

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2008.32.6.446

자동차용 고분자 연료전지 수소 재순환 시스템의 이상 유동해석

곽현주* · 정진택[†] · 김재춘* · 김용찬** · 오형석***
(2007년 12월 26일 접수, 2008년 4월 26일 심사완료)

Two-Phase Flow Analysis of The Hydrogen Recirculation System for Automotive Pem Fuel Cell

Hyun Ju Kwag, Jin Taek Chung, Jae Choon Kim, Yongchan Kim and Hyung Seuk Oh

Key Words: Fuel Cell Vehicles(연료전지 자동차), Hydrogen Recirculation System(수소 재순환 장치), Two-phase Flow(이상 유동), Condensation(응축), CFD(전산해석)

Abstract

The purpose of this paper is to analyze two-phase flows of the hydrogen recirculation system. Two-phase flow modeling is one of the great challenges in the classical sciences. As with most problems in engineering, the interest in two-phase flow is due to its extreme importance in various industrial applications. In hydrogen recirculation systems of fuel cell, the changes in pressure and temperature affect the phase change of mixture. Therefore, two-phase flow analysis of the hydrogen recirculation system is very important. Two-phase computation fluid dynamics (CFD) calculations, using a commercial CFD package FLUENT 6.2, were employed to calculate the gas-liquid flow. A two-phase flow calculation was conducted to solve continuity, momentum, energy equation for each phase. Then, the mass transfer between water vapor and liquid water was calculated. Through an experiment to measure production of liquid water with change of pressure, the analysis model was verified. The predictions of rate of condensed liquid water with change of pressure were within an average error of about 5%. A comparison of experimental and computed data was found to be in good agreement. The variations of performance, properties, mass fraction and two-phase flow characteristic of mixture with respect to the fuel cell power were investigated.

1. 서론

기호설명

- \vec{J}_i : 확산 흐름
- h : 엔탈피
- D : 확산 계수
- C : 1.883×10^{-2}
- Y : 질량 분율

연료전지시스템은 동력(전기)을 발생시키는 발전모듈(스택)과 이 발전 모듈을 최적의 상태로 운전하기 위한 운전 장치시스템(BOP)으로 구성되어 있다. 반응셀이 적층되어 있는 연료전지 스택에서는 공급된 공기와 수소가 100%의 화학 반응을 이루지 못하고 있으며, 매니폴드의 유동 저항 등을 고려하여 각 셀을 지나는 수소의 유속, 분포 등을 적절히 유지하기 위하여 전지반응에 필요한 양보다 더 많은 수소를 공급해야 한다. 그러므로 스택의 성능확보 및 수명 증대를 위하여 스택에서 반응하고 남은 수소는, 연료의 낭비를 막아 시스템의 효율을 높이기 위해 재순환하여 스택 입구로 되돌려야 한다. 따라서 수소재순환시스템

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교
E-mail : jchung@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3364 FAX : (02)928-9766
* 고려대학교 대학원
** 고려대학교
*** 현대자동차

은 연료전지 자동차의 연비를 결정하는 중요한 부품이다. Fig. 1은 연료전지 자동차에 사용되는 수소 재순환시스템의 개략도이다.

고분자 전해질 연료전지는 전해질의 특성상 가습이 반드시 필요하기 때문에 수소극에서 배출되는 수소에는 일정량의 수증기가 포함되게 되어 있다. 이렇게 포함된 수증기가 수소 재순환 시스템 내부를 지나면서 압력과 온도의 변화로 인하여 그 일부가 응축하게 된다. 이렇게 발생된 물은 전체 시스템의 압력강하를 가져오게 되고 재순환되어 스택으로까지 들어가서 스택의 효율을 떨어뜨리는 문제점을 가져오고 있다. 또한 재순환 시스템의 내부에서 물이 생김으로 인해 재순환되는 수소의 양이 줄어들고 일정한 양의 수소를 정확히 재순환 할 수 없게 된다. 결과적으로 재순환 시스템의 불안정성이 높아지고 연료전지 시스템의 성능저하를 가져오게 된다. 그러므로 수소재순환장치에서의 이상유동을 파악하고 응축되는 물을 제어하는 연구가 필요하다.

