

수전해 시스템 성능 향상을 위한 능동 이온수송 기술 연구

김현중¹ · 귀하오¹ · 김상영^{2†}

¹국립군산대학교 일반대학원 기계공학과, ²국립군산대학교 기계공학부

A Study on Active Ion Transport Technology to Improve Water Electrolysis System Performance

HYEON-JUNG KIM¹, HAO GUO¹, SANG-YOUNG KIM^{2†}

¹Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University General Graduate School, 558 Daehak-ro, Gunsan 54150, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Gunsan 54150, Korea

[†]Corresponding author :

sangyoungkim@kunsan.ac.kr

Received 2 November, 2022

Revised 17 January, 2023

Accepted 2 March, 2023

Abstract >> In this study, rotary magnet holder (RMH) was manufactured to analyze the ion transport effect according to the rotating magnetic field for the hydrogen production efficiency by alkaline water electrolyte. In the experiment, the voltage signal according to the magnet arrangement inside the RMH, the rotation speed, and the rotation time was measured using the voltage measurement module. As a result of the voltage signal measurement experiment, the average potential difference increased as the rotation speed of the RMH increased. Through the results of the voltage signal measurement experiment, the most efficient magnet arrangement (case 2) was applied to the RMH to conduct a water electrolysis experiment. A 20% NaOH aqueous solution was filled in the electrolytic cell, and a direct current 2 V constant voltage was applied to measure the current value according to the RMH rotation to compare the hydrogen generation amount. When rotating at 100 RPM, the hydrogen production efficiency increased by 8.06% compared to when not rotating. Considering the area exceeding +25 mA, which was not measured at the beginning of the experiment, an increase in hydrogen production of about 10% or more can be expected.

Key words : Water electrolysis(수전해), Hydrogen(수소), Magnetic field(자기장), Ion transportaion(이온 수송), Alkaline water electrolysis(알칼리 수전해)

1. 서론

수소는 지구의 풍부한 물을 이용하여 얻을 수 있어 자원의 고갈이 없고 재생 가능한 청정에너지원으로

로, 탄소중립(net-zero) 사회로 나아가기 위한 미래의 에너지원으로 인식되고 있다. 이러한 수소는 저장성, 안정성 및 효율성의 확보가 가장 중요한 요소이며¹⁻⁴⁾, 현재 자동차, 철도, 선박 등 수송 분야뿐만 아니라 제

약, 석유화학 등의 각종 화학공정을 위한 에너지원 등 광범위한 분야로 확대되고 있다^{5,6)}.

수소생산 기술 중에서, 수전해 기술은 전기에너지를 물에 투입해 수소 기체를 생산하는 방식이며, 신뢰성이 높고 고순도의 수소를 생산하는 가장 효율적이고 실용적인 방법으로 알려져 있다. 이러한 수전해를 이용한 수소생산 방식은 간편할 뿐만 아니라 에너지의 저장 및 수송이 용이하기 때문에 석유, 천연가스와 같은 화석연료로 인한 환경 문제에 대응할 수 있는 차세대 신재생에너지의 저장 기술로 주목받고 있다^{7,8)}.

수전해 기술은 크게 작동 온도, 전해질 및 막 유형에 따라 알칼리수전해(AWE), 고분자전해질막수전해(PEM), 음이온교환막수전해(AEMWE)로 구분된다⁹⁾.

AWE는 현재 전 세계적으로 상업화된 기술이며 설비 투자 비용이 낮다는 장점이 있다. 하지만, 알칼리 전해질의 특성상 전류 밀도가 400 mA/cm²로 제한되어 있으며, 낮은 작동 압력 및 다른 수전해 기술에 비하여 낮은 에너지 효율이 단점이다.

AEMWE는 음이온 교환막(AEM)을 사용하는 수전해 기술로서 PEM과 AWE의 장점을 모두 갖고 있는 기술이다. AEMWE는 설비 투자 비용이 낮고, 높은 에너지 효율을 가지고 있어서 수전해 분야에서 차세대 기술로 주목받고 있으며, 현재 AEM 및 촉매 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

PEM은 고체 고분자 전해질막을 이용한 수전해 기술이며, 최근 재생에너지와 결합된 녹색 수소생산 기술로 주목받고 있다. PEM은 재생에너지와 결합하기 위한 빠른 동적 응답, 높은 압력에서 작동할 수 있는 능력, 높은 작동 밀도 등이 장점이 있으며, 현재 초고압 작동과 고용량 PEM에 관한 연구개발이 진행되고 있다. 하지만, 높은 비용과 내구성의 문제로 인해 대규모 설비 설치가 어렵다는 단점이 있다¹⁰⁻¹²⁾.

