

## CFD-ACE를 이용한 연료 전지 냉각판의 최적 설계

홍민성\*, 김종민+

### Optimization of Fuel-cell stack design using CFD-ACE

Hong Min Sung\*, Kim Jong Min+

#### Abstract

Fuel-cell system consists of fuel reformer, stack and energy translator. Among these parts, stack is a core part which produces electricity directly. In order to set a stack module, fabrication of appropriate stack, design of water flow path in stack, and control of coolant are needed. Especially, water or air is used as a coolant to dissipate heat. The different temperature of each electric cells after cooling and the high temperature of the stack affect the performance of the stack,

Therefore, it is necessary that the relationship between coolant, heating rate, width of stack, properties of stack, and the shape of water flow path must be understood. For the optimal design, the computational simulation by CFD-ACE has been conducted and the resulting database has been constructed.

**Keywords :** Fuel-cell(연료전지), Stack(스택)

### 1. 서론

고분자 전해질 연료 전지는 수소이온 교환 특성을 갖는 고분자막을 전해질로 사용하는 연료 전지로서 연료로부터 추출된 수소와 공기 중의 산소의 화학반응에너지를 전기에너지로 변환시켜 청정하게 전력을 분산 생성하는 장치이다.<sup>[1]</sup> 이것은 다른 형태의 연료전지에 비하여 작동온도가 100℃이하 정도로 낮고, 효율이 높으며, 전류밀도 및 출력밀도가 크고, 부하변화에 따른 응답이 빠른 특성을 가지고 있다. 특히 전해질로 고분자막을 사용하기 때문에 부식 및 전해질 조절이 필요 없고 반응 기체의 압력변화에도 덜 민감하다.

또한, 디자인이 간단하고 제작이 쉬우며 다양한 범위의 출력을 낼 수 있는 장점이 있기 때문에 무공해 차량의 동력원, 현지 설치형 발전, 이동용 전원, 군사용 전원 등 매우 다양한 분야에 응용될 수 있는 장점이 있다.

연료전지 시스템은 크게 연료 개질기, 스택(Stack), 그리고 전력 변환기로 이루어져 있으며 이중에 스택은 연료로부터 직접 전기를 생산하는 부분으로 핵심이 되는 부분이다.<sup>[2]</sup> 스택의 구성은 고분자막과 촉매층을 포함한 가스 확산층의 열간 압착으로 이루어진 막 전극 접합체(membrane electrode assembly)와 기체의 흐름을 제공하는 유로가 가공된 분리판(gas flow field or bipolar plate), 그리고 스택의 온도를 100℃ 이하로 유지하기 위한 냉각수 유로가 형성된 냉각판(cooling plate)으로 이루어져 있다. 스택의 냉각판의 재질

\* 홍민성(mshong@ajou.ac.kr), 아주대학교 기계공학부  
주소 : 442-749 경기도 수원시 팔달구 원천동 산5번지  
+ 아주대학교 기계공학과 대학원

로는 분리판과 마찬가지로 전기전도성과 화학적 부식에 대한 저항성 및 가스 불투과성 등을 요구하므로 흑연 및 흑연복합체가 가장 일반적인 재료이며 보통 1~3mm 두께를 가지는 유로가 가공된 평평한 판으로 되어 있다.

스택 모듈을 개발하기 위해서는 적절한 냉각판의 개발과 냉각판의 유로 설계 및 냉각 시 냉각수의 유량조절이 필수적이다.<sup>[3]</sup> 스택의 발열은 물 또는 공기를 사용하여 냉각하는데, 스택을 이루는 각 단의 단위 전지의 냉각이 불균일하거나 부족하면 성능 차이를 유발하고 이로 인해 스택 전체의 성능에 영향을 미치게 된다. 이를 위해서는 스택으로 유입, 유출하는 냉각수의 물성을 결정할 수 있는 설계기술이 선행되어야 하며, 다양한 운전조건에서의 냉각수의 유량, 온도, 스택의 발열량 등에 대한 자료를 축적해야 한다. 그러나 수많은 조건에서 냉각수의 유량과 온도를 실험을 통하여 결정하는 것은 현실적으로 어려움이 따르며 전산유체역학 해석 기법을 이용하여 체계적으로 냉각조건을 이해하는 것이 절실히 필요하다.