연료전지 내부의 이상 유동에 관한 연구로는 2004년에 Yuan et al.⁽¹⁾가 단위연료전지 cathode 내부의 유동을 CFD로 해석하여 가습도의 차이에 따른 전체 연료전지 출력의 변화를 예측하였고 또한 응축의 기준을 제시하고 이를 적용한 Two-phase 기법을 제안하였다. 파이프 내에서의 이상 유동에 관한 연구로는 2005년 Berthelsen et al.⁽²⁾가 완전 분리된 수평관에서의 유동에 대해 CFD를 이용하여 압력강하, 물의 층 높이를 예측하고 그 전에 실험했던 연구결과와 비교 연구하였다. 이와 같은 이상유동을 재순환 시스템에 적용한 연구로는, 2006년 Kim 등⁽³⁾이 연료전지가 80KW의 출력을 낼 때 재순환 시스템의 형상을 모델링하고 유동을 상용코드를 이용하여 전산해석 하였다. 그러나 Kim 등⁽³⁾이 수행한 이상유동에 대한 해석연구에서는 결과에 대한 검증이 이루어지지 않았다. 또한 다양한 이상유동 모델을 적용하지 못하여 재순환시스템에 적합한 모델을 제시하지 못하였다. 그러므로 본 연구에서는 선행연구를 했던 Kim 등⁽³⁾의 모델을 비교 연구하여 새로운 해석모델을 제안하고 이를 실험으로 검증하고자 한다. 그리고 제안한 모델을 적용하여 실제 개발된 연료전지의 운전조건에 따른 수소의 유동을 파악하고 재순환 시스템 내부에서 발생된 물의 양을 예측하는 것을 목적으로 한다.

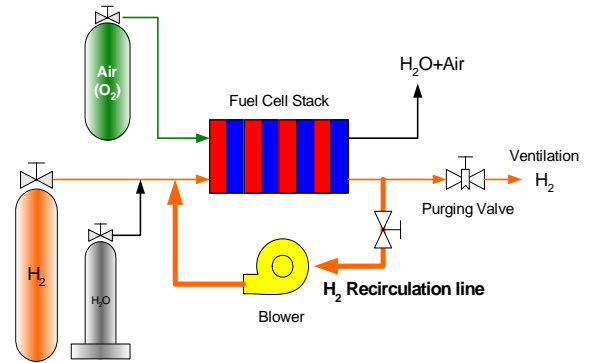


Fig. 1 Schematic of hydrogen recirculation system

2. 수치 해석

2.1 상태량 계산

재순환 시스템 내에서 수소와 수증기를 하나의 물질(Single component)로 가정할 수 없다. 따라서 각 상태량(Properties)을 계산할 때 상태량을 구하는 식에 따라 단일물질일 때와 혼합물질일 때를 나누어서 계산을 해 주어야 한다. 단일물질일 때 점도의 경우는 Sutherland Law, 열전도율과 비열은 Polynomial function을 사용하여 온도에 따른 계산 값을 각각 얻었으며 혼합물질일 때 상태량 계산은 단일물질에서 계산된 값을 이용하여 계산을 하거나 단일물질들의 질량비율을 이용해서 계산하게 된다. 혼합물의 밀도는 Incompressible Ideal Gas Law를 사용하였고, 점도와 열전도율은 Ideal Gas Mixing Law를 사용하며 비열은 Mixing Law를 사용하여 혼합물의 값을 각각 계산하였다.

2.2 이상 유동

수소 재순환 시스템 안에서 발생하는 응축은 수소와 수증기 혼합물이 유로내를 지나가면서 온도와 압력의 변화로 인해 액적이 생성되는 것이다. 액적이 생기는 기준은 Yuan et. al.⁽¹⁾에 의하면 수증기의 부분압력이 포화압력보다 높을 때이다. 그러므로 물의 응축량은 시스템의 수증기의 상대습도로 예측하였다. 응축이 생기는 시작점은 상대습도가 100%가 넘을 때이다. 상대습도는 식 (1) 과 같다.

