

차량용 연료전지 스택의 안정적 반응 가스 공급을 위한 중앙 유동 분배기 형상 설계에 관한 수치적 연구

*정 헤미¹⁾, **엄 석기²⁾, 정 희석³⁾, 이 성호³⁾, 서 정도³⁾, 손 영진³⁾

A Numerical Study on the Design of a Central Flow Distributor Device Stabilizing Flow Uniformity in a vehicular fuel cell stack

*Hye-Mi Jung and **Sukkee Um

Key words : Fuel Cell(연료전지), Stack(스택), Central Flow Distributor(중앙유동분배기), Flow Uniformity(유동균일도), Flow Stabilization(유동안정화), Design(형상설계)

Abstract : In this study, two types of central flow distributor designs are presented and compared to obtain the optimal compact design which has the least flow resistance and the uniform flow distribution in a vehicular fuel cell stack. For effective and reliable prediction on the thermo-flow characteristics of the reactants flow over the entire fuel cell stack domain, open channel flow in the bipolar plates of the power generating cells were simulated by applying a simplified flow resistance model with an empirical porous concept. A number of case studies were performed to figure out an optimal configuration of a central flow distributor device in terms of the time-dependent thermo-flow behavior and load-dependent flow distribution. The results showed that the stable and load-independent thermo-flow uniformity is very design specific, which is closely associated with the design of central manifolding devices in order to achieve the enhanced volumetric power density and the reliable long-lasting operating of fuel cells.

Nomenclature

A : cross-sectional area, m²
C : molar concentration, mol/m³
D_h : hydraulic diameter, m
F : Faraday constant, 96487 C/mole
I : current density, A/m²
P_c : wetted perimeter, m
Re : Reynolds number
V : fluid velocity, m/s
μ : molecular viscosity, Pa-s
ξ : stoichiometry flow ratio
ρ : density, kg/m³

Subscripts

c : cathode
cx : cross-sectional
in : central flow distributor inlet
ref : reference value
rx : electrochemical reaction

1. 서론

현재 대다수의 수십 kW급의 차량용 연료전지 스택은 요구 출력에 부합하는 전력을 생산하기 위해서 일정 개수의 단위전지로 구성된 서브 모듈이 연결장치(coupling device)에 의해 연결된 형태의 구조로 이루어져 있다. 여기서 서브 모듈을 연결시켜주는 연결장치는 연료전지의 반응가스 공급 및 배출, 서브 모듈 간 통전 등의 주요 기능을 담당하는 핵심 구성요소가 된다. 이와 같은 서브 모듈 간 연결장치는 단일 입·출구를 갖는 대규모 스택에서 발생할 수 있는 현격한 압력 강하 증대 및 단위전지 간 유동균일도 감소 등의

- 1) 한양대학교 대학원 기계공학과
E-mail : ham1978@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0432 Fax : (02) 2220-0432
- 2) 한양대학교 공과대학 기계공학부
E-mail : sukkeeum@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0432 Fax : (02) 2220-0432
- 3) 현대기아 연구개발총괄본부
E-mail : suk96j@hyundai-motor.com
Tel : (031) 899-3165 Fax : (031) 899-3331

