Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 649~656
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.649
JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

저온형 직접 암모니아 연료전지의 막–전극 접합체 제조 및 성능 향상 연구

채지언† · 김선엽 · 최지선 · 이선엽

한국기계연구원 친환경에너지연구본부 친환경모빌리티연구실

Fabrication and Performance Enhancement of Membrane–Electrode Assemblies for Low-Temperature Direct Ammonia Fuel Cells

JI EON CHAE†, SEONYEOB KIM, JISEON CHOI, SUNYOUP LEE

Department of Eco-friendly Mobility Power, Eco-Friendly Energy & Environment Research Division, Korea Institute of Machinery & Matrials, Daejeon 34103, Korea

†Corresponding author : jechae@kimm.re.kr

Received 28 October, 2025
Revised 28 October, 2025
Accepted 7 November, 2025

Abstract >> Low-temperature direct ammonia fuel cells (DAFCs) are promising electrochemical devices for sustainable energy conversion due to the high volumetric energy density and convenient storage of ammonia. This study aims to elucidate how membrane–electrode assembly (MEA) design and operational conditions influence ammonia oxidation and overall cell performance. Therefore, this study investigates MEA fabrication strategies, the effects of catalyst loading, membrane thickness, fuel type, and cell activation on DAFC performance.

Key words : Ammonia(암모니아), Direct ammonia fuel cell(직접 암모니아 연료전지), Anion exchange membrane(음이온 교환막), Membrane-electrode assembly (막-전극 접합체), Ammonia oxidation reaction(암모니아 산화반응), Oxygen reduction reaction(산소환원반응)

1. 서 론

전세계적으로 심화되는 기후변화와 에너지 안보 위기로 인해 지속 가능한 대체 에너지 기술 개발의 필요성이 대두되고 있다. 특히 탄소중립을 실현하기 위해서는 무탄소 에너지 기반 시스템으로의 전환이 시급하며, 이러한 에너지 전환의 중심에는 수소가 자리하고 있다. 수소 밸류 체인(Hydrogen value chain)을 효율적으로 구축하기 위해서는 생산 및 활용뿐 아니라 저장과 운송을 위한 인프라 확충이 전략적 과제로 부상하고 있다[1).

암모니아는 수소 에너지 기반 사회를 구현하기 위하여 수소 운반체로서 오랜 기간 주목받아 왔다. 암모니아의 부피당 에너지 밀도는 12.9–14.4 MJ/L로 압축 수소 및 액화 수소 대비 상대적으로 높으며, 분자식 기준으로 17.6wt%의 수소를 함유하고 있다. 또한 298.15 K에서 약 0.86 MPa의 낮은 압력에서 액화되며, 상압에서는 239.75 K에서 쉽게 액화되어 저장과 운송이 용이하다는 장점을 가지고 있다[2,3)].

암모니아를 수소 운반체로 활용할 경우, 암모니아

에서 수소를 추출하는 크래킹 과정에서 열에너지 손실이 발생하며, 추출된 수소를 고순도로 정제하고 압축하는 추가 공정이 필요하다[4]. 이러한 에너지 손실과 공정 복잡성을 줄이고 연료 효율을 향상시키기 위하여 최근에는 암모니아 직접 연료로 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 사례로는 암모니아 연료전지, 암모니아 엔진, 암모니아 가스 터빈 등이 있다[5].

직접 암모니아 연료전지(Direct ammonia fuel cells, DAFCs) 기술은 작동 온도에 따라, 100°C 부근에서 작동하는 저온형 연료전지와 700°C 수준에서 작동하는 고온형 연료전지로 나뉜다. 이 중 저온형 DAFC는 음이온교환막 연료전지(Anion exchange membrane fuel cells, AEMFCs) 구조를 기반으로 하며, 애노드에서 암모니아를 수소로 전환하지 않고 직접 전기화학적으로 산화시켜 전기를 생산한다. Fig. 1은 저온형 DAFC의 작동 원리를 나타낸다. 애노드에서는 Eqn. (1)과 같이 암모니아 산화반응(Ammonia oxidation reaction, AOR)이 일어나고, 캐소드에서는 Eqn. (2)와 같이 산소환원반응(Oxygen reduction reaction, ORR)이 일어나 전류가 흐른다. 이 과정에서 암모니아와 산소가 반응하여 전기를 생산하며, 부산물로는 물과 질소가 형성된다(Eqn. (3)).

저온형 DAFC는 100°C 부근에서 구동되므로, 모빌리티용이나 백업 전원용으로 활용이 가능하여 주목받고 있다. 그러나 DAFC 기술은 아직 연구 초기 단계로, 연료전지의 성능 향상을 위한 다양한 최적화 전략이 필요하다[6].