$$\eta = \frac{P_{wv}}{P_{w, sat}} = x_{wv} \frac{P}{P_{w, sat}} \quad (1)$$

여기서 P 는 압력이고, P_w 는 수증기의 부분압력이다. x_w 는 수증기의 molar fraction 이며, $P_{w,sat}$ 는 온도에 따라 변하기 때문에 식 (2)을 사용하여 계산하였다.

$$\log_{10} P_{w,sat} = -3.179 + 0.029 T - 9.183 \times 10^{-5} T^2 + 1.445 \times 10^{-7} T^3 \quad (2)$$

2.3 수치 해석

본 연구는 전산해석을 통하여 수행하였으며 전산해석에는 상용프로그램인 FLUENT 6.2를 사용하였다. 수소 재순환 장치 내에서의 물리적 현상을 나타낼 수 있도록 각 성분에 대한 지배방정식을 계산하였다. 유동 및 물질의 확산을 나타내기 위해 질량보존 방정식, 운동량 보존 방정식, 에너지 방정식, 성분전달방정식 (3)~(6)을 사용하였다. 성분전달방정식에서 질량확산계수는 Taylor⁽⁴⁾가 제안한 식(7)를 C언어로 프로그래밍 하여 해석에 적용하였다. 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 방정식을 사용하였고, 이산화 방정식은 2nd order Upwind Scheme을 사용하였다. 압력 수정은 Pa-tankar의 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) scheme을 사용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_m \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k h_k + p)) = S_E \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot (\vec{J}_i) + R_i + S_i \quad (6)$$

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu}{Sc_t} \right) \cdot \nabla Y_i - D_{i,T} \frac{\nabla T}{T}$$

Where $D_{i,m} = CT^{1.75} \frac{\sqrt{((M_1+M_2)/M_1 M_2)}}{P \sqrt{3of V_1 + \sqrt{3of V_2}}} \quad (7)$

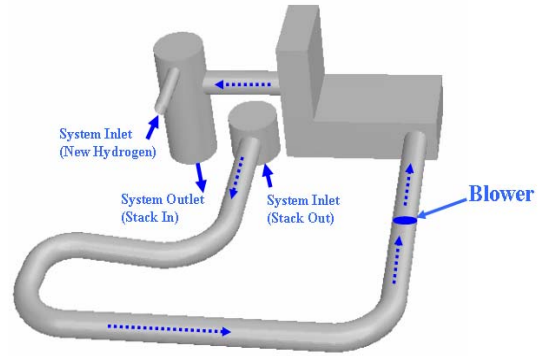


Fig. 2 Computation model

2.4 해석 모델

수소재순환 시스템의 해석모델은 현재 개발된 자동차에 사용되는 수소 재순환 시스템을 Fig. 2에 나타난 것처럼 단순화 시켰다.

2.5 계산격자

본 연구에서는 상용 전산유체역학 프로그램 FLUENT6.2의 전처리 소프트웨어인 GAMBIT를 사용하여 형상 및 격자를 생성하였다. 격자는 사각채널격자모양으로 형상의 경계면과 일치하는 격자를 만들었으며, 격자수는 모두 1,313,551개이다.

2.6 경계조건

혼합물의 상태량과 지배방정식의 해를 구하기 위해서는 물리적으로 타당한 경계조건들이 필요하다. 본 수치해석 연구에서는 입구의 경계조건으로는 수소와 수증기의 일정한 유량과 온도를 주었고 벽면은 모두 점착조건(no-slip condition)과 단열조건을 사용하였다. 그리고 출구의 경계조건으로는 일정한 압력을 주었고, 블로어의 경계조건으로는 증가되는 압력 값을 사용하였다. 그리고 입구와 출구에서는 수소와 수증기의 질량비를 사용하였다. 또한 시스템 입구에서 수소와 수증기는 균일하게 섞여 있는 것으로 가정하였다. 모든 경계조건들은 실제 개발된 80KW급 연료전지 자동차의 스택출력이 2KW, 10KW, 40KW, 60KW, 80KW일 때의 실험값을 이용하였다. 이는 자동차의 속도에 따른 스택의 출력이 계속 변하기 때문에 이에 대한 최소한의 출력조건을 선정하여 실험값으로 이용한 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 해석검증

본 연구에서 계산되어진 전산해석 값의 타당성을 검증하기 위하여 간단한 모델을 만들어서 실험을 수행하고 동일한 경계조건으로 해석하여 비교 검증하였다. 검증하고자한 내용은 혼합물의 압력의 변화, 입구 수소 유량의 변화에 따라 생성되는 응축물이다.