스택의 냉각판은 연료전지 시스템의 외부의 부하에 따라 열 발생이 달라지므로 냉각수의 유량과 스택의 발열량과의 데이터는 물론 냉각판의 두께, 재질 및 유로의 형상과의 관계와도 규명되어야 한다.<sup>[4]</sup> 이와 같이 냉각판의 설계는 매우 복잡한 인자들이 작용하므로 최적 설계를 위해서는 충분한 데이터의 구축과 전산모사 기법을 이용한 시뮬레이션인 CFD를 통하여 최적구성 요소를 결정할 필요가 있다.<sup>[5]</sup>

본 연구에서는 냉각판의 냉각유로, 냉각판의 크기 및 두께, 냉각수의 유량 분포를 실제의 스택의 발열량에 따라 최적 설계를 위한 데이터베이스를 구축하였다. 이 데이터베이스를 토대로 연료전지의 스택을 위한 최적의 조건을 제시하였다.

## 2. 연구 내용

CFD-ACE<sup>[6]</sup>를 이용하여 연료전지스택의 냉각판의 온도장 및 냉각수 유동장의 해석, 냉각판의 냉각수 유로, 냉각판의 크기 및 두께, 냉각수의 유량 분포를 실제의 스택의 발열량에 따라

최적 설계를 위한 데이터베이스 구축을 위한 시뮬레이션을 수행하고, 이 데이터베이스를 토대로 연료전지의 스택을 위한 최적의 조건을 제시하는데 있다. 본 연구의 내용은 다음과 같다.

첫째, 실제 냉각판 CAD데이터를 CFD-ACE에서 사용 가능한 데이터로 변환하고, 해석을 하기 위한 적절한 mesh 작업을 수행한다. 유체 유동과 열 유동이 동시에 일어나므로, 결과값이 발산하지 않도록 적절한 mesh 작업을 수행한다.

둘째, 다음과 같이 온도변화에 가장 민감한 4개의 변수를 주어 각각의 냉각판 상태를 시뮬레이션 한다.

1. 냉각판 유로의 폭 (Width : W)
2. 냉각판 유로의 깊이 (Depth : D)
3. 냉각판 유로에 진입하는 유체의 속도 (Velocity : V)
4. 냉각판에 가해지는 열유속 (Heat Flux : H.F.)

위에 주어진 변수를 CFD-ACE의 Sim-Manager<sup>[7]</sup>의 각 변수에 알맞게 배치한다. 이를 이용하여 각각의 경우에서 출구의 유체 온도를 구한다. 현재 가장 스택의 효율이 좋다고 알려진 온도(입력 유체의 온도와 출구 유체의 온도차가 5℃인 경우)를 찾는다.

셋째, 비슷한 온도 변화가 일어나는 경우를 선택하여 가장 최적화된 결과가 나오는 값을 선택한다.

## 3. 냉각판 모델링

냉각판 모델링은 다음과 같이 수행하였다. 우선 대략 5가지 정도의 스택의 냉각 통로 Topology를 생성 후 유체의 냉각 효율이 가장 좋은 형태의 모델을 선택한 후 그 모델을 기준으로 열 해석을 수행하였다. 우선, Fig. 1에서 보여지는 것처럼 SolidWorks를 이용하여 드로잉 한 후 계산의 단순화를 위해서 모서리의 라운딩을 모두 제거하고, 여기서 IGS 파일을 받아서 CFD-ACE 환경으로 변환시킨 후 그 모델을 기준으로 해석을 수행하였다.

