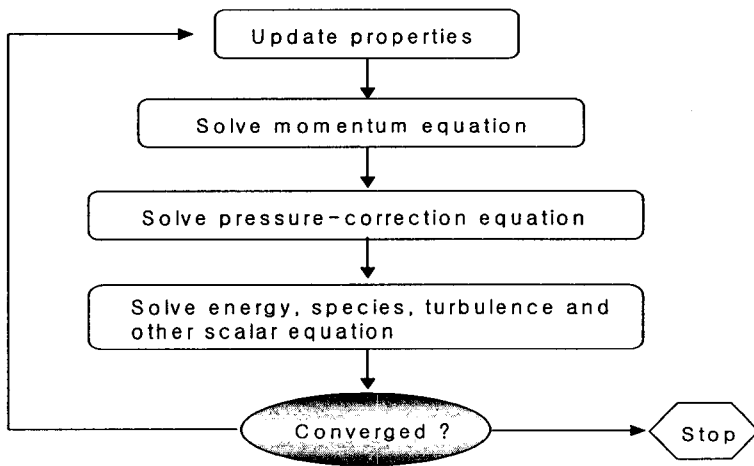


Fig. 2. Overview of Segregated solution method.

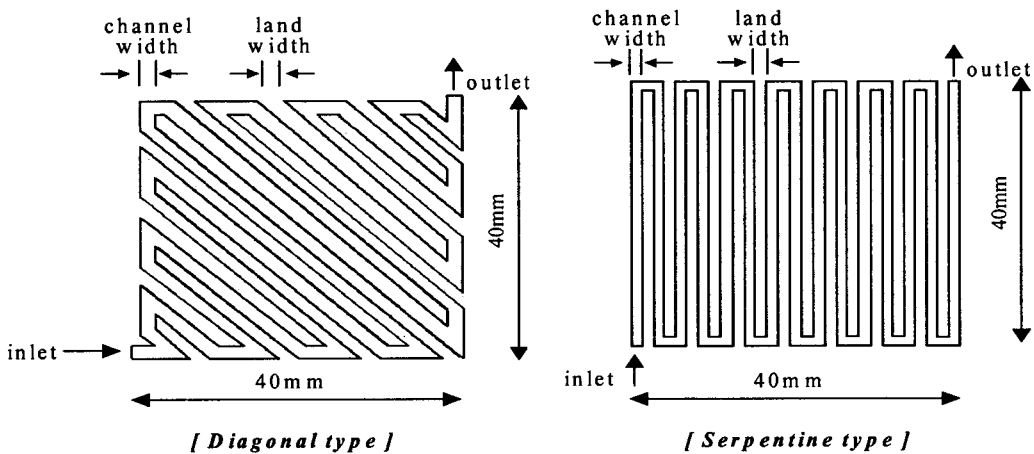


Fig. 3. Diagonal & Serpentine flow field design.

수소량 사이의 오차를 비교하여 수렴을 판단하여 계산을 종료하였다.

**3.1. 모델구성 및 기본가정**

본 연구에서는 바이폴라 플레이트의 유동장으로 공급되는 연료가 Fig. 3과 같이 유로의 형태 및 크기에 따라 얼마만큼 이용되는지를 시뮬레이션을 통하여 살펴볼 예정이므로 모델의 적용범위를 반전지(half cell)로 제한하였다. 바이폴라 플레이트의 입구에 공급된 수소는 유동장을 지나면서 일부가 다공성인 확산층을 통과하여 촉매층으로 이동하게 되고 촉매층에서 반응에 의해 소모되게 된다. 유동장 내부의 유로에서 가스흐름은 정상상태, 층류흐름이고 중력의 효과는 무시되었으며 연료는 순수한 수소라 가정하였다. 유동장은 크기가 충분히 작으므로 등온조건이며 유동장 내부에서 수소에 대한 압축성 이상기체기법이 적용하였다. 또한 다공성 매체의 투과도는 등방성(isotropic)이어서  $x, y, z$  방향에서 균일하다고 가정하였다.

