

2.5kW급 연료전지 매니폴드 형상의 최적설계

Manifold Diffuser of 2.5kW fuel cell design optimization

이충언^{1*}, 오승훈¹, 경성현¹, 김종억¹

인하대학교 기계공학과

초 록

연료전지의 성능을 결정짓는 가장 중요한 변수 중의 하나는 각 스택의 채널에 얼마나 균일하게 연료를 공급할 수 있는냐이다. 본 연구에서는 네 가지의 모델을 사용하여 연료전지 매니폴드 형상에 따른 최적 설계를 수행하였다. 위 네 가지 모델은 각기 다른 기하학적 형상을 가지며 Edison CFD를 이용하여 형상 내의 유동을 비교하였다. 초기 모델에서는, 입구부에서 매니폴드로 유입되는 유동의 확산이 잘 일어나지 않아 각 채널의 질량유량이 불균일한 분포를 보였으며 특히 속도가 빠른 중심 영역의 채널에 많은 연료가 유입되었다. 이를 위한 디퓨저 모델링이 제안되었으며 실속이 최소한도로 발생할 때 채널당 질량유량이 가장 균일하다고 가정하였다. 이를 위해 다양한 디퓨저 각을 가진 모델을 사용했고, 이론상으로 실속이 발생하지 않는 형상에서 가장 균일한 분포를 보임을 확인하였다.

Key Words : 매니폴드(Manifold), 디퓨저(Diffuser), 연료전지(Fuel cell), 실속(Stall), 유량분배 (Fluid Distribution)

1. 서론

연료전지에는 많은 종류가 있지만, 고분자 전해질형 연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cells, PEFCs)는 고분자 전해질을 사용하여 수소로부터 전기를 얻는 연료전지이다. 일반적으로 연료전지의 효율은 작동 온도가 높을 때 우수하지만 PEFCs는 다른 형태의 연료전지보다 비교적 낮은 작동온도(~100℃)에서도 작동이 가능하고 전류밀도 및 출력밀도가 크다는 장점이 있다. 뿐만 아니라 부하변화에 대한 응답특성이 빠르고 넓은 범위의 출력을 낼 수 있는 장점 때문에 가정용 발전장치, 이동용 전원 등 다양한 분야에 응용되고 있는 실정이다. 본 연구에서 설계한 2.5kW급 연료전지의 출력은 일반 가정에서 소모되는 평균전력인 2~2.5kW를 상회하므로 가정용 보조 전원 및 다양한 용도로 사용가능하다.

Nernst Equation에 의해 구해지는 PEFCs 단위 연료전지의 이론상 최대전압은 1.2V이지만, 비가역성과 기타 부분을 고려한다면 0.75V 미만의 전압을 가진다. 단위전지로 얻을 수 있는 전압이 낮기 때문에 단위 연료전지를 직렬로 연결하여, 스택(Stack)구조로 사용하는 것이 일반적이다. 연료전지의 높은 효율을 위해서는 균일한 유량분배가 필수적이며, 이를 위해 각 셀에 적절하게 가스를 분배시키기 위한 매니폴드 형상의 연구가 요구된다.

본 연구는 단위전지 20개로 구성된 스택 모델을 제작하고, 이를 Edison CFD를 사용함으로써 매니폴드의 기하학적 형상 변수들이 유동의 균일한 분배에 미치는 영향을 확인해 볼 것이다. 일반적으로 유동의 균일함을 확인하는 방법은 3D CFD 프로그램을 사용하여 각 채널의 유량을 확인하는 것이지만, 이번 연구에서는 매니폴드 단면에서 발생하는 실속 등을 분석하여 유량의 분배를 예측해보고자 한다. 이후 분석한 내용을 바탕으로 3D CFD 프로그램을 사용하여 나온 결과와 예상한 결과가 일치하는지 확인해 볼 것이다. 그림 1은 연료전지의 대략적인 기본형상을 단순화 한 것이다.

