

# 수소 연료전지 추진 선박의 cathode 에어필터 설계 및 평가

이현우<sup>†</sup> · 진소민 · 정길주 · 한기훈

현대중합금속 기계사업부

## Design and Evaluation of Cathode Air Filter for Hydrogen Fuel Cell-powered Ships

HYUNWOO LEE<sup>†</sup>, SOMIN JIN, GILJU JEONG, KIHOO HAN

Machinery Division, HYUNDAI Welding, 641 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan 44547, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :

hwlee@hyundaiwelding.com

Received 18 October, 2024

Revised 2 December, 2024

Accepted 16 December, 2024

**Abstract** >> Hydrogen energy is a key eco-friendly energy source, and studies aimed at enhancing the performance of hydrogen fuel cells are increasing. In hydrogen fuel cells, balance of plant (BOP) significantly affects the overall efficiency of the fuel cell system. The BOP includes various components such as the air supply system, hydrogen supply system, and thermal management system. This study aims to select an efficient filter through the design and performance evaluation of air filters in air supply systems. The air filter is designed to efficiently remove sea salt aerosols and harmful gases present in marine environments, ensuring the delivery of clean air to the cathode.

**Key words** : Carbon neutrality(탄소중립), Ship(선박), Hydrogen fuel cell(수소 연료전지), Air filter(에어필터), Filtration efficiency(입자 포집율), Gas removal efficiency(가스 제거 효율)

## 1. 서론

지구 온난화, 이상 기후 등과 같이 환경과 관련된 이슈가 늘어나면서 탄소 저감의 필요성과 이에 대한 관심이 증가하고 있다. 탄소 저감을 위한 정책 중 하나인 탄소중립은 인간의 활동에 의한 온실가스 배출을 최대한 줄이고 남은 온실가스는 흡수하여 실질적인 탄소 배출량을 0으로 만드는 개념이다. 이러한 탄소중립을 위해서 글로벌 국가들의 다양한 노력이 이루어지고 있으며 국내에서도 2050 탄소중립 목표를

수립 및 계획하여 탄소중립을 위해 노력하고 있다<sup>1)</sup>. 그리고 탄소중립 정책에 대한 다양한 연구와 분석을 통하여 현재의 문제점 파악과 향후 정책의 방향성에 대한 의견들이 활발하게 표현되고 있다<sup>2-4)</sup>.

탄소 배출을 줄이기 위한 방안으로 모빌리티의 친환경화가 대표적으로 진행되고 있다. 전기차 보급, 수소전기차 보급, 노후 경유차의 친환경 전환과 같은 보급 사업이 진행되고 있으며 우수한 효율의 배터리 및 연료전지의 개발을 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다<sup>5-7)</sup>. 탄소중립을 위한 신재생에너지 중 연

료전지는 수소를 연료로 사용하여 대기 중의 산소와 전기화학 반응을 시켜 전기를 생산하는 장치이다. 연료전지의 종류로는 고온형 연료전지로 용융탄산염(molten carbonate fuel cell, MCFC)과 고체산화물(solid oxide fuel cell, SOFC)이 있으며 저온형 연료전지로는 인산염(phosphoric acid fuel cell, PAFC), 알칼리(alkaline fuel cell, AFC), 고분자 전해질형(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC), 직접 메탄올(direct methanol fuel cell, DMFC)이 있다. 이러한 연료전지의 종류는 작동 온도, 촉매, 전해질 등의 작동 조건 및 구성 요소에 따라 분류되고 있으며 각 종류마다 특징에 차이가 있어 사용처 및 설치 용도에 적합한 연료전지를 선정하여 사용되고 있다. 기본적으로 연료전지는 공기극(양극, cathode), 연료극(음극, anode) 그리고 전해질(electrolyte)로 이루어져 있으며 연료전지 시스템은 스택(stack)과 balance of plant(BOP)로 구성되어 있다. BOP는 스택을 제외한 나머지 구성 부품을 뜻하며 수소 공급, 공기 공급, 열 제어 등 연료전지 작동에 필수적인 역할을 하는 각각의 부품 및 시스템이다.

