

알카리 수전해에서 전극 형상의 영향에 관한 연구

최수광¹ · 김종수² · 한진목¹ · 윤성호³ · 김세웅³ · 정영관^{3,†}

¹금오공과대학교 대학원, ²한국기계연구원, ³금오공과대학교

A Study on Effect of the Shape of Electrodes in Alkaline Water Electrolysis

SOOKWANG CHOI¹, JONGSOO KIM², JIN MOOK HAN¹, SEONG-HO YUN³, SEWOONG KIM³,
YOUNGUAN JUNG^{3,†}

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

²Busan Technical Center of Automotive Parts, Korea Institute of Machinery & Materials, 48 Mieumsandan 5-ro, 41beon-gil, Gangseo-gu, Busan 46744, Korea

³Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

†Corresponding author :
jyg_kr@kumoh.ac.kr

Received 31 March, 2017
Revised 18 April, 2017
Accepted 30 April, 2017

Abstract >> For an investigation on the effect of the shape of electrodes in alkaline water electrolysis, two kinds of stack with circular and square electrode array are used to visualize both for behaviors of hydrogen bubble around the electrodes and for measurements of hydrogen production from these two stacks. The electrolytes for the hydrogen production experiment were applied for 20 wt%, 25 wt%, 30 wt% and 35 wt% of KOH alkaline aqueous solutions.

As a result, the adhesion length of bubbles attached around the square electrode in the visualization experiment was found to be 1.7 times longer compared with the attached around the circular electrode. In the hydrogen production experiments, the volume of hydrogen production of the stack by using circular electrode array was approximately 3% more than that of the stack with square electrode array. These observations may be caused by the effect of the bubbles attached to the around the electrodes obstructing mass transfer such as hydrogen exhaust and electrolyte supply.

Key words : Alkali(알카리), Electrolysis(전기분해), Hydrogen(수소), Bubble(기포), Behavior(거동), Electrode(전극), Shape(형상)

Nomenclature

H_2O	: water
H_2	: hydrogen
O_2	: oxygen
$NaOH$: sodium hydroxide
KOH	: potassium hydroxide
F_n	: net force
F_g	: force by gravity, weight
F_b	: force by buoyancy
F_e	: external force
F_a	: surface adhesion force
F_o	: obstruction force

Subscripts

n	: net
g	: gravity
b	: buoyancy
e	: external
a	: adhesion
o	: obstruction

1. 서 론

태양광발전이나 풍력발전에 이용되는 태양 에너지나 바람과 같은 재생에너지원들은 전력부하의 변동에 대응하는 에너지 공급의 안전성 결여와 그 에너지를 대량으로 장시간에 걸쳐 보관할 수 있는 저장성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

여러 가지 물질로부터 다양한 방법을 통하여 생산할 수 있는 수소는 저장성¹⁻³⁾뿐만 아니라 연료전지와 함께 에너지 공급의 안전성을 해결할 수 있다. 지구상에 대량으로 존재하는 물을 전기분해하는 수전해에 의해 생산된 수소^{4,5)}는 연료전지^{6,7)}를 통하여 물과 전기로 변환되는 빠른 가역성⁸⁻¹⁰⁾과 거대한 부존량을 가지고 있으므로, 에너지의 수급조절에 가장 적합한 중심 에너지원¹¹⁾으로 연구개발이 활발하

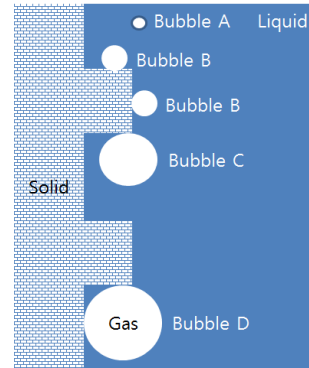


Fig. 1. The schematic diagram of the status of bubbles produced in the water electrolysis stack

게 진행되고 있다.