본 연구에서는 이온화 과정을 통해 음이온 및 양이온으로 분리된 물질들을 자기장을 이용하여 서로 분리하거나 한쪽 방향으로 이동시키는 능동 이온수송 기술을 개발하고, 이를 수전해 시스템에 적용하여 효율을 향상시키고자 한다.

2. 실험

2.1 수전해 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 수전해 실험장치 개념도를 나타낸 것이다. Fig. 1에 보이는 바와 같이 실험장치는 6개의 파이프로 연결된 2개의 반응수조와 내부에 전기를 공급하여 수전해 반응을 일으키는 금속전극, 6개의 파이프의 내부와 외부에 장착되어 전해질에 자기장을 부여하는 rotary magnet holder (RMH), 기체를 포집할 수 있는 기체포집봉투(polyster aluminim bag)로 구성되어 있으며, 반응수조 사이에 있는 6개의 파이프를 통해 양쪽의 반응수조를 물리적으로 연결하여 이온수송이 가능하도록 하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 RMH는 내부 RMH와 외부 RMH로 구성되며, 내부 RMH는 파이프 쪽에는 S극을 배치하고 외부 RMH의 파이프 쪽에는 N극을 배치하였다. 내부 RMH와 외부 RMH는 같은 속도로 회전하며 파이프에 자기장을 부여하였다.

2.2 RMH 설계 및 제작

회전 시 발생하는 자력 및 자기장에 따른 이온수송 효과를 확인하기 위해서 RMH를 설계 및 제작하

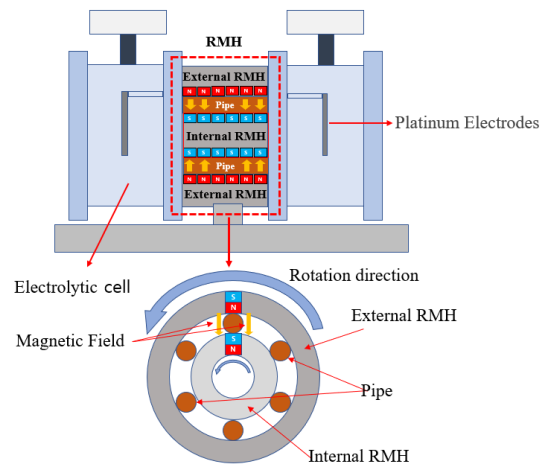


Fig. 1. Scheme of test equipment

였다. RMH의 재질은 3D 프린터(μ Print SE, Stratasys Ltd. Rehovot, State of Israel)를 이용하였으며 acrylonitrile butadiene styrene 재질의 RMH를 제작하였다. Fig. 2와 같이 RMH는 자기장을 형성하기 위한 내부 RMH와 외부 RMH로 구성되어 있다.

내부 RMH와 외부 RMH는 자기장의 힘을 받는 이온의 수송을 고려하여 최대 156개의 자석이 각각 원주 방향으로 15° 간격으로 배치될 수 있도록 설계되었으며, 각각 7열, 6열의 자석이 지그재그 패턴으로 배치될 수 있도록 설계하였다. RMH에 평균 자력 약 4,500 G (지름 10 mm, 길이 15 mm)의 원통형 네오디뮴 자석을 배치하였으며, 외부 RMH는 총 4피스로, 조립식으로 제작되었다.

2.3 회전 자력에 의한 이온 수송 방향

Fig. 3은 자석의 배치에 따른 이온 수송 방향의 개념도를 나타낸 것이다. RMH 회전 시 RMH 내부 자석의 배치를 통하여 이온의 수송 방향을 결정할 수 있다. 플레밍의 오른손 법칙에 따라 자기장의 방향과 전류가 흐르는 방향을 알 때 힘의 방향을 결정할 수 있으며, RMH가 회전하면서 배관이 움직일 때 양이온과 음이온은 서로 반대 방향으로 이동하는 힘을 받게 된다. 따라서 자기장에 따른 이온의 수송을 고려하여 Fig. 3과 같이 자석을 나선형으로 배치하였