모델에서 유동장의 크기는 4cm×4cm의 크기이며, 수소가스가 공급되는 바이폴라 플레이트 위에 새겨진 유동장(flow field), 수소가스가 촉매층으로 확산하는 다공성의 확산층(gas diffusion layer), 그리고 수소가스가 전자와 이온으로 분리되어 소모되는 촉매층(catalyst layer)으로 구성되어 있다. 유동장에서 유로의 크기는 상업용 바이폴라 플레이트에 일반적으로 선호되는 0.5 ~ 3.0mm를 고려하였으며[35], 단일 경로의 serpentine type과 직사각형 횡단면의 유로형태를 가진다. 확산층과 촉매층의 두께는 실제 상업용 바이폴라 플레이트와 유사하게 각각 0.3mm와 0.03mm로 적용하였다[29].

**3.2. 입력변수 및 경계조건**

경계조건(boundary condition)은 유체의 유동과 열변화를 조건으로 지정하는 것으로 압력과 함께 밀도의 변화가 유동속도에 중요한 영향을 끼치는 압축성 유동의 경우 수소주입조건과 출구조건이 사용된다. 수소주입의 경계조건은 입구흐름의 전체압력보다는 규정된 수소량과 에너지 흐름속도를 적합하게 하는 것이 더 중요할 때 사용되며, 본 모델에서는 전류밀도를  $1 A/cm^2$ 로 가정하여 수소의 주입속도를  $1.68 \times 10^{-7} kg/s$ 로 일정하게 유지되고 유로 입구의 횡단면에 수직 방향으로 들어가도록 고려하였다. 출구측의 경계조건은 출구의 압력을

대기압으로 하였다. 본 연구에서 사용된 입력변수와 경계조건은 값은 Table 1과 같다.

벽의 경계조건은 입구와 출구이외의 모든 지역에 대해 설정되었으며 no-slip 조건을 적용하였다. 바이폴라 플레이트를 구성하는 고체물질로는 일반적으로 사용되는 graphite를 고려하였으며, 그 물성 값은 Table 2와 같다.

**Table 1. Input parameters and boundary conditions used in the model.**

	Parameter	Value
Input parameters	Temperature(k)	353
	Operating pressure(pascal)	101325
	Fluid density(kg/cm <sup>3</sup> )	Solved from state equation of ideal gas
	Fluid Viscosity(kg/m-s)	8.411e-6
	Fluid Cp(J/kg-k)	14283
	Thermal conductivity(w/m-k)	0.1672
Boundary condition	Mass flow inlet(kg/s)	1.68e-7
	Pressure outlet(pascal)	0
	wall	no-slip

**Table 2. Physical properties of bipolar plate.**

Property	Value	Property	Value
Density(kg/m <sup>3</sup> )	1780	Thermal conductivity (W/m.K)	5.7
Specific heat capacity(J/kg.K)	709	Porosity(%)	15

**4. 시뮬레이션 결과**

바이폴라 플레이트의 최적 유로크기 분석을 위하여 다양한 케이스에 대한 시뮬레이션이 수행하였다. 바이폴라 플레이트의 유동장에서 유로의 너비와 깊이, 지면너비는 연료전지의 출력효율에 중요한 영향을 미치는 기술요소이며,

시스템 전체 부피와 무게에도 직접적인 영향을 미치기 때문에 유로너비, 유로깊이, 지면너비의 세 변수에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 유로크기 분석의 첫단계로 유로너비와 지면너비의 효과를 조사하였으며, 유로깊이 1.5mm에서 유로와 지면의 너비를 각각 0.5mm씩 변경하며 0.5 ~ 3.0mm의 크기에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 4는 각각의 유로와 지면너비를 변화시키면서 수소의 이용율을 조사한 결과를 나타내는 등고선이며, 유로너비와 지면너비의 함수로서 수소의 소모를 나타낸다. 유로너비와 지면너비가 가장 적을 때, 수소이용율이 최대값을 나타내며, 유로너비와 지면너비가 증가할수록 수소이용율이 하락함을 알 수 있다. 그러므로 연료전지의 성능을 향상시키기 위해서는 유로와 지면너비는 가능한한 작아야 함을 알 수 있는데, 유로너비와 지면너비를 줄이는 것은 전체 유로길이를 증가시키므로 유로에서 압력하락이 증가하여 수소 이용율이 증가하게 되기 때문이다.

