

PEM 연료전지용 Bipolar Plate의 변화단면 유로에 대한 CFD 해석

양동진*, 박운진

CFD Analysis on a Flow Channel of a Bipolar Plate with Varying Cross-sectional Area in a PEM Fuel Cell

Dong-Jin Yang*, Woon-Jean Park

Abstract A flow channel model of a bipolar plate with varying cross-sectional area was newly designed for improving performance and efficiency of a PEM fuel cell stack. As a result, the varying cross-sectional area model showed poor uniformity in velocity distribution, however, maximum velocity in the flow path is about 30% faster than that of the uniform cross-sectional area model. The proposed varying cross-sectional area model is expected to diffuse operating fluids more easily into diffusion layer because it has relatively higher values in pressure distribution compared with other flow channel models.

It is expected that the implementation of the varying cross-sectional area model can reduce not only the mass transport loss but also the activation loss in a PEM fuel cell, and open circuit voltage of a fuel cell can thus be increased slightly.

Key words PEMFC(고분자 전해질 연료전지), Flow Channel Pattern(유로 형상), CFD(전산유체역학), Flow Channel with Varying Cross-sectional Area(변화단면 유로)

* 한국기술교육대학교 기계정보공학부
 ■ E-mail : dj-yang98@yahoo.co.kr ■ Tel : (061)662-1982 ■ Fax : (041)560-1253

subscrip

A : area
 D_h : hydraulic diameter
 P : wetted perimeter
 Re : Reynolds number
 v : velocity of the fluid, m/s
 μ : viscosity of the fluid, m²/s
 ρ : density of the fluid, kg/m³

1. 서론

21세기를 맞이하여 여러 가지 환경 및 에너지 문제에 대한 해결책으로 높은 연료 효율을 갖는 저공해 친환경 에너지원의 개발이 필요하게 되었다. 그 중 유용한 신, 재생 에너지원으로 각광을 받고 있는 연료전지의 상용화에 있어서 비용 절감은 해결해야 할 당면 과제이다. Direct Technologies Inc (DTI)와 Arthur D. Little (ADL)의 연료전지 비용 모델에 따르면 연료전지의 구성요소 중 bipolar plate는 전체 비용의 약 30%와 전

체 무게의 80 % 이상을 차지한다.^{1,2)} 따라서 연료전지 비용 절감을 위해서는 bipolar plate의 유로 형상과 치수의 최적화를 통하여 유로 내의 압력과 속도를 증가시켜 전압 손실을 일으키는 세 가지 과전위(overpotential) 중 활성화 과전위와 농도 과전위를 줄여 실제적인 개회로 전압을 높여야 한다. 연료전지의 bipolar plate의 유로 형상과 치수에 대한 최적화를 수행하기 위해서는 실제 연료전지를 이용한 실험보다 비용이 적게 들뿐만 아니라 다양한 유로 형상의 변경에 용이한 이점을 갖는 CFD code를 이용한 수치해석적 방법으로 연료전지의 유로 형상 최적화를 도모하는 것이 추세이다. 이에 본 연구에서는 상용 CFD code의 하나인 ANSYS CFX 10.0을 이용하여 선형연구³⁾ 등에서 통상 채택되었던 유로 깊이가 일정한 등단면 유로 모델은 물론 본 연구에서 새롭게 고안된 유로의 깊이가 변화하는 변화단면 유로 모델의 경우에 대한 압력과 속도 분포 등 유동 특성을 해석하였다. 이로써 등단면 및 변화단면 유로에 대한 CFD 해석 결과를 이용하여 bipolar plate의 유로 형상이 PEM (Polymer Electrolyte Membrane) 연료전지의 성능에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 연료전지의 구성 및 원리

2.1 연료전지의 구성

연료전지는 Fig. 1과 같이 연료 및 산소를 공급하는 bipolar plate, 공급된 연료와 산소의 확산이 진행되는 확산층

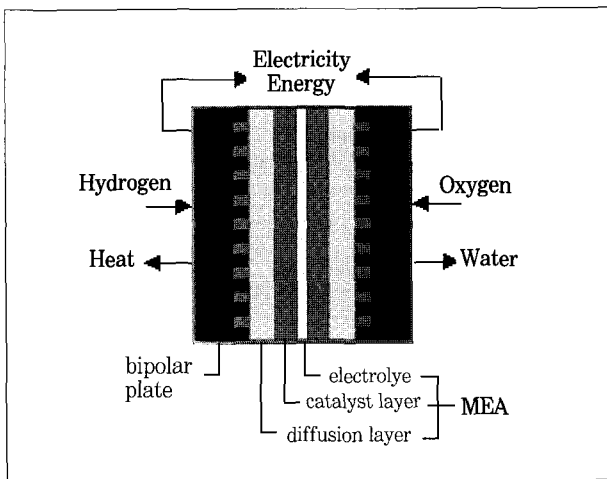
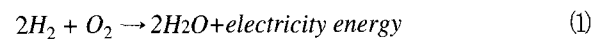
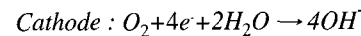
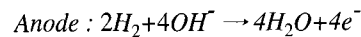


