Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 5, 2025, pp. 504~509
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.5.504
JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

URFC의 수전해모드에서 저 Pt MEA의 산소극에서 Ir 그리고 Ru 촉매의 영향에 관한 연구

서원학[1] · 김규덕[1] · 정영관[2†] · 서영진[2] · 황철민[3] · 김승환[4†]

[1]국립금오공과대학교 대학원, [2]국립금오공과대학교 기계공학부, [3]포항테크노파크 그린에너지센터 수소팀, [4]아크로랩스(주) 기업부설연구소

A Study on the Effects of Ir and Ru Catalysts at the Oxygen Electrode of Low Pt MEA in Electrolysis Mode of URFC

WONHAK SEO[1], GYUDEOK KIM[1], YOUNGGUAN JUNG[2†], YOUNGJIN SEO[2], CHULMIN HWANG[3], SEUNGHWAN KIM[4†]

[1]Graduate School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea
[2]School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea
[3]POHANG TECHNOPARK Foundation, 394 Jigok-ro, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongbuk 37668, Korea
[4]AcroLabs, Inc, Suite D-703, 700 Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13516, Korea

†Corresponding author :
kseungh0551@naver.com
jyg_kr@kumoh.ac.kr

Received 10 September, 2025
Revised 30 September, 2025
Accepted 1 October, 2025

Abstract >> The Unitized Regenerative Fuel Cell (URFC) have also the function of water electrolysis and the function of fuel cell in same one cell. The electrochemical reactions of fuel cell and water electrolysis in low temperature require also catalysts. However, various studies on catalyst composition and performance improvement are required to operate the reversible functions in URFC. Many previous studies have investigated the performance of MEAs (Membrane Electrode Assembly) made with a high content of Pt catalyst, but there is no studies on MEAs made with a low composition of Pt catalyst.

In this study, we investigated between the catalyst composition and electrochemical performance on MEAs in URFC. The electrochemical performance of MEAs made of low-content Pt, Ir and Ru catalyst was experimentally investigated. The results showed that in water electrolysis mode, the electrochemical performance of Ir, Ru, and Ir/Ru catalyst improved with increasing catalyst content. However, the performance of Ru and Ir/Ru catalysts decrease above 2 mg/cm^2.

Key words : URFC(가역연료전지), Fuel Cell(연료전지), Water Electrolysis(수전해), Membrane Electrode Assembly(막전극집합체), Catalyst(촉매), Spray (스프레이), Production(생산)

1. 서 론

인터넷을 비롯한 통신망 기술이 발달하면서 클라우드를 비롯한 다양한 기술 구현에 필요한 데이터센터의 구축이, AI(인공지능)기술의 발달과 함께 전 세계적으로 그 확장세가 급격하게 증가하고 있다. 기존의 데이터센터에서 서버들에 필요한 전력소비와 비교하여, AI데이터센터를 구성하는 AI서버의 전력소비는 비교할 수 없을 정도의 규모로 급격하게 증가하고 있다. AI기술의 발달로 인한 AI반도체산업에 필요한 전력소비와 AI데이터센터를 운영에 필요한 초거대 전력망 구축을 위한 세계 각국의 전력망구축에 대한 투자가 크게 증가하고 있다.

이와 함께, 러시아의 우크라이나 침략전쟁으로 인한 에너지공급과 트럼프의 당선으로 인한 미국산 천연가스 공급확대와 같은 화석에너지공급에 대한 변화 등과 같은 다양한 정치외교적인 불확실성으로 인하여 에너지안보(Energy Security) 문제가 떠오르고 있으며, 이를 해결하기 위해 세계 각국에서는 화석에너지에 대한 의존성을 탈피와 에너지자립을 위한 노력이 지속되고 있다.

많은 나라들의 에너지 자립을 위한 방안으로 신재생에너지에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있으며, AI데이터센터에 필요한 신속한 전력망확보를 위해서는 태양광발전과 풍력발전과 같이 신속한 구축이 가능한 재생에너지를 이용한 전력공급망 구축과 함께 재생에너지원들의 공급안정성 문제를 해결하기 위한 다양한 에너지저장장치에 대한 기술이 개발되고 있다. 재생에너지원의 에너지 공급안정성을 해결하기 위한 방법으로 기존의 기술인 2차 전지를 이용하는 기술과 함께, 신기술분야인 수소에너지와 연료전지를 이용한 에너지저장시스템(Energy Storage System, ESS)의 보급이 시작되고 있으며, 물을 전기분해하여 수소를 생산하는 수전해(Electrolysis)와 수소를 이용하여 발전하는 연료전지의 중요성과 함께 효율향상과 가격경쟁력 확보의 필요성이 대두되고 있다.

