

알카리 수전해 스택에서 수소기포의 2상유동 수치해석에 관한 연구

한진목¹ · 배유근¹ · 서영진² · 김세웅² · 정영관^{2,†}

¹금오공과대학교 기계공학과 대학원, ²금오공과대학교 기계공학과

A Study on Numerical Analysis Using the Two Phase Flow in Alkaline Water Electrolysis Stacks

JINMOK HAN¹, YOOGUN BAE¹, YOUNGJIN SEO², SEWOONG KIM², YOUNGGUAN JUNG^{2,†}

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Kumoh National University of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kumoh National University of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

†Corresponding author :
jyg_kr@kumoh.ac.kr

Received 30 March, 2018

Revised 19 April, 2018

Accepted 30 April, 2018

Abstract >> In this paper, the reliability of the numerical analysis using the two phase flow on the behavior of the hydrogen bubbles in the alkali electrolysis stacks was investigated by comparing the results obtained from numerical analysis and flow visualization experiments. As the results, through comparison with results gotten to visualization experiments, it is possible to approximate analysis for the flow of hydrogen bubbles in the stacks by numerical analysis using the two-phase flow. Also, the flow of hydrogen bubbles around the electrodes could be similarly analyzed by numerical analysis using the two-phase flow.

Key words : Alkali(알카리), Electrolysis(전기분해), Hydrogen(수소), Bubble(기포), Behavior(거동), Two phase flow (2상유동), Numerical analysis(수치해석), Experiment(실험)

1. 서론

H₂O : Water

H₂ : Hydrogen

O₂ : Oxygen

NaOH : Sodium hydroxide

KOH : Potassium hydroxide

Φ_l : Liquid phase volume fraction (m³/m³)

Φ_g : Gas phase volume fraction (m³/m³)

ρ_l : Liquid density (kg/m³)

ρ_g : Gas density (kg/m³)

u_l : Liquid velocity (m/s)

u_g : Gas velocity (m/s)

G : Gravity (m/s²)

T : Temperature (K)

μ_l : Liquid dynamic viscosity (Pa·s)

p : pressure (Pa)

F : Volume force (N/m³)

N_{ϕ, ρ_g} : Gas mass flux (kg/m²·s)

I : Quantities related to the liquid and the gas phase

Subscripts

l : liquid

g : gas

1. 서론

자연현상을 이용하여 전기를 생산하는 태양광발전이나 풍력발전과 같은 재생에너지들은 전력부하 변동에 대응하는 공급안정성이 부족하며, 생산된 전기를 장시간 대량으로 저장하는 것이 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

이러한 재생에너지는 물을 전기분해하여 수소를 생산하고 그 수소를 연료전지의 신에너지로 사용함으로써 저장성¹⁻³⁾과 공급 안정성을 보완할 수 있다. 수전해에 의한 수소 생산^{4,5)}과 연료전지^{6,7)}에 의한 물과 전기로의 빠른 가역성⁸⁻¹⁰⁾을 활용하는 변환 에너지는 다양한 에너지원의 중심 에너지원¹¹⁾으로 주목받고 있다.

전기화학반응에 의해 생산된 수소와 산소는 알카리 전해질 수용액에 둘러싸인 전극 둘레에서 미세한 수소와 산소의 기포로 변하여 배출되고, 전해질 수용액을 통과하여 상부로 이동하는 2상유동(two phase flow)을 한다. 이에 대한 수치해석^{4,5,12-16)}과 실험^{17,18)}을 통한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

그러나 2상유동에 대한 수치해석 해의 검증이 이루어지지 않고 있으므로 전해질 수용액 중에서 유동하는 수소기포의 2상유동에 대한 수치해석 결과의 신뢰성에 대한 연구¹⁹⁾가 필요하다.

그러므로 2상유동의 수치해석에서 구한 해는 2상유동에 대한 실험결과와 비교하여 그 신뢰성을 입증하여야 할 필요가 있다.