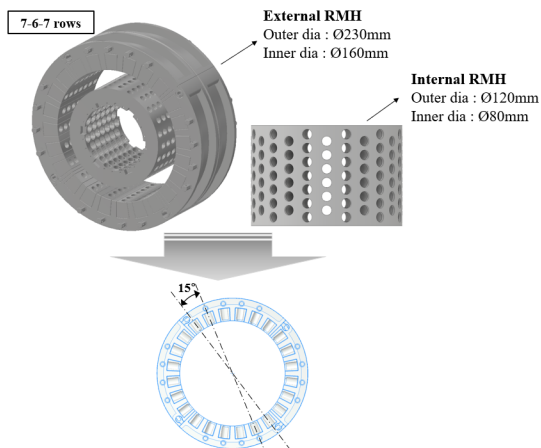


Fig. 2. Rotary magnet holder design

다. Fig. 3(a)와 같이 자석의 배치를 오른쪽 나선 방향으로 배치할 경우, RMH 회전 시 플레밍의 오른손 법칙에 의해 음이온보다 양이온이 배관을 통해 반응수조로 더 많이 수송될 것으로 판단된다.

마찬가지로, Fig. 3(b)와 같이 자석의 배치를 왼쪽 나선 방향으로 배치할 경우, 양이온보다 음이온이 더 많이 수송될 것으로 판단된다. 따라서 반응수조에 전압을 인가 후 RMH를 회전시켜 음극에서 전압신호를 측정할 경우, 이온의 수송으로 인한 전위차 상승이 예상되며, 이러한 결과를 통하여 수전해 시 이온의 수송을 가속화하여 효율을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

2.4 전위차 측정 실험

자석의 배치와 RMH의 회전에 따른 이온수송효과를 확인하기 위해 양쪽 반응수조에 NaOH 20% 전해액을 가득 채우고 백금 코팅된 티타늄 메쉬(Mesh) 전극을 넣은 후, 전압측정모듈(cDAQ-9178, NI-9205, 16 bit, National Instrument INC., Austin, TX, USA)을 이용하여 RMH의 회전속도 및 회전시간에 따른 전압신호를 측정하였다. 실험 수행 시 전압신호 측정은 약 10분(600초) 동안 실시하였으며, 초당 5,000개

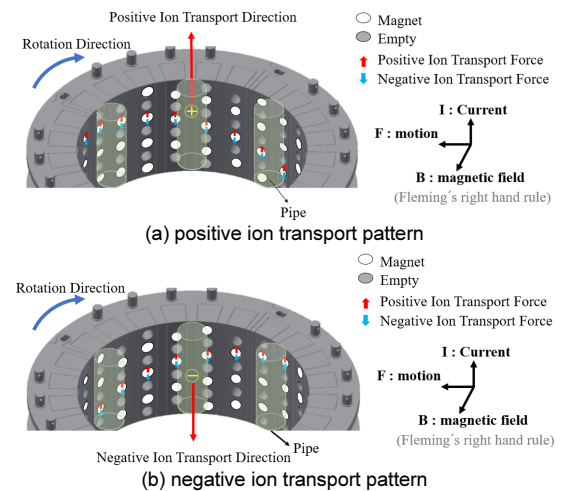


Fig. 3. Scheme of ion transport direction by rotating magnetic force

의 전위차 데이터를 획득하여 전압신호의 특성을 관찰하였다. 이를 비교하기 위하여 직전 25,000개의 데이터 평균을 표시한 추세선(평균전위차, fitting data)을 작성하여 비교 분석하였다. 이온수송속도와 측정 전압을 분석하기 위해 RMH 내부의 자석 배치와 회

전속도를 실험 변수로 선정하여 총 6번의 실험을 수행하였다. Fig. 4는 RMH 내부의 case별 자석의 배치 및 패턴을 나타낸 것이다. Fig. 3의 이온 수송 방향 개념도에서 알 수 있듯이, Fig. 4(a)는 자석의 배치가 오른쪽 나선 방향으로 양이온 수송 방향을 나타내며, RMH 내부에 배치된 자석과 배치되지 않은 곳의 간격이 1열 정도 떨어져 있어서 이를 OX 패턴으로 나타내었다. Fig. 4(b)의 경우, 자석의 배치가 왼쪽 나선 방향으로 음이온 수송 방향을 나타내며, OX 패턴이다. Fig. 4(c)의 경우, Fig. 4(b)와 마찬가지로 자석의 배치가 왼쪽 나선 방향으로 음이온 수송 방향을 나타낸다. 또한 자력의 세기에 따른 이온 수송 효과를 확인하기 위하여 Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)와 다르게 자석 사이의 간격을 2열로 배치하여 이를 OXX 패턴으로 나타내었다.