Anode:

$$4NH_3 + 12OH^- \rightarrow 2N_2 + 12H_2O + 12e^- \tag{1}$$

Cathode:

$$3O_2 + 6H_2O + 12e^- \rightarrow 12OH^- \tag{2}$$

Overall:

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O \tag{3}$$

본 연구에서는 DAFC의 성능을 향상시키기 위한 막–전극 접합체(Membrane–electrode assembly, MEA) 제조 전략과 운전 변수의 영향을 조사하였다. 이를 위해 암모니아 연료 조성, 전해질막 두께, 촉매 로딩량 및 캐소드 촉매 종류 등의 인자가 DAFC 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 기체 암모니아와 암모니아수 형태에 따른 DAFC의 전기화학적 성능 특성을 비교함으로써, DAFC 기술의 실용적 가능성을 평가하고자 하였다.

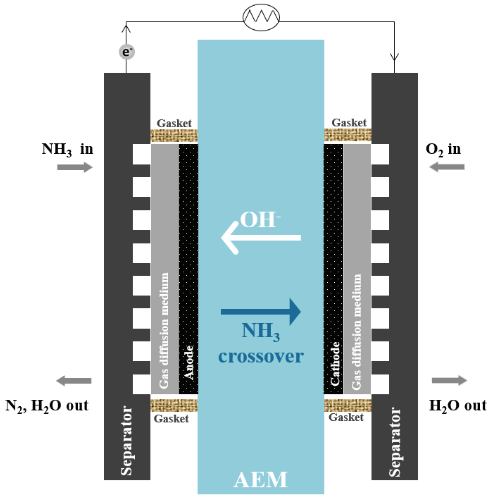

Fig. 1. Schematic of the operating principle of the direct ammonia fuel cell

2. 실 험

2.1 막-전극 접합체 제작

본 연구에서는 음이온 교환막(Anion exchange membrane, AEM)으로 PiperION® 20 μm와 40 μm (Vesogen, USA), 음이온 교환 이오노머로 PiperION® Anion exchange dispersion (PiperION-A5, 5wt%, Versogen, USA)를 사용하여 MEA를 제작하였다. 애노드 촉매로는 Pt-Ir/C (40wt% Pt-Ir (1:1 atomic ratio) on Vulcan XC-72, Premetek, USA), 캐소드 촉매로는 Pt/C (60wt% Pt on Vulcan XC-72, Premetek, USA)과 Fe–N–C (011904, Pajarito, USA)를 적용하였다. 애노드의 이오노머 함량은 10wt%, 캐소드의 이오노머 함량은 20wt%로 고정하였다.

촉매 잉크는 촉매과 이오노머를 탈이온수와 이소프로필 알코올에 분산시켜 제조하였으며, 촉매 잉크는 1 시간 동안 초음파 분산을 수행하여 균일하게 분산되도록 하였다. 전극 제작은 초음파 노즐(Sono-Tek Corp., USA)이 장착된 자동 스프레이 장비(NanoNC, South Korea)를 사용하였다. 애노드 및 Fe–N–C 전극은 Catalyst-coated substrate (CCS) 방식으로 기체 확산층(Gas diffusion layer) 위에 전극을 코팅하였고, 캐소드는 Catalyst-coated membrane (CCM) 방식으로 AEM 위에 도포하였다. 애노드 및 캐소드의 GDL은 각각 carbon cloth (W1S1011, CeTech, Taiwan)과 carbon paper (22BB, SGL carbon, Germany)을 사용하였다. Pt-Ir 및 Pt와 Fe–N–C 로딩은 각각 2–4 mg/cm^2 및 1–3 mg/cm^2로 설정하였다. 제작된 CCS 전극과 CCM은 1 M KOH 용액에 3 시간 동안 담근 후 탈이온수로 가볍게 세척하였다. MEA, 테플론 가스켓, 흑연 분리판, 금도금 집전판, 그리고 엔드플레이트를 사용하여 셀을 조립하고, 체결 토크는 80 in-lb로 설정하였다.

2.2 암모니아수 공급 연료전지 성능 평가

암모니아수 연료 조건에서는 28% Ammonium hydroxide (Daejung Chemicals, South Korea)을 사용하여, 14.8 M NH_3 용액과 supporting electrolyte로서 KOH (Daejung Chemicals, South Korea)가 포함된 연료 조건에서는 7 M NH_3 in 1 M KOH 용액을 사용하였다. 작동 온도는 80°C로 유지하였으며, 연료 공급 온도 역시 80°C로 설정하였다. 암모니아수 연료는 4 cc/min의 유량으로 애노드에 공급하였으며, 캐소드에는 상대습도 100%의 산소를 800 ml/min의 유량으로 공급하였다. 전류–전압(I–V) 곡선은 PLZ1205W Electronic load (Kikusui, Japan)를 사용하여 0.2 A/s의 스캔 속도로 측정하였다.