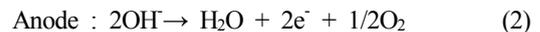
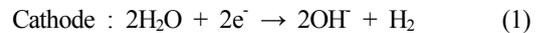
본 연구에서는 알카리 수전해 스택 내부의 전극에서 발생하는 수소기포의 유동을 2상유동으로 가정하여 수치해석을 수행하고, 수치해석 모델과 근사한 크기의 유동가시화 스택을 제작하여 가시화 실험을 실시한 다음, 수치해석과 실험 결과를 비교하여 알카리 수전해 스택 내부에서 발생하는 2상유동의 수치해석

결과에 대한 신뢰성을 검증하는 연구를 진행하고자 한다.

2. 수전해 및 기포의 유동 이론

2.1. 수전해 이론

전기분해를 이용한 수소생산의 대표적인 방법인 알카리 수전해는 두 전극 사이에 격막을 배치하고 전해질을 채운 후에 직류전기를 공급하여 물로부터 수소를 생산하는 전기화학적 방법이다. 전해질로는 NaOH 또는 KOH 수용액을 사용하며, 음극에서는 수소, 양극에서는 산소가 발생된다. 그 원리는 다음과 같다.



두 전극에서 생산된 수소와 산소는 전극 주위의 전해질 수용액 중에서 발생되므로, 수소와 산소의 기포를 형성하여 전극둘레 표면에 부착되어 성장한 후에 이탈한다. 이러한 과정 때문에 수전해 효율이 저하되는 것으로 알려져 있다²⁰⁾.

2.2. 2상유동 지배방정식

액체 속에서 기포흐름에 대한 지배방정식은 식 (3)의 연속방정식과 식 (4)의 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Phi_l \rho_l + \Phi_g \rho_g) + \nabla \cdot (\Phi_l \rho_l u_l + \Phi_g \rho_g u_g) = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \Phi_l \rho_l \frac{\partial u_l}{\partial t} + \Phi_l \rho_l (u_l \cdot \nabla) u_l = \\ & \nabla \cdot [-pI + \Phi_l \mu_l (\nabla u_l + (\nabla u_l)^T \\ & - \frac{2}{3}(\nabla \cdot u_l)I)] + \Phi_l \rho_l G + F \end{aligned} \quad (4)$$

기포의 흐름에 대한 방정식의 해를 구하기 위한 일반적인 방법에는 2상유동에 대한 거시적 방법인

2종유체(the two fluid) Euler-Euler 방법이 있다. 이 방법에서 기체의 밀도는 액체의 밀도에 비해 매우 작으며, 액체에 대한 기체기포의 움직임은 점성저항과 압력 사이의 균형에 의해서 결정된다고 가정한다.

알카리 수용액에 잠겨 있는 수전해 전극에서 수소는 30 % KOH 수용액의 물질량에 비하여 약 1/14 그리고 물에 비하여 물질량이 1/9로 가볍고, 스택 내부의 전체 유로 체적의 1/10 이하를 점유하면서 생산되므로, 전해질 수용액에서 수소기포의 흐름에 관한 수치해석에는 2상유동의 거시적 방법인 2종유체(the two fluid) Euler-Euler 방법을 적용할 수 있다.

3. 수치해석과 실험 방법

3.1. 수치해석 방법

거시적인 수소기포유동에 미치는 스택의 내부 유로 형상과 수소배출구의 차이에 따른 영향을 연구하기 위해, Fig. 1과 같은 2 개의 모델을 이용하였다. 사각형 스택은 수소배출구가 1개이며, 직경 2 mm인 원형 전극이 피치 4 mm로 배열된 실험용 모델이며, 원형 스택은 수소배출구 3개가 큰 수소배출구와 연결된, 직경 5 mm인 원형 전극이 피치 10 mm로 배열된 산업용의 근사 모델이다. 두 형상의 스택 내부에는 원형 전극을 균일한 간격의 행렬배열로 배치하여 수치해석을 수행하였다. 사각형 스택의 경우 좌우 대칭의 구조이므로 축대칭 모델을 이용하였다.

전극에서 수전해가 일어나지 않는 유동가시화용 스택 내부에서 수소는 수치해석 모델의 하단으로부터 균일하게 기포 상태로 공급되며, 상단부의 출구에서 배출된다.