3.1.1 실험 장치 및 방법

Fig. 3 는 응축물 측정 실험을 위한 실험장치 개략도를 나타내었다. 실험에 사용된 파이프는 실제 재순환 장치에 사용되고 있는 파이프와 동일한 레이놀즈를 갖도록 제작하였다. 펌프는 실험조건에 해당하는 유량과 압력을 보내주는 역할을 하며 각각의 실험 조건마다 일정한 유량을 보내 주어야 하므로 유량을 변경할 수 있고 출구 압력에 대해 정해진 유량을 일정하게 보낼 수 있으며 수소의 폭발에도 견딜 수 있게 방폭형 정량 펌프를 설치하였다. 수소와 수증기가 공급되는 입구에는 유량계(MFC)를 사용하여 유체의 유량을 제어하도록 하고 차압계는 펌프의 혼합물이 지나가는 입구 및 출구 부분에 연결하여 펌프가 일정한 유량을 보낼 때 발생하는 압력강하량을 측정하도록 하였다. 그리고 펌프에 의한 압력상승으로 인해 발생하는 물의 양을 질량저울을 통해 일정한 시간간격에 따라 측정하도록 하였다.

다음은 실험에 사용한 계측기기의 종류 및 오차를 표로 나타내었다.

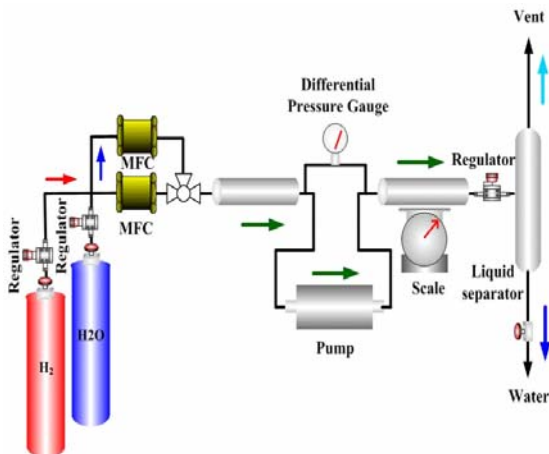


Fig. 3 Schematic diagram of experiment

3.1.2 해석 모델

해석모델은 Fig. 4 에 나타난 것처럼 실험에 사용했던 파이프의 형상을 단순화 시켰다. 그리고 펌프 또한 단순화 시켜서 실제로 일어나는 유량의 차와 부피의 차로 인해 변하는 압력의 차로만 설정하였다. 격자는 사각채널격자모양으로 형상의 경계면과 일치하는 격자를 만들었으며, 격자수는 모두 83,200개이다. 본 해석의 경계조건은 실험조건과 동일하게 주었다.

3.1.3 검증 결과

본 연구에서 계산되어진 전산해석 값의 타당성을 알아보기 위하여, 본 연구에서 획득한 실험값과 해석 값, 그리고 선행연구를 했던 Kim⁽³⁾의 모델을 이용하여 해석한 값을 비교하여 해석의 신뢰성을 살펴보았다. Fig. 5 과 Fig. 6에 나타난 것과 같이 실험값과 해석값 모두 압력이 높을수록, 또한 수소유량이 클수록 응축물이 많아지는 동일한 경향성을 보이고 있다. 그리고 Kim⁽³⁾ 모델을 사용했을 경우는 10% 이상의 오차가 발생했지만 본 모델을 적용했을 때는 5%의 오차를 보였다. 선행연구를 했던 Kim⁽³⁾의 모델과 차이가 나는 이유는 응축을 판단하는 기준이 본연구와 다르기 때문이다. Kim⁽³⁾의 모델에서는 응축의 기준이 수소의 가습도를 기준으로 판단하였다. 실험과 5~6% 차이를 보이는 이유는 본 해석의 유동을 기체와 액체의 서로 다른 상이 같은 유속을 갖는 균질유동으로 가정하였기 때문이다. 또한 실험데이터의 불확실성과 사용한 이상유동 모델의 불확실성, 물성치의 불확실성 때문이다.