일상생활에서 연료전지를 접할 수 있는 대표적인 사례는 수소전기차이다. 수소전기차에는 PEMFC가 적용되어 있으며 상용화되어 판매되고 있다. 최근에는 자동차 이외에도 선박에 연료전지를 사용하는 것에 대한 관심이 늘어나고 있고 연구가 활발히 진행되고 있으며 실제 운영 사례도 늘어나고 있다<sup>8-16)</sup>. 연료전지의 공기 유입부에서는 공기 공급 시스템을 통하여 대기 중의 O<sub>2</sub>가 cathode로 공급될 수 있도록 한다. 해상에서는 바닷물에 의한 비래염분이 존재하고 있으며 이러한 비래염분이 공기와 함께 유입될 시 연료전지의 성능 저하 및 주변 부품들의 부식을 유발한다<sup>17)</sup>. 그리고 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, volatile organic compounds(VOCs), NH<sub>3</sub> 등 연료전지의 성능 저하를 초래하는 유해가스들이 선박 주변 및 육상에서 배출되고 있다<sup>18,19)</sup>. 그러므로 연료전지의 수명과 성능을 보호하기 위하여 비래염분 및 유해가스의 제거가 가능한 에어필터의 설치는 필수적인 구성이다.

본 연구에서는 선박용 수소 연료전지의 cathode로

유입되는 공기의 정화를 위하여 전처리, high efficiency particulate air (HEPA), 케미칼 필터로 구성되어 있는 에어필터를 설계하였다. 설계를 바탕으로 제작된 에어필터는 공인 시험기관을 통하여 성능 및 특성 평가가 진행되었으며 시험 평가 과정을 통하여 가장 효율적인 필터를 선정하였다.

## 2. 설 계

### 2.1 유해인자

#### 2.1.1 비래염분

연료전지를 사용함에 있어 육상과 다르게 해상에서는 염분에 대한 관리가 필요하다. 주로 파도에 의해 발생하는 비래염분은 연료전지의 성능에 매우 치명적이며 주로 염화나트륨(NaCl)으로 구성되어 있다. 비래염분은 연료전지의 성능뿐만 아니라 주변 부품 및 기기들의 부식을 초래하므로 필수적으로 제거하여야 하는 유해인자이다. 하지만 비래염분은 일반적으로 0.05-10.00 μm의 크기여서 제거가 쉽지 않다. 더군다나 수분을 머금고 있는 형태이기 때문에 필터의 성능과 수명을 급속도로 감소시킨다. 비래염분 또는 염화나트륨이 연료전지의 성능에 미치는 영향에 대하여 다양한 연구가 진행되고 있다<sup>20-23)</sup>. Uemura 등<sup>24)</sup>은 비래염분이 PEMFC의 성능 감소에 미치는 영향을 실험적으로 확인하기 위하여 염화나트륨을 분무하여 cathode에 주입하였다. 그 결과 매우 작은 비래염분이 가스 확산층(gas diffusion layer, GDL)을 통과 후 촉매층(catalyst layer)까지 도달하여 PEMFC의 성능을 저하시켰음을 확인하였다. Yoo와 Cho<sup>25)</sup>는 수분과 염화나트륨이 PEMFC에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며 장시간 실험을 통해 종류수를 사용한 경우에도 성능이 감소함을 확인하였지만 염화나트륨 용액을 사용한 경우의 성능 감소의 폭이 더 큼을 확인하여 염화나트륨이 연료전지의 성능 저하에 영향을 미침을 실험을 통해 보여주었다.

앞서 언급한 연구 사례들을 보았을 때 비래염분의 제거는 필수적이다. 따라서 10 μm 이하의 작은 입자를

제거하기 위하여 HEPA 필터를 적용하기로 하였다. HEPA 필터는 0.3  $\mu\text{m}$  이상 크기의 입자를 99.95% 제거할 수 있는 H13 등급을 선정하였다. 그리고 HEPA 필터의 입자 누적에 의한 통기 저항 증가를 감소시키기 위하여 HEPA 필터 전단에 전처리 필터를 설치하였다.