또한, 전극주변에서 미시적인 기포유동을 수치해석하기 위하여, Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같은, 직경 5 mm인 원형 전극 3개를 피치 10 mm로 수직하게 배열한 2차원 모델을 사용하였다. 수전해에 의해 발생하는 수소는 3개의 원형 전극의 둘레에서 균일하게 기포 상태로 발생되어 상부의 출구에서 배출되도록 하였다.

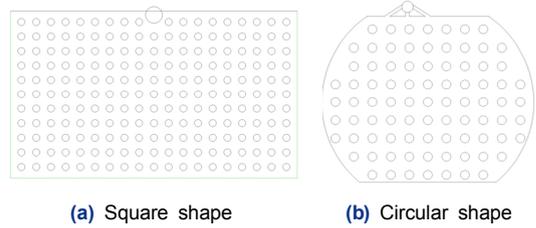


Fig. 1. The stack models of two shapes for numerical analysis in stacks

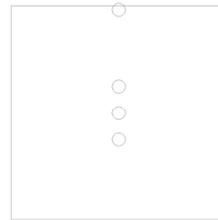


Fig. 2. The model for numerical analysis around electrode

Table 1. Properties for numerical analysis

Material	Parameter	Value
Electrolyte	Density (kg/m ³)	1305.6
	Thermal conduction (w/m·K)	0.0242
	Viscosity (kg/m·s)	4.11×10 ⁻³
	Molecular weight (kg/kg·mol)	28.966
Hydrogen	Density (kg/m ³)	8.189×10 ⁻²
	Thermal conduction (w/m·K)	0.1672
	Viscosity (kg/m·s)	8.411×10 ⁻⁶
	Molecular weight (kg/kg·mol)	2.01594

Table 1은 2상유동의 수치해석에 사용된 전해질 수용액과 수소에 대한 물성치를 나타내고 있다.

수치해석에서 수소기포는 구의 형태로 일정한 크기로 유동하며, 기포의 표면장력은 0.07 N/m이고, 수소기포 발생량은 0.00062 kg/m²s로 설정하였다. 수전해 스택의 출구 압력은 1기압이고, 스택 내부의 모든 유로의 벽에서 유체는 no-slip 조건을 만족하는 것으로 가정하였다. 수전해 스택 내부의 2상유동을 해석하기 위하여 상용 수치해석 프로그램인 COMSOL multiphysics의 자동요소분할을 이용하였다.

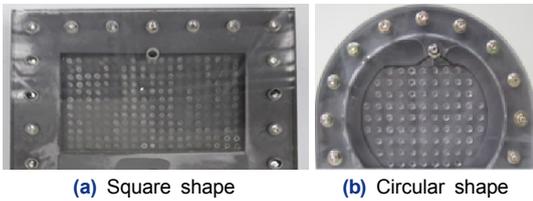


Fig. 3. The visible stack of two shapes for visualization experiments of the bubble flow in electrolysis stacks

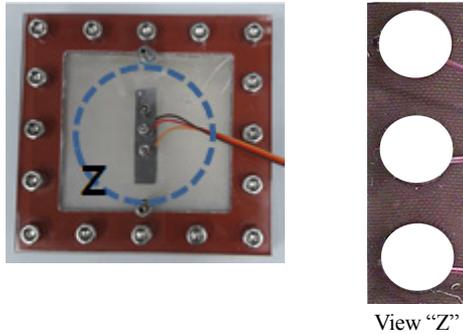


Fig. 4. The visible stack for visualization experiments of the bubble flow around electrodes

3.2. 실험 방법

알카리 수전해 스택 내부와 전극주변에서 발생하는 2상유동에 대한 수치해석 결과의 신뢰성을 확인하기 위하여 다음과 같이 전해질 수용액에서 수소기포 거동에 대한 유동가시화 실험을 수행하였다.

Fig. 3에 보여주고 있는 것과 같이, 전극의 크기와 배열 그리고 스택 내부 유동 공간이 수치해석용 모델과 근사한 사각형과 원형의 유동가시화용 스택을 제작하여 거시적인 수소기포의 분포를 관찰하였다.