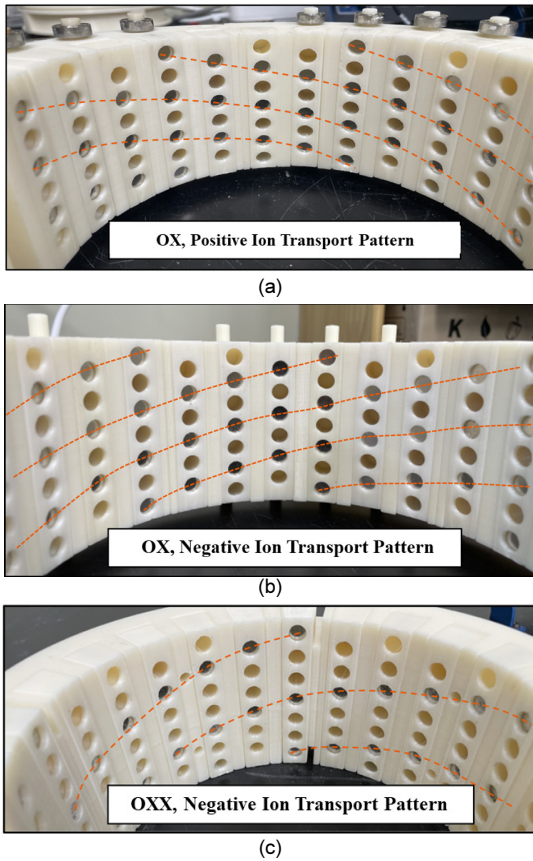


Fig. 4. Arrangement of magnet (a) case 1 (b) case 2 (c) case3

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 구간별 전압 신호 기울기 측정

각 실험에서 데이터 분석을 위해 평균전위차의 상승률을 구간별(A 구간: 0-200초, B 구간: 200-400초, C 구간: 400-600초)로 표시하여 실험 조건과 함께 Table 1에 나타내었다.

3.2 전압 신호 측정 분석

Fig. 5와 같이 case 1의 실험에서 75 RPM으로 실험

Table 1. Result of slope measurement by section

Division	Magnet Pattern		RPM	Slope by section ($\times 10^{-4}$ mV/sec)		
	Magnet Arrangement	Transport ion		Section A	Section B	Section C
Case 1	OX	Positive ion	75	1.10	5.54	7.57
			100	1.40	13.70	6.18
Case 2	OX	Negative ion	75	2.17	5.19	6.98
			100	4.04	4.67	6.60
Case 3	OXX	Negative ion	75	1.77	1.42	0.72
			100	4.32	0.53	4.19

험 수행 결과, 평균전위차가 A 구간(0-200초)에서는 거의 상승하지 않다가 B와 C 구간(200-600초)에서는 일정하게 상승하는 형태의 특성을 보였다. 100 RPM의 회전속도로 실험한 결과, A 및 B 구간에서는 75 RPM의 경우와 유사한 경향을 보였으나, C 구간(400-600초)에서는 상승 후 수렴하는 특성을 보였다. 시험 시작점과 비교하여 75 RPM의 경우에는 평균전위차가 약 0.28 mV 상승하였으며, 100 RPM은 평균전위차가 약 0.43 mV 상승하였다. 75 RPM으로 600초보다 긴 시간 동안 실험을 수행할 경우, 100 RPM과 유사한 경향의 평균전위차가 발생할 것으로 예상된다. Table 1에 나타난 것과 같이 100 RPM의 경우, B 구간의 평균전위차 상승율이 75 RPM에 비해 약 2.5배 정도 컸으며, 이는 RMH의 회전속도에 따른 결과로 판단된다.

Fig. 6과 같이 75 RPM 및 100 RPM 모두 실험이

진행될수록 평균전위차는 지속적으로 상승하였다. A 구간보다 B 구간에서 평균전위차 상승률이 소폭 상승하는 것으로 나타났으며, C 구간에서도 B 구간보다 평균전위차 상승률이 상승하는 것으로 나타났다. 시험 시작점과 비교하여 75 RPM의 경우에는 평균전위차가 약 0.29 mV 상승하였으며, 100 RPM의 경우에는 평균전위차가 약 0.29 mV로 75 RPM과 유사했다. Table 1에 나타난 것과 같이 A 구간에서는 100 RPM의 경우의 평균전위차 상승률이 75 RPM보다 컸으며, B 및 C 구간은 거의 유사한 것으로 나타났다.