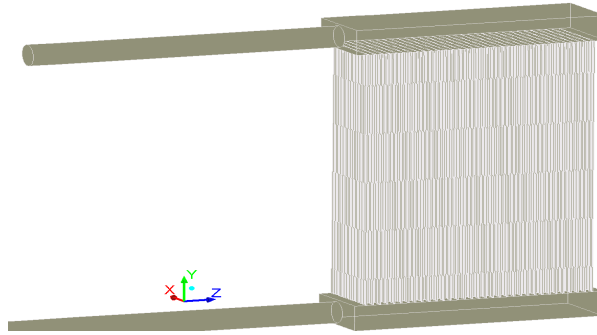


그림 1. 연료전지를 단순화 한 기본형상

2. 본론

2.1 유동해석모델

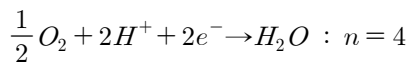
본 연구에 사용될 연료전지는 2.5kW급 가정용 연료전지로서, 사양은 표 1과 같다.

표 1. 모델의 기본 변수

스택당 채널수	20	반응면적	400cm ²
스택수	20	상대습도	100% in 60℃
화학양론	2	전류밀도	5000A/m ²
입구직경	1.51cm	작동온도	60℃
밀도(ρ)	0.8497kg/m ³	점성계수(μ)	2.0082×10^{-5} kg/(m · s)
유입속도	18.75m/s	레이놀즈수(Re)	11979

시뮬레이션은 환원극(Cathode)을 기준으로 다루지며 모델 해석을 위한 기본적인 물리량 계산이 수행되었다. Nernst 방정식으로부터 입구부의 유입속도를 구하기 위한 몇 가지 식이 사용되었다. 계산에 사용된 식들은 다음과 같다.

- 환원극의 화학반응식



- Nernst 방정식

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod p_{Product}^{v_i}}{\prod p_{Reactant}^{v_i}}$$

- 혼합물의 점성계수

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^N x_j \Phi_{ij}}$$

- 입구속도

$$V_{inlet} = \zeta \times \frac{I_{ref}}{2 \cdot F \cdot C_{H_2}} \times \frac{A_{act} \cdot N_{stack}}{A_{inlet}}$$

2.2 기하학적 설계변수

이번 연구의 쟁점은 매니폴드 및 입구부의 기하학적 형상을 변화시켜 가면서 유량을 적절하게 분배하기 위한 최적 형상을 설계하는 것이다. 이를 위해 매니폴드의 폭과 입구부의 길이, 입구의 형상을 설계

변수로 하여 시뮬레이션을 진행하였다. 각 모델 별 기하학적 형상은 표 2와 같다.

표 2. 각 모델 별 기하학적 형상

Case Number	설계변수		
	입구형상	매니폴드 폭(mm)	디퓨저 길이(mm)
1	원통형(기본)	50	-
2	디퓨저	50	60
3	디퓨저	60	60
4	디퓨저	50	100

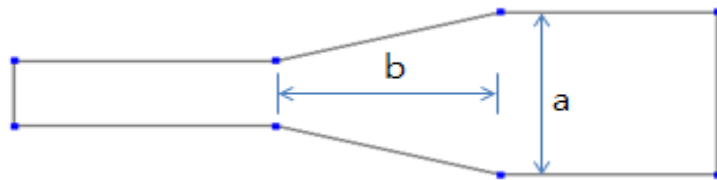


그림 2. 디퓨저의 형상 (a: 매니폴드 폭, b: 디퓨저 길이)

원통형 입구부를 가진 기본형상으로부터 질량유량 분포를 위한 디퓨저 모델을 제안했으며, 그림 2와 같이 디퓨저 모델을 제작하였다. 또한, 유입속도를 일정하게 하기 위해서 입구부의 반경을 고정시킨 후 디퓨저의 형상을 표 2와 같이 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 진행하였다. 폭과 길이를 설계변수로 하여 실속이 발생하는 정도를 비교해 보았다. case 4는 이론적으로 실속이 발생하지 않는 기하학적 변수들로 구성해 보았다.