많은 수의 전극으로 구성된 스택 내부의 유동을 관찰하기 위하여 전극에서 수전해가 불가능한 유사 전극들을 배치한 유동가시화용 스택을 제작하였으며, 내부로 수소 공급은 수치해석 모델과 같이 스택 하단부에 설치된 대형 전극에서 균일하게 발생하는 수소기포를 이용하였다. 사각형 스택의 경우에는 중앙 상단에 1개의 수소 배출구를 설치하고, 원형 스택의 경우에는 산업용 스택과 유사하게 우측 상단에 있는 3개의 수소배출구가 더 큰 한 개의 수소배출구와 연결된 구조로 제작하여 실험하였다.

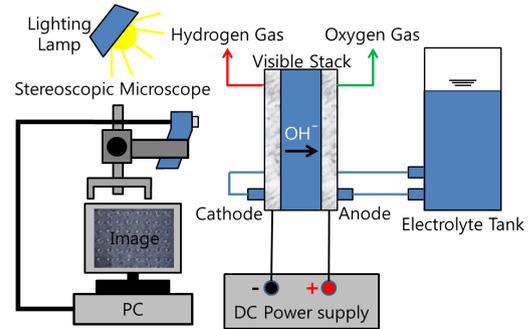


Fig. 5. The schematic diagram of experiment apparatus for visualization of the hydrogen bubble flow

또한, Fig. 4에서 알 수 있듯이, 전극 둘레에서 발생하는 미시적인 기포유동을 관찰하기 위하여, 수치해석용 모델인 Fig. 2와 근사한 크기의 수전해용 원형 전극 3 개를 수직 등 간격으로 배열한 Fig. 4와 같은 유동가시화 스택을 제작하여, 각각의 전극들에 균일한 전력을 공급하여 전극 둘레에서 수전해에 의하여 발생하는 수소기포의 거동을 관찰하는 유동가시화 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 유동가시화용 스택들을 이용하여 수소기포의 유동을 관찰하기 위한 실험장치의 구성을 나타내고 있다. Sometech사의 SV32 실체현미경 이용하여 수전해에 의한 스택 내부의 거시적인 기포거동과 전극 둘레의 미시적인 기포의 거동을 관찰하였다.

4. 결과 및 검토

Fig. 6은 사각형 수전해 스택에서 수전해 진행 과정에 대한 수치해석 결과들과 유동가시화 실험의 결과들을 비교하여 보여주고 있다. Fig. 6의 위쪽 그림은 수소배출구가 한 개인 사각형 수전해 스택의 수소배출구까지 전해질 수용액을 채운 상태의 2상유동에 대한 수치해석을 수행한 결과이다(본 논문의 수치해석 결과는 암청색에 가까운 수소체적비가 매우 낮은 전해질 수용액을, 암적색에 가까울수록 수소체적비가 매우 높은 수소기포를 나타냄). 수소기포가 상부로 부상하여 스택 출구부에 채워져 있는 전해질 수용액을 밀어내고 배출될 수 있는 부력이 형성될