Table 1 Measurement Meter

Name	Error range	Range
Mass Flow meter	2 %	50 ~ 2000 cc
Differential pressure gauge	2 %	-68 ~ 103 kPa
Mass weight meter	0.1 %	0.01 ~ 120 g

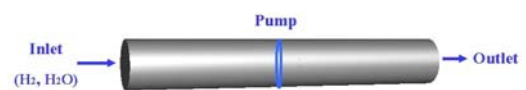


Fig. 4 Computation model in pipe

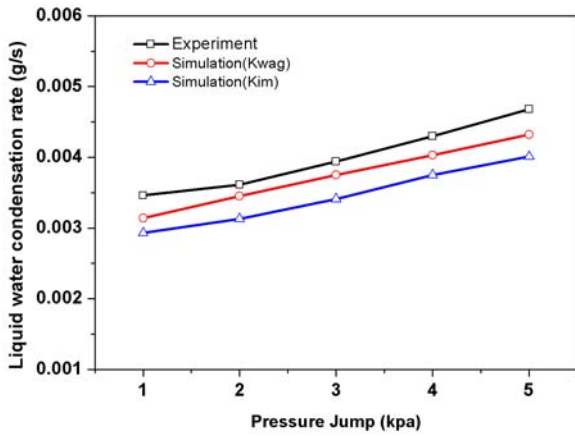


Fig. 5 Comparison between measurement and calculation - Rate of condensed liquid water with respect to pressure jump

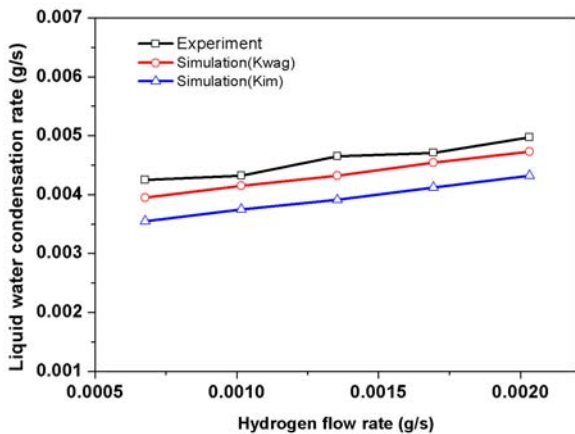


Fig. 6 Comparison between measurement and calculation - Rate of condensed liquid water with respect to hydrogen flow rate

3.2 재순환 시스템 내에서의 유동 특성

재순환 시스템의 특성상 내부를 직접 볼 수 없고, 가시화가 되더라도 시스템 안에서 투명한 수소와 수증기, 물의 분포를 알아내기 쉽지 않다. 그래서 그 대안으로 물리적 형상을 모사할 수 있는 전산유체 역학을 이용, 내부의 물리적 현상을 분석하였다. 본 연구에서는 현재 개발된 연료전지 자동차의 스택출력이 2KW, 10KW, 40KW, 60KW, 80KW일 때의 압력 분포, 수소의 분포 그리고 응축된 물의 분포를 파악하여 혼합물의 거동을 보았다. 전체 형상에 대한 분포는 출력에

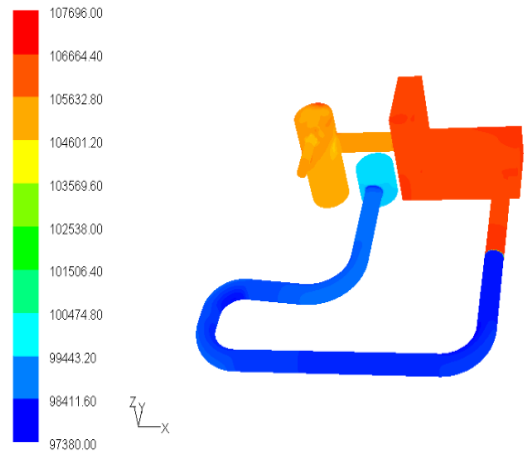


Fig. 7 80KW Pressure distribution(pa)

따라 다소 달랐으나 여기서는 80KW일 때의 분포만 나타내었다.