수전해는 재생에너지로부터 생산된 전기에너지를 수소로 변환하여 저장하는 에너지저장시스템의 핵심기술로 알칼리 수전해(Alkaline Electrolysis, AE), 고분자전해질막 수전해(Polymer Electrolyte Membrane Electrolysis, PEME), 고온수증기 수전해(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC) 등이 대표적이다.

알칼리 수전해는 연구개발이 가장 먼저 진행되어 기술의 성숙도가 높은 수전해 방법으로 비귀금속 촉매를 사용하여 수소 생산 단가가 낮은 장점이 있으나, 수소와 산소의 혼입 위험과 저순도의 수소, 낮은 에너지 밀도, 부식과 수소의 정제가 필요하다는 단점이 있다. 이러한 알칼리 수전해는 최근 스택 개발을 필두로 수소 생산의 고밀도화와 차압 운전대응 등에 대한 연구가 주로 진행되고 있다[1-3].

고온수증기 수전해는 700~900°C의 높은 온도에서 작동하는 방법으로 수증기를 분해하여 수소와 산소를 생산해 효율이 높아 투입되는 전기용량 대비 생산할 수 있는 수소와 산소의 양이 많은 장점이 있으나, 고온에서 작동하는 만큼 아직은 수명이 짧고, 전극이 고온의 수증기로 인해 증발되거나 구조가 변형되며, 정지시동 등 간헐적 작동이 어려운 단점이 있다. 이러한 고온수증기 수전해는 내구성 문제를 극복과 작동 온도를 낮추는 등에 대한 연구가 주로 진행되고 있다[1,3].

ESS는 화력발전, 원자력발전, 재생에너지원들로부터 생산되는 과잉상태의 전기에너지를 수전해를 이용하여 빠르게 수소로 변환하여 저장한 후에, 급격한 전기부하에 맞추어 저장된 수소를 연료전지를 이용하여 전기에너지로 필요한 만큼 전기에너지로 변환하는 빠른 대응하는 것이 가능하며, 특히 고분자전해질막 수전해와 연료전지를 상용하는 것이 가장 효과적인 방법의 하나이며, 저온에서 작동하며 효율이 높고 구성이 단순하여 제작이 쉬운 장점이 있지만, 고가의 촉매가 사용되어 비용이 높은 단점이 있다.

고분자전해질막 수전해와 연료전지는 가역반응(Reversible Reaction) 원리로 작동하기에 이를 이용한 가역연료전지(Unitized Regenerative Fuel Cell, URFC)는 하나의 셀(Cell)로 수전해와 연료전지를 양방향으로 사용하기에 고분자전해질막 수전해와 연료전지의

두 시스템의 통합을 이용한 가격 저감을 통해 단점을 극복할 수 있다[4,5].

그러나 URFC의 수전해와 연료전지라는 양방향 에너지변환에는 수전해와 연료전지의 기능 구현을 위한 막전극집합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)의 촉매 구성과 성능 향상 등이 중요하다.

수전해에서는 이리듐(Iridium, Ir)과 루테늄(Ruthenium, Ru) 촉매는 수소생산 성능에 큰 영향을 미치며, 연료전지에서는 백금(Platinum, Pt)촉매가 발전 성능에 큰 영향을 미친다.

이러한 수전해와 연료전지의 촉매들은 각각의 작동 상태에서의 전기화학적 성능 특성에 대해 많은 연구가 이뤄져 있으나, 이 촉매들이 URFC에서의 정량적인 성능 정도와 촉매들의 조합에 따른 성능 등에 관한 다양한 연구가 미흡한 실정이다.

또한 많은 연구들이 성능 향상에 대한 연구에 집중되어 있어, Pt 함량이 높고, Ir과 Ru이 저전류(Low Current) 영역에서부터의 전기화학적 성능 측성을 파악할 수 있는 정량적인 실험적 연구가 부족하다[5-8].

특히 많은 성행연구들 중에서 부족한 URFC용 MEA 산소극의 저 Pt의 상태에서 Ir과 Ru 촉매에 관한 다양한 연구가 필요한 실정이며, URFC용 MEA 산소극의 저 Pt의 상태에서 Ir과 Ru 촉매의 조성에 따른 연료전지 모드에서의 전기화학적 성능 특성에 관한 연구를 수행하였다[9].