2.3 기체 암모니아 공급 연료전지 성능 평가

기체 암모니아 공급 기반 DAFC의 성능 평가는 연료전지 평가 스테이션을 이용하여 수행하였으며, 셀 온도, 유량, 습도를 정밀하게 제어하였다. I–V 곡선은 HCP-803 Potentiostat (BioLogic, France)를 사용하여 0.02 V/s의 스캔 속도로 측정하였다. 연료로는 암모니아 가스에 가습된 질소를 캐리어 가스로 혼합하여 애노드에 공급하였다. 작동 온도는 80°C로 유지하였다. 암모니아 및 가습 질소의 유량은 각각 400 ml/min으로 제어하였다. 캐소드에는 상대습도 100%의 산소를 500 ml/min의 유량으로 공급하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 암모니아수 공급 DAFC의 전기화학 성능 분석

3.1.1 Supporting electrolyte의 영향

암모니아수 연료는 암모니아와 물로 구성되며, 경우에 따라 supporting electrolyte를 첨가하여 전해질 내 이온 전도성을 향상시킬 수 있다. Supporting electrolyte는 전기화학 셀에서 OH^- 이온의 농도를 증가시켜 전극 반응의 활성을 촉진시키는 역할을 한다[7]. 본 연구에서는 암모니아수 연료 조건에서 supporting electrolyte가 저온형 DAFC의 전기화학적 성능에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 14.8 M NH_3 연료와 7M NH_3 in 1 M KOH의 연료를 비교하였다.

그 결과, Fig. 2의 I–V 곡선에서 확인되듯이, supporting electrolyte를 포함한 경우 개방 회로 전압(Open-circuit voltage, OCV) 및 전체적인 셀 성능이 현저히 향상되었다. 이는 다전자 반응을 수반하는 느린 AOR에서 KOH 첨가로 인해 풍부한 OH^- 이온이 공급되어 반응 속도가 증가한 결과로 해석된다. 14.8 M NH_3 연료의 최대 출력밀도는 40.3 mW/cm^2, 7 M NH_3 in 1 M KOH의 연료의 경우 144.2 mW/cm^2로 관찰되어, supporting electrolyte의 도입에 따라 DAFC의 성능이 약 3.6배 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과는 연료 내 OH^- 이온 농도 증가가 DAFC의 전기화학적 반응 활성 향상에 직접적으로 기여함을 시사한다.

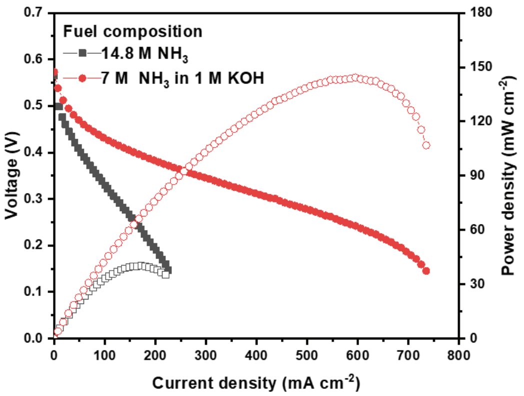

Fig. 2. I–V curves under different aqueous ammonia fuel compositions

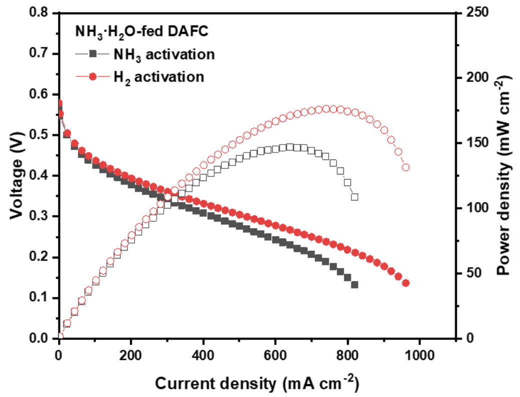

Fig. 3. I–V curves for different activation methods

3.1.2 셀 활성화 방법의 영향

셀 활성화는 연료전지가 안정적이고 높은 출력으로 작동하기 위해 운전 초기 단계에서 전극 촉매의 활성도를 높이는 중요한 공정이다. 본 연구에서는 애노드측에 공급되는 연료의 종류에 따라 활성화 방법을 수소 활성화와 암모니아 활성화로 구분하여 비교하였다. 암모니아 활성화는 암모니아수 연료 공급하에 0.05 A/s의 스캔 속도로 전류를 인가하여 성능을 안정화시키는 방식으로 수행하였다. 반면, 수소 활성화는 본격적인 DAFC 구동 전, 상대습도 100%의 수소 연료를 애노드에 공급하여 AEMFC의 성능을 안정화시킨 후[8] 암모니아수 연료 조건으로 연료를 전환하여 구동하는 방식으로 진행하였다.