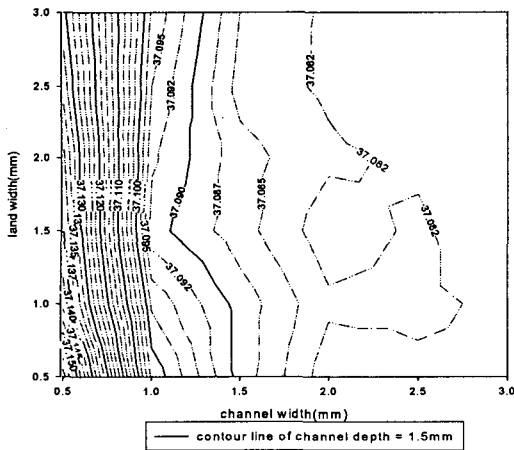


Fig. 4. Contour plot of hydrogen utilization for channel width and land width at channel depth=1.5mm.

유로와 지면너비 각각의 변화에 따른 수소 이용율 변화를 살펴보면, 유로너비가 증가할 때 수소 이용율의 변화는 37.159% ~ 37.082%로 0.077% 하락을 나타내며, 지면너비가 증가할 때 수소 이용율 변화는 37.159% ~ 37.131%로 0.028% 하락을 나타낸다. 또한 유로너비가 증가하는 방향의 등고선이 지면너비를 증가하는 방향보다 간격이 더 조밀함을 나타내고 있으며, 수소

소비에 대해 유로너비를 증가하는 것이 지면너비를 증가하는 것보다 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 유로너비가 증가할 때를 자세히 살펴보면 1.5mm이하에서는 등고선이 매우 조밀하나 그 이상에서는 간격이 비교적 크다. 즉, 이 구간에서는 유로너비를 조금만 변화하여도 수소 이용율 변화가 커지는 것을 알 수 있다.

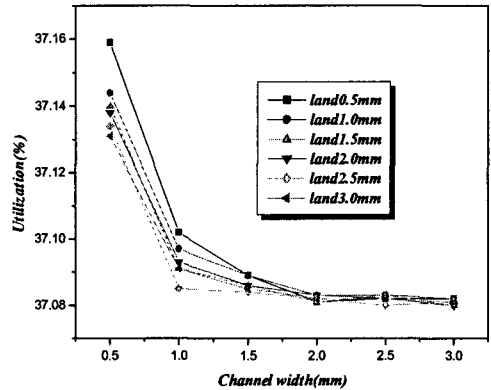


Fig. 5. Hydrogen utilization with different channel width.

Fig. 5는 6가지 경우의 지면너비에 대하여 유로너비를 변화시키면서 조사한 수소이용율을 나타낸 것이다. 유로너비를 변화시킨 결과, 유로너비 0.5 ~ 1.5mm사이에서는 유로너비가 증가할수록 수소 이용율이 급격하게 감소함을 알 수 있는데, 유로너비가 증가할수록 유로트랙의 수가 감소하여 유로의 전체길이를 감소시키므로 유로에서 압력하락을 감소시키기 때문이다. 그러나 2.0 ~ 3.0mm사이의 유로너비에서는 수소이용율의 변화가 아주 미미하며, 이러한 현상은 6가지 모든 지면너비의 경우에서 매우 유사하게 나타난다. 따라서 1.5mm이하의 유로너비에서는 유로너비를 감소시킴에 따라 아노드에서 수소소모가 증가한다는 것을 알 수 있다.

지면너비 증가의 경우에도 유사한 현상이 나타나지만 수소이용율의 변화는 유로너비 증가에 비해 상대적으로 적다.

Fig. 6은 6가지 경우의 유로너비에 대하여 지면너비 변화에 따른 수소이용율의 변화를 나타낸 것이다.