본 연구에서는 URFC용 MEA에서의 Pt와 Ir 그리고 Ru의 촉매 조성에 따른 전기화학적 성능에 미치는 영향에 대한 연구의 일환으로, URFC의 MEA 산소극이 저 Pt의 상태에서 Ir과 Ru 촉매의 조합이 미치는 수전해 모드에서의 발전 특성을 실험을 통해 연구하였다.

2. URFC의 전기화학적 성능 평가 방법

2.1 URFC용 저백금 MEA 제작

Table 1은 본 연구의 저 Pt의 상태에서 Ir과 Ru 촉매의 수전해모드 전기화학적 성능 실험에 사용된 Dupont사(Wilmington, DE, USA)의 고분자 전해질막인 Nafion 115의 규격을 나타낸 것이다[8,10].

Table 1. Properties of Nafion 115

Division	Properties
Type	Nafion 115
Equivalent (EW)	1100
Basic weight (g/m^2)	250
Thickness (mm)	0.127

Table 2. Electrode Catalyst Composition of URFC MEAs

Cathode	Anode	
Pt/C 2 mg/cm^2	Pt 0.1 mg/cm^2	Ir 1 ~3 mg/cm^2
		Ru 1 ~ 3 mg/cm^2
		Ir/Ru 1 ~ 3 mg/cm^2

URFC용 MEA는 두께 0.127 mm, 기본 무게 250 g/m^2, 당량 1100인 Nafion 115 이온교환막에, Table 2와 같은 조성의 수소극과 산소극용 촉매로 5 × 5 cm^2의 활성면적으로 제작하였다.

이오노머(Ionomer)인 Nafion 용액을 20 wt%에, 수소극의 촉매는 Pt/C 2 mg/cm^2로 동일하게 조성하였으며, 산소극의 촉매는 Pt 0.1 mg/cm^2 기반에 Ir 1 ~ 3 mg/cm^2와 Ru 1 ~ 3 mg/cm^2, Ir과 Ru은 1:1 비율의 Ir/Ru 1 ~ 3 mg/cm^2로 조성하였다.

Fig. 1은 URFC용 MEA 제작 과정을 나타낸 것으로, 산소 농도 5%이하인 질소 분위기의 글로브 박스(Glove Box) 내부에서 촉매와 이오노머를 섞어 전극촉매 슬러리를 제작하여 스프레이법을 이용하여 고분자전해질막 위에 촉매를 도포하였다. 촉매가 도포된 고분자전해질막을 열압착(Hot Press)과 소결과정인 열처리(Heat Treatment) 작업을 통해 성능 평가를 위한 MEA를 제작하였다.

2.2 URFC 성능 평가 방법

Fig. 2와 URFC 성능평가를 위한 연료제어시스템을, Fig. 3은 URFC용 MEA의 수전해모드 성능 평가 방법을 나타낸 것이다. 전극촉매 활성화를 위해 촉매

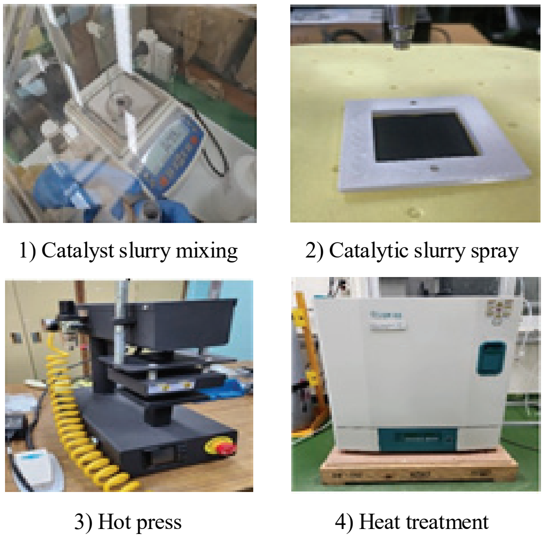

Fig. 1. Manufacturing Process for the MEA in URFC

활성화 과정을 거친 후 연료전지모드 성능 평가를 먼저 수행하였다. 연료전지모드 성능 평가를 수행한 후에, 질소(Nitrogen, N_2) 퍼지(Purge)를 통해 셀 내부의 잔여물인 연료로 투입된 수소와 산소 기체, 반응물인 물을 제거한 후 수전해모드 성능 평가를 수행하였다.