Fig.1. Fuel cell input and output

(diffusion layer), 연료와 산소가 전기화학 반응을 일으키는 촉매층(catalyst layer) 및 수소 이온만을 통과 시키는 고분자 전해막 등으로 구성되어 있다. 여기서 전극과 전해막의 결합체를 MEA라 부른다. 연료전지의 원리는 다른 일반 전지와 마찬가지로 전기반응, 즉 전기화학 반응에 의해 전기에너지를 생산해내는 것이다. 그러나 일반 전지가 일회용 에너지 저장장치의 개념이 강한 반면, 연료전지는 연료(주로 수소)를 계속적으로 공급하는 한 전기를 연속적으로 생산하기 때문에 내연기관과 마찬가지로 에너지 변환기구로 볼 수 있다.

2.2 연료전지의 원리

연료전지의 작동원리는 아래 식과 같이 물이 전기 분해되는 과정의 역반응으로 Anode극에 공급되는 수소와 Cathode극에 공급되는 산소가 결합하여 물을 생성할 때 반응물의 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 과정으로 설명할 수 있다. 즉 연료전지란 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 장치로서 연료가 공급되는 한 전기를 생산하며 부산물로서 물과 열을 방출하지만 오염물질을 배출하지 않기 때문에 친환경적이다.

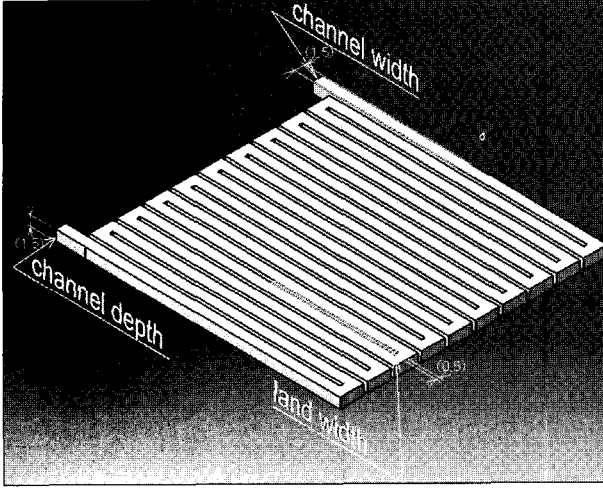


3. 유로 형상 모델 해석

3.1 유로의 형상

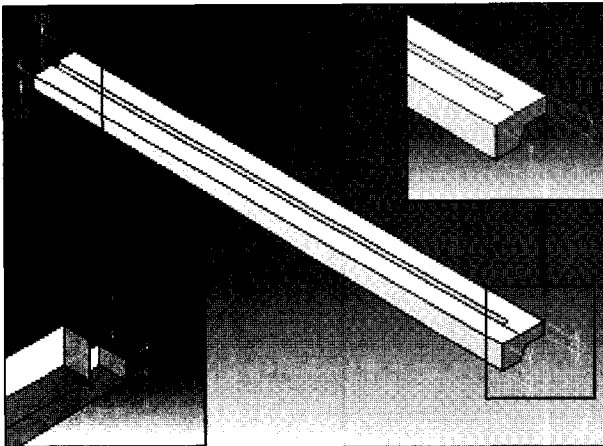
기존의 연료전지에서 사용되는 bipolar plate의 유로 형상은 일정한 유로 단면을 갖는 유로를 사형형(serpentine type)으로 배열한 형태가 일반적이며 Fig. 2는 이런 유로 형상의 일례를 보인 것이다.

Fig. 3은 본 연구에서 새롭게 고안된 변화단면 유로의 입구 측 2개 열을 나타낸 것으로 기존의 등단면 유로와는 달리 유로 깊이를 선형적으로 변화시켜 단면적이 주기적으로 증가 또는 감소하도록 설계된 유로이다. 맨 처음 열의 입구 측에서는 유로 깊이가 2mm로서 최대이고 출구 측에서는 유로 깊이가



(dimensions in mm)

Fig. 2. Sketch of a bipolar plate with a serpentine type flow pattern.