그 결과, 수소 활성화 방법을 적용한 경우 최대 출력밀도는 176.3 mW/cm^{2}로 암모니아 활성화 조건(147.1 mW/cm^2) 대비 약 20.2% 향상된 성능을 나타내었다(Fig. 3). 이는 수소 활성화시, AOR 대비 상대적으로 빠른 수소산화반응(Hydrogen oxidation reaction, HOR)[9]이 진행됨에 따라 애노드 촉매 표면의 친수성과 OH$^-$ 친화도에 영향을 미쳐 전극 활성화를 유도하고, 그 결과 AOR의 활성화에도 긍정적인 영향을 미쳤기 때문이다.

캐소드에서는 두 활성화 조건 모두 ORR을 수반하므로, 이온의 이동과 전하 전달 경로가 개선되며 전극 전체의 반응 활성화가 촉진되었다. 결과적으로, 수소 활성화는 촉매 활성화, 전극 내부의 반응 경로 개선, 이온의 이동 촉진 등을 통해 DAFC의 초기 활성화 및 전기화학적 성능 향상에 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다.

3.1.3 음이온 교환막 두께의 영향

MEA의 구성 요소 중 AEM은 OH$^-$ 이온의 선택적 전도와 함께 연료와 산화제의 직접적인 혼합을 방지하는 핵심적인 역할을 한다[10]. 따라서 AEM의 두께는 이온전도도, 막 저항, 연료 크로스오버, 기계적 안정성 등에 직접적인 영향을 미치며, 전기화학적 성능과 안정성 간의 균형을 확보하기 위해 적절한 막 두께 선정이 필수적이다. 본 연구에서는 연료의 종류(수소 및 암모니아수)에 따른 AEM의 두께의 영향을 분석하였다.

Fig. 4는 수소 연료 조건에서 20 μm 및 40 μm 두께의 AEM을 적용했을 때의 I–V 특성을 나타낸 것이다. 수소 연료는 암모니아 연료에 비해 HOR의 반응 속도가 빠르고, 전극 계면에서의 전하 전달 반응이 원활하기 때문에 상대적으로 낮은 막 저항이 중요한 요인으로 작용한다. 이에 따라, 20 μm 막을 사용한 경우 40 μm 막 대비 약 36.9% 증가한 최대 출력밀도(0.771 W/cm^2)를 보였다.

그러나 얇은 막의 경우 연료의 크로스오버 현상이 상대적으로 심화되어 OCV는 20 μm에서 0.999 V, 40 μm에서 1.041 V로, 두꺼운 막에서 약 4.2% 증가한 수치를 나타내었다. 결과적으로, 수소 연료 기반

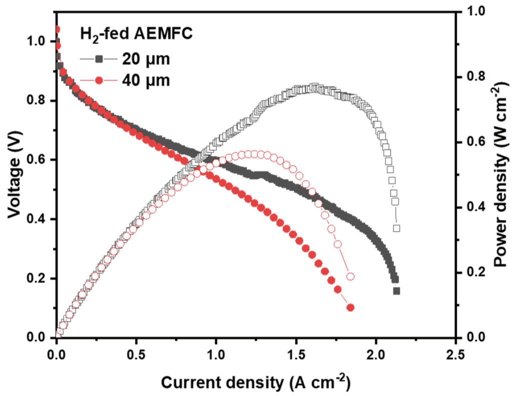

Fig. 4. I–V curves with varying the thickness of the anion exchange membrane for H_2-fed AEMFCs

AEMFC에서는 막 두께가 얇을수록 막 저항이 감소하여 셀의 오믹 손실을 줄이는 효과가 더 크게 나타나므로, OCV의 일부 손실에도 불구하고 전체 셀 성능은 얇은 막에서 향상되는 경향을 나타내었다.

한편, 암모니아수 연료 조건에서는 상반된 경향이 관찰되었다. OCV는 20 μm 막에서 0.573 V, 40 μm 막에서 0.594 V로, 두꺼운 막에서 약 3.7% 향상되었다. 그러나 최대 출력밀도는 얇은 막 보다 오히려 40 μm 막에서 약 19.6% 증가하는 결과를 보였다(Fig. 5). 이는 암모니아 연료의 느린 반응 속도와 연료 크로스오버 현상으로 인해, 얇은 막에서는 암모니아 크로스오버가 심화되어 셀 내부에서 혼합 전위(mixed potential)가 형성되고 전극 반응이 저해되기 때문이다[11]. 반면, 두꺼운 막은 막 저항이 다소 커지더라도 연료 크로스오버를 억제함으로써 전반적인 셀 성능을 개선시켰다. 따라서, 암모니아 크로스오버가 주요 성능 제한 인자로 작용하는 DAFC에서는 막 저항 감소보다 크로스오버 저감 효과가 우세하게 나타나며, 성능 향상을 위해서는 적절한 두께의 막을 선택하여 이온 전도도와 연료 크로스오버 저감 특성 간의 균형을 최적화하는 것이 중요함을 확인하였다.