알카리 수용액을 전기분해하여 수소를 생산하는 알카리 수전해에서는 스택의 내부에 공급된 전기에 의해 양극과 음극 사이에 있는 알카리 수용액으로부터 전기화학반응에 의해 수소와 산소가 생산되며, 이 수소와 산소가 전극 밖으로 배출되는 과정에서, 전극의 둘레 표면에 미세한 수소기포가 발생된다. 많은 수소 기포들은 전극 둘레에 부착되어 일정한 크기의 부력을 갖는 기포의 크기로 성장한 후에 전극의 둘레 표면으로부터 박리되며, 전극들 사이의 유로에 채워져 있는 전해질 용액을 통과하여 수전해 스택의 상부로 이동하는 2상 유동(two phase flow)을 한다. 이와 같은 현상을 규명하기 위하여 수전해 스택의 내부에서 발생하는 수소와 산소의 기포 거동에 대한 수치해석^{4,5,12-17)}과 실험^{18,19)}을 통한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

전극 둘레 표면에서 생성되는 수소와 산소의 기포가 수전해 효율을 저하시키는 것으로 추론하고 있으나¹¹⁾, 발생된 기포의 부착으로 인하여 저하되는 수전해 효율의 구체적이고 정량적인 연구는 전무한 실정이다.

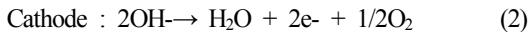
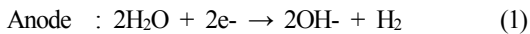
본 연구에서는 수전해의 효율을 저하시키는 것으로 추론되고 있는 수전해 전극 둘레에서 생성된 수소와 산소의 기포의 영향에 대한 연구의 일환으로, 기포 거동에 많은 차이를 보일 것으로 사료되는 원형과 사각형의 전극들이 일정한 간격으로 균일하게 나열되어 있는 유동가시화용 수전해 스택과 수

소생산량을 측정하기 위한 수전해 스택들을 제작하여 수소 기포가 수전해 효율에 미치는 영향과 알칼리 전해질의 농도가 기포 배출에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다.

2. 수전해 및 기포의 유동 이론

2.1 수전해 이론

대표적인 전기분해 방법인 알칼리 수전해는, 석면격막과 Ni 도금 탄소강 전극들을 배치하고, 직류 전기를 공급하여 NaOH 또는 KOH 수용액의 전해질에서 전기화학반응에 의하여, 음극에서 수소, 양극에서 산소를 발생시키며, 그 기본적인 원리는 다음과 같다.



수전해에 의해 전극표면과 전해질 수용액 중에서 발생하는 수소와 산소가 전극 주변의 전해질 내에서 기포를 형성하여 수전해 효율을 저하시키는 것으로 추론하고 있다.

2.2 기포의 유동 이론

수전해 전극에서 발생된 수소와 산소의 기체는 전해질 수용액 중에서 기포들이 된다. 스택의 고체 요소 안의 전해질 액체 분위기에서 발생하는 기체들은, Fig. 1의 기포의 상태 모식도에서와 같이, 기포 A/B/C/D의 4조건 중의 한 조건으로 스택 내부에 존재한다. 기포 A는 액체 중에서 깊이에 따라 압력이 증가하며 액체 속에서의 기포는 식 (3)과 같이 정미력(net force) F_n 을 받는다. 아르키메데스(Archimedes)의 원리에 따른 기포의 부력(buoyancy) F_b 는 기포에 작용하는 중력에 의한 힘 F_g 의 반대 방향으로 작용을 하며, 중력의 반대 방향으로 부상하는

힘이다.

$$F_n = F_g - F_b \quad (3)$$

액체 중의 수평 수직한 고체 표면 고체 표면의 상부에 부착된 기포 B는, 식 (4)와 같이, 중력과 중력의 반대 방향인 부력 그리고 고체 표면에 접촉되는 중력방향의 표면접착력(surface adhesion force) F_a 인 외력(external force) F_e 을 받고 있으며, 주변의 기포들과 합쳐져 성장을 하여 부력 F_b 의 크기가 기포에 작용하는 중력 F_g 와 표면접착력 F_a 의 합보다 커질 경우 고체 표면으로부터 분리되어 부상하게 된다.