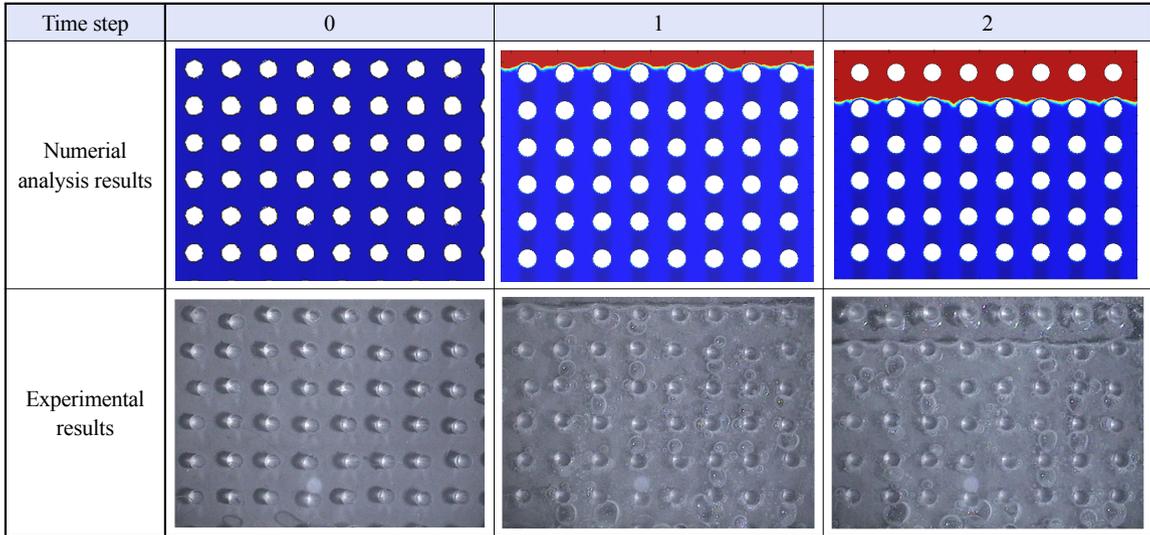
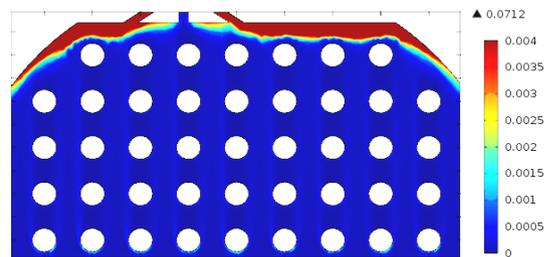


Fig. 6. Comparison between numerical analysis and experimental results on the square electrolysis stack

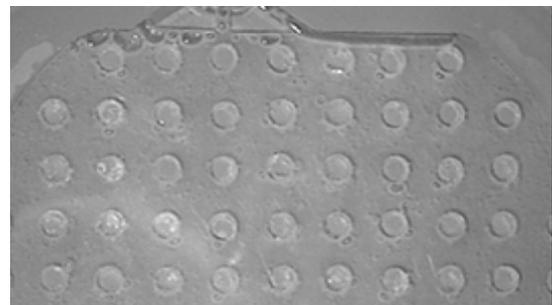
때까지 수소기포는 스택의 상부로부터 첫 번째 열의 전극들을 거쳐, 두 번째 열의 전극들 상단부까지 성장하고 있는 것으로 해석되었다. Fig. 6의 아래쪽 그림은 수치해석 모델과 근사한 조건으로 유동가시화 스택에서 수전해 실험을 수행한 결과이다. 유동가시화 실험에서 수소기포의 거동은 수전해 과정에 대한 수치해석으로부터 얻은 결과인 거시적인 기포의 거동과 매우 유사하게 수소기포가 스택의 상단부에서 크게 성장한다는 것을 알 수 있다.

한편, 전극들 주변에서 미시적인 수소기포의 거동에 대한 수치해석 결과는 상하로 배열된 스택들 사이의 수소기포의 밀도가 매우 낮다는 결과를 보이며, 유동가시화 실험의 결과는 일부 상하로 배열된 스택들 사이에서 크게 성장한 기포들이 관찰되고, 수치해석 결과와는 약간의 차이를 보이고 있다.

Fig. 7은 원형 수전해 스택에서, 수전해에 대한 수치해석 결과와 유동가시화 실험의 결과를 비교하여 나타내고 있다. Fig. 7의 위쪽 그림은 상단부에 한 개의 큰 수소 배출구에 연결된 3개의 수소배출구들의 중앙부 배출구 높이까지만 전해질 수용액을 채운 상태의 2상유동에 대한 수치해석을 수행한 결과이다. 상부로 유동하여 부상한 수소기포가 3개의 수소배출구들에 채워져 있는 전해질 수용액을 밀어내고 배출



(a) Numerial analysis result



(b) Experimental result

Fig. 7. Comparison between numerical analysis and experimental results on the circular electrolysis stack