3.1.4 전극 촉매 및 로딩량의 영향

전극 촉매는 연료와 산화제의 전기화학 반응 속도를 결정하는 핵심 요소로 연료전지 성능에 직접적인 영향을 미친다. 백금계 촉매 (Pt-based catalyst)는 저온형 연료전지에서 일반적으로 사용되는 대표적 촉매이나, DAFC에서는 암모니아 크로스오버에 의해 발생하는 캐소드 피독 및 혼합 전위의 문제로 인해 성능 저하가 불가피하다. 따라서 암모니아 산화 활성이 높은 애노드 촉매와 암모니아 내성이 우수한 비백금계 촉매의 선정이 필요하다.

본 연구에서는 애노드 촉매로 Pt-Ir/C를 사용하여 PtIr의 로딩량을 2 mg/cm^{2}와 4 mg/cm^{2}로 비교하였으며, 캐소드 촉매로는 Pt/C 및 Fe–N–C를 사용하여 1 mg/cm^{2}와 3 mg/cm^{2}의 촉매 로딩량의 영향을 비교하였다. Fig. 6에서 나타낸 바와 같이, 캐소드 촉매 로딩량을 Pt 1 mg/cm^{2}로 고정한 상태에서 애노드의 Pt-Ir 로딩량을 증가시킨 결과, 최대 출력밀도는 1.7배 증가하여 240.5 mW/cm^{2}를 나타내었다. 이는 느린 AOR

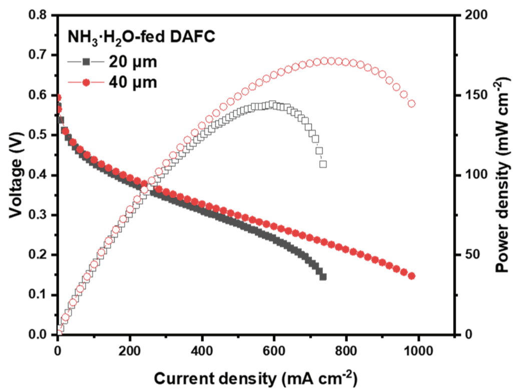

Fig. 5. I–V curves with varying the thickness of the anion exchange membrane for aqueous ammonia-fed DAFCs

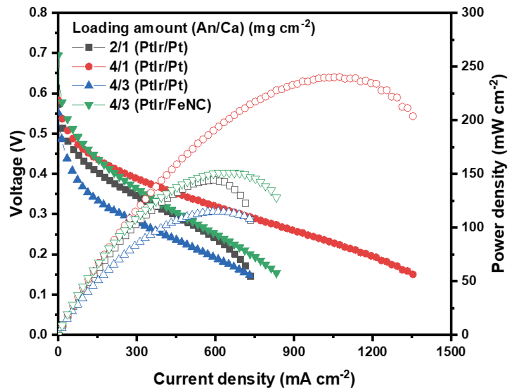

Fig. 6. I–V curves with varying the loading amount of each catalyst for aqueous ammonia-fed DAFCs

을 보완하기 위해 충분한 촉매 표면적이 확보되어야 함을 의미하며, 4 mg/cm^2 조건에서 보다 활발한 반응 활성과 전하 전달이 이루어진 것으로 해석된다.

한편, 애노드 촉매 로딩량을 Pt-Ir 4 mg/cm^{2}로 고정하고 캐소드측 Pt 촉매의 로딩량을 1 mg/cm^{2}과 3 mg/cm^{2}으로 비교한 결과, 오히려 높은 로딩량에서는 최대 출력밀도가 115.0 mW/cm^{2}로 가장 낮게 나타났다. 이는 캐소드에서 일어나는 ORR의 경우, Pt 촉매가 이미 충분한 활성을 가지므로 과도한 로딩이 두꺼운 촉매층을 형성하여 전자의 이동 및 기체 확산을 저해하기 때문으로 판단된다.