$$F_e + F_g - F_b = 0 \quad (4)$$

$$F_e = F_a \quad (5)$$

액체 중의 돌출된 고체면의 하단부에 부착된 기포 C의 경우는, 식 (4)와 같이, 중력과 부력 그리고 외력 F_e 이 작용하며, 이 경우 외력 F_e 는 식 (6)과 같이 고체에 의한 저항력(obstruction force) F_o 이며 중력방향으로 작용하고, 다른 기포들과 합쳐 성장하여 부력 F_b 의 크기가 기포에 작용하는 중력 F_g 와 저항력 F_o 의 합보다 커질 경우 고체 돌출부를 벗어나 상부로 부상한다.

$$F_e = F_o \quad (6)$$

액체 중의 돌출된 고체의 하단부와 수직한 고체 표면에 부착된 기포 D의 경우도, 식 (4)와 같이, 중력과 부력 그리고 외력 F_e 이 작용을 하며, 이 경우 외력 F_e 는 식 (7)과 같이 중력의 방향으로 작용을 하는 표면접착력 F_a 와 고체에 의한 저항력 F_o 의 합으로 구성되며, 다른 기포들과 합쳐 성장하여 충분한 크기의 부력 F_b 가 되어 기포에 작용하는 중력 F_g 과 표면접착력 F_a 그리고 저항력 F_o 의 합보다 커질 경우 고체와 표면과 돌출부를 벗어나 상부로 부상한다.

$$F_e = F_a + F_o \quad (7)$$

수전해 스택의 내부 수용액에서 발생하는 수소와 산소의 기포는 전극의 돌레의 표면과 분리막에 부착되어 중력과 접착력 그리고 저항력의 합보다 큰 부력이 얻어질 때까지 성장을 한 후에 이탈을 하므로 수전해에 영향을 미칠 것으로 생각할 수 있다.

3. 실험 방법

수전해 스택에서 생산된 수소와 산소의 기포가 수전해의 효율에 미치는 영향을 연구하기 위하여 전극에서 발생된 기포의 거동에 관한 실험연구^{18,19)}가 보고된 연속적인 구배변화의 기하학적 형상인 원형 전극¹⁹⁾과 함께 기포 C와 기포 D의 조건이 가장 적합한 수평구조의 기하학적 구조인 정사각형 전극 형상을 선택하였으며, 이 전극 형상들을 적용한 유동가시화 스택과 수소 생산용 스택을 제작하여 실험을 수행하였다.

수전해 스택 내부의 전극에서 생성된 기포의 거동을 관찰하기 위하여 Fig. 2의 (a)과 같은 원형 전극과 정사각형 전극이 동일한 면적과 전극 간의 간

격의 배열이 되도록 유동가시화용 스택을 제작하여, 전극 돌레에서의 기포의 거동을 비교하기 위한 실험을 수행하였다. 수소 생산용 수전해 스택은 Fig. 2의 (b)와 같으며, Fig. 3에서 보여주는 것처럼 스택 내부의 전극은 탄소강 소재이며, 동일한 면적과 전극들 간격이 되도록 원형과 정사각형의 전극 배열을 위하여 정밀 기계가공을 한 후에 Ni 도금 처리를 하였다.

Fig. 4는 본 연구의 원형과 정사각형 전극 돌레에서 수전해에 의해 생성된 수소 기포의 거동을 관찰하기 위한 유동가시화 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. 전극 돌레에서 기포의 거동은 10배율과 640 × 480화소 수의 분해능으로 구성된 실체현미경을 통하여 관찰하였다.

전극 돌레에서 기포가 수전해에 미치는 영향을 연구하기 위하여, 원형과 정사각형 전극 배열의 스택을 이용하여, Fig. 5와 같은 실험 장치를 구성하여 수소 생산량을 측정하였다.

본 연구에서 전극 돌레에서의 수소 기포의 거동을 관찰하기 위해 유동가시화 스택에 적용한 알카리 전해질에는 농도 30 wt%의 KOH 수용액을 사용하였다. 또한, 수소 생산량 측정을 위한 실험에 사용된 알카리 전해질로는, 유동가시화 스택에서와