지면너비를 증가함에 따라 수소 이용율 변화가 전체적으로 매우 적으며 지면너비 0.5 ~



1.5mm사이에서는 약간 큼을 알 수 있는데, 이것은 작은 유로너비에서 지면너비가 증가할 경우에 지면 밑으로 수소가 확산되어야 하므로 물질전달 제한이 일어나서 수소의 순 소비가 감소하기 때문이다. 그러나 유로너비가 커질수록 변화량의 차이는 점점 작아지며 1.5mm이상의 유로너비에서는 지면너비를 변화하여도 수소 이용율이 거의 변화하지 않았다. 유로크기가 커질 경우에는 지면너비가 증가하여도 물질전달 제한이 거의 일어나지 않음을 알 수 있으나, 유로너비가 지면너비보다 수소 이용율에 더 민감하게 영향을 미치므로 큰 유로너비는 현실적이지 않다.

그러므로 1.5mm 유로깊이에서 유로너비와 지면너비를 변화시키면서 조사한 결과는 유로너비와 지면너비가 작을수록 수소 소모에 유리하며, 최대 수소 이용율은 0.5mm의 유로너비와 0.5mm의 지면너비에서 37.159%로 나타났다. 수소 이용율이 다른 유사한 연구에서와 차이를 보이는 것은 압력, 유량, 온도와 같은 입력변수와 촉매층의 두께에서 차이 때문이다. 이러한 결과는 0.5, 1, 2mm의 유로너비와 지면너비에 대해 수소소비를 조사한 E. Hontanon et al[26]의 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있었다. 그는 지면너비를 1mm로 고정하고 유로너비를 변경시키는 경우와 유로너비를 1mm로 고정하고 지면너비를 변경하는 경우 등에 대해 시뮬레이션을 수행하여 유로너비와 지면너비를 줄이는 것이 연료전지 성능에 유리함을 조사하였다.

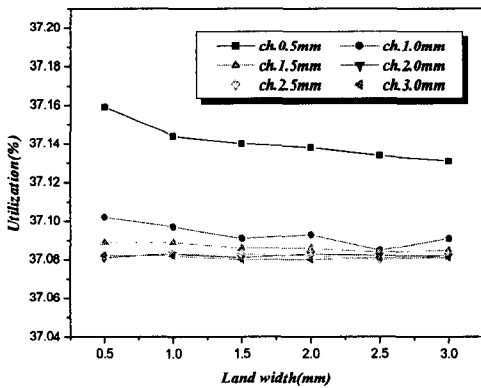


Fig. 6. Hydrogen utilization with different land width.

유로해석의 두 번째 단계로 유로깊이에 따른 수소 이용율을 조사하였으며, 위의 결과를 고려하여 볼 때 1.0mm이상의 지면너비와 2.0mm이상의 유로너비가 수소 이용율에 미치는 영향이 미비하므로 조사범위를 지면너비 0.5 ~ 1.0mm와 유로너비 0.5 ~ 2.0mm로 제한하였다.

Fig. 7은 지면너비 0.5mm에서 수소이용율의 등고선을 나타낸 것이다. 유로깊이가 0.5mm에서 2.0mm로 증가함에 따라 수소 이용율은 37.188% ~ 37.165%로 0.023%의 감소를 보였다. 유로깊이가 증가됨에 따라 유로의 단면적이 증가하여 압력하락이 일어나므로 촉매층에서 수소밀도가 감소하기 때문이다. 그러나 유로너비 증가에 따른 수소 이용율 감소 0.083%보다 훨씬 적으며 유로깊이의 contour line이 유로너비에서 보다 넓으므로 유로깊이 변화에 따른 수소이용율의 변화가 민감하지 않음을 알 수 있다. 이러한 현상은 지면너비 1.0mm에서도 동일하게 나타난다.

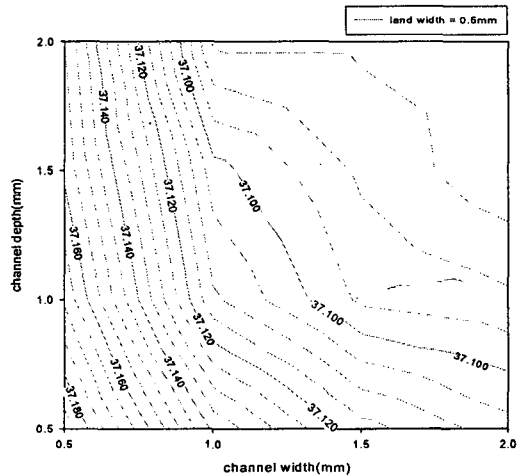


Fig. 7. Contour plot of hydrogen utilization for channel width and channel depth at land width=0.5mm.