Fig. 7과 같이 75 RPM의 경우, B 및 C 구간 모두 평균전위차가 매우 천천히 상승하는 특성을 보여주었다. 100 RPM의 경우, A 구간에서 소폭 상승, B 구간에서 수렴하는 특성을 보였다. 그러나 C 구간에서는 평균전위차가 정체 후 다시 상승하는 특성을 보였다. 75 RPM의 경우, 평균전위차가 약 0.07 mV 상

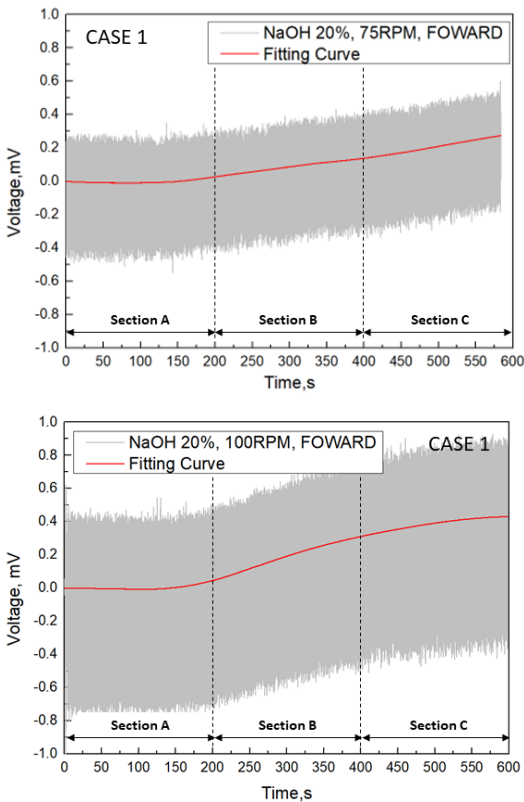


Fig. 5. Result of case 1

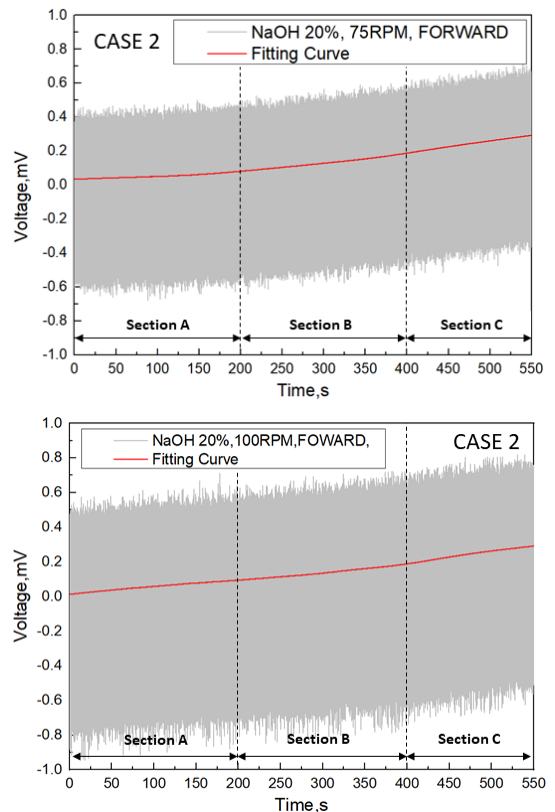


Fig. 6. Result of case 2

승하였으며, 100 RPM은 평균전위차가 약 0.18 mV 상승하였다. Table 1에서 나타낸 바와 같이 전체적으로 75 RPM보다 100 RPM의 평균전위차 상승률이 컸으며, 이는 RMH의 회전속도에 비례하여 증가하는 것으로 판단된다. Case 3의 경우, 회전속도를 달리하였을 때 case 1 및 case 2에 비해 평균전위차가 상대적으로 낮게 나타났다. 이는 자석의 배치패턴이 OXX 패턴으로 OX 패턴과 다르게 자석의 간격이 너무 멀어서 낮은 회전속도에는 크게 영향을 받지 않기 때문으로 판단된다.