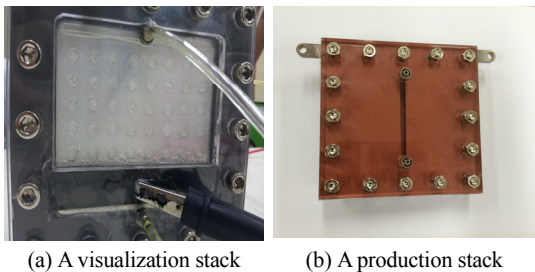


Fig. 2. Photographs of the stacks for experiments

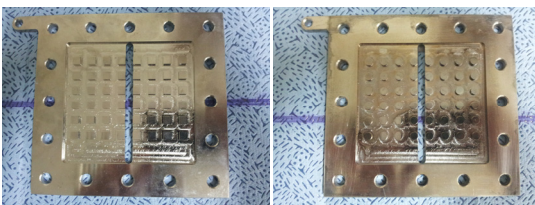


Fig. 3. Photographs of the circular and square electrodes for measurements of the hydrogen production

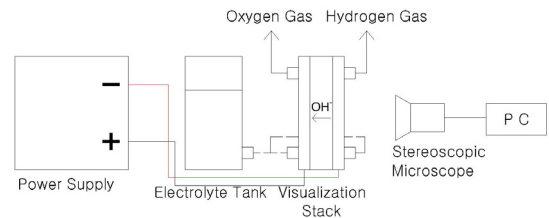


Fig. 4. The schematic diagram of the hydrogen flow visualization experiment system

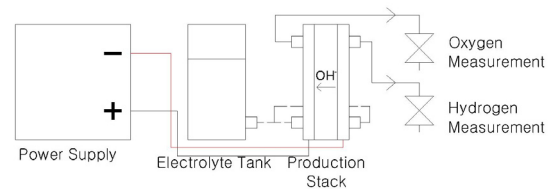


Fig. 5. The schematic diagram of the hydrogen product experiment system

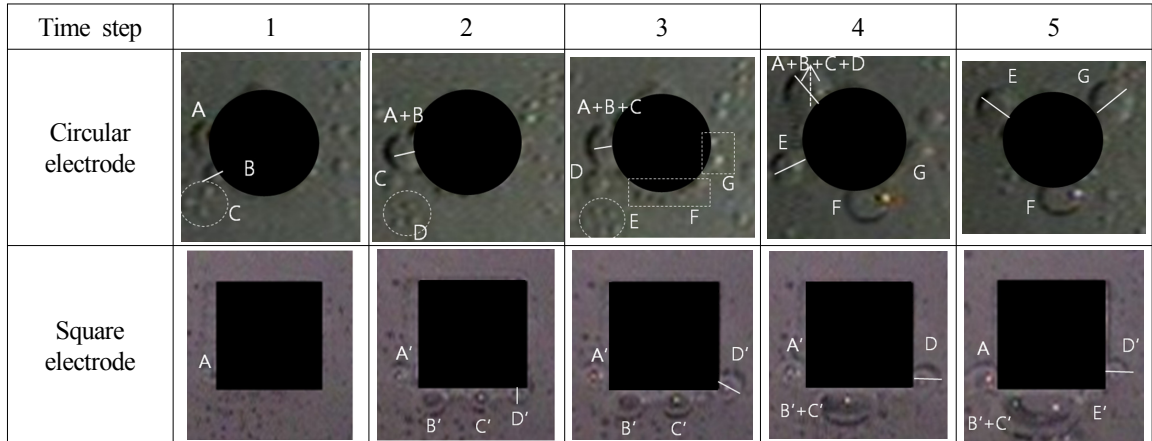


Fig. 6. Photographs of comparisons with behavior of bubbles around circular and square electrodes

같이 KOH 수용액을 사용하였으며, 20~35 wt%의 전해질 수용액의 농도 구간을 5 wt% 간격으로 제조하여 사용하였으며, 전원 공급 장치로부터 공급한 전압과 전류는 각각 2 V, 0.1 A를 15분 동안 일정하게 공급하여 생산된 수소의 생산량을 측정하였다.

4. 실험 결과 및 검토

Fig. 6은 유동가시화용 수전해 스택을 이용하여 원형과 정사각형의 전극 둘레에서 기포의 거동을 관찰한 대표적인 결과를 보여주고 있다. 원형 전극의 경우 수소 기포가 성장(A+B+C+D, E, F, G)을 하면서 연속적인 기울기를 갖는 전극 둘레를 따라 전극의 하단부에서 상단부로 이동을 한 후에 스택의 상부로 부상을 한다.