Fig. 8은 지면너비 1.0mm에서 수소이용율의 등고선을 나타냈으며, 유로깊이가 증가함에 따라 수소 이용율은 37.160%로부터 37.143%로 0.017% 감소하였고, 유로너비 증가에 따른 수소 이용율 감소 0.055%보다는 작음을 나타낸다. 즉, 유로깊이가 작을수록 수소 이용율에 유리하게 작용하지만, 그 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 바이폴라 플레이트에서 유로

의 두께는 시스템의 부피와 무게에 크게 영향을 끼치게 되므로 가능한 한 적어야 한다.

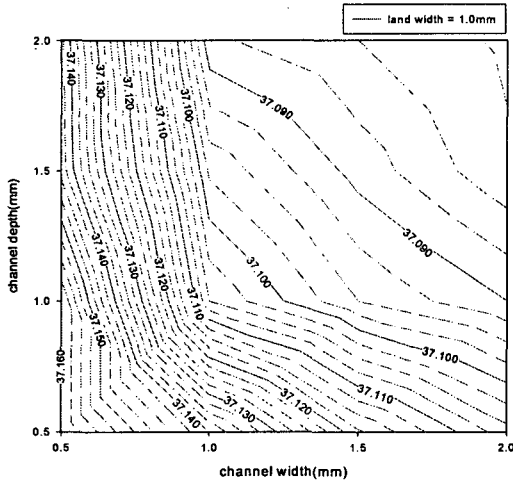


Fig. 8. Contour plot of hydrogen utilization for channel width and channel depth at land width=1.0mm.

위의 시뮬레이션 결과로 미루어 볼 때, 수소 이용율이 가장 높은 유로크기는 각각의 크기가 가장 작은 유로너비 0.5mm, 지면너비 0.5mm, 유로깊이 0.5mm에서 이며 이때의 수소 이용율은 37.188%이다. 그러나 가능한 한 작은 유로너비와 지면너비가 수소 이용을 향상에 유리하다 할지라도 현재 사용되고 있는 흑연 바이폴라 플레이트의 몇몇 문제 때문에 유동장 유로를 무한정 작게 할 수가 없다. 바이폴라 플레이트는 양편에 흐르는 수소와 산소가 섞이지 않도록 분리막의 역할을 하여야 하며 필요에 따라 높은 운전압력에서도 파손되지 않아야 한다. 또한 연료전지로부터 사용가능한 정도의 동력을 얻기 위해서는 수 십~수 백 장의 바이폴라 플레이트가 적층되므로 일정한 기계적 강도를 유지하여야 한다. 현재 사용되고 있는 흑연 바이폴라 플레이트는 기계적인 단점과 가공기술상의 어려움으로 인한 높은 가공비용 때문에 1mm이하의 바이폴라 플레이트 유동장 유로를 만드는 것이 현실적으로 곤란하다. 또한 전류를 모집하는 트랙이 연료전지의 전체 스택 성능에 미치는 영향을 조사한 Hental et al[36]의 실험적 연구에서 볼 수 있는 것처럼 어느 정도까지 지면너비를 증가시키는 것은 접촉면적을 증가시켜 내부저항을 줄이므로 유로밀도

의 감소를 상쇄시키는 효과가 있다. 그는 Grafoil™ 플레이트를 가지고 1.0 ~ 4.0mm사이의 유로와 지면너비에 대한 전류밀도를 조사하여 1.0mm 가스유로와 2.0mm 지면너비에서 최대동력을 얻었다. 하지만 접촉면적을 넓히기 위해 지면너비를 증가시키는 것은 유로수를 줄이는 부정적인 효과가 커지기 때문에 유익하지 않다. 따라서 본 연구에서는 바이폴라 플레이트 유동장의 최적 유로크기를 판단한 결과, 수소 이용율이 37.140%로 가장 높게 나타난 유로너비 1.0mm, 지면너비 1.0mm, 유로깊이 0.5mm로 나타났다.