### 2.1.2 유해가스

연료전지의 성능을 유지하고 수명을 길게 하기 위해서는 유해가스에 대한 대책이 필요하다. 유해가스란  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , VOCs,  $\text{NH}_3$  등과 같이 연료전지의 성능을 저하시키는 가스를 일컫는다. 이러한 유해가스가 cathode로 유입되게 되면 연료전지의 성능이 저하되며 가스의 종류마다 성능 저하에 미치는 영향의 정도가 다르다. 유해가스에 의한 연료전지의 성능 저하는 다양한 연구를 통해 증명되었다<sup>26-29</sup>. Wang 등<sup>30</sup>은 톨루엔이 연료전지의 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 통하여 톨루엔이 촉매에 흡착되어 반응 속도를 감소시키면서 연료전지의 성능 감소를 유발함을 확인하였으며 Pan과 Pei<sup>31</sup>는  $\text{SO}_2$ 가 연료전지의 성능에 미치는 영향을 가스 농도와 유속에 따른 비교를 통하여 분석하였다. Halseid 등<sup>32</sup>은 연료전지가  $\text{NH}_3$ 에 장시간 노출되었을 경우에 대한 성능 감소를 비교하였다. Misz 등<sup>33</sup>은  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ 가 연료전지의 성능에 미치는 영향을 실험을 통해 확인하였으며 유해가스에 의한 성능 감소를 방지하기 위하여 활성탄으로 만든 에어필터의 효과를 확인하였다. Lv 등<sup>34</sup>은 유동 해석을 활용하여 cathode 에어필터의  $\text{SO}_2$  흡착 성능 및 수명에 대하여 예측하였다. 선행 연구 사례들을 보았을 때 대부분의 유해가스는 막전극 집합체(membrane electrode assemble, MEA)에 흡착되어 반응 속도를 감소시키면서 연료전지의 성능 감소를 유발하거나 촉매층과 GDL에 영향을 미쳐 물질 전달 저항을 증가시켜 연료전지의 성능이 감소되는 것으로 확인되었다.

유해가스의 유입 방지를 위해서는 활성탄 또는 이온교환수지를 활용한 케미칼 필터의 적용이 필요하다. 케미칼 필터는 적용 환경 및 설계자의 의도에 따

라 활성탄의 양, 이온교환수지의 양, layer의 수, 여재의 종류 등의 다양한 변수를 가지고 설계가 가능하다<sup>35,36</sup>. 활성탄의 선정에서는 활성탄의 종류에 따라 공극 직경, 공극 부피, 비표면적과 같은 특성이 다르므로 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 분석을 통해 활성탄의 특성 파악이 중요하며 파쇄 크기, 조립 형태에 따른 특성도 다르므로 목적에 적합한 활성탄의 선정이 필요하다<sup>37</sup>.

### 2.2 에어필터 설계

Kennedy 등<sup>38</sup>은 cathode 에어필터의 설계 순서와 설계 시 필요한 계산식들을 정리하여 계산값과 실제 결과를 비교하여 계산을 통한 에어필터의 통기 저항, 수명 등의 예측이 가능함을 확인하였다. 이때 연료전지의 출력에 적합한 유량을 계산하기 위하여 다음의 식이 사용되었다.

$$\text{Air flowrate} = 1.82 \times 10^{-2} \times \lambda \times \frac{P_c}{V_c} (\text{SLPM}) \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 화학양론비이고  $P_c$ 는 스택 운전 출력(W),  $V_c$ 는 단 셀 운전 전위(V)이다.

본 연구에서는 연료전지에 필요한 최적 유량을 계산한 다음 필터의 크기를 선정하였으며 선정된 필터 크기를 기준으로 전처리, HEPA 그리고 케미칼 필터에 대한 세부 설계를 진행하였다. HEPA 필터는 비래염분의 유입을 방지하기 위하여 H13 등급을 선정하였다. 높은 등급을 사용할수록 입자 포집률은 우수해지지만 통기 저항이 증가하므로 공기 공급 시스템에 설치된 블로워의 부하를 줄이기 위하여 H13등급을 선정하였다. HEPA 필터에 입자가 누적되면서 높아지는 통기 저항의 증가 속도를 줄이기 위하여 HEPA 필터 전단에 전처리 필터를 설치하였으며 수분에 의한 필터 손상도 방지할 수 있다. 전처리 필터가 수분과 입자를 여과하게 되면 전처리 필터의 수명이 줄어들지만 이러한 설계는 가격적인 측면에서 전처리 필터가 HEPA 필터보다 가격이 저렴하므로 경제적인 설계로 보여진다. 총 4종류의 HEPA 필터가

제작되었으며 각 필터는 여재의 두께와 짜임 구조에 차이를 두었다.