그러나 정사각형의 전극의 경우에는, 상부와 좌우 수직한 전극 둘레에서는 전극 둘레에 부착되어 성장하는 기포(A')가 적고 원형의 전극보다 기포의 배출이 원활하지만, 하단부 수평면에서는 전극의 기하학적 구조로 인한 저항력 F_0 의 영향으로 인하여 기포가 매우 크게 성장 하며(B'+C'), Fig. 7에서 볼 수 있는 것과 같이 하단부 수평 전극 둘레 길이 이상의 기포 크기로 성장하는 것은 물론 원형 전극의 둘레의 기포들보다 전극 둘레에 부착되어 있는 시간도 긴 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서 볼 수가 있는 것과 같이, 원형 전극의

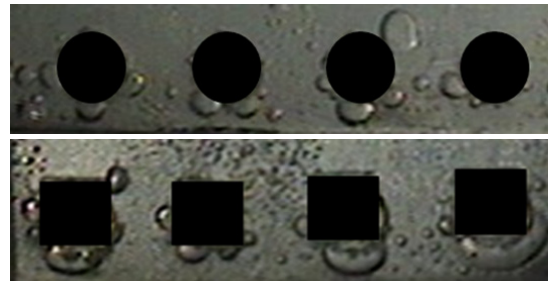


Fig. 7. Photographs of comparisons with bubbles grown around circular and square electrodes

경우에는 전극 둘레에 부착된 기포의 전극 둘레길이에 대한 점유비율이 27.7%, 25.6%, 34.1%, 18%로 평균 26.3% 정도이다. 그러나 정사각형 전극에서는 전극 둘레에 부착된 기포의 전극 둘레길이에 점유율이 55%, 36.2%, 47.4%, 41%로 평균 44.9%로 원형의 전극과 비교하여 1.7배 넓게 전극 둘레에 부착되어 기포의 배출이 원활하게 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다. 전극의 기하학적 형상에 따른 기포에 작용하는 저항력 F_0 의 차이가 전극의 둘레에 부착되어 성장하는 기포의 성장에 커다란 영향을 준다는 것을 확인할 수 있으며, 부착되어 있는 시간에도 큰 영향을 준다.

전극 둘레의 수소 기포의 부착에 차이가 있는 원형과 정사각형의 전극들이 배열된 수소 생산용 스택을 이용하여, KOH 수용액의 농도에 따라 15분 동안 측정한 수소 생산량은 Fig. 8과 같다. 모든 KOH 전해질 수용액의 농도에서 정사각형 전극의

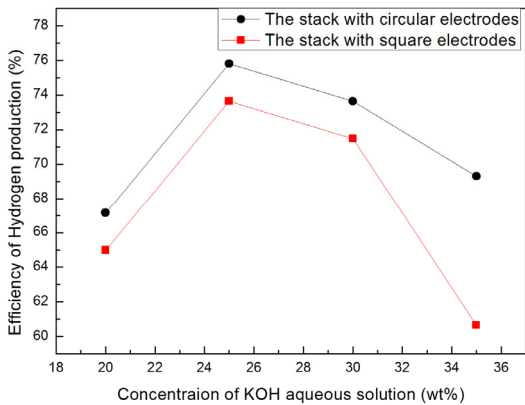


Fig. 8. The hydrogen production with respect to electrode shapes and KOH concentrations

Table 1. The efficiency of hydrogen production with respect to hydrogen shapes and concentrations of the KOH aqueous solution

Concentration of KOH aqueous solution (wt%)	Efficiency of Hydrogen production (%)	
	The stack with circular electrodes	The stack with square electrodes
20	67.1	65.0
25	75.8	73.6
30	73.6	71.5
35	69.3	60.6