할 정도까지 성장한 후에 배출되는 것으로 해석되었다. Fig. 7의 아래쪽 그림은 수치해석 모델과 근사한 조건으로 유동가시화 스택에서 수전해 실험을 수행한 결과이다. 수소기포의 거동은 수전해 과정에 대한 수치해석으로부터 얻은 결과인 거시적인 기포 거동

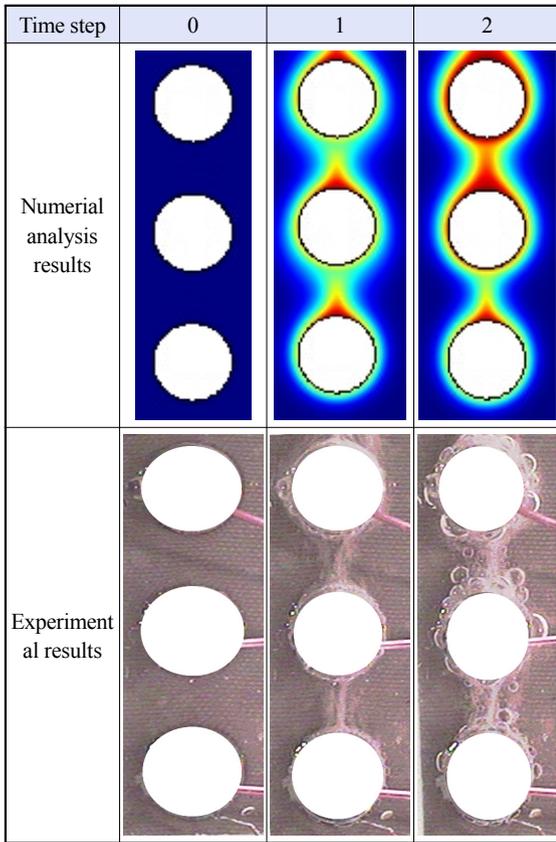


Fig. 8. Comparison between numerical analysis and experimental results on the bubble flow around electrodes

과 유사하게 수소기포가 스택의 상단부에서 일정한 크기로 성장한 후에 배출된다는 것을 알 수 있다.

또한 전극들 주변에서 미시적인 수소기포의 거동에 대한 수치해석은 상하로 배열된 스택들 사이의 수소기포의 밀도가 매우 낮다는 결과를 나타내고 있으나, 유동가시화 실험에서는 일부 상하로 배열된 스택들 사이에서 작은 크기의 기포들이 보여지고 있다. 이는 수치해석 결과와 작은 차이를 보이고 있으며 사각형 스택의 비교 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

그러나 상하로 배열된 전극들 사이의 수소기포의 밀도에 대한 수치해석 결과와 유동가시화 결과의 차이는 수전해가 불가능한 원형 전극들 주변에 대한 유동가시화 실험이기 때문으로 사료된다. 그러므로 수전해가 가능한 원형 전극의 주변에 대한 수치해석과 유동가시화 실험으로부터 구한 미시적인 수소기

포의 거동에 대한 결과들을 비교할 필요가 있다.