URFC 수전해모드 성능 평가는 셀 온도를 60°C로 하였으며, 투입 연료인 증류수는 상온 25°C를 이용하여 성능 평가를 수행하였다.

URFC 셀에 사용된 세퍼레이터는 전체 크기 8 × 8 cm^2에 활성면적 5 × 5 cm^2이고, 사로형(Serpentine)의 폭이 1 mm의 유로를 사용하였다.

3. 전기화학적 성능 평가 결과 및 고찰

3.1 산소극의 Ir 촉매 함량에 따른 수전해 성능

Fig. 4는 산소극의 Ir 촉매 함량에 따른 URFC 수전해 모드의 전기화학적 성능과의 관계를 나타낸 것이다. 24.0 mA/cm^2에서 Ir 1 mg/cm^2와 Ir 2 mg/cm^2, Ir 3 mg/cm^2의 전압은 각각 1.658 V, 1.620 V, 1.600 V로 Ir 3 mg/cm^2는 Ir 1 mg/cm^2와 Ir 2 mg/cm^2에 비해 각각 약 3.50%, 1.23% 전압이 감소하였다.

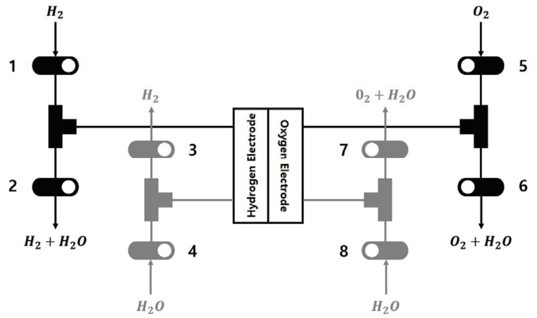

Fig. 2. Fuel Control System for URFC Performance Evaluation

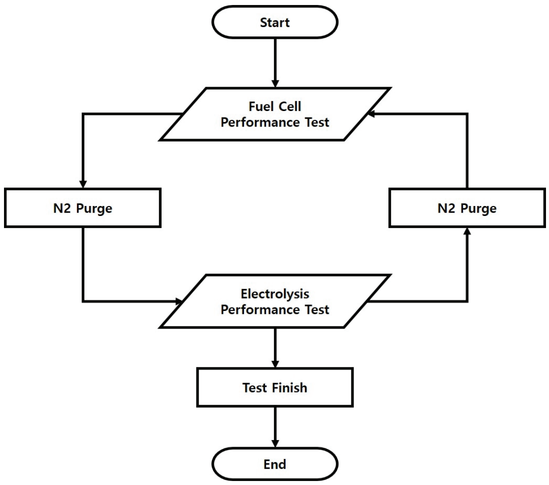

Fig. 3. Schematic Diagram on the URFC Performance Evaluation Process

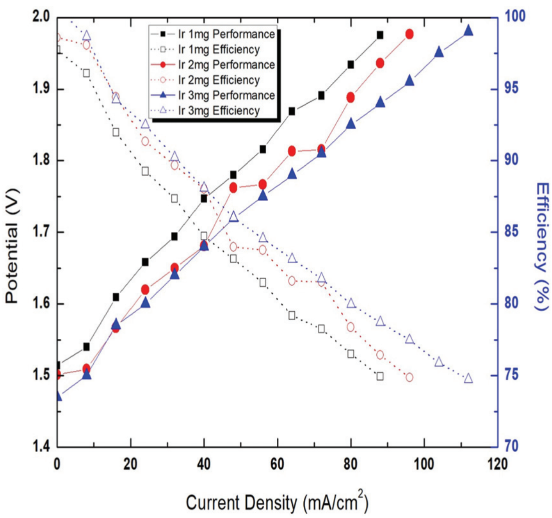

Fig. 4. The Relations between Ir Catalyst Content of Oxygen Electrode and Performance of Electrolysis Mode in URFC

80.0 mA/cm^{2}에서 Ir 1 mg/cm^{2}와 Ir 2 mg/cm^2, Ir 3 mg/cm^{2}의 전압은 각각 1.934 V, 1.888 V, 1.850 V로 Ir 3 mg/cm^{2}는 Ir 1 mg/cm^{2}와 Ir 2 mg/cm^{2}에 비해 각각 약 4.34%, 2.02% 전압이 감소하였다.

Ir 촉매는 촉매 함량이 증가할수록 동일한 전류밀도에서 발생하는 전압이 감소하여 수전해 성능이 증가한 것을 확인하였다.