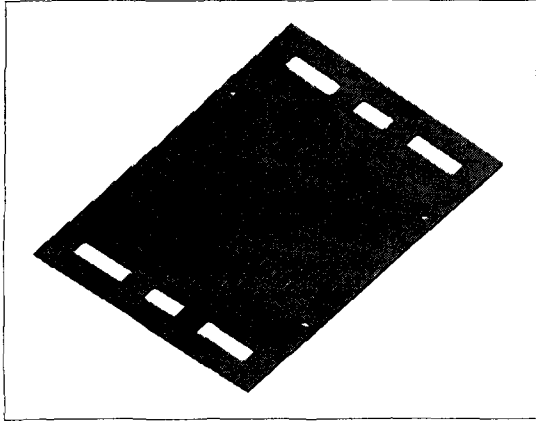


Fig. 1 CAD Design of stack

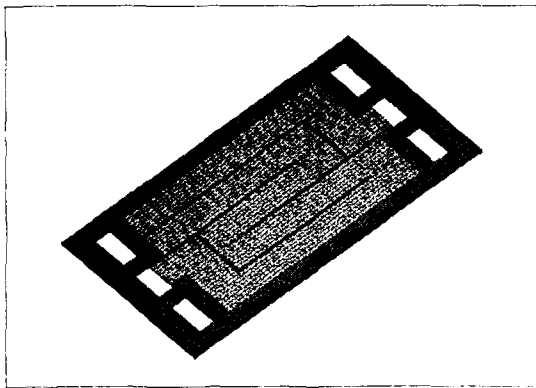


Fig. 2 Structured & Unstructured complex model in CFD-ACE

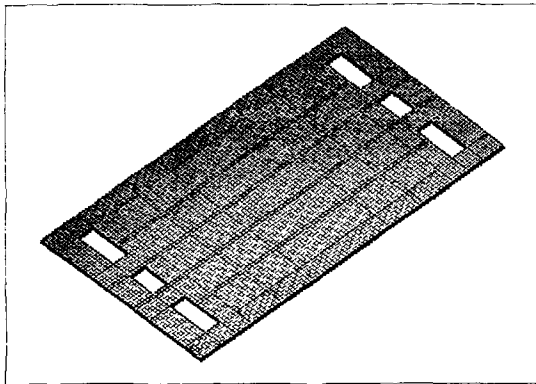


Fig. 3 Structured mode in CFD-ACE

여기서, structured 구조는 정육면체 격자 구조를 말하고, unstructured 구조는 일반 육면체 격자 구조를 말한다.

Fig. 2 의 Unstructured 와 Structured complex model의 경우 냉각판 유로와 Graphite판 사이의 경계조건에서 경계조건 불일치 현상이 발생하거나 유체 입력부 모서리에서 과도한 유동 해석을 수행하여 결과값을 발산시키는 문제를 발생했다.

본 연구에서는 유체 유동이 층류로 일어나므로 Fig.3에 보여지는 것과 같이 Structured model을 이용하여 해석을 수행하였다.

#### 4. 시뮬레이션 실험 및 결과

시뮬레이션은 CFD-GEOM<sup>[8]</sup>, CFD-ACE<sup>[6]</sup>, CFD-VIEW<sup>[9]</sup>를 이용하였고, 파라미터의 변화는 SimManager<sup>[7]</sup>를 이용하여 순차적으로 입력되도록 하였다. Table 1은 시뮬레이션에 사용된 Volume Condition과 Boundary Condition 이다.

Table 1 Simulation Parameters

<b>Volume Condition</b>	
<b>Fluid - Water</b>	
Density	997.0089 (kg/m <sup>3</sup> )
Viscosity	0.000855 (kg/m-s)
Specific Heat	4179 (J/kg-K)
Thermal Conductivity	0.613 (W/m-K)
<b>Solid - Graphite</b>	
Density	2250 (kg/m <sup>3</sup> )
Specific Heat	690 (J/kg-K)
Thermal Conductivity	24 (W/m-K)
<b>Boundary Condition</b>	
<b>Inlet (Fixed Velocity)</b>	
X Direction Velocity	0.6529 (m/s)
Temperature	323 (K)
<b>Stack Top and Bottom</b>	
Heat Flux	450 (W/m <sup>2</sup> )
<b>Outside</b>	
Adiabatic	

시뮬레이션을 수행하기 이전의 초기 데이터는 실제 현장에서 제시한 조건으로 시뮬레이션을 수행하였고, 그 이후 반복 수행을 통하여 온도차가 5℃에 가장 근접한 조건을 SimManager를 이용하여 찾아내는 방법을 수행하였다.