문제점을 해결하기 위해 양측의 서브 모듈에 반응가스 공급 유량을 분산시키는 중앙 유동 분배 형태의 구조, 즉 중앙 유동 분배기의 형상을 하고 있다. 그러므로 단일 경로를 갖는 반응가스 공급 구조에 비해 유동 경로가 짧아져 스택의 주요 설계 인자인 압력 강하 제한에 대한 부담을 완화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 연료전지 차량의 급가속 혹은 급속한 가변 부하 시 스택 내부의 유동 불안정에 따른 순간적 성능 저하 현상을 방지할 수 있다.¹⁻³⁾ 이와 같은 서브 모듈 간 연결 장치를 설계하기 위해서는 중앙 유동 분배기 형상에 대한 유체역학적 고찰과 더불어 서브 모듈 간 통전을 위한 재료 선정 및 통전 구조에 대한 검토가 반드시 수반되어야 한다. 일례로 전기적 안정성을 위해 전기적 절연체 재료로 중앙 유동 분배기를 설계/제작하는 경우, 직렬로 연결된 서브 모듈의 중앙 분배기에 전기적 전도체를 부수적으로 삽입하여 서브 모듈 간 통전을 구현해야 하므로 제작 공정 및 비용 측면에서 불리한 입장에 놓여질 수 있다. 따라서 서브 모듈 간 연결장치 설계 시 스택 중앙 감소에 따른 출력 밀도 향상, 스택 제작 공정 단순화에 따른 비용 절감 측면에서 통전 재료 및 구조에 대한 고려가 충분히 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 차량용 연료전지 스택의 안정적 반응 가스 공급을 위한 새로운 개념의 중앙 유동 분배기 형상 및 통전 구조 설계/개선 방법에 대한 일체의 내용을 제시하고자 한다.

2. 형상 설계 및 해석 모델

본 연구에서는 다량의 유량이 공급되는 차량용 연료전지 스택에서의 유체 동특성 및 균일한 유동 분배구조 향상을 위해 그림 1과 같은 새로운 개념의 관상형 중앙 유동 분배기를 설계하고, 수치적 방법을 이용하여 중앙 유동 분배기와 서브 모듈 스택 매니폴드에서의 유동 특성을 검증/분석한 후 설계된 형상을 개선하는 일련의 과정을 개괄적으로 다루고 있다.

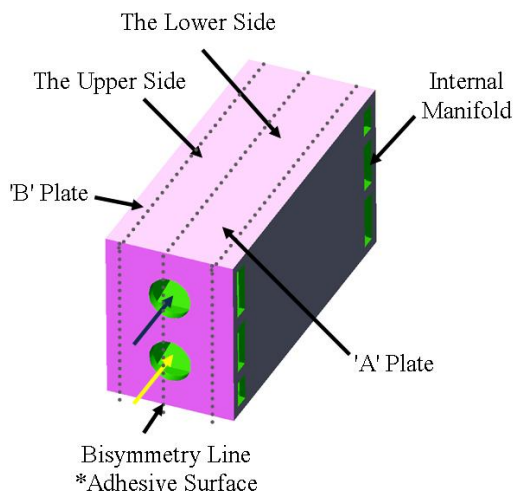


Fig. 1 Schematic of a central flow distributor

그림 1은 25kW급 요구 출력 달성을 위해 2개의 서브 모듈로 구성된 차량용 연료전지 스택의 중앙 유동 분배기의 설계 형상을 나타내고 있다. 본 연구에서는 기존의 반응가스 중앙 분배기의 통전 및 제작 시 수반되는 문제점을 해결하기 위해 중심축의 접합면 (adhesive surface)을 기준으로 중심부의 좌우에 위치해 있는 2개의 판은 SUS 재질, 외곽부의 좌우에 접합되어 있는 2개의 판은 분리판과 동일한 재질인 카본 그라파이트 소재를 사용함으로써, 부수적 전도체 삽입에 따른 연료전지 중앙 유동 분배기 설계의 자유도 감소 및 추가 비용 발생의 문제점을 동시에 해결하였다. 또한 중앙 유동 분배기의 내부 형상을 그림 2와 같이 설계함으로써 입구 영역에서는 유동 굴절에 의한 유체 동특성 및 유동균일도 향상을 꾀하였으며, 출구 영역에서는 임의의 경사각을 부여하여 중력에 의한 잔류 반응가스 및 응축수의 효과적 배출을 유도해 주었다.