(dimensions in mm)

Fig. 3 Flow field shape of a varying cross-sectional model.

1mm로서 최소가 되도록 단면적이 선형적으로 감소하며 두 번째 열에서는 유로 깊이가 1mm에서 2mm로 다시 증가하는 방식으로 반복하는 사행형 유로를 형성한다.

3.2 유로의 치수 및 경계 조건

Table 1은 본 연구에서 선정된 변화단면 유로와 등단면 유로의 모델 치수와 유로 형상을 나타낸 것으로 등단면 유로의 경우는 선행연구⁴⁾에서 최적의 유로 치수로 제안된 4.0×4.0 cm 크기의 사행형 유로 형상을 기본 모델로 하였으며 변화단면 유

Table 1. Design parameters and dimensions in a half cell model

	등단면유로	변화단면유로
flow channel width	40 mm×40 mm	
channel width	1.5 mm로 일정	
land width	0.5 mm로 일정	
channel depth	1.5 mm로 일정	2mm에서 1 mm로 변화
channel design	serpentine	

Table 2. Input parameters and boundary conditions

	parameter	value
input parameters	temperature(K)	350
	working fluid	H ₂ ideal gas
boundary condition	inlet mass flow rate(kg/s)	2.5×10 ⁻⁷
	outlet gauge pressure (Pascal)	0
	wall	no-slip

로의 경우는 유로의 깊이를 최대 2mm에서 최소 1mm로 선형적으로 변화시켰다.

Table 2는 연료전지 유로 형상 모델의 수치해석에 사용된 경계조건과 입력변수를 요약한 것으로 연료전지는 anode극의 반전지(a half cell)로 고려하고 중력의 영향과 전지 내의 온도 변화는 고려하지 않았으며 전지 내에서의 유동은 층류이고 압축성 이상기체로 가정하여 유로 형상 모델을 해석하였다.

4. 수치해석을 이용한 유로 해석

4.1 유로해석 조건

본 연구에서 선정한 모델에 대한 유동 해석은 유로를 통과하는 유동만을 고려하고 확산층과 촉매층의 유동은 고려하지 않았다. Table 3에 보인 바와 같이 CFX code를 이용한 수치해석을 수행하기 위하여 최대 반복 횟수를 1000번으로 설정하고 잔차(residual)가 1.0×10⁻⁵이 될 때까지 해석하였으며 작동 유체의 유동 영역은 층류로 가정하였다. 속도 분포와 압력 분포의 측정 단면은 확산층 쪽에 접하는 면으로부터 유로 깊이 방향으로 0.7 mm 떨어진 평면을 선정하여 해석을 수행하였다. 이렇게 선정된 평면 상에서 유로의 입구부터 출구까지의 유동장에 대한 평균 속도 분포와 압력 분포를 해석한 결과들을

Table 3. Input parameters in CFD code.

residual target	1.0×10 ⁻⁵	
maximum number of iteration	1000	
volume mesh element	serpentine	1176200
	diagonal	993048
	spiral	1223744
	serpentine (varying cross section)	955119
turbulence model	laminar	

검토하여 유로 형상이 연료전지의 성능에 미치는 영향을 해석하였다.

4.2 속도 분포

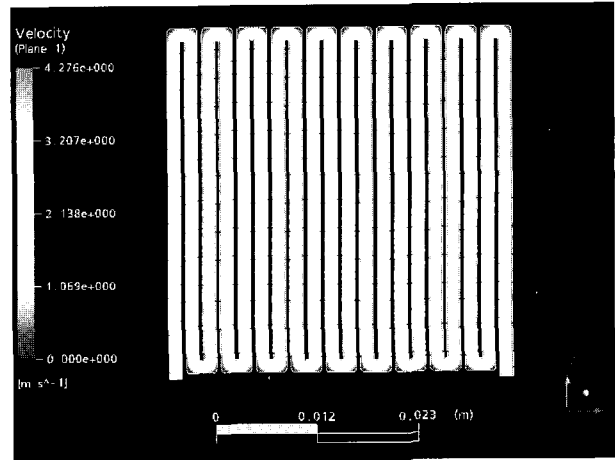
연료전지의 bipolar plate에 배열된 유체의 유동 통로(유로)의 한쪽 면은 확산층과 맞닿는 부분으로 연료가 유로 속을 통과하여 균일한 속도로 흘러야만 연료전지의 효율을 높일 수 있으며⁽⁴⁾ 유로 속의 유속이 빠르면 유로 내의 수소의 공급 속도 또한 빨라져 농도 과전위가 일어나지 않도록 할 수 있다. 수치해석에 적용된 유동은 층류로 가정되었으며 유로가 비원형 단면이기 때문에 유동 영역의 판단을 위한 Reynolds 수는 수력직경(D_h : hydraulic diameter)을 기준으로 한 Re_{D_h} 가 사용되며 수력직경과 Re_{D_h} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_h = \frac{4A}{P} = \frac{4 \times \text{area}}{\text{wetted perimeter}} \quad (2)$$