RMH의 회전을 통해 만들어내는 전위차는 자기장의 회전이 만들어내는 이온의 수송에 의한 것이라 할 수 있다. 평균전위차가 상승하는 현상은 자기장의 회전으로 인하여 배관을 통해 이온이 한쪽 방향으로 수송되기 때문이라 판단된다. 양이온 수송의 경우에는 평균전위차 상승률이 높지만, 수전해 시에 음극에

서 발생한 수산화이온(OH⁻)이 양극으로 이동해야 하므로 음이온 수송패턴 중에 가장 평균전위차 상승률이 높은 case 2 (OX, 음이온 수송 방향, 100 RPM)가 가장 높은 효율을 보일 것으로 예측되었으며, 전류 측정을 통해 수전해 실험 시 발생한 수소의 양을 측정하였다.

3.3 전류 측정 및 분석

수전해 실험 장치에서 실험 시 발생하는 기체의 양을 측정하고자 하였으나, 발생된 기체의 양이 적어서 포집 및 측정이 어려웠다. 본 연구에서는 RMH의 회전 유무에 따른 수소 생산량의 상대 비교를 위해서 수전해 실험 시 소요 전류를 비교하였다.

전류 측정을 위하여 반응 수조에 NaOH 20%를 채우고, 전위차 측정 실험 결과를 바탕으로 case 2의 자석 배치 패턴을 선정하여 RMH에 적용하고, 전극에 정전압을 인가하여 수전해 실험을 수행하였다. 수전해 실험을 수행하는 동안 발생한 수소의 양을 관찰하기 위하여 전류측정모듈(NI-9219, 16 bit, National Instrument INC., Austin, TX, USA)을 이용하여 전류를 측정하였다.

수전해의 이론상 전압은 1.23 V이나, 1.23 V의 정전압으로는 입력한 전기에너지가 충분하지 않아 발생하는 기체의 양을 관찰하기 어려웠다. 또한, 실험 장치에서 사용된 백금 코팅된 티타늄 메쉬(mesh) 전극의 최대 허용 전압(2 V)을 고려하여, 양 전극에 direct current (DC) 2 V 정전압을 인가하여 실험을 수행하였으며, 이를 Fig. 8에 나타냈다.

Fig. 8(a)의 경우, 0 RPM일 때 DC 2 V 정전압이 인가된 후 약 23-24 mA의 전류가 흘렀으나 곧 급격히 감소하여 실험 시작 후 약 60초 이후에는 완만한 감소를 보였다. 이는 음극 쪽에서 수소 양이온이 환원되어 수소 기체가 발생함에 따라 음극 쪽의 양이온의 밀도가 현저하게 감소하게 되어 상대적으로 음이온의 밀도가 증가하게 되고, 이로 인한 저항의 증가로 전류가 급감한 것으로 생각된다. 또한, RMH의 회전으로 인하여 양극 쪽으로 음이온이, 음극 쪽으로

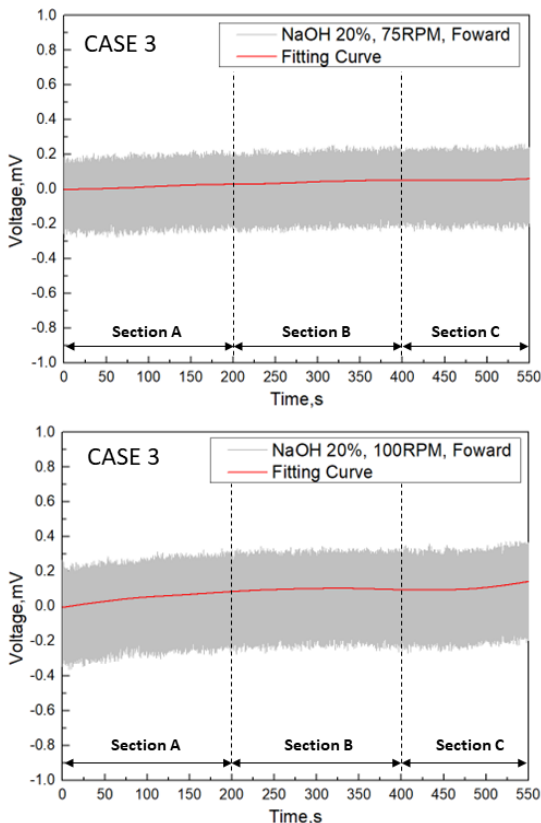


Fig. 7. Result of case 3

양이온이 모일 것이라고 생각되지만, RMH로 인해 수송되는 수소이온의 양이 수소 기체로 환원되는 양에 비해 적기 때문에 전류값이 유지되지 못하고 급격하게 감소한 것으로 생각된다.