Fig. 7의 결과에서 확인되듯이, 캐소드 촉매를 비귀금속 기반 Fe–N–C로 대체한 경우, 현저히 높은 OCV값을 보였다. Pt 촉매를 사용한 경우 OCV는 0.552–0.583 V의 범위를 나타낸 반면, Fe–N–C 촉매는 0.694 V로 약 0.1 V 이상 높은 값을 나타내었다. 이는 Pt 촉매는 암모니아 크로스오버에 의해 연료가 캐소드 측으로 침투할 때 혼합 전위가 형성되어 OCV가 저하되는 반면, Fe–N–C 촉매는 암모니아에 대한 내성이 상대적으로 우수하여 혼합 전위의 영향을 최소화하기 때문이다[12].

그러나 Fe–N–C 촉매는 활성화 영역(activation region)에서는 가장 높은 전압을 보이지만, 오믹 영역(ohmic region)부터는 점차 전압 강하가 발생하여 최대 출력밀도는 151.2 mW/cm^{2}로 Pt 1 mg/cm^2 대비 낮게 나타났다. 이는 Fe–N–C 전극층이 상대적으로 두꺼워 전극 내부에서 이온 및 전자의 이동 경로가 길어지기 때문으로 유추된다. 따라서 Fe–N–C 촉매 적용 시에는 전극 구조 및 로딩량 최적화를 추가적으로 진행할 필요가 있다.

3.2 기체 암모니아 공급 DAFC의 전기화학 성능 분석

3.2.1 음이온 교환막 두께의 영향

기체 암모니아 연료는 건조 암모니아 형태로 공급되기 때문에 MEA가 건조되며 이온 전도도가 급격히 저하되고, 이에 따라 막 저항이 크게 증가하여 셀 성능이 저하된다[13]. 본 연구에서는 기체 암모니아 연료 공급 시 수분 부족 문제를 완화하기 위해 가습된 질소를 건조 암모니아와 혼합하여 공급하였다.

Fig. 8은 AEM 두께 변화에 따른 기체 암모니아 공급 기반 DAFC의 I–V 특성을 나타낸다. 40 μm 막에서의 최대 출력밀도는 10.0 mW/cm^{2}로, 암모니아수 연료 기반 DAFC의 성능보다 현저히 낮은 값을 나타낸다. 이는 기체 암모니아를 연료로 사용할 경우 반응 매질내 이온 이동성이 낮고 촉매 표면에서의 AOR 속도가 느리며, 액상 전해질이 없는 조건에서 구동되어 OH^- 이온의 공급이 제한되기 때문이다.

한편, 20 μm 막에서는 OCV가 0.447 V, 40 μm 막에서는 0.563 V로 두꺼운 막을 적용했을 때 OCV가 약 26.0% 증가하였다. 이는 앞선 수소 및 암모니아수 연료 결과와 마찬가지로 두꺼운 막이 연료 크로

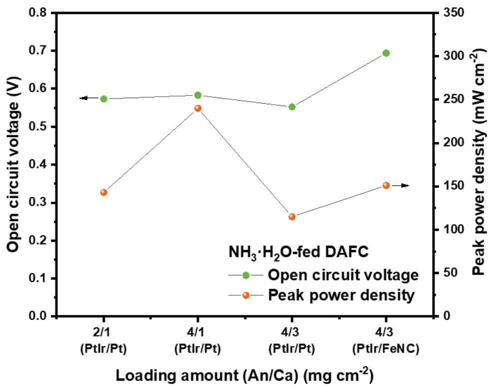

Fig. 7. Open circuit voltage and peak power density depending on the catalyst loading amount

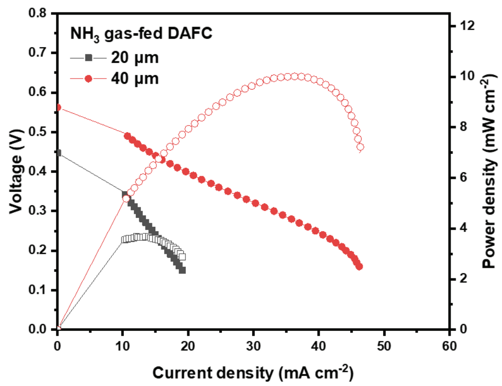

Fig. 8. I–V curves with varying the thickness of the anion exchange membrane for gas ammonia-fed DAFCs

스오버를 억제하여 혼합 전위를 감소시킨 결과로, 특히 기체 암모니아 조건에서는 그 효과가 더 크게 나타나 높은 OCV 향상률을 나타내었다.

3.2.2 전극 촉매 및 로딩량의 영향

Fig. 9는 촉매 종류 및 로딩량 변화에 따른 기체 암모니아 공급 기반 DAFC의 성능 비교 결과를 나타낸다. 캐소드 촉매와 로딩량을 Pt 1 mg/cm^{2}로 고정한 조건에서 애노드측 Pt-Ir의 로딩량을 증가시켰을 때, 최대 출력밀도는 약 1.9배 증가하였다. 이는 기체 암모니아 연료에서도 AOR의 낮은 활성으로 인해 충분한 촉매 로딩량이 요구됨을 보여준다.