3.2.1 압력분포

Fig. 7은 연료전지 자동차의 스택출력이 80KW일 때의 수소 재순환 시스템의 압력 분포를 나타내고, Fig. 8은 연료전지의 출력에 따른 재순환 블로어에 의해 상승된 압력과 시스템 입구의 압력, 출구의 압력을 비교하여 나타내었다. Fig. 7에서 보는 것처럼 블로어 전, 후로 급격한 압력변화를 보이고 유로를 흐를수록 떨어지는 압력을 확인할 수 있으며 곡관 부분들에서 550Pa의 압력 손실이 발생하였다. 이는 관의 마찰에 의한 압력 손실을 잘 나타내준다. 그리고 새로 유입되는 수소와 재순환 혼합물이 만나는 부분에서 500Pa의 압력변화가 일어남을 확인할 수 있었다. 입구의 압력은 블로어의 승압되는 압력과 유량에 의해 결정되고, 이것은 스택출구에서 나오는 미반응 수소와 수증기 그리고 물의 재순환 시스템 내부에서의 거동에 영향을 끼침으로 매우 중요하다. Fig. 8에서 블로어의 압력증가율이 상대적으로 선형적인데 비해 입구의 압력크기는 40KW와 60KW 사이에서 다른 출력들의 결과와는 다른 형태의 결과를 보이는데, 이는 40KW 때까지는 선형적으로 변하던 출구의 압력이 60KW 때에 급격히 증가했기 때문이며 또한 연료전지스택에서 요구하는 수소의 양이 다른 출력 때보다 급격히 많아져서 압력 또한 증가하는 것이다.

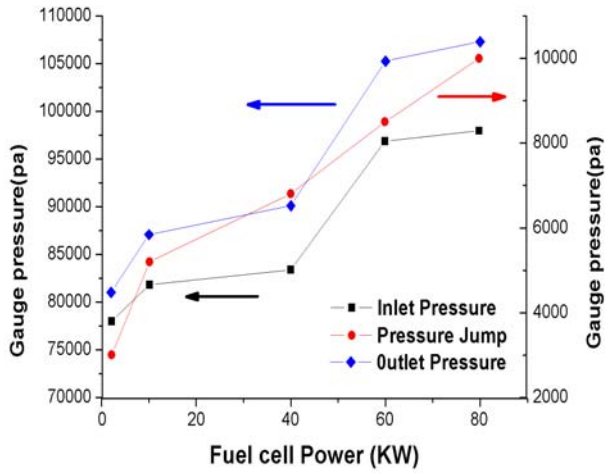


Fig. 8 Inlet pressure, outlet pressure and pressure jump

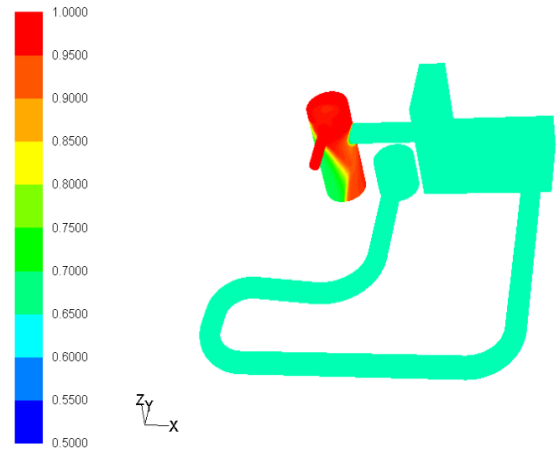


Fig. 11 80KW H_2 mass fraction distribution

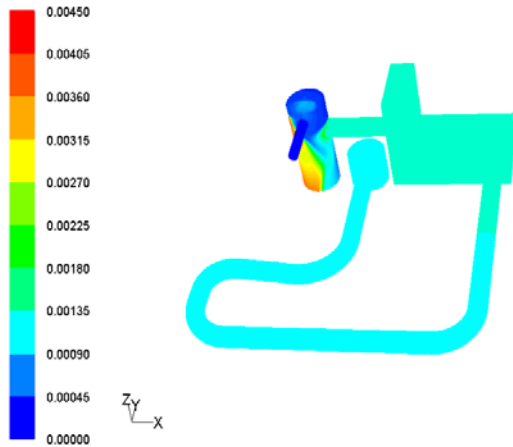


Fig. 9 80 KW H_2O distribution(kg/s)