실험 시작 후 60초 이후 전류가 10 mA 이하로 감소하였으며, 이는 확산에 의해 이온이 수송되는 속도에 따라 전류량이 변화하고, 시간이 지날수록 완만하게 변화하는 것으로 판단된다.

Fig. 8(b)는 전압을 인가하기 전에 10분(600초) 동안 RMH를 회전시켜 양 전극 쪽으로 음이온 또는 양이온을 집중시킨 후, 양이온이 집중되었으리라고 예상되는 전극에 음극을 인가하고 반대쪽에 양극을 인가되었을 때 측정된 전류 데이터를 나타낸다.

Fig. 8(b)의 경우, Fig. 8(a)에 비해 실험 초기 더 높은 전류가 발생하였다. 이와 같이 수전해 시 높은 전

류가 흐른 것은 RMH의 회전이 이온의 집중을 더 유발하였으며, RMH의 회전이 전극 주위로 더 많은 이온을 이동시켰기 때문이라고 판단된다. 단, 전류 측정모듈의 측정 범위가 -25 mA에서 +25 mA이기 때문에 실험 초기에 나타나는 측정 범위를 초과하는 최대값을 확인하기 어려웠다. 또한, 실험 시작 후 60초 이후에서는 0 RPM의 경우와 유사하게 매우 천천히 전류가 감소하는 것으로 나타났으나, 0 RPM의 경우와 비교하여 감소율이 적은 것으로 나타났다. 이는 RMH의 회전이 이온을 수송하는 효과를 만들기 때문이라고 판단된다.

전류(current)의 정의는 단위 시간당 흐른 전하량을 의미하며 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)을 이용하여 전류를 적분하면 식 (2)와 같이 전하량을 얻을 수 있으며, 수전해 실험시간과 전류의 면적을 계산하여 수소의 양을 계산할 수 있다.

$$I = dq / dt [A] = [c/s] \tag{1}$$

$$I = q'(t) \Rightarrow \int I(t) = q(t) \tag{2}$$

전류 측정 실험 후 전류가 0인 좌표축과 그래프가 만들어내는 빗금 친 면적을 계산하여 비교한 결과, 자기장이 회전하지 않을 때보다 100 RPM으로 회전할 경우, 면적이 약 8.06% 정도 더 컸으며, 이를 통해 약 8.06% 수소생산량이 증가한 것으로 보인다. 그러나 이는 100 RPM으로 회전할 경우, 실험 초기에 측정하지 못한 +25 mA 초과 영역은 고려하지 않았기 때문에 실제로는 약 10% 이상의 수소생산량 증가를 기대할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수전해 시스템의 수소 생산 효율의 향상을 위해 제작된 RMH의 내부의 자석의 배치 및 패턴 회전속도를 달리하여 수전해 반응의 효율을 향상시키기 위한 실험 연구를 수행하였다. 연구를 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