케미칼 필터의 경우 국내 항구별 대기 성분 분석 데이터를 바탕으로 설계되었으며 목표 수명은 2,000시간이다. 대기 중의 유해가스 농도와 목표 수명 시간을 기준으로 활성탄, 이온교환수지, 여재가 선정되었으며 산성 가스의 제거는 활성탄, NH<sub>3</sub>와 같은 염기성 가스는 이온교환 수지를 사용하여 제거하였다. 적합한 활성탄의 선정을 위하여 BET 분석을 진행하였다. 분석 결과는 Table 1에 나타내었으며 활성탄의 혼합 비율 및 당량에 따라 총 4종류의 케미칼 필터를 제작하였다.

에어필터 시스템의 전체 통기 저항 목표는 500 Pa 이하이다. 여기에서 에어필터 시스템은 전처리 필터, HEPA 필터 그리고 케미칼 필터로 구성된 시스템을 말한다.

### 3. 시험 조건

#### 3.1 HEPA 필터

HEPA 필터의 비레염분 제거 성능 및 통기 저항 변화를 확인하기 위하여 염화칼륨(KCl) 입자와 시험용 먼지(ISO 12103-1, A2 Fine dust)를 사용한 HEPA 필터 시험이 진행되었다.

비레염분 제거 성능은 염화나트륨을 대신하여 염화칼륨 입자가 사용되었으며 유량 2,500 LPM의 조건에서 0.3 μm의 염화칼륨 입자를 75 mg/m<sup>3</sup>의 농도로 공급하면서 필터의 전단과 후단에서의 입자 수를 측정하는 방법으로 입자 포집률을 계산하였다. 이때 공급된 입자의 농도는 평균 해상 대기 조건의 약

1,000배 이상의 조건이다. 해당 시험은 KS B 6141:2020 9.1 형식 1을 준용하였다.

통기 저항 변화 시험은 시험용 먼지를 150 mg/m<sup>3</sup>의 농도로 공급하며 진행되었으며 5분간 입자를 공급하면서 통기 저항의 변화를 확인하였다. 통기 저항의 증가는 필터의 수명과 연관이 있다. Xu 등<sup>39)</sup>은 입자의 축적량에 따른 통기 저항의 증가를 실험적으로 연구하였으며 통기 저항과 입자 포집률의 연관성 및 통기 저항에 따른 필터의 수명에 대해 정리하여 통기 저항 측정 시험에 대한 필요성을 보여주고 있다. 통기 저항 변화 시험은 SPS-KACA014-0144:2019 방법을 준용하였다.

#### 3.2 케미칼 필터

유해가스를 제거하는 역할의 케미칼 필터의 성능 평가는 각 유해가스를 주입시켜 주면서 필터 전단과 후단에서의 가스 농도 변화를 측정하여 성능을 평가하였다. SO<sub>2</sub>와 톨루엔에 대한 성능 평가를 하였으며 5분간 150 m<sup>3</sup>/h의 유량에서 10 ppm의 농도로 가스를 주입하는 조건으로 시험이 진행되었다. 시험은 SPS-KACA014-0144:2019 방법을 준용하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 HEPA 필터

HEPA 필터 성능 시험을 통하여 최종 필터를 선정하였다. 필터의 성능 확인 및 비교를 위해 총 4개의 필터가 시험에 사용되었다. 먼저 비레염분에 대한 시험 결과는 Fig. 1에 그래프로 나타내었다. 0.3 μm의 염화칼륨 입자에 대한 포집률은 최소 99.7%, 최대 99.91%로 모두 우수한 결과를 보였다.

통기 저항 변화 시험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 시험용 먼지를 5분간 분사하여 얻은 시험 결과로 HF-1은 초기 통기 저항 189.4 Pa에서 최종 193.2 Pa로 3.8 Pa 증가하였으며 HF-2는 초기 통기 저항 330.8 Pa에서 최종 352.3 Pa로 21.5 Pa 증가한 결과를 보였다.

Table 1. BET analysis results of activated carbons

	Pore diameter (nm)	Pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	Specific surface area (m <sup>2</sup> /g)
AC-1	38.02	0.1242	826
AC-2	29.31	0.0665	1,104
AC-3	30.36	0.0432	950

HF-3은 초기 통기 저항 124.8 Pa에서 최종 126.5 Pa로 상승하여 1.7 Pa의 매우 작은 증가폭을 보였고 HF-4는 초기 통기 저항 169.2 Pa에서 최종 175.7 Pa로 6.5 Pa이 증가한 결과를 보였다.