### 5. 실험

시뮬레이션 결과로부터 높은 연료이용율을 나타낸 유로(ch. width 1.0, land width 1.0, ch. depth 0.5mm)를 2cm×2cm의 유동장에 대각선형(diagonal type)과 S자형(serpentine type)의 형태로 각각 성형하였고, 0.4mg/cm<sup>2</sup> loading Pt 전극과 Nafion-115 전해질막이 조립된 5cm<sup>2</sup> MEA를 사용하여 단전지를 제작하였으며, 연료전지 평가시스템(Fuel Cell Test Station)을 이용하여 단전지의 성능을 평가하였다.

연료전지의 운전온도와 운전압력은 70℃, 101325 Pa이었으며, 수소와 공기의 양은 각각 80cc/min와 400cc/min로 80℃로 가습하여 공급하였다.

Fig. 9는 실험에 사용된 연료전지 평가장치를 나타낸 것이다. 가스공급장치, 전자부하장치와 프로그램 제어 소프트웨어로 구성되어 있으며, 실시간으로 측정값들을 확인할 수 있다.

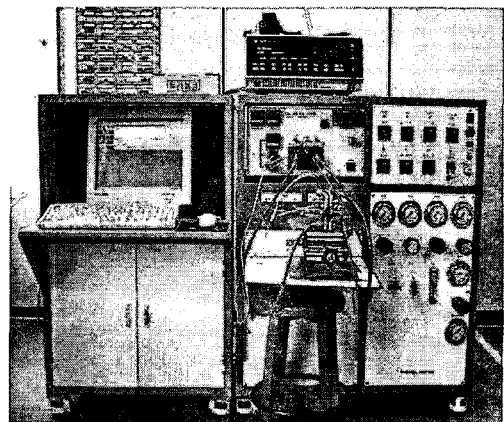


Fig. 9. Fuel Cell Test Station.

Fig. 10과 Fig. 11은 대각선형 유동장과 S자형 유동장의 OCV(open circuit voltage)를 나타낸 것이다. 전류가 0mA일 때 전위인 OCV는 대각선형에서 0.974로부터 0.960V로 완만하게 하락하였으며, S자형에서도 0.973으로부터 0.941로 유사하게 하락하였다. 또한 대각선형에서 최대전압은 0.988V로 S자형에서 최대값 0.973V보다 더 높은 전압이 생성됨을 알 수 있다.

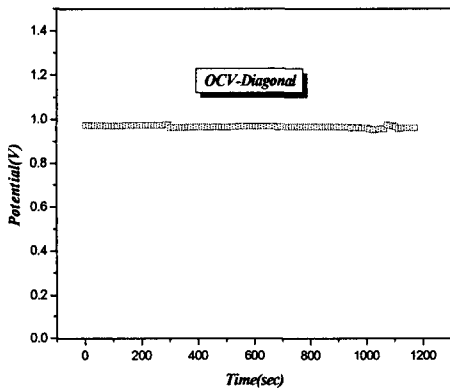


Fig. 10. Graph of OCV in the diagonal flow field.

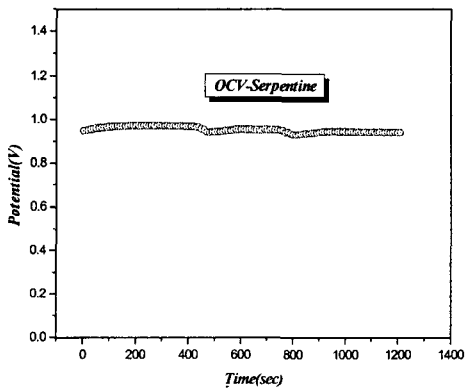


Fig. 11. Graph of OCV in the serpentine flow field.

또한, 연료전지로부터 이용할 수 있는 전류의 양을 비교하기 위하여 전압을 0.2V로부터

0.8V로 변화시키면서 생성되는 전류밀도를 측정하여 Fig. 12에 전류밀도변화를 나타냈다.