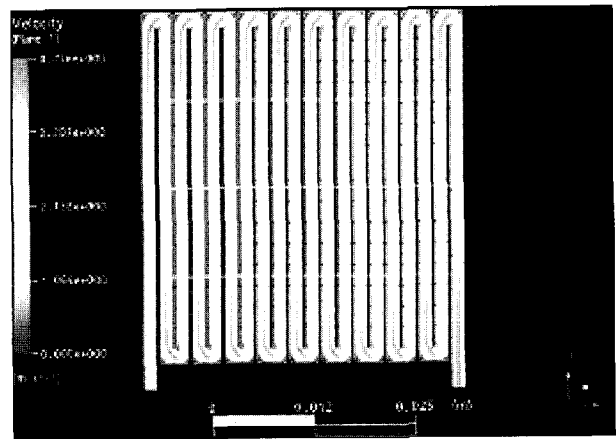
$$Re_{D_h} = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (3)$$

작동 유체를 300K, 표준대기압 하의 수소로 가정하고 CFD code로 해석한 등단면 유로와 변화단면 유로에 대한 속도 분포 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

등단면 유로에서의 최고 속도는 3.17 m/s로 이었으며 여기서 계산된 최고 속도와 해석에 사용된 유로의 수력직경인 1.5 mm를 기준으로 Re_{D_h} 를 구하면 $Re_{D_h} = 45 - 49$ 의 범위에 있으며 $Re_{D_h} \ll 2300$ 로서 유로 내의 유동은 모든 영역에서 층류임



(a) uniform cross-sectional area model



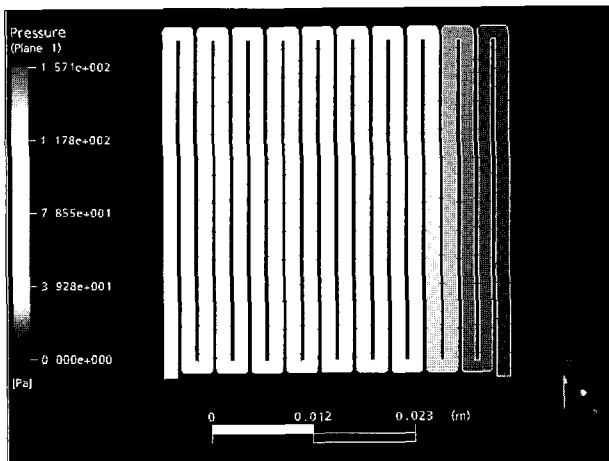
(b) varying cross-sectional area model

Fig. 4 Velocity distributions in a flow channel

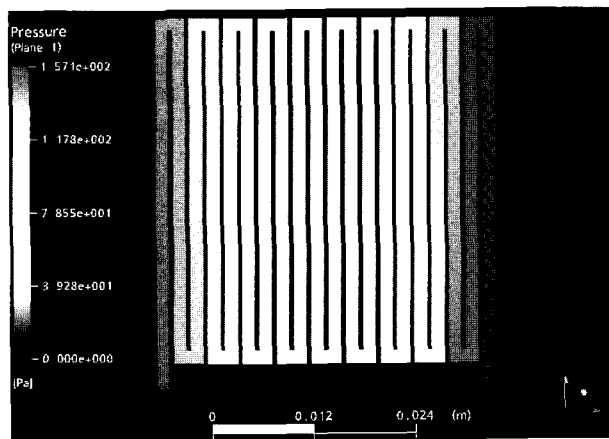
을 알 수 있다. 한편 변화단면 유로에서는 유로 깊이가 1 mm인 곳에서의 최대 속도가 등단면 유로보다 1 m/s정도 빠른 3.94 m/s로 이때의 수력직경은 $D_h = 1\text{mm}$ 로서 $Re_{D_h} = 40$ 이다. 또 유로 깊이가 2 mm인 곳은 등단면보다 1m/s 정도 느린 2.13 m/s로 수력직경은 $D_h = 2\text{mm}$ 로서 $Re_{D_h} = 40$ 이다. 유로 깊이에 따라 수력직경은 당연히 다른 값을 갖지만 연속식의 적용에 따른 속도 차이 때문에 거의 동일한 Re_{D_h} 값을 갖게 되는 결과를 초래한다. 이렇게 형성되는 속도 차이 때문에 확산층을 고려할 경우엔 유로 내의 속도가 보다 균일한 분포가 될 것으로 기대된다. 따라서 변화단면 유로의 경우가 등단면 유로의 경우보다 촉매층으로의 원활한 수소공급을 기대할 수 있을 것이다.