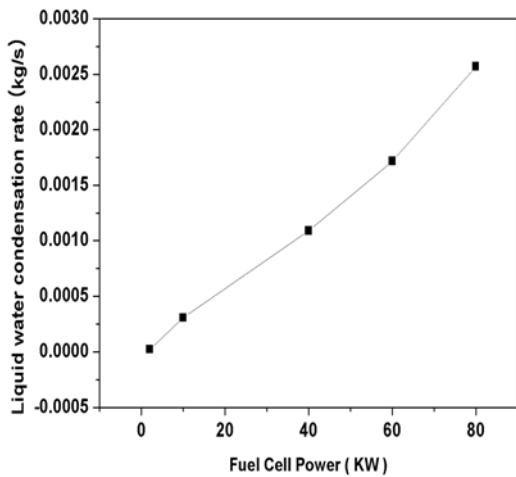


Fig. 10 Water condensation rate in system outlet

3.2.2 물 분포

Fig. 9는 스택출력이 80KW일 때의 수소재순환 시스템 내부의 응축된 물분포를 나타내고, Fig. 10은 스택출력 변화에 따른 재순환 시스템 출구에서의 응축률 변화를 나타내었다.

Fig. 9를 보면 블로어의 승압으로 인해 블로어를 지난 후에 응축률이 커짐을 확인 할 수 있고 그 후 새로운 수소가 공급되기 전까지는 그 양이 일정하다가 새로운 수소와 합쳐진 후 그 크기가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 블로어에 의한 압력 상승이 수증기의 응축현상에 큰 영향을 주었음을 알 수 있으며 또한 새로운 수소의 낮은 온도로 인한 물의 응축을 확인 할 수 있다. Fig. 10를 보면 출력이 증가할수록 응축률이 0.0000232kg/s ~0.00257kg/s 까지 증가하는 모습을 확인하였다. 이는 출력이 증가할수록 시스템의 전체 압력이 증가하므로 물의 응축률 또한 증가하는 것이다. 앞 절에서 출력에 따른 압력분포 그래프와 비교하여 보면 압력이 증가하는 곳에서 동일하게 물의 응축률 또한 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

3.2.3 수소 질량분율

Fig. 11는 스택출력이 80KW일 때의 수소재순환 시스템의 수소질량분율을 나타내고, Fig. 12는 스택출력에 따른 재순환 시스템 출구에서의 수소 질량분율을 나타내었다. Fig. 11를 보면 재순환 시스템 입구에서부터 새로운 수소와 만나는 부분까지의 질량분율이 일정한 결과를 보이며 재순환

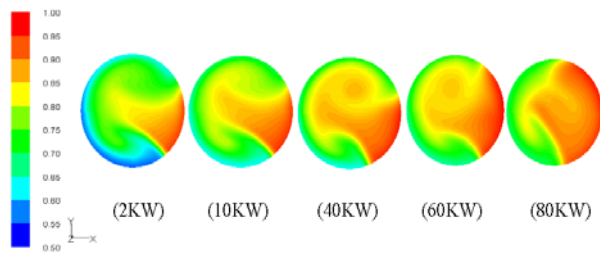


Fig. 12 H_2 mass fraction in system outlet

시스템의 출구 부분에서 새로운 수소의 유입으로 수소 분율이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이는 입구에서 수소와 수증기가 균일하게 들어온다고 가정하였기 때문이다. Fig. 12에서 출력이 증가할수록 수소의 질량 분율이 0.79~0.86 까지 커지는 모습을 확인 할 수 있다.