2.3 해석방법

모델의 유동해석은 Edison CFD를 사용하여 진행하였다. 모델링 과정에서 경계조건 입력을 위해 자유류와 출구의 정압을 직접 계산하여 구한 이후 2D_Incomp solver를 이용해 시뮬레이션을 수행하였다. CFL 값의 변화에 따라 수렴 정도가 굉장히 많은 차이가 났기 때문에 적절한 값을 찾기 위해 많은 계산이 수행되었고 1에서 가장 적절하게 수렴하는 것을 확인하였다.

본래 질량유량의 최적설계는 3D 툴로 이루어지는 것이 바람직하다. 하지만 매니폴드 형상의 최적설계 관점에서 보면 매니폴드의 높이와 입구부의 직경이 거의 동일하기 때문에, 매니폴드의 높이는 유량의 균일 분배에 끼치는 영향이 미미하다고 판단하였다. 이 때문에 2D 해석으로도 충분히 최적설계를 할 수 있을 것으로 예상하였다. 또한 실속이 최소화되는 형상에서 유량이 가장 균일하게 분배된다고 가정하고 시뮬레이션을 진행하였다. 위 가정을 확인하기 위해서 Edison CFD로 실속이 최소화되는 형상을 설계한 후 기본형상과 최적화 형상의 질량유량 분포 비교를 3D 범용 소프트웨어를 통해 최종적으로 확인해 보았다.

2.4 결과 및 고찰

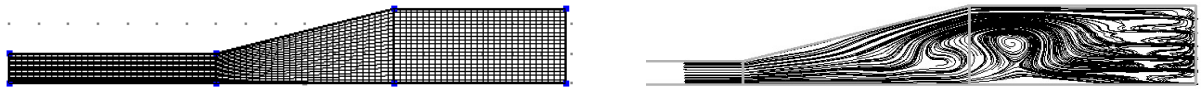
원통형 입구를 가진 기본 형상과, 이를 개선하기 위한 디퓨저 형상 3가지가 설계되었다. 각 형상은 경계조건을 제외한 모든 입력 값들이 같다. 경계조건의 경우 디퓨저 형상에 따라 무차원화 변수들의 값이 변화하기 때문에 따로 계산을 통해 각 형상별 경계조건을 구했다. case 1을 제외한 모든 형상은 경계층

에서의 점성 마찰을 명확하게 확인하기 위해서 경계면에 격자가 집중되게 I-ds 0.1의 값을 부여하였다. 각 형상의 격자구성과 유선차원의 실속유무 확인은 그림 3과 같다.

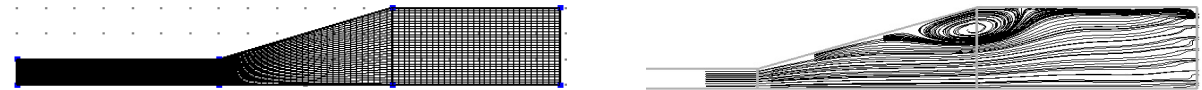
case 1.



case 2.



case 3.



case 4.



그림 3. 모델 별 격자구성 및 유선

case 1의 경우 굉장히 크게 실속이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 관내유동의 갑작스런 확산에 의해 발생하며, 이를 줄이기 위해 디퓨저 모델을 고안하게 되었다. 나머지 세 가지 모델은 디퓨저를 포함한 형상이며 유동에서의 실속이 대폭 감소하거나, 혹은 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 유동은 진행하면서 경계층에서의 점성마찰로 압력이 감소하며, 기본형상에서의 압력강하 그래프가 그림 4에 나타나 있다.