4.3 압력분포

연료전지의 운전 압력이 증가하면 이상기체 법칙에 따라 수소의 밀도가 증가하고 그 결과 수소이용률이 증가하게 된다. 그러나 운전 압력을 증가시키기 위해서는 가압으로 인한 추가적인 부대비용이 필요하게 된다¹⁰⁾. 따라서 가압을 하지 않더라도 유동장에서의 압력강하 값이 적절한 수준이면서 유동장에서 촉매층으로의 확산이 잘 일어날 수 있도록 하며 물의 배출을 용이하도록 하는 유로가 최적의 유로라고 할 수 있다. Fig. 5는 변화단면 유로와 등단면 유로의 압력분포에 대한 수치해석 결과를 나타낸 그림이다.



(a) uniform cross-sectional area model



(b) varying cross-sectional area model

Fig. 5 pressure distributions in a flow channel

5. 결론

본 연구에서 기존의 PEM 연료전지의 bipola plate의 유로 설계에 가장 많이 사용되는 사행형 유로 형상에서 유로의 단면이 균일한 등단면 유로와 유로의 단면이 변화하는 변화단면 유로의 두 모델을 선정하여 CFX를 이용한 수치해석을 수행하고 그 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 속도를 비교 기준으로 변화단면 유로는 등단면 유로에 비해 균일한 속도 분포를 가지지는 않았으나 최고 속도가 1 m/s 정도 빨라 등단면 유로보다 빠른 수소 공급을 가능하게 하여 농도 과전위를 줄일 것으로 판단된다.
- 2) 압력을 비교 기준으로 변화단면 유로는 입구와 출구의 압력차가 등단면 유로보다 커서 압력강하를 낮추는 것에는 적절하지 못하였지만 전체적인 압력 분포가 가장 높아 확산층으로 확산을 원활하게 하여 등단면 유로에 비하여 높은 수소 이용률을 나타낼 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 새롭게 고안된 유로 형상 설계 중에서 유로 깊이에 경사를 주어 연료전지 내에 높은 압력 분포와 빠른 속도 분포를 나타낸 변화단면 유로는 빠른 속도로 농도 과전위를 감소시키며 높은 수소이용률로 활성화 과전위를 감소시켜 결과적으로 개방회로 전압을 증가시킬 것으로 기대된다.

References

- (1) 한국가스공사 연구개발원 이용기기센터, 2003, "고분자 전해질 연료전지용 Bipolar plate의 유로해석에 관한 최종 보고서".
- (2) 천광우, 이호열, 박창권, 오병수, 2004, "PEM 연료전지의 유로 깊이에 따른 성능 해석", 전남대학교.
- (3) A. Kumar and R. G. Reddy, 2003, "Effect of channel dimensions and shape in the flow-field distributor on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells", J. of Power Sources 113, pp. 11-18.
- (4) 조용훈, 2005, "PEMFC의 유로설계를 위한 모델개발", 연세대학교.

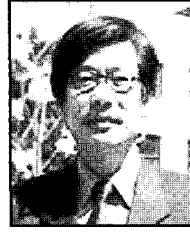
양 등 진



2005년 한국기술교육대학교 기계정보공학부 공학사
2007년 한국기술교육대학교 기계공학과 공학석사

(E-mail ; dj_yang98@yahoo.co.kr)

박 운 진



1975년 서울대학교 공업교육과 공학사
1986년 펜실바니아주립대 기계공학과 공학석사
1989년 펜실바니아주립대 기계공학과 공학박사

현재 한국기술교육대학교 기계정보공학부 교수
(E-mail ; wjpark@kut.ac.kr)