스택보다 원형 전극의 스택에서 수소 생산이 많은 것을 알 수 있으며, 전극의 형상에 따른 수소 기포 형성이 수소 생산량에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 전해질의 농도가 20 wt%에서 25 wt%로 증가할 경우에 수소 생산량이 원형과 정사각형의 전극의 스택에서 모두 0.9 mL 증가하여 각각 12.9%와 13.3%의 수소의 생산율이 증가하였다. 그러나 전해질 수용액의 농도가 25 wt%일 경우의 원형과 사각형 전극의 스택에서 각각 7.92 mL와 7.69 mL의 최고 수소 생산량을 나타내고, 전해질 농도가 30 wt%인 경우에는 원형과 사각형 전극의 스택에서 모두 0.23 mL의 수소 생산량의 감소로 각각 2.8%와 2.9%의 수소 생산을 감소를 보였다. 또한, 전해질 농도가 35 wt%인 경우에는 원형과 사각형 전극의 스택에서 각각 0.68 mL와 1.36 mL의 수소 생산량의 감소로 수소 생산율이 각각 8.6%와 17.6%

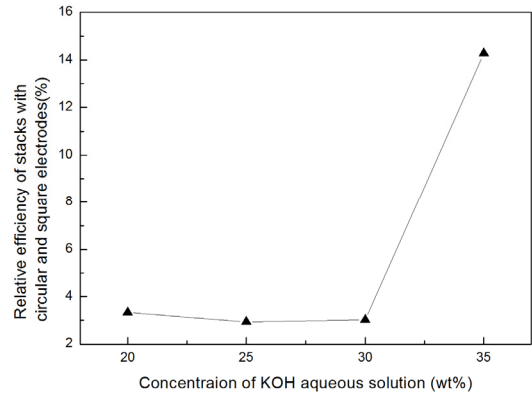


Fig. 9. The relative efficiency of the hydrogen production between stacks with circular and square electrodes with respect to KOH concentrations

의 큰 폭으로 떨어졌다. 특히 원형 전극의 스택보다 정사각형 전극의 수소 생산량 감소가 더 크게 나타나, 전극 둘레에 부착된 수소 기포가 수전해에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

Table 1은 KOH 전해질 수용액의 농도별 원형과 정사각형 전극들을 갖는 수전해 스택의 수전해 효율을 나타내고 있다. 정사각형 전극과 비교하여 원형 전극 스택의 수전해 효율이 2.1~8.7% 높다는 것을 알 수 있으며, 전극의 기하학적 형상의 차이로 인한 전극 둘레의 수소 기포들이 수전해 효율에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 또한 원형과 정사각형 전극의 스택의 수전해 효율은 전해질 농도 25 wt%에서 각각 75.8와 73.6%로 두 스택 모두 최고의 수전해 효율을 나타내었다. 그러나 전해질 농도 30 wt%에서는 모두 약 2%의 수전해 효율 감소를, 전해질 농도 35 wt%에서는 각각 6.5%와 13%의 수전해 효율 감소를 보였으며, 정사각형 전극에서 수전해 효율이 더 큰 폭으로 감소하였다.

Fig 9는 정사각형 전극의 스택과 비교한 원형 전극의 스택의 상대 수소 생산 효율을 나타내고 있다. 전해질 농도가 20~30 wt% 구간에서 원형 전극의 스택이 정사각형 전극의 스택보다 3% 정도의 수소 생산 효율이 높았으며, 특히 전해질 농도 35 wt%에서는 14.3%로 크게 증가하였다. 따라서 전해질의 농도 증가로 인한 점도의 영향이 전극의 기하학적 형

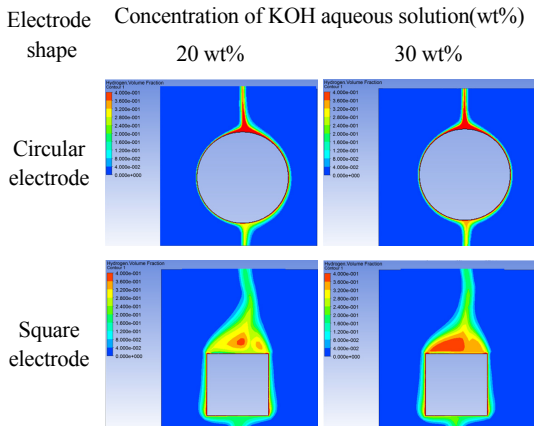


Fig. 10. The results of numerical analyses on the bubble flow around circular and square electrodes depending on viscosity

상에 따라 수소 기포의 거동에 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다.