0.3  $\mu\text{m}$ 의 염화칼륨 입자를 사용한 비래염분 제거 성능에 대한 시험 결과와 시험용 먼지를 사용한 통기 저항 증가 시험 결과를 보았을 때 HF-3이 우수한 입자 포집률과 가장 낮은 초기 통기 저항 및 통기 저항 증가폭을 보여주었다. 하지만 연료전지에 있어 위험요소 중 하나인 비래염분을 가장 우수하게 제거할 수 있는 성능을 보여준 HF-4의 초기 통기 저항 및 통기 저항 증가폭 역시 우수한 결과를 보였으며 설계 목표 통기 저항 범위를 벗어나지 않아 HF-4를 최종 HEPA 필터로 선정하였다.

### 4.2 케미칼 필터

연료전지에 유해한 가스를 제거하기 위한 케미칼

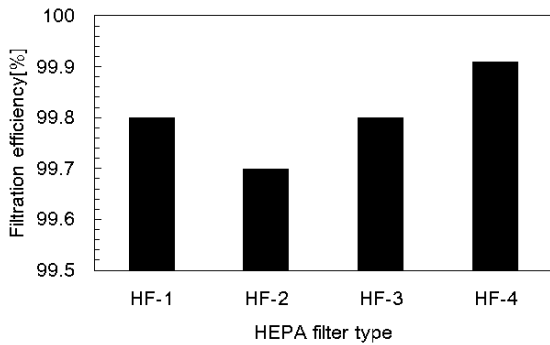


Fig. 1. Results of filtration efficiency test

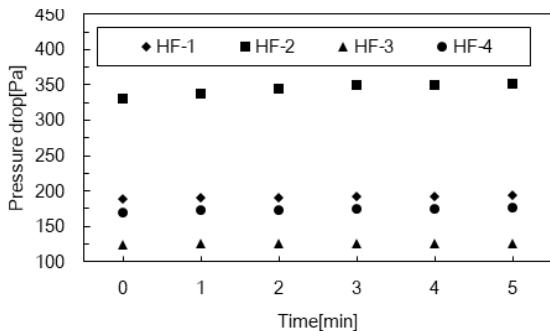
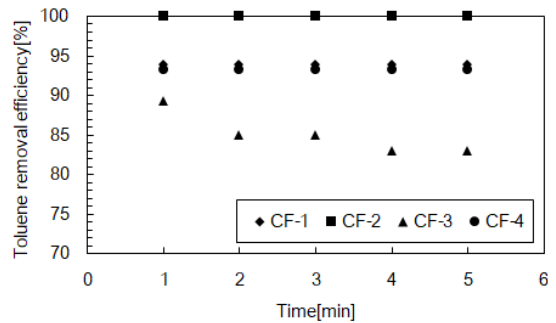


Fig. 2. Results of pressure drop test

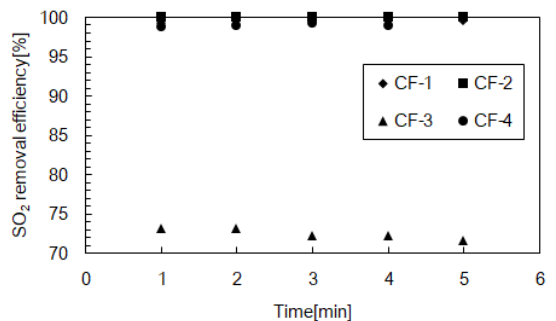
필터의 가스 제거 성능에 대한 시험을 진행하였다. 시험에는 SO<sub>2</sub>와 톨루엔 가스가 사용되었다. 성능 비교 및 최종 필터 선정을 위하여 총 4개의 필터에 대한 가스 제거 효율 시험이 진행되었다. 각 가스에 대한 영향을 받지 않게 하기 위하여 동일 모델의 필터를 3개씩 준비하였다. 먼저 케미칼 필터의 초기 통기 저항 결과로 CF-1은 28.0 Pa, CF-2는 66.3 Pa, CF-3은 59.9 Pa, CF-4는 64.1 Pa로 CF-1의 초기 통기 저항이 가장 낮게 나타났으며 모든 필터가 통기 저항 설계 기준에 부합함을 확인하였다. SO<sub>2</sub> 가스의 제거 효율은 CF-2가 100%로 가장 높게 나타났으며 톨루엔

Table 2. Initial pressure drop results of chemical filter

	Initial pressure drop (Pa)
CF-1	28.0
CF-2	66.3
CF-3	59.9
CF4	64.1



(a)



(b)