Fig. 8은 수전해가 가능한 3개의 원형 전극들을 수직으로 배치한 스택을 이용한 수전해 진행과정에서 미시적인 수소기포의 유동에 대한 수치해석 결과들과 유동가시화 실험의 결과들을 비교하여 보여주고 있다. Fig. 8의 위쪽 그림은 전해질 수용액속의 3개 전극 둘레에서 수전해에 의해 발생하는 수소기포의 거동에 관한 2상유동의 수치해석을 수행한 결과이다. 각각의 전극들에서 수소기포가 발생하여 전극 둘레를 따라서 유동한 후에 전극의 12시 방향 전후에서 이탈 부상하여 상단의 전극들로 이동을 하는 것으로 해석되었다. 상단의 전극 둘레에서는 자체 전극 둘레에서 생산된 기포들과 하단의 전극에서 공급되는 수소기포들로 인하여 전극 둘레에서 수소기포의 밀도가 점점 더 크게 증가하는 것으로 해석되었다. Fig. 8의 아래쪽 그림은 수치해석 모델과 근사한 조건에서 유동가시화 스택으로 수전해 실험을 수행한 결과이다. 전극 둘레에서 발생된 수소기포가 전극 둘레를 따라서 전극의 12시 방향 전후까지 유동한 후에 상단 전극의 6시 방향으로 공급된다. 하부 전극 둘레와 비교하여 상부 전극 둘레에서는 자체 전극에서 생산된 수소기포와 하단 전극에서 공급된 수소기포들로 인하여 수소기포의 밀도가 크게 증가한다는 것을 알 수 있으며, 전극 둘레에서 미시적인 수소기포의 거동은 수치해석으로부터 얻은 결과와 유사한 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 8의 time step 2의 전극들 주변에서 미시적인 수소기포의 거동에서 볼 수 있듯이, 유동가시화 실험에서 발생하는 전극 둘레의 거대한 수소기포의 성장은 수치해석 결과로는 알 수 없었으나, 유동가시화 실험을 통해 확인한 수소기포의 성장을 바탕으로, 수치해석에서도 전극 둘레의 수소기포 밀도가 증가할 경우 수소기포가 크게 성장할 할 수 있는 것을 추측할 수 있다. 아울러 적극둘레 등에 부착되고 성장하고 이탈하는 수소기포에 대한 적극의 기하학적 형상은 물론 표면저항기와 전기력 등의 다양한 영향에 연구가 필요할 것으로 생각할 수 있다.

이상과 같은 3종의 수전해 스택에 대한 수치해석

과 유동가시화 실험을 수행하여 얻은 수소기포의 유동에 대한 결과들로부터, 2상유동 수치해석을 이용하여 수전해 스택 내부에서 일어나는 거시적인 수소기포의 거동을 실험과 매우 유사하게 해석할 수 있다는 것을 확인하였다. 아울러 전극 둘레에서 미시적인 수소기포의 거동도 실험과 유사한 해석이 가능하나, 해석이 불가능한 전극둘레의 기포 성장은 수소기포의 밀도로부터 유추하여 판단할 수 있다는 것을 알았다.

유동가시화 실험과 수치해석 결과들이 유사하다는 사실은 2상유동 수치해석을 활용하여 수전해 스택에서 수소기포의 원활한 배출을 위한 전극 형상 및 유로 구조의 최적설계에 적용할 수 있으며, 전극의 둘레에서 발생하는 수소기포에 의한 수전해 효율의 감소²⁰⁾를 억제할 수 있다고 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 알카리 수전해 스택 내부 유로에서 거시적인 수소기포의 거동을 관찰하기 위한 2종의 수전해 스택뿐만 아니라 전극 둘레의 미시적인 수소기포의 거동을 관찰하기 위한 1종의 수전해 스택에 대한 수치해석과 유동가시화 실험을 수행하였다. 수치해석과 유동가시화 실험에서 얻은 결과들의 비교를 통하여 알카리 수전해 스택 내부에서 발생하는 수소기포의 거동에 관한 2상유동의 수치해석 결과에 대한 신뢰성을 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가시화 실험과 비교한 결과로부터 수치해석을 통한 스택 내부의 거시적인 수소기포의 유동을 2상유동 수치해석을 이용하여 근사하게 구현할 수 있다.
- 2) 전극 둘레에서 미시적인 수소기포들의 유동은 2상유동 수치해석을 이용하여 유사하게 구할 수 있다.
- 3) 전극 둘레에 부착하여 거대하게 성장하는 기포의 거동은 구할 수 없었으나, 전극 둘레의 수소기포의 밀도로부터 유추할 수 있다.
- 4) 2상유동 수치해석을 활용하여 수전해 스택에서 원활한 수소기포의 배출 및 수전해 효율의 개선을

위한의 전극 형상과 유로 구조의 최적화 설계가 가능하다고 판단된다.

후기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원으로 수행되었다.