본 연구에서는 초반 중앙 유동 분배기와 매니폴드의 기준 형상 및 크기를 결정함에 있어서 식 (1)-(3)의 유동 특성 해석에 관한 유체역학적 기초 이론을 사용하였다. 이처럼 이론적 방법을 통해 초기 설계된 중앙 유동 분배기와 매니폴드 형상에 대한 명확한 유동특성을 규명/분석하기 위해서는 수치적 방법이 유용한 도구로 활용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전산해석 방법을 이용하여 연료전지 스택의 유동균일도 및 유동안정화 향상을 위한 설계 개선 방안을 도출하였으며, 이를 토대로 중앙 유동 분배기의 형상을 재설계하고 성능을 재검토하는 일련의 과정을 반복하여 최적 형상을 결정해 주었다. 본 논문은 지면 관계 상 공기 측 중앙 유동 분배기 설계에 대한 내용만 다를 것이며 수치해석 방법 및 절차는 앞서 발표한 논문과 동일하므로 생략하도록 한다.⁴⁾

$$V_{c,in} = \xi_c \cdot \frac{I_{ref}}{4F \cdot CO_{2,in}} \cdot \frac{A_{rx}}{A_{cx}} \quad (1)$$

$$D_h = 4 \left(\frac{A_{cx}}{P_c} \right) \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho V_{c,in} D_h}{\mu} \quad (3)$$