애노드 촉매와 로딩량을 Pt-Ir 4 mg/cm^{2}로 고정한 상태에서 캐소드 Pt 촉매 로딩량을 변화시킨 결과, 암모니아수 연료의 경우 로딩량 증가에 따라 성능이 감소하였으나, 기체 암모니아 연료에서는 OCV 및 최대 출력밀도 모두 큰 변화를 보이지 않았다(Fig. 10). 이는 기체 암모니아 연료의 느린 AOR이 전반적인 반응 속도를 지배하기 때문에 ORR의 영향이 상대적으로 제한되었기 때문이다. 따라서 기체 암모니아 공급 기반 DAFC의 성능 향상을 위해서는 무엇보다도 애노드에서의 암모니아 산화 활성을 향상시키는게 우선되어야 한다.

또한, 캐소드 촉매로 비귀금속계 Fe–N–C 촉매를 적용한 경우, OCV는 0.663 V로 Pt 촉매 대비 약 38% 이상 증가하였다. 최대 출력밀도는 역시 22.4 mW/cm^{2}로 가장 높은 값을 나타내어 기체 암모니아 공급 기반 DAFC에서 가장 우수한 성능을 보였다. 이는 기체 암모니아 연료 조건에서 느린 AOR로 인해 애노드 전위가 상승하더라도, Fe–N–C 촉매가 암모니아 내성이 높아 혼합 전위 형성을 억제하고, ORR 활성 특성이 비교적 명확하게 발현되었기 때문으로 해석된다. 따라서 기체 암모니아 공급 기반 DAFC의 성능 향상을 위해서는 애노드측 AOR 활성 개선과 더불어, 암모니아 내성이 우수한 캐소드 촉매의 적용이 중요함을 확인하였다.

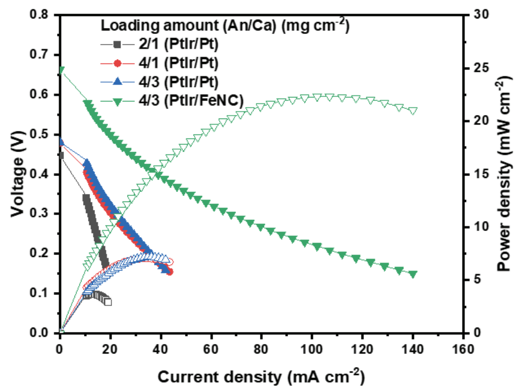

Fig. 9. I–V curves with varying the loading amount of each catalyst for gas ammonia-fed DAFCs

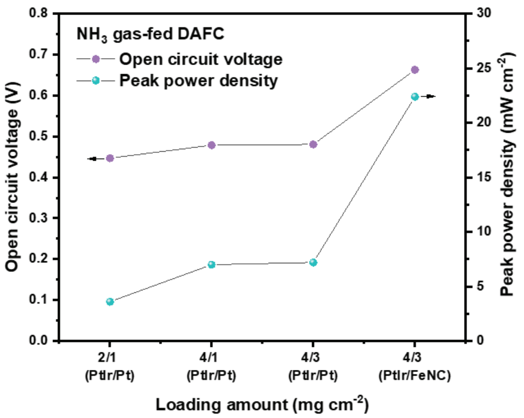

Fig. 10. Open circuit voltage and peak power density depending on the catalyst loading amount

4. 결 론

본 연구에서는 저온형 DAFC의 성능 향상을 위해 MEA 제조 전략과 연료 공급 형태에 따른 구동 특성을 분석하였다. 셀 활성화 방법, AEM의 두께, 촉매 종류 및 로딩량, 연료 공급 형태에 따른 최적 조건을 도출하였다. 그 결과, 암모니아수 연료 공급 기반 DAFC의 최대 출력밀도는 240.5 mW/cm^2, 기체 암모니아 연료 공급 기반 DAFC는 22.4 mW/cm^{2}의 최대 출력밀도를 달성하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

1) 암모니아수 연료의 경우 7 M NH_3 in 1 M KOH와 같이 supporting electrolyte를 포함할 때 OCV와 최대 출력 밀도가 모두 향상되었다. 이는 풍부한 OH^- 이온 공급으로 인해 느린

AOR이 촉진되었기 때문이다.