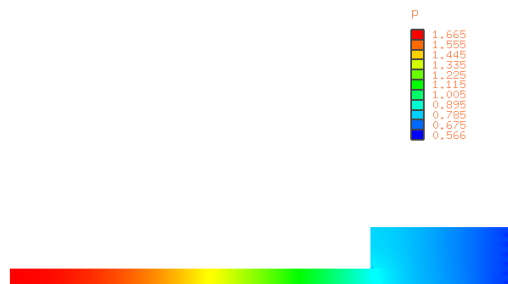


그림 4. case 1 압력강하

유선 분포를 통해 각 모델에서 실속이 발생함을 확인할 수 있다. 하지만 실속의 발생 정도를 정량적으로 확인하기에는 유선분포의 분석으로는 부족하고, 또한 실속의 발생이 각 셀의 질량유량에 영향을 미친다는 것을 확인하기 위해 3D 시뮬레이션을 통한 유량 분석을 제안하게 되었다.

채널별 질량유량 분석을 위해 범용소프트웨어인 ANSYS-FLUENT 6.3 전산유체 패키지를 사용한 3D 시

플레이션이 수행되었다. case 1과 가장 실속의 발생이 적은 case 4, 그리고 일반적인 디퓨저 모델인 case 2가 질량유량의 관점에서 비교되었다. 결과는 그림 5와 같다.

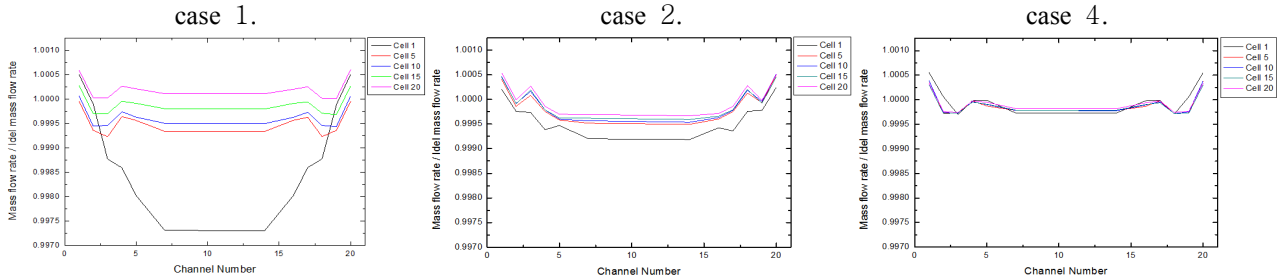


그림 5. 모델 별 채널 질량유량

그래프의 x축은 스택으로 유입되는 채널 번호, y축은 각 채널의 질량유량을 평균 질량유량으로 무차원화한 값을 나타낸다. 예상한대로 기본 형상에서의 질량유량은 굉장히 불균일하며, 디퓨저에서 실속이 적게 발생하는 순서대로 질량유량의 균일함이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 셀의 질량유량이 다른 셀에 비해 굉장히 작은 것은 유입속도가 매우 빨라 정압이 낮으므로 유량이 채널로 유입되지 않고 흘러간다는 것을 의미한다. 디퓨저를 통해 유입속도를 낮추고 압력을 상승시키면 case 2, case 4의 경우와 같이 첫 번째 스택의 질량유량 효율을 큰 폭으로 향상시킬 수 있다. 결론적으로 실속의 발생이 채널로 유입되는 질량유량의 균일함에 영향을 주는 인자라고 확인할 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 기본적인 매니폴드 형상에서의 유량분배 특성을 확인해 보고, 이를 개선하기 위한 디퓨저 모델을 제안하였다. 디퓨저에서 발생하는 실속이 유량분배에 가장 중요한 변수라 가정하여 실속의 발생 유무를 확인하기 위한 다양한 형상의 디퓨저 모델을 제작하였다. 2D 시뮬레이션에서는 유선을 통해 실속의 발생 유무를 확인하였고, 기본형상과 실속의 발생이 가장 적었던 디퓨저 모델을 3D 시뮬레이션으로 비교하여 결과를 검증하였다. 본 연구를 통해 도출된 결과는 다음과 같다.