3.2 산소극의 Ru 촉매 함량에 따른 수전해 성능

Fig. 5는 산소극의 Ru 촉매 함량에 따른 URFC 수전해 모드의 전기화학적 성능과의 관계를 보여주고 있다. 32.0 mA/cm^{2}에서 Ru 1 mg/cm^{2}와 Ru 2 mg/cm^2, Ru 3 mg/cm^{2}의 전압은 각각 1.573 V, 1.554 V, 1.553 V로 Ru 3 mg/cm^{2}는 Ru 1 mg/cm^{2}와 Ru 2 mg/cm^{2}에 비해 각각 약 1.26%, 0.03% 전압이 감소하였다.

64.0 mA/cm^{2}에서 Ru 1 mg/cm^{2}와 Ru 2 mg/cm^2, Ru 3 mg/cm^{2}의 전압은 각각 1.691 V, 1.644 V, 1.626 V로 Ru 3 mg/cm^{2}는 Ir 1 mg/cm^{2}와 Ir 2 mg/cm^{2}에 비해 각각 약 3.82%, 1.08% 전압이 감소하였다.

Ru 촉매는 2 mg/cm^{2}의 촉매 함량까지 수전해 성능이 증가하였으나 2 mg/cm^{2}이상의 촉매 함량에서의 성능은 크게 증가하지 않아 2 mg/cm^{2}의 촉매 함량이 한계 성능 함량인 것을 확인하였다.

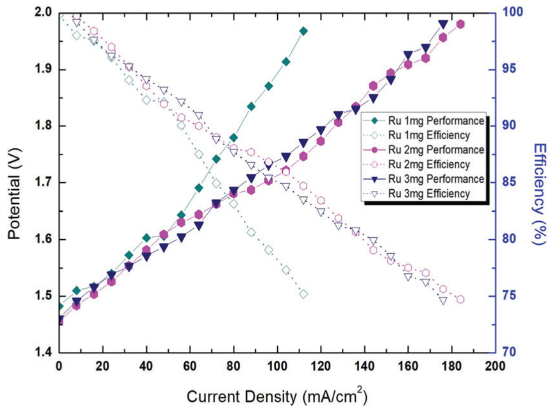

Fig. 5. The Relations between Ru Catalyst Content of Oxygen Electrode and Performance of Electrolysis Mode in URFC

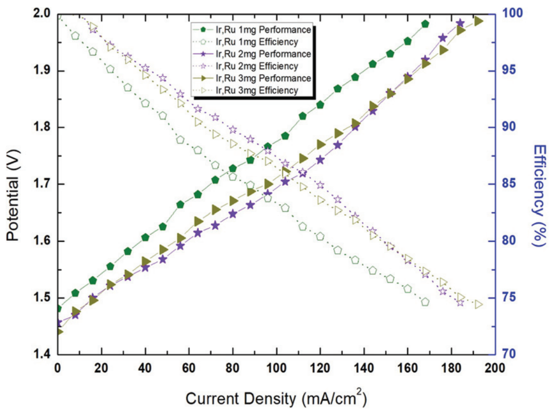

Fig. 6. The Relations between Ir/Ru Catalyst Content of Oxygen Electrode and Performance of Electrolysis Mode in URFC

3.3 산소극의 Ir과 Ru 촉매 함량에 따른 수전해 성능

Fig. 6은 산소극의 Ir/Ru 촉매 함량에 따른 URFC 수전해 모드의 전기화학적 성능을 나타낸 것이다. 16.0 mA/cm^{2}에서 Ir/Ru 1 mg/cm^{2}와 Ir/Ru 2 mg/cm^2, Ir/Ru 3 mg/cm^{2}의 전압은 각각 1.531 V, 1.500 V, 1.496 V로 Ir/Ru 3 mg/cm^{2}는 Ir/Ru 1 mg/cm^{2}와 Ir/Ru 2 mg/cm^{2}에 비해 각각 약 2.26%, 0.28% 전압이 감소하였다.

144.0 mA/cm^{2}에서 Ir/Ru 1 mg/cm^{2}와 Ir/Ru 2 mg/cm^2, Ir/Ru 3 mg/cm^{2}의 전압은 각각 1.912 V, 1.830 V, 1.838 V로 Ir/Ru 3 mg/cm^{2}는 Ir 1 mg/cm^{2}에 비해 약 3.87% 전압이 감소하였으나 Ir/Ru 2 mg/cm^{2}에 비해 약 0.45% 전압이 증가하였다.