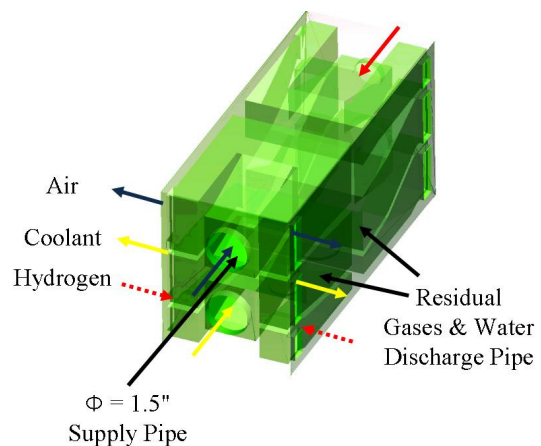


Fig. 2 Inner structure of a central flow distributor

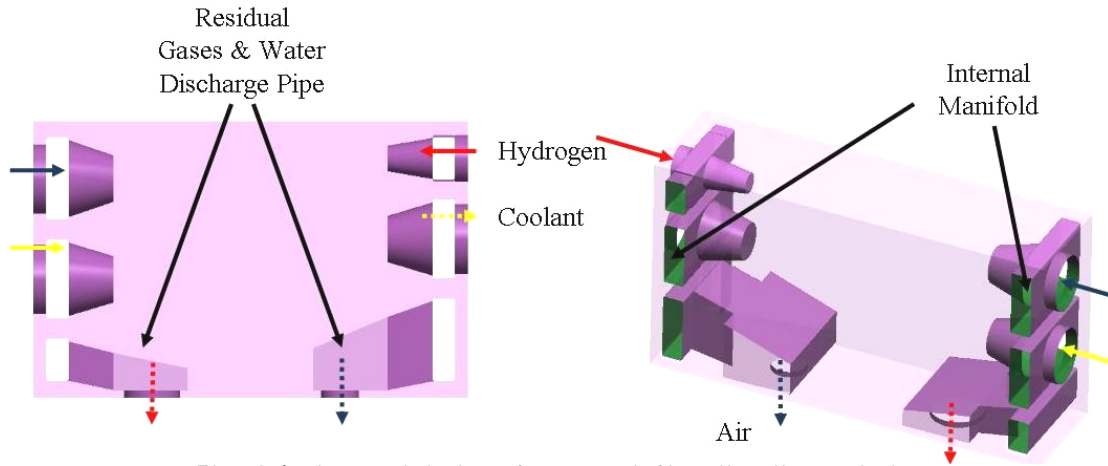


Fig. 3 An improved design of a central flow distributor device

3. 결과 및 고찰

그림 3은 차량용 연료전지 스택의 중요한 개발 목표 중 하나인 출력 밀도 (power density)를 향상시키고 동시에 스택 내부의 유동균일도 및 유동안정성을 확보하기 위해 본 연구에서 제시하고 있는 중앙 유동 분배기의 최적 형상을 나타내고 있다. 앞서 그림 2를 통해 제시한 중앙 유동 분배기 형상에 대한 전산해석을 수행한 결과, 반응가스 원형 공급관과 중앙 유동 분배기의 연결 부분과 중앙 유동 분배기와 서브 모듈 연결 부분에서 급격한 유동 가용면적 변화에 의한 유동 박리 현상을 가시화/분석할 수 있었다. 이와 같은 현상을 개선 혹은 제거하기 위한 노력의 일환으로 다량의 반응가스 유량이 공급되는 원형 공급관과 중앙 유동 분배기 연결부분의 돌연 확대 (sudden expansion)에 의한 유동 불안정 증대구간에 대한 유동 가용 폭 및 형상을 변경해 주었다. 그림 2와 같이 설계된 중앙 유동 분배기를 각각 81개의 단위전지로 구성된 두 개의 서브모듈이 연결하는 부분에 설치하는 경우, 서브모듈 내부의 단위전지 당 유동균일도는 그림4와 같다. 그림 2의 설계 형상에서 살펴볼 수 있듯이 초기에 설계된 중

앙 유동 분배기는 중심부의 접합면을 기준으로 좌우 대칭의 형태를 하고 있으므로 전산해석 결과 또한 좌우 서브모듈 내부의 단위전지 당 유동 균일도가 대칭되는 형태를 보인다. 따라서 본 논문에서는 중앙 유동 분배기의 좌측, 혹은 우측면에 연결되어 있는 81개의 단위전지로 구성된 서브모듈 한 개에 대한 전산해석 결과만을 도시하였다. 그림 4는 그림 2의 중앙 유동 분배기 형상에 대한 평균 유량 대비 단위전지 당 유입 유량의 비율을 나타내고 있다. 여기서 (+)부호는 평균 유량에 비해 많은 유량이 공급되는 것을 의미하고 있으며, (-)부호는 평균 유량에 비해 단위전지에 공급되는 유량이 부족하다는 것을 가리킨다. 즉, 그림 4는 스택 전단부 및 후단부에 공급되는 반응가스 유량이 평균 유량에 비해 적게 공급되고 있다는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 연료전지 차량이 급가속/감속하는 경우 순간적인 반응가스 공급 중단 (fuel starvation)으로 이어질 수 있기 때문에, 이와 관련된 불안요인을 설계 단계에서 원천적으로 배제시키기 위해서는 중앙 유동 분배기의 형상 변경이 필수 불가결하다. 이에 본 연구에서는 그림 3과 같은 중앙 유동 분배기 형상을 고안하여 서브모듈 스택 전단부의 유동 박리 현상에 의한 유체 재순환 영역 (recirculating region)을 완전히 배제시켜