0.6V에서는 두 유동장에서 유사하게 약 15mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 생성하였으나, 0.2V ~ 0.5V 사이에서는 대각선형 유동장에서 66.50 ~ 33.85mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 생성하여 S자형 유동장에서의 전류밀도 28.07 ~ 20.01mA/cm<sup>2</sup>보다 훨씬 높았으며, 0.7 ~ 0.8V의 높은 전압에서는 전류밀도가 급격히 하락하여 S자형 유동장보다 낮은 전류밀도를 생성함을 알 수 있다.

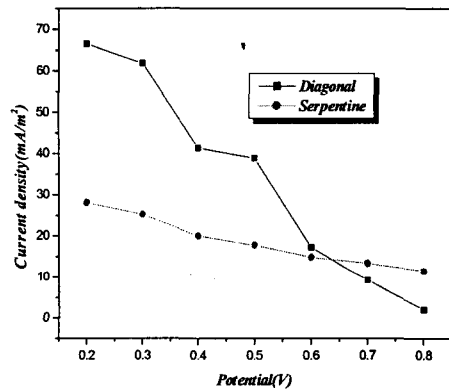


Fig. 12. Graph of current density against cell voltage in the diagonal and serpentine flow field.

## 6. 결 론

고분자 전해질 연료전지의 성능을 향상시키기 위하여 수치해법에 의해 유동현상에 대한 해를 구하는 상용 프로그램 "fluent 5.5"를 이용하여 바이폴라 플레이트의 유로 크기와 유동장의 형태에 대한 3차원 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

0.5 ~ 3mm 범위의 유로크기에 대한 시뮬레이션 결과는 유로너비, 지면너비, 유로깊이가 적을수록 아노드에서 수소의 이용율이 높음을 알 수 있었다.

또한, 유로너비를 변화시키는 것이 지면너비나 유로깊이를 변화시키는 것보다 수소 이용율에 더 민감하다는 것을 알 수 있었으나, 현실적으로 기계가공은 1mm이상에서 가능하다. 유로너비 1mm의 경우에 지면너비 1.0mm, 유로깊이 0.5mm에서 수소 이용율이 가장 높았으

며, 최적 유로크기로 판단될 수 있다.

최적 유로크기를 성형한 2cm×2cm 크기의 대각선형 유동장과 S자형 유동장에 Nafion-115이 조립된 5cm<sup>2</sup>의 MEA를 각각 결합하여 단전지를 제작하였으며, 연료전지 평가 장치를 이용하여 측정한 결과, 전류밀도는 0.6V이하에서는 대각선형 유동장이 S자형 유동장보다 2~40mA/m<sup>2</sup> 더 높았으며 0.7 ~ 0.8V에서는 S자형 유동장이 5~10mA/m<sup>2</sup> 더 높은 값을 나타내었다.