Fig. 3. Results of gas removal efficiency. (a) SO<sub>2</sub>, (b) toluene



시험에서도 CF-2가 100%로 가장 높은 제거 효율을 보여주었다. 하지만 CF-2는 에어필터의 적용 환경에 대하여 과도한 성능으로 설계된 것으로 확인되었다. 케미칼 필터의 초기 통기 저항 및 가스 제거 효율은 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다. 통기 저항, 가스 제거 효율 그리고 설계 목표에 대한 성능 비교를 통하여 최종적으로 CF-4가 설계 목표 및 해상 환경에 적합한 필터로 선정되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 선박용 연료전지에 사용될 cathode 에어필터를 설계하고 최종 모델 선정을 위하여 연료전지에 부정적 영향을 미치는 유해인자에 대한 시험 평가를 진행하였다. 에어필터는 전처리, HEPA, 그리고 케미칼 필터로 구성되어 있다. 유해인자 시험으로는 HEPA 필터의 비래염분 포집률 평가를 위한 입자 포집 성능 평가 시험, 통기 저항 증가 시험을 진행하였고 케미칼 필터의 유해가스 제거 성능 평가를 위한 SO<sub>2</sub> 및 톨루엔 제거 시험을 진행하였다. HEPA 필터 및 케미칼 필터의 성능 평가 시험 결과 모든 필터의 통기 저항 결과가 설계 기준에 부합하였으므로 필터 성능과 적용 환경에 대한 성능 적합성에 대한 평가로 최종 필터를 선정하였다. 적용 환경에 대한 성능 적합성 평가는 과도한 성능의 설계를 방지하기 위함이다. 이러한 시험 평가 과정을 거쳐 HEPA 필터는 HF-4로 선정하였으며 케미칼 필터로는 CF-4를 선정하였다.

본 연구를 통하여 현재 진행 중인 소형 수소연료전지 추진 선박에 적합한 에어필터의 선정이 가능하였다. 향후 실제 사용 현장에서의 필터 성능 평가를 위한 시험 장치를 제작하여 현장 검증을 진행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 안전기반 소형수소 추진선박 기술개발 및 실증 사업의 지원으로 수행되

었음(과제명: LBTS를 활용한 연료전지 기반 전기 추진시스템 기술개발, 과제번호: RS-2022-00142947).

## References

1. C. Kim, G. Kim, and H. Kim, "Analysis of domestic and foreign policy and technology trends for hydrogen industry development", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34.No. 2, 2023, pp. 122-131, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.2.122>.
2. J. Kim and C. Kim, "Analysis of operation of the model school for carbon neutrality and directions for environmental education with a whole school approach", *Korean Journal of Environmental Education*, Vol. 37, No. 2, 2024, pp. 282-302, doi: <https://doi.org/10.17965/kjee.2024.37.2.282>.
3. M. G. Choi, "A Study on issues and improvement measures of the special act on offshore wind power for the realization of carbon neutrality", *Ocean Policy Research*, Vol. 39. No. 1, 2024, pp. 187-224. Retrieved from <https://www.kmi.re.kr/synap/skin/doc.html?fn=202407031307123117.pdf&rs=/synap/result/&page=null&type=null>.
4. H. Hwang, "A study on tax system for carbon neutrality", *Seoul Tax Law Review*, Vol. 29, No. 3, 2023, pp. 529-568, doi: <https://doi.org/10.16974/stlr.2023.29.3.011>.
5. J. Lee, "Analysis of types and performance of portable replaceable batteries", *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 32, No. 4, 2024, pp. 357-362, doi: <https://doi.org/10.7467/KSAE.2024.32.4.357>.
6. Y. Kim and K. Yoo, "Development of highly heat-resistant polyimide separator to improve thermal stability and performance in electric vehicle batteries", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, Vol. 48, No. 1, 2024, pp. 1-7, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2024.48.1.001>.
7. W. Kim, S. Lee, R. Song, S. Park, T. Lim, and J. Lee, "Development of tubular solid oxide fuel cells with advanced anode current collection", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 24, No. 6, 2013, pp. 480-486, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2013.24.6.480>.
8. U. S. Congress Office of Technology Assessment, "Marine applications for fuel cell technology: a technical memorandum", U. S. Government Printing Office, USA, 1986. Retrieved from <https://ota.fas.org/reports/8612.pdf>.
9. T. A. Dahl, O. H. Staveli, and G. Sakariassen, "An approach to ventilation on hydrogen powered ships [Bachelor's thesis]", Bergen: Western Norway University of Applied Sciences, 2019.
10. D. J. Yorke, "Fuel cell solution for marine applications", *The*