1) 기본형상과 디퓨저 형상의 유선을 비교해 보았을 때, 디퓨저 모델의 고안은 거의 필수적이다. 기본형상의 경우, 유동이 진행하면서 갑작스러운 확산으로 인해 실속이 발생하는 것을 해석을 통해 확실하게 확인할 수 있다. 또한 이론적으로도 디퓨저를 통해 유동의 유입속도를 감소시키면서 압력을 증가시키는 것이 채널의 유량분배에 긍정적인 영향을 미치기 때문에, 디퓨저 형상의 설계가 굉장히 중요한 인자임을 알 수 있다.

2) 이론상 디퓨저는 실속이 발생하는 임계각이 존재하고, 이 전후에 따라 실속의 유무가 명확하게 나누어진다. 해석 결과를 통해 디퓨저의 기하학적 변수 변화가 실속의 유무에 크게 관여함을 확인할 수 있다. 디퓨저 각이 감소하는 형상 변화가 실속의 발생을 감소시켰고 이론상 실속이 발생하지 않는 디퓨저 모델에서 유량이 매니폴드로 균일하게 유입되었다.

3) 추가적인 3D 시뮬레이션 분석을 통해, 디퓨저의 길이가 가장 긴 모델에서 가장 적절한 유량분배가 이루어졌음을 확인할 수 있다. 위 디퓨저의 길이는 이론상 실속이 발생하지 않는 각을 이루는 기하학적 형상이며, 확실히 실속이 발생하지 않고 유량이 매니폴드 내로 균일하게 유입되어 채널까지 균일하게 유입됨을 볼 수 있다. 하지만 디퓨저의 길이가 길어질수록 연료전지의 부피와 질량이 증가하고, 이 인자가 미세하게 증가된 효율보다 큰 영향을 끼칠 수도 있기 때문에 설계에 있어서는 공학적인 선택이 필요하다고 판단된다.

실속이 발생한 모델이 3D 시뮬레이션 내에서도 질량분배가 균일하지 않았던 것을 보면 충분히 2D

CFD 소프트웨어로도 형상 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다. 3D CFD 소프트웨어가 더 다양한 관점에서 모델을 해석할 수는 있지만, 계산 시간이 짧고 해석이 간단하다는 것도 2D 소프트웨어의 큰 장점이 될 수 있을 것이다.

후기

Edison CFD를 이용하여 연료전지 매니폴드 해석을 통해 연료전지 성능 향상에 기여할 수 있는 기회가 되었다. 또한 본 연구는 미래창조과학부의 지원 사업인 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, S. Y., Kim, W. N., 2007, "Effect of Cathode Inlet Manifold Configuration on Performance of 10-Cell Proton-Exchange Membrane Fuel Cell," *Journal of Power Sources*, Vol. 166, pp. 430~434.
- (2) Koh, J. H., Seo, H. K., Lee, C. G., Yoo, Y. S., Lim, H. C., 2003, "Pressure and Flow Distribution in Internal Gas Manifolds of a Fuel-Cell Stack," *Journal of Power Sources*, Vol. 115, pp. 54~65.
- (3) Chen, C. H., Jung, S. P., Yen, S. C., 2007, "Flow Distribution in the Manifold of PEM Fuel Cell Stack," *Journal of Power Sources*, Vol. 173, pp. 249~263.
- (4) Runstadler, P. W., Dolan, F. X., Dean, R. C., 1975, "Diffuser Data Book," *Creare Inc. Tech. note 186*, Hanover, NH.
- (5) 조아래, 강경문, 오성진, 주현철, 2012, "연료전지 채널 내 균일한 유량분배를 위한 연료전지 스택의 매니폴드 디자인 최적화 연구", *유체기계저널* Vol 15. pp. 11~19.