### 참 고 문 헌

- [1] 恩田和夫, "21세기에 기대되는 연료전지 발전시스템", *전기화학 및 공업물리화학지*, 658-661, (2000)
- [2] 전자부품연구원 기술기획팀, "연료전지 산업동향", *Biweekly electronics information*, 6(6), 1-20, (2003)
- [3] Larminie, J. and A. Dicks, *Fuel cell systems explained*, John Wiley & Sons, Ltd, (2000)
- [4] Thomas, S. and M. Zalowitz, *Fuel cells-Green power*, Los Alamos national laboratory, (1999)
- [5] 한국산업기술평가원, *Technology loadmap-전지*, 산업자원부, (2001)
- [6] Perry, M. L. and T. F. Fuller, "A historical perspective of fuel cell technology in the 20th century", *J. Electrochem. soc.* 149(7), 59-67, (2002)
- [7] Kumar, A. and R. G. Reddy, *PEM fuelcell bipolar plates-material selection, design and integration*, P.R.Taylor ed., 41-51, (2002)
- [8] Bar-On I., et al., "Technical cost analysis for PEMFC", *J. power sources* 109, 71-75, (2002)
- [9] Metha, V. and J. S. Cooper, "Review and analysis of PEMFC design and manufacturing", *J. power sources* 5044, 1-22, (2002)
- [10] 조만, "고체고분자 연료전지 기술동향", 한국과학기술정보연구원 기술동향 보고서, (2002)
- [11] Bernardi D. M. and M. W. Verbrugge, "Mathematical model of a gas diffusion electrode bonded to a polymer electrolyte", *J. AICHE*, 37(8), 1151-1163, (1991)
- [12] Bernardi D. M. and M. W. Verbrugge, "A mathematical model of the solid-polymer-electrolyte fuel cells", *J. Electrochem. soc.*, 139(9), 2477-2491, (1992)
- [13] Springer, T.E. et al., "Polymer electrolyte fuel cell model", *J. Electrochem. Soc.*, 138(8) 2334-2342, (1991)
- [14] Fuller, T. F. and J. Newman, "Water and thermal management in solid-polymer-electrolyte fuel cells", *J. Electrochem. Soc.*, 140(5) 1218-1225, (1993)
- [15] Nguyen, T. V. and R. E. White, "Water and heat management model for PEMFC", *J. Electrochem. Soc.*, 140(8), 2178-2186, (1993)
- [16] Yi, J. S. and T. V. Nguyen, "An along the channel model for PEMFC", *J. Electrochem. soc.*, 145(4), 1149-1159, (1998)
- [17] Dannenberg, K., et al., "Mathematical model of PEMFC", *J. Applied Electrochemistry*, 30, 1377-1387, (2000)
- [18] Gurau, V., et al., "Two dimensional model for PEMFC", *J. AICHE*, 44(11), 2410-2422, (1998)
- [19] Um, S., et al., "Computational fluid dynamics modeling of PEMFC", *J. Electrochem. soc.*, 147(12), 4485-4493, (2000)
- [20] Yi J. S. and T. V. Nguyen, "Multicomponent transport in porous electrodes of PEM fuel cells using interdigitated gas distributors", *J. Electrochem. soc.*, 146(1), 38-45, (1999)
- [21] Kazim, A., et al., "Modelling of performance of PEMFC with conventional and interdigitated flow field", *J. Applied Electrochemistry*, 29, 1409-1416, (1999)
- [22] Dutta et al., "Three dimensional

- analysis of straight channel PEMFC", *J. Applied Electrochemistry.*, **30**, 135-146, 2000.
- [23] Um, S. and C. Y. Wang, "Three dimensional analysis of transport and reaction in PEMFC", *proceedings of the ASME Fuel Cell Division*, (2000)
- [24] Pasaogullari, U. and C. Y. Wang, "Computational fluid dynamic modelling of PEMFC using FLUENT", *Fluent Student Contest winner Presented in 2002 Fluent user group meeting*, (2002)
- [25] Ziou, T. and H. Liu, "3-D simulation of PEMFC performance operated on reformed gas", *Fuel cell seminar abstract*, 1-4, (2002)
- [26] Hontanon, E. and M. J. Esudero, "Optimization of flow field in PEMFC using computational fluid dynamics techniques", *J. power sources*, **86**, 363-368, (2000)
- [27] Kumar, A. and R. G. Reddy, "Effect of channel dimensions and shape in the flow field distributor on the performance of PEMFC", *J. power sources*, **4984**, 1-8, (2002)
- [28] Ise, M., et al., "material and construction principles for PEM fuel cells", *1st european PEFC form proceedings*, 285-295, (2002)
- [29] Gamburzev, S. and A. J. Appleby, "Recent progress in performance impromant of the PEMFC", *J. power sources*, **107**, 5-12, (2002)
- [30] Carrette, L., et al., "Fuel cells: principles, types, fuels, and applications", *J. Chemphyschem*, **1**, 162-193, (2000)
- [31] Bird, R. B., et al., *Transport phenomena*, John Willey & Sons Inc, (1960)
- [32] Fluent Inc., *Fluent 5.5 User Guide Documentation*, NH, (1998)
- [33] Jckson, G. W. and D.F James, "The permeability of Fibrous Porous Media", *J. Chem. Eng.*, **64**, 364, (1998)
- [34] Pilling, M. J. and P. W. Seakins, *Reaction kinetics*, oxford university press Inc., New York, (1995)
- [35] Watkins, D. S., et al., "Novel fuel cell fluid flow field plate", *US Patent 4988583*, (1991)
- [36] Hental, P. L. and J. B. Lakeman, "New material for polymer electrolyte membrane fuel cell current collector", *J. power sources*, **80**, 235-241, (1999)