- Institution of Gas Engineers & Managers, 2021. Retrieved from <https://www.h2knowledgecentre.com/content/conference3591>.
11. F. Vogler and G. Würsig, "New developments for maritime fuel cell systems", In: In: D. Stolten and T. Grube, editors. 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010: parallel sessions book 5: strategic analyses / safety issues / existing and emerging markets; 2010 May 16-21; Essen, Germany, 2010. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:54538435>.
  12. B. R. Ryu, P. A. Duong, J. B. Kim, S. Y. Choi, J. W. Shin, J. Jung, and H. Kang, "The effect of ventilation on the hazards of hydrogen release in enclosed areas of hydrogen-fueled ship", *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11, No. 9, 2023, pp. 1639, doi: <https://doi.org/10.3390/jmse11091639>.
  13. T. Tronstad, H. H. Åstrand, G. P. Haugom, and L. Langfeldt, "Study on the use of fuel cells in shipping", European Maritime Safety Agency, 2017. Retrieved from <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/2921-emsa-study-on-the-use-of-fuel-cells-in-shipping.html>.
  14. H. Cho, S. Hyeon, S. Jung, H. Ji, and J. Choi, "A study on optimal operation of methanol steam reforming system for hydrogen fuel cell propulsion ships", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 733-742, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.733>.
  15. J. Lim, S. Lee, S. Yoon, and O. Lim, "The technology development and substantiation of small hydrogen powered vessel", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 555-561, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.555>.
  16. L. E. Klebanoff, J. W. Pratt, and C. B. LaFleur, "Comparison of the safety-related physical and combustion properties of liquid hydrogen and liquid natural gas in the context of the SF-BREEZE high-speed fuel-cell ferry", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 1, 2017, pp. 757-774, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.024>.
  17. M. S. Mikkola, T. Rockward, F. A. Uribe, and B. S. Pivovar, "The effect of NaCl in the cathode air stream on PEMFC performance", *Fuel cells*, Vol. 7, No. 2, 2007, pp. 153-158, doi: <https://doi.org/10.1002/fuce.200600206>.
  18. Y. Rho and Y. T. Chang, "Assessing greenhouse and noxious gas emissions from stevedoring work at the port of Incheon", *Journal of Korea Port Economic Association*, Vol. 31, No. 4, 2015, pp. 133-150. Retrieved from <https://www.kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci?sereArticleSearchBean.artiId=ART002073938>.
  19. J. H. Jang, Y. Y. Kim, J. H. Han, S. Y. Lee, E. A. Cho, H. J. Kim, and T. H. Lim, "The effect of air impurities on the PEMFC performances", 2008 Annual Spring Conference of The Korean Society for New and Renewable Energy, Vol. 2008, 2008, pp. 526-529. Retrieved from <https://koreascience.kr/article/CFKO200835535943769.page>.
  20. H. Li, H. Wang, W. Qian, S. Zhang, S. Wessel, T. T. H. Cheng, J. Shen, and S. Wu, "Chloride contamination effects on proton exchange membrane fuel cell performance and durability", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, No. 15, 2011, pp. 6249-6255, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.04.018>.
  21. S. Park, D. Shorova, and H. Kim, "Effect of operating cell voltage on the NaCl poisoning mechanism in polymer electrolyte membrane fuel cells", *Journal of Power Sources*, Vol. 538, 2022, pp. 231590, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231590>.
  22. X. Wen, Z. Li, H. Wang, L. Xiao, L. Li, K. Mao, and F. Lu, "Experimental investigation for proton exchange membrane fuel cells in marine salt spray environment", *ACS Omega*, Vol. 9, No. 23, 2024, pp. 24880-24888, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01712>.
  23. B. V. Sasank, N. Rajalakshmi, and K. S. Dhathathreyan, "Performance analysis of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack operated under marine environmental conditions", *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 21, 2016, pp. 471-478, doi: <https://doi.org/10.1007/s00773-016-0369-y>.
  24. S. Uemura, M. Yamazaki, T. Yoshida, T. C. Jao, and S. Hirai, "Performance degradation of PEMFC by sea salt aerosol contamination", *ECS Transactions*, Vol. 80, No. 8, 2017, pp. 651-655, doi: <https://doi.org/10.1149/08008.0651ecst>.
  25. H. J. Yoo and G. Y. Cho, "Effects of humidification with nacl solution mist on electrochemical characteristics of polymer electrolyte membrane fuel cells", *Sustainability*, Vol. 14, No. 23, 2022, pp. 16242, doi: <https://doi.org/10.3390/su142316242>.
  26. K. Hu and D. Yang, "Studies on the effects of NH<sub>3</sub> in H<sub>2</sub> and air on the performance of PEMFC", *Energies*, Vol. 14, No. 20, 2021, pp. 6556, doi: <https://doi.org/10.3390/en14206556>.
  27. X. Ma, D. Yang, W. Zhou, C. Zhang, X. Pan, L. Xu, M. Wu, and J. Ma, "Evaluation of activated carbon adsorbent for fuel cell cathode air filtration", *Journal of Power Sources*, Vol. 175, No. 1, 2008, pp. 383-389, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.116>.
  28. A. Talke, U. Misz, G. Konrad, and A. Heinzl, "Impact of air contaminants on subscale single fuel cells and an automotive short stack", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 3, 2015, pp. 70-79. Retrieved from <https://www.davidpublisher.com/index.php/Home/Article/index?id=21779.html>.
  29. A. Talke, U. Misz, G. Konrad, A. Heinzl, D. Klemp, and R. Wegener, "Influence of urban air on proton exchange membrane fuel cell vehicles - Long term effects of air contaminants in an authentic driving cycle", *Journal of Power Sources*, Vol. 400, 2018, pp. 556-565, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.063>.
  30. C. Wang, K. Liu, and J. Liu, "Toluene adsorption performance