2) 셀 활성화 방법으로 수소 연료를 사용한 경우, 암모니아 활성화 대비 약 20.2% 높은 최대 출력밀도를 달성하였으며, 이는 애노드 촉매 표면의 친수성 및 OH^- 친화도 향상과 전극 내부 반응 경로 활성화에 기인한다.
3) 연료 특성에 따라 적절한 막 두께를 선택하는 것이 중요하다. 수소 연료 기반 AEMFC에서는 얇은 막 적용시 막 저항 감소로 성능이 향상되나, 암모니아수 및 기체 암모니아 연료 기반 DAFC에서는 암모니아 크로스오버를 억제하기 위해 상대적으로 두꺼운 막이 성능 향상에 유리하였다.
4) 애노드 Pt-Ir/C 촉매는 충분한 로딩량에서 AOR 활성이 증가하여 전반적인 셀 성능을 높였다.
5) 캐소드 Pt/C 촉매의 과도한 로딩은 전극 내부의 전자 및 기체 확산 저해로 인해 오히려 성능 감소를 초래하였다.
6) 캐소드 촉매로 Fe–N–C를 적용한 경우, Pt 촉매 대비 OCV가 현저히 증가하고, 기체 암모니아 연료 조건에서 안정적인 성능을 나타내었다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 기본사업 “차세대 암모니아 연료전지 스택 및 시스템 개발 (NK254D)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. J. E. Shin, “Hydrogen policy trends and current status of hydrogen technology development by value chain”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 562-574, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.562.
2. L. Zhai, S. Liu, and Z. Xiang, “Ammonia as a carbon-free hydrogen carrier for fuel cells: a perspective”, Industrial Chemistry & Materials, Vol. 1, No. 3, 2023, pp. 332-342, doi: https://doi.org/10.1039/D3IM00036B.
3. Y. Kojima and M. Yamaguchi, “Ammonia as a hydrogen energy carrier”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 54, 2022, pp. 22832-22839, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.096.
4. S. Chatterjee, R. K. Parsapur, and K. W. Huang, “Limitations of ammonia as a hydrogen energy carrier for the transportation sector”, ACS Energy Letters, Vol. 6, No. 12, 2021, pp. 4390-4394, doi: https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02189.
5. G. Lee, S. Lee, S. Hong, H. Jung, and S. P. Jung, “Ammonia and liquid hydrogen as energy carriers: challenges and opportunities”, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 46, No. 12, 2024, pp. 816-830, doi: https://doi.org/10.4491/KSEE.2024.46.12.816.
6. S. Kim, J. E. Chae, J. Choi, S. Lee, and C. Park, “Research trend of direct ammonia anion-exchange membrane fuel cells”, Journal of the Korean Institute of Gas, Vol. 27, No. 3, 2023, pp. 41-51, doi: https://doi.org/10.7842/kigas.2023.27.3.41.
7. E. K. Volk, A. L. Clauser, M. E. Kreider, D. D. Soetrisno, S. Khandavalli, J. D. Sugar, S. Kwon, and S. M. Alia, “Role of the ionomer in supporting electrolyte-fed Anion Exchange Membrane water electrolyzers”, ACS Electrochemistry, Vol. 1, No. 2, 2025, pp. 239-248, doi: https://doi.org/10.1021/acselectrochem.4c00061.
8. J. E. Chae, J. Choi, S. Lee, C. Park, and S. Kim, “Effects of fabrication parameters of membrane-electrode assembly for high-performance anion exchange membrane fuel cells”, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 133, 2024, pp. 255-262, doi: https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.11.063.
9. J. Hyun, and H.-T. Kim, “Powering the hydrogen future: current status and challenges of anion exchange membrane fuel cells”, Energy & Environmental Science, Vol. 16, No. 12, 2023, pp. 5633-5662, doi: https://doi.org/10.1039/D3EE01768K.
10. S. H. Lee and D. J. Yoo, “Preparation and characterization of poly (arylene ether) having heterocyclic quaternary ammonium functional groups for anion exchange membranes”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 4, 2022, pp. 372-382, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.4.372.
11. D. Kim, J. Son, Y. Lee, Y. Shin, S. M. Kim, and S. Jang, “Boosting direct-ammonia fuel cell performance via cathode configuration optimization”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 101, 2025, pp. 1496-1502, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.007.
12. T. Wang, Y. Zhao, B. P. Setzler, and Y. Yan, “Improving performance and durability of low temperature direct ammonia fuel cells: effect of backpressure and oxygen reduction catalysts”, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 168, 2021, pp. 014507, doi: https://doi.org/10.1149/1945-7111/abdcca.
13. Y. Zhao, T. Wang, B. P. Setzler, R. Abbasi, J. Wang, and Y. Yan, “A high-performance gas-fed direct ammonia hydroxide exchange membrane fuel cell”, ACS Energy Letters, Vol. 6, No. 5, 2021, pp. 1996-2002, doi: https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c00370.