References

1. P. R. Wilson and R. C. Bowman Jr, "Operation of a PEM fuel cell with LaNi_{4.8}Sn_{0.2} hydride beds", *J. Alloys and Compounds*, Vol. 446, 2007, pp. 676-680.
2. Y. Jung, S. Kim, K. Kim, S. Choi, T. Jang, and C. Hwang, "A study on the hydrogen supply for variation in output from a metal hydride canister", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 20, No. 3, 2009, pp. 218-223.
3. D. Park and Y. G. Jung, "Study on the reaction conditions for H₂ generation reactor with NaBH₄ and Load following ability for Fuel Cell application", 2013 3rd International Conference on Mechanical Industrial and Manufacturing Technology, 2013, pp. 676-680.
4. H. H. Jo, B. J. Jang, and J. Y. Songt, "A study on the channel design of bipolar plate of electrolytic cell by flow dynamic simulation in the two phase flow system", *J. of the Korean Oil Chermists' Soc.*, Vol. 27, No. 4, 2010, pp. 415-420.
5. H. H. Jo, S. H. Lee, B. J. Jang, and J. Y. Songt, "A study on the bipolar plate of electrolytic cell of hydrogen gas generation system by numerical system", *J. of the Korean Oil Chermists' Soc.*, Vol. 27, No. 1, 2010, pp. 61-69.
6. D. Park, K. Cha, H. Jo, and Y. Jung, "Study on Optimization of Operation in household Fuel Cell System", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 1, 2012, pp. 598-603.
7. D. Park, H. Lee, Y. Jung, B. Kim, and H. Choi, "The study on the combination of PEMFC stacks", *International Conference of Future Environment and Energy*, 2011, pp. 110-113.
8. C. M. Hwang, D. Park, and Y. Jung, "Effect of double porous layer on a polymer electrolyte Unitized Regenerative Fuel Cell", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 24, No. 4, 2013, pp. 320-325.
9. A. Kato, M. Masuda, A. Takahashi, T. Ioroi, M. Yamaki, and H. Ito, "Durability investigation of a PEM-type unitized reversible cell", *ECS Transactions*, Vol. 25, 2009, pp. 1271-1278.
10. C. M. Hwang, M. Ishida, H. Ito, T. Maeda, A. Nakano, A. Kato, and T. Yoshida, "Effect of titanium powder loading in

- gas diffusion layer of a polymer electrolyte unitized reversible fuel cell”, J. of Power Sources, Vol. 202, 2012, pp. 108-113.
11. Y. Jung, et al., “Hydrogen Energy”, A-JIN Press, 2005, pp. 13.
 12. D. H. Park, H. J. Lee, H. J. Ko, K. H. Kim, S. W. Kim, and Y. G. Jung, “A Study on the hydrogen flow at a separator”, KHNES, 2011, pp. 374-375.
 13. D. H. Park, H. J. Lee, K. H. Kim, and Y. G. Juan, “A study on the Bubble stream in the Separators”, KHNES, 2012, pp. 246-247.
 14. D. H. Park, J. M. Han, S. W. Kim, and Y. G. Jung, “Numerical Analysis on Bubble growth in the separator”, KHNES, 2012, pp. 244-245.
 15. Y. Jung, J. Han, and C. Hwang, “The bubble size Effect on the Numerical Analysis of the flow in the Separator of water electrolysis”, KHNES, 2013, pp. 208-210.
 16. Y. Jung and J. Han, “Study on the Hydrogen Production according the Flow patterns in Electrolysis”, KHNES, 2014, pp. 181-184.
 17. C. Ryu, J. Kim, D. Park, and Y. Jung, “A Study on the hydrogen flow at a separator”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 5, 2012, pp. 538-544.
 18. Y. Jung, “Study on the Behavior of Bubbles in Array Type Flow Channels”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 24, No. 1, 2013, pp. 84-90.
 19. Y. Jung, J. Han, C. Hwang, “The Comparison between Numerical Analysis and Experiment on the Flow in Electrolysis separator with Array type flow channels”, KHNES, 2013, pp. 238-240.
 20. S. Choi, J. Kim, J. Han, S. Yun, S. Kim, and Y. Jung, “A Study on Effect of the Shape of Electrodes in Alkaline Water Electrolysis”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 121-128.