Table 2 Simulation result at SimManager

Depth (mm)	Width (mm)	Velocity (m/s)	Heat flux (W/m <sup>2</sup> )	ΔT
0.5	27.8	0.6029	425	5.9081
			450	6.0106
			475	6.1827
		0.6529	425	5.5629
			450	5.7275
			475	5.6977
	29.8	0.7029	425	5.2725
			450	5.5165
			475	5.6554
		0.6029	425	5.6468
			450	5.7381
			475	5.8284
29.8	0.6529	425	4.8758	
		450	5.0042	
		475	5.1646	
	0.7029	425	4.2065	
		450	4.4034	
		475	4.6287	

참고로 Depth가 0.35, 0.65인 경우에 대해서도 SimManager를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였지만, 0.5일 때 5℃에 근접하는 데이터가 가장 많이 존재하였다.

SimManager를 통하여 얻어진 최적의 파라미터들은 Table 3에 있다.

Table 3 Optimal parameters

Depth(mm)	0.5
Width(mm)	29.8
Velocity (m/s)	0.6529
Heat flux(W/m <sup>2</sup> )	450

또한 이 때의 온도분포와 냉각수의 속도벡터를 다음 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다.

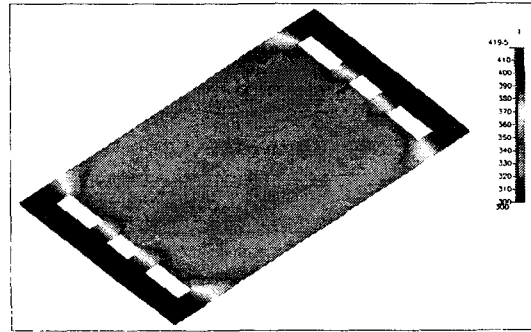


Fig. 4 The optimal temperature

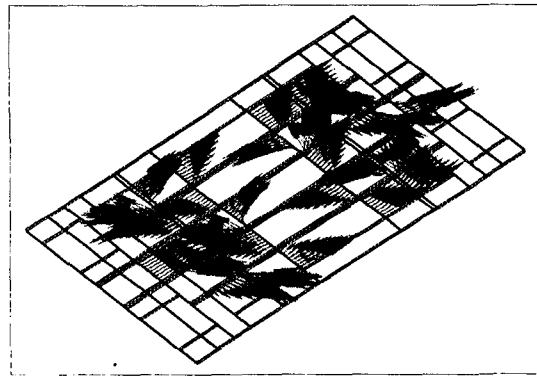


Fig. 5 Coolant velocity vector

## 6. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연료전지의 스택 냉각의 최적설계를 위한 데이터의 축적을 통하여 각 단위전지의 온도 균일도(uniformity)를 개선 할 수 있으며, 냉각수 순환 및 열 교환에 필요한 부가적인 동력손실을 줄여 전체적인 스택의 성능을 향상시킬 수 있다.
2. 다양한 운전조건에서의 데이터베이스를 구축하여 향후 제품 개발시간을 단축시킴으로써 스택의 안정적인 설계와 제조로 신뢰성 있는 연료전

지의 상용화를 앞당기는 기준을 제시하였다.

3. 전산유체역학 기법을 사용한 열, 유동 해석의 타당성 검증을 통하여 향후 연료전지 시스템 개발을 위한 모사방법 기술을 축적할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] Blomen, L. and Mugerwa, M. N., 1993, *Fuel cell systems*, Plenum Press
- [2] Williams, K.R., 1966, *An introduction to fuel cells*, Elsevier
- [3] Jiang, Rongzhong and Chu Deryn, 2001, "Stack design and performance of polymer electrolyte membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 93, No. 1-2, pp. 25~31.
- [4] Barnett, S. A., 1990, "A new solid oxide fuel cell design based on thin film electrolytes", *Energy*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~9.
- [5] Myung, Hyoun-kuk, *An introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2002, Munundang
- [6] *CFD-ACE Reference manual*, 2001, CFD Research Corporation
- [7] *CFD-SimManager Reference manual*, 2001, CFD Research Corporation
- [8] *CFD-GEOM Reference manual*, 2001, CFD Research Corporation
- [9] *CFD-VIEW Reference manual*, 2001, CFD Research Corporation
- [10] Lee, J. H., Lalk, T. R., 1998, "Modeling fuel cell stack systems", *Journal of Power Sources*, Vol. 73, No. 2, pp. 229~241.
- [11] Paganin, V. A., Ticianelli, E. A. and Gonzalez, E. R., 1998, "Development of small polymer electrolyte fuel cell stacks", *Journal of Power Sources*, Vol. 70, No. 1, pp. 55~58.