이는 출력이 증가할수록 연료전지 스택에서 요구하는 수소의 양이 많아지고 따라서 미반응 수소 또한 많아지므로 재순환시스템에서의 수소질량분율이 커지는 것으로 사료된다.

4. 결 론

(1) 재순환 장치의 이상유동에 있어서 본 연구에서 제시한 해석기법을 이용하여 압력, 온도, 성분변화에 민감한 혼합유체의 상변화 및 물리적 특성치들을 보다 정확하게 예측할 수 있었다.

(2) 본 해석 값의 신뢰성을 위해 검증한 결과 실험값과 해석값 모두 동일한 경향성을 보였으며 본 모델을 적용했을 때 실험값과 해석 값이 5~6%의 오차를 보였다.

(3) 압력분포 결과 곡관부들에서 550Pa의 압력 손실이 발생했으며 새로 유입되는 수소와 재순환 혼합물이 만나는 부분에서 500Pa의 압력변화가 일어남을 확인할 수 있었다. 그리고 연료전지의 출력이 증가할수록 시스템의 전체 압력이 증가하는 모습을 확인할 수 있었다.

(4) 연료전지의 출력이 증가할수록 응축물이 0.0000232kg/s ~ 0.00257kg/s 까지 증가하였으며 블로어에 의한 압력상승과 새로운 수소 유입에 따른 수소 유량증가와 온도저하가 물의 응축현상의 원인임을 알 수 있었다.

(5) 수소분포는 재순환 시스템의 출구 부분에서 새로운 수소의 유입으로 수소질량분율이 증가

하는 모습을 볼 수 있었으며 출력이 증가할수록 수소의 질량 분율이 0.79 ~ 0.86 까지 커지는 모습을 확인 할 수 있었다.

본 연구를 향후 개발하는 연료전지 수소 재순환 장치에 적용함으로써 유동압력 및 유동형태, 응축률을 보다 정확하게 예측하여 수소재순환 장치의 안정적, 효율적 운영에 중요한 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2007년도 두뇌한국 21사업과 산업자원부의 지원(과제번호 10016536-2004-11)으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Jinliang Yuan, Bengt Sundén, 2004, "Two-Phase Flow Analysis in a Cathode Duct of Pefcs," *Electrochimica Acta*, No. 50. Pp. 677~683.
- (2) Petter Andreas Berthelsen, Tor Ytrehus, 2005, "Calculations of Stratified Wavy Two-phase Flow in Pipes," *International Journal of Multiphase Flow*, No. 31. pp. 571~592.
- (3) Jae Choon Kim, Jin Taek Chung, Yongteak Lee, Yongchan Kim, Yongsun Park, 2006, "Flow Analysis of the Hydrogen Recirculation System for 80Kw Level Fuel Cell," *Conference Proceedings of KSAE*, pp. 1936~1941.
- (4) Ross Taylor, R. Krishna, 1993, "Multicomponent Mass Transfer," John Wiley & Sons Inc, pp.50~138.
- (5) R. Eckl, W. Zehner, C. Leu, U. Wagner, 2004, "Experimental Analysis of Water Management in a Self-humidifying Polymer Electrolyte Fuel Cell Stack," *Journal of Power Sources*, No. 138. pp. 137~144.
- (6) Vladimir D. Stevanovic, Zoran V. Stosic, Uwe Stoll, 2005, "Condensation Induced Non-condensables Accumulation in a Non-vented Vertical Pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 48. pp. 83~103.
- (7) Hua Meng, 2006, "A Three-dimensional PEM Fuel Cell Model with Consistent Treatment of Water

Transport in MEA," *Journal of Power Sources*, No. 162. pp. 426~435.

(8) M. K. Groff, S. J. Ormiston, H. M. Soliman, 2007, "Numerical Solution of Film Condensation from Turbulent Flow of Vapor-gas Mixtures in Vertical Tubes," *International Journal of Heat and*

Mass Transfer, No. 50. pp. 3899~3912.

(9) Christophe Vallee, Thomas Hohne, Horst-Michael Prasser, Tobias Suhnel, 2007, "Experimental Investigation and CFD Simulation of Horizontal Stratified Two-phase Flow Phenomena," *Nuclear Engineering and Design*, pp. 4833~4843.