- study of cathode air filter for high-power hydrogen fuel cell vehicles”, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 461, 2023, pp. 141782, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141782>.
31. Y. Pan and J. Pei, “Study on the SO<sub>2</sub> adsorption performance of dual-layer activated carbon cloth cathode air filter for high-power fuel cell”, *Fuel*, Vol. 361, 2024, pp. 130661, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130661>.
  32. R. Halseid, P. J. S. Vie, and R. Tunold, “Effect of ammonia on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cells”, *Journal of Power Sources*, Vol. 154, No. 2, 2006, pp. 343-350, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.10.011>.
  33. U. Misz, J. Burfeind, P. Beckhaus, and A. Heinzl “Analysis of the influence of a filter for traffic-related gaseous and chaptericulate contaminants on PEMFC”, In: D. Stolten and T. Grube, editors. 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010: parallel sessions book 1: fuel cell basics / fuel infrastructures; 2010 May 16-21; Essen, Germany, 2010, pp. 171. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2128/3866>.
  34. H. Lv, P. Liu, S. Cai, D. Yang, and J. Ma, “Design and simulation for fuel cell cathode air filter”, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 4, No. 3, 2010, pp. 460-463, doi: <https://doi.org/10.3390/wevj4030460>.
  35. P. M. Tronville and R. D. Rivers, “Assessing the performance of combination particulate and gaseous contaminant air filters”, 4 Contributo in Atti di Convegno (Proceeding), Vol. 2, 2007, pp. 219-226, doi: <https://doi.org/11583/1520552>.
  36. C. Özyalcin, P. Mauermann, S. Dirkes, P. Thiele, S. Sterlepper, and S. Pischinger, “Investigation of filtration phenomena of air pollutants on cathode air filters for PEM fuel cells”, *Catalysts*, Vol. 11, No. 11, 2021, pp. 1339, doi: <https://doi.org/10.3390/catal11111339>.
  37. Y. Zhi and J. Liu, “Analysis of chemical filter performance and activated carbon microstructure at low concentration”, *Building and Environment*, Vol. 169, 2020, pp. 106563, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106563>.
  38. D. M. Kennedy, D. R. Cahela, W. H. Zhu, K. C. Westrom, R. M. Nelms, and B. J. Tatarchuk, “Fuel cell cathode air filters: methodologies for design and optimization”, *Journal of Power Sources*, Vol. 168, No. 2, 2007, pp. 391-399, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.020>.
  39. B. Xu, J. Liu, S. Ren, W. Yin, and Q. Chen, “Investigation of the performance of airliner cabin air filters throughout lifetime usage”, *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 13, No. 5, 2013, pp. 1544-1551, doi: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.11.0330>.