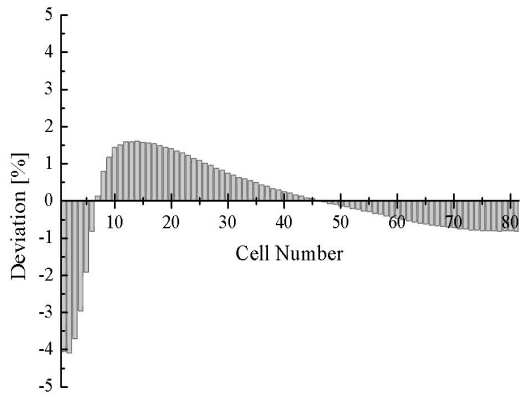


Fig. 4 Predicted flow distribution to cells in the initial model

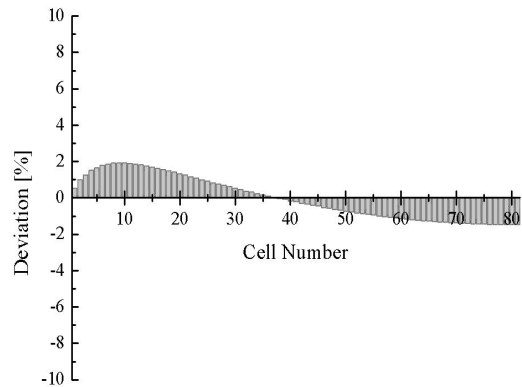


Fig. 5 Predicted flow distribution to cells in the improved model

주었다. 그 결과 기존의 중앙 유동 분배기 장착 시 발생되었던 스택 전단부 및 후단부의 유량 공급 부족 편차가 최고 50% 정도 감소되었으며, 그림 5에 나타난 바와 같이 서브모듈을 구성하고 있는 대부분의 단위전지에 공급되는 반응가스 유량이 평균 유량에 근접한 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 그림 3의 중앙 유동 분배기는 기존에 설계된 중앙 유동 분배기 형상 대비 유동균일도 및 유동안정화 측면에서 우수하며 형상이 비교적 단순하기 때문에 설계 및 제작이 용이하다는 이점을 갖고 있을 뿐만 아니라, 특히 서브모듈 간 연결장치의 두께가 기존 모델 대비 4.5% 정도 감소되었기 때문에 차량용 연료전지 스택의 출력밀도를 대략 7.2% 정도 향상시킬 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 다량의 유량이 공급되는 수십 kW급의 차량용 연료전지 스택에서의 유동균일성 확보 및 연료전지 차량의 부하조건 변화에 따른 유체 동적거동 응답특성 향상을 위해 새로운 개념의 판상형 중앙 유동 분배기를 설계하였으며, 전산해석을 통해 이들 각각의 유동특성을 분석한 후 최적의 유동안정성과 균일 유량 분배 특성을 갖는 중앙 유동 분배기 형상 설계를 위한 개선 방안을 도출하였다. 이를 위해 본 연구에서는 단순한 구조를 갖는 중앙 유동 분배 형상을 최적화하여, 연료전지 차량의 동적 운전에서 발생할 과 통전에 필요한 부수적 삽입 재료 가공에 따른 응축수를 출구 부분에 임의의 경사각을 부여하는

단순한 방법을 사용하여 효과적으로 제거함으로써 연료전지 스택의 장기 운전 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 이와 같은 노력의 일환으로 본 제작공정의 복잡화의 기술적 문제를 해결하였다. 또한 연료전지 장기 운전의 가장 큰 애로사항인 수 있는 스택 전·후단의 반응가스 공급부족 현상 연구에서는 새로운 형태의 반응가스 중앙 유동 분배기를 설계/제작하여 반응가스 분배기가 갖춰야 할 기능을 극대화하면서도 그 제작 공정을 단순화할 수 있는 설계안을 제시하였다. 본 설계안을 통해 제시된 형상을 이용하여 전산해석을 수행한 결과 기존의 중앙 유동 분배기에 비해 유량 공급 부족 편차가 50% 정도 개선되었음을 확인할 수 있었으며, 이를 직접 차량용 연료전지 스택에 적용하는 경우 기존 설계 형상 대비 스택 출력밀도가 7.2% 정도 향상될 것으로 기대된다.

References

- [1] 엄석기, 김수환, 임태원, 이종현, 이기춘, 2006, "연료전지의 유량분배 안정장치," 공개 특허 10-2004-0068717, 대한민국특허청.
- [2] 진상문, 양유창, 금영범, 이종현, 김세훈, 2007, "연료전지 차량용 고출력 분리판 개발," 한국자동차공학회 2007년도 춘계학술대회논문집, pp. 2356-2361, 한국자동차공학회.
- [3] 김세훈, 2006, "연료전지 차량[승용차, 버스] 개발 현황," 한국자동차공학회 2006년 워크샵 (하이브리드 자동차 부문), pp. 133-141, 한국자동차공학회.
- [4] 정혜미, 엄석기, 손영준, 박정선, 이원용, 김창수, 2005, "고분자 전해질 연료전지 매니폴드의 열유동 특성에 관한 수치적 연구," 한국신재생에너지학회지, 제 1권, 제 2호, pp. 41-52, 한국신재생에너지학회.