Ir/Ru 촉매는 촉매 함량이 증가할수록 수전해 성능이 증가하나 2 mg/cm^{2}이상의 촉매 함량에서 성능이 증가하지 않은 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 저 Pt 상태인 MEA 산소극에서 Ir과 Ru 촉매의 조합에 따라서 분사법으로 제작된 URFC용 MEA의 수전해 모드에서의 전기화학적 특성을 실험연구를 수행하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1) 수전해 모드에서 Ir 촉매는 촉매 함량이 증가할

수록 촉매 활성도가 증가해 수전해 성능이 증가한 것을 확인하였다.

2) 수전해 모드에서 Ru 촉매는 2 mg/cm^{2}의 촉매 함량까지 수전해 성능이 증가하였으나 2 mg/cm^2 이상의 촉매 함량에서의 성능은 크게 증가하지 않아 2 mg/cm^{2}의 촉매 함량이 한계 성능 함량인 것을 확인하였다.
3) 수전해 모드에서 Ir/Ru 촉매는 촉매 함량이 증가할수록 수전해 성능이 증가하나 2 mg/cm^{2}이상의 촉매 함량에서 성능이 증가하지 않은 것을 확인하였다.
4) 본 실험연구를 통해 향후 URFC용 MEA의 촉매 구성과 조합에 따른 Pt와 Ir 그리고 Ru의 영향에 대한 기초 자료로 활용할 수 있다.

후 기

본 결과물은 2025년도 경상북도 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)-(특화산업 Scale-up)의 지원을 받아 수행된 결과입니다. This research was supported by the Gyeongsangbuk-do RISE (Regional Innovation System & Education) project (Specialized Industry Scale-up unit).

References

1. J. M. Baek and S. H. Kim, “Current status of water electrolysis technology and large-scale demonstration projects in Korea and overseas”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 14-26, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.14.
2. M. J. Jang, M. S. Won, K. H. Lee, and S. M. Choi, “Optimization of operating parameters and components for water electrolysis using anion exchange membrane”, Journal of Surface Science and Engineering, Vol. 49, No. 2, 2016, pp. 159-165, doi: http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.2.159.
3. G. J. Hwang and H. S. Choi, “Hydrogen production systems through water electrolysis”, Membrane Journal, Vol. 27, No. 6, 2017, pp. 477-486, doi: https://doi.org/10.14579/MEMBRANE_JOURNAL.2017.27.6.477.
4. H. Y. Jung, “Understanding of polymer electrolyte membrane for a unitized regenerative fuel cell (URFC)”, Applied Chemistry for Engineering, Vol. 22, No. 2, 2011, pp. 125-132, doi: https://doi.org/10.14478/ace.2011.22.2.125.
5. H. Ito, N. Miyazaki, M. Ishida, and A. Nakano, “Efficiency of unitized reversible fuel cell systems”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 13, 2016, pp. 5803-5815, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.150.
6. S. D. Yim, G. G. Park, Y. J. Sohn, W. Y. Lee, Y. G. Yoon, T. H. Yang, S. Um, S. P. Yu, and C. S. Kim, “Optimization of PtIr electrocatalyst for PEM URFC”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 30, No. 12, 2005, pp. 1345-1350, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.04.013.
7. S. D. Yim, G. G. Park, Y. J. Sohn, T. H. Yang, Y. G. Yoon, W. Y. Lee, and C. S. Kim, “Development of bifunctional electrocatalyst for PEM URFC”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 15, No. 1, 2004, pp. 23-31, Retrieved from https://www.dbpia.co.kr/pdf/pdfView.do?nodeId=NODE10598088.
8. C. M. Hwang, D. H. Park, Y. G. Jung, K. H. Kim, and J. S. Kim, “Effect of double porous layer on a polymer electrolyte unitized regenerative fuel cell”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 24, No. 4, 2013, pp. 320-325, doi: http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2013.24.4.320.
9. S. H. Kim, W. H. Seo, Y. J. Seo, C. M. Hwang, S. H. Lee, and Y. G. Jung, “A study on the effects of Ir and Ru catalysts at the oxygen electrode of low Pt MEA in fuel cell mode of URFC”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 2, 2025, pp. 170-175, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.2.170.
10. S. H. Kim, J. W. Eo, Y. J. Seo, C. M. Hwang, and Y. G. Jung, “A study on the change of mechanical property according to the aging of polymer electrolyte membrane”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 2, 2022, pp. 176-182, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.2.176.