전해질의 농도는 전극 둘레에서 생성되는 수소 기포의 배출에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 10은 전해질 농도 20 wt%와 30 wt%의 액체 중의 원형과 정사각형 전극 둘레에서 수소 기포의 2상 유동(two phase)을 상용 유동 수치해석 프로그램을 이용하여 해석한 결과이다. 전해질의 농도가 20 wt%에서 30 wt%로 높아지면, 원형 전극의 상단부와 하단부에서 수소기포의 밀도가 약간 증가하며, 사각형 전극의 경우에는 하단부의 밀도는 약간 증가하지만 상단부의 밀도는 비교적 큰 폭으로 증가한다. 이것은 전해질의 농도 증가로 인한 점도의 증가가 전극으로부터 생성된 수소 기포의 원활한 배출을 방해하기 때문에 나타나는 현상으로 판단할 수 있다.

이상의 결과들로부터, 전극 주변으로부터 수소 기포의 배출이 원활하지 않은 정사각형 전극의 스택에서 수소 생산 효율이 더 저하된다는 것을 알 수 있다. 또한, 전해질 농도의 증가로 인한 전해질의 점도 증가가 전극 둘레에서 생성되는 수소 기포의 배출을 억제하고, 수소 기포 배출이 원활하지 못한 기하학적 구조의 전극에 더 큰 영향을 미친다는 것을 알 수가 있다. 그러므로 전해질의 농도가 크게 증가할 경우 전해질의 점도가 증가하여 수소 기포의 배출을 지연시키며, 전극 둘레에 부착되어 있는

수소 기포는 전극으로 전해질의 공급과 전극으로부터 수소 배출 등의 물질전달을 방해하므로, 전극에서 물질전달이 줄어들게 되어 수전해 효율이 감소하는 것으로 생각할 수 있다.

따라서 수전해 스택의 설계에서는 수소 배출이 원활한 전극의 기하학적 형상과 함께 전해질의 농도에 대한 최적화가 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 알카리 수전해 스택 내부의 전극 둘레에서 생성된 수소와 산소의 기포가 수전해의 효율에 미치는 영향에 대한 연구의 일환으로, 기포의 거동이 크게 차이가 나는 원형과 사각형의 전극들이 일정한 간격으로 균일하게 나열되어 있는 유동가시화용 스택과 수소생산용 스택을 제작하여 수전해 효율에 미치는 수소 기포의 영향과 KOH 알카리 전해질의 농도의 영향에 관한 연구를 수행하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가시화 실험을 통해, 생성된 수소 기포의 정사각형 전극의 둘레 길이 점유율이 평균 44.9%로 원형 전극에서 평균 26.3%보다 18.6% 높았으며, 수소 기포의 배출이 전극의 기하학적 형상에 영향을 받는다.

2) 전극 둘레에 부착된 기포의 길이 비가 18.6% 많은 정사각형 전극의 스택에서 원형 전극의 스택보다 3%의 수소 생산 효율과 2% 이상의 수전해 효율이 감소하였으며, 이는 전극 둘레에 부착된 기포가 물질전달을 방해하는 것으로 생각할 수 있다.

3) KOH 전해질 수용액의 농도가 30 wt% 이상 높아지면 전해질의 점도 증가가 수소 기포의 유동 및 배출을 지연시켜 수전해 효율을 저하시키며, 특히 35 wt%에서는 수전해 효율이 크게 감소하는 것은 물론 원형 전극보다 정사각형 전극의 효율에 더 큰 영향을 미친다.

4) 수소 기포의 배출에 영향을 미치는 전극의 형상과 전해질의 농도가 수소의 생산 효율에 큰 영향을 미친다.

후 기

이 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 지원된 논문입니다.

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 Internatinal Conference on Mechanical Industrial and Manufacturing Technologe, 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", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 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", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 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", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 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", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 2013, pp. 208-210.
16. Y. Jung, J. Han, and C. Hwang, "The Comparison between Numerical Analysis and Experiment on the Flow in Electrolysis separator with Array type flow channels", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 2013, pp. 238-240.
17. Y. Jung and J. Han, "Study on the Hydrogen Production according the Flow patterns in Electrolysis", *Korean Hydrogen and New Energy Society*, 2015, pp. 181-184.
18. 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.
19. 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.