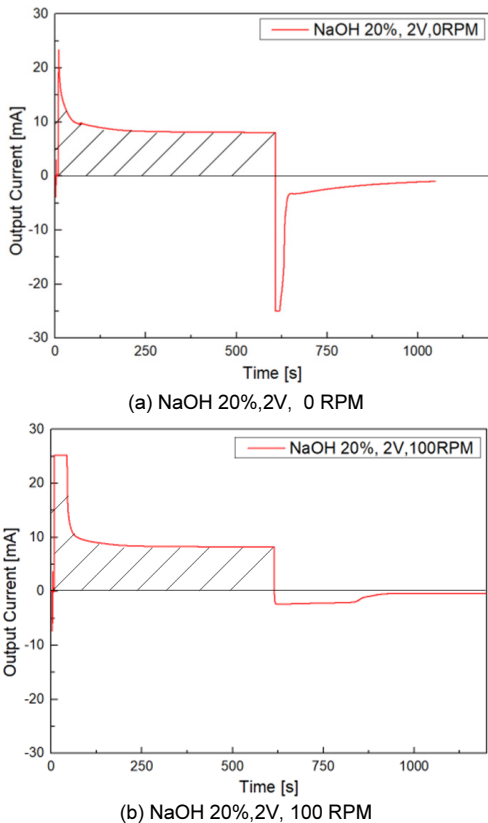


Fig. 8. Result of current measurement

1) 자석의 배치 및 패턴, 회전속도 등에 따른 실험을 수행하였다. 전위차 측정 실험 결과 다른 5가지 자석 배치 간격 모두 -1 mV에서 1 mV 범위의 wave 형태의 전압을 확인하였다. 자석의 배치 및 패턴을 변수로 한 실험 결과로부터 각각의 최대 및 최소값과 자석의 배치에 따른 파형의 변화를 확인하였다. 또한 회전속도를 빠르게 증가시킬수록 전압이 점점 크게 나타나는 것을 확인하였다. 전위차가 증가한 것은 더 많은 이온이 두 전극 쪽으로 집중된 것 때문이라 생각되며, 이를 이용하면 자석의 배치 및 회전속도 변화를 이용하여 전자 및 이온의 수송에 변화를 만들어 낼 수 있을 것으로 판단된다.

2) case 2 (OX, 음이온 수송 방향, 100 RPM)를 설정한 후 수전해 실험을 진행한 결과, RMH의 회전속도가 증가할수록 자기장 회전속도가 증가하여 전하 및 이온의 수송량 및 속도가 증가할 것으로 보이며, 이온수송 기술을 이용하면 수전해 시스템에서 수소생산 속도 및 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

3) 전류 측정 실험 결과, 0 RPM보다 100 RPM으로 회전할 경우, 약 8.06% 수소생산이 증가한 것을 알 수 있었다. 100 RPM으로 회전할 경우, 실험 초기에 측정하지 못한 +25 mA 초과 영역을 고려할 경우, 실제로는 약 10% 이상의 수소생산량 증가를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0012769, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)과 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2019R111A3A0106276412)을 받았다.

References

1. S. A. Park, E. K. Lee, J. W. Lee, S. K. Lee, J. S. Moon, T. W. Kim, and Y. K. Cheon, "A study on performance characteristic and safety of alkaline water electrolysis system",

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 601-609, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.601>.

2. M. Y. Lin and L. W. Hourng, "Effects of magnetic field and pulse potential on hydrogen production via water electrolysis", International Journal of Energy Research, Vol. 38, No. 1, 2014, pp. 106-116, doi: <https://doi.org/10.1002/er.3112>.
3. H. S. Choi, D. S. Yim, C. H. Rhyu, J. C. Kim, and G. J. Hwang, "Study on the electrode characteristics for the alkaline water electrolysis", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 117-124, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2012.23.2.117>.
4. D. W. Yim, "Governance leadership for hydrogen economy revitalization", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 31, No. 3, 2020, pp. 265-275, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.3.265>.
5. M. Y. Lin, L. W. Hourng, and C. W. Kuo, "The effect of magnetic force on hydrogen production efficiency in water electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 2, 2012, pp. 1311-1320, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.024>.
6. S. Anwar, F. Khan, Y. Zhang, and A. Djire, "Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 63, 2021, pp. 32284-32317, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.191>.
7. N. Nagai, M. Takeuchi, T. Kimura, and T. Oka, "Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 28, No. 1, 2003, pp. 35-41, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00027-7).
8. N. Bidin, S. R. Azni, S. Islam, M. Abdullah, M. F. S. Ahmad, G. Krishnan, A. R. Johari, M. A. A. Bakar, N. S. Sahidan, N. F. Musa, M. F. Salebi, N. Razali, and M. M. Sanagi, "The effect of magnetic and optic field in water electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 26, 2017, pp. 16325-16332, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.169>.
9. S. Y. Jang, C. H. Ryu, G. J. Hwang, "High temperature characteristics of commercially available anion exchange membrane for alkaline water electrolysis", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 33, No. 4, 2022, pp. 330-336, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.330>.
10. M. Kotisaari, O. Thomann, D. Montinaro, and J. Kiviahio, "Evaluation of a SOE stack for hydrogen and syngas production: a performance and durability analysis", Fuel Cells, Vol. 17, No. 4, 2017, pp. 571-580, doi: <https://doi.org/10.1002/fuce.201600166>.
11. S. S. Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis - a review", Materials Science for

Energy Technologies, Vol. 2, No. 3, 2019, pp. 442-454, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>.

12. C. Minke, M. Suermann, B. Bensmann, and R. Hanke-Rauschenbach, "Is iridium demand a potential bottleneck in the

realization of large-scale PEM water electrolysis?", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, No. 46, 2021, pp. 23581-23590, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.04.174>.