

## 자동차 분야 수소연료전지시스템 소개와 선박 적용을 위한 핵심 기술

임동하(한국생산기술연구원)

### 1. 서론

국제 수출입 물량의 90% 정도가 해상운송에 의존하고 있는 실정이며, 이러한 이유로 전 세계 해운업 활동을 통해 발생하는 온실가스 배출량은 상당한 수준이다. 그림 1은 2012년에서 2050년까지의 해운업 부문에서의 온실가스 배출 시나리오를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이, 온실가스 배출에 대한 별다른 감축노력이 없다면 온실가스 배출은 2050년까지 2012년 배출량 대비 최소 50%, 최대 250%까지 증가할 전망이다이라고 한다.

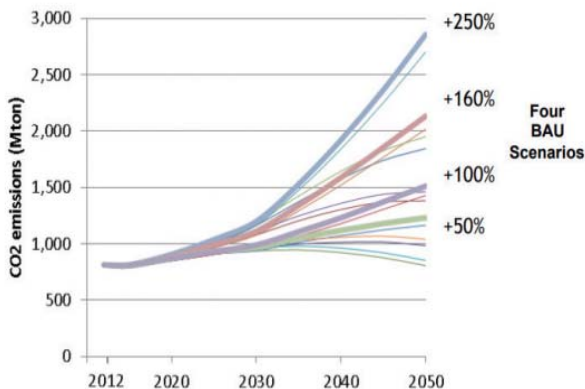


그림 1 해운업 부문 온실가스 배출 시나리오 ( '12년 ~ '50년 )

중·단기적으로는 선박연료로 사용하고 있는 벙커나 디젤을 LNG와 같은 친환경연료로 전환하되, 장기적으로는 암모니아, 수소 등의 CO<sub>2</sub>-free인 비화석연료로 바꾸어야 할 필요가 있다. 친환경연료인 LNG 사용은 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 규제에는 대안이 될 수 있지만, CO<sub>2</sub> 발생으로 인해 온실가스(GHG) 규제에는 대안이 될 수 없기 때문이다. IMO 규제로 인해 선박 추진기관과 부속설비뿐만 아니라 친환경 가스연료 사용 시 벙커링 시설도 고려되어야 하므로 IMO의 강제성을 띄고 있는 규제는 조선 및 해운산업에 아주 큰 변화를 가져올 것으로 생각된다. 해외 선진국에서는 이러한 변화에 미리 대비하고 있는 모습이다. 특히, 약 10여 년 전부터 수소연료전지를 선박에 탑재시켜 전기를 생산하고 모터를 구동시

켜 추진력을 얻는 방식으로 기술개발을 진행하고 있다.

연료전지(Fuel Cell)는 전기화학적 변환을 통해 화학에너지를 기계에너지로 변환하는 발전장치이며, 수소와 산소의 전기화학적반응을 통해 전기를 발생시키는 친환경 전기발전기이다. 수소전기차는 내연기관 엔진 대신 화학반응을 통해 생산된 전기를 통해 모터를 구동하여 주행하는 친환경 자동차이다. 수소사회로 진입하는데 있어 수소자동차의 역할은 매우 크다고 할 수 있다. 첫째는 주변에서 흔히 볼 수 있는 교통수단인 수소자동차를 통해 수소사회를 거부감 없이 혹은 자연스럽게 받아들일 수 있고, 둘째로 만약 수소자동차에 적용되는 수소저장·공급기술, 연료전지기술, 전기추진기술 등이 상용화에 성공한다면 자동차에 적용되었던 기술을 선박, 항공, 철도 등 타분야로 쉽게 적용시켜 볼 수 있기 때문이다. 특히 수소연료전지는 수소차뿐만 아니라 선박, 기차, 잠수함 등 전기 동력원이 필요한 모든 분야에 쓰일 수 있기 때문에 정부가 수소차와 함께 역점을 두는 부분은 수소연료전지 보급 확산이다. 지난 1월 정부는 세계 최고수준의 수소경제 선도국가로 도약하기 위해 수소경제 활성화 로드맵을 발표하였다. 그 중에서 우리나라가 강점이 있는 수소차와 연료전지를 양대 축으로 수소경제를 선도할 수 있는 산업생태계를 구축하겠다는 전략이다.

이러한 이유로 이미 어느 정도 기술격도에 올랐다는 평가를 받고 있는 우리나라 자동차분야의 연료전지에 대해 이해하고, 이를 바탕으로 선박 적용을 위한 핵심기술을 발굴한다면 정부의 정책기조에도 부합하고 수소연료전지선박이 상용화되는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

연료전지추진선박에 탑재되는 연료전지의 경우 선박추진용뿐만 아니라 비상전원과 발전기 등의 목적으로도 적용이 가능하다. 소형선박의 경우 차량분야에 널리 적용되고 있는 고분자전해질막형 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane, PEMFC)를 적용하여 실증에 관한 연구를 수행하고 선박 운항시 발생하게 되는 여러 문제점들을 하나씩 해결해 나가는 동시에 중·대형 선박에 용융탄산염형 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC), 고체산화물형 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 등의 기술을 응용하여 수소자동차 연료전지 기술을 선박에 적용시키는 것이 바람직한 연구의 방향이라고 생각한다. 본고에서는 자동차 분야 수소연료전지시스템에 대해 소개하고 선박 적용을 위한 핵심기술에 대해 소개하고자 한다.



그림 2 수소전기차 핵심 모듈 구성도 (출처: 에너지경제연구원)

## 2. 본 론

### 2.1 자동차분야 연료전지시스템 개요

수소전기차는 연료전지시스템, 수소저장장치, 전장장치로 크게 구성되며, 이중 전장장치는 일반 전기차(Electric vehicle)의 구성품과 공유될 정도로 유사하지만, 연료전지 스택과 수소저장장치는 기존 내연기관 자동차 및 전기차와 구별되는 수소전기차만의 특징이라고 볼 수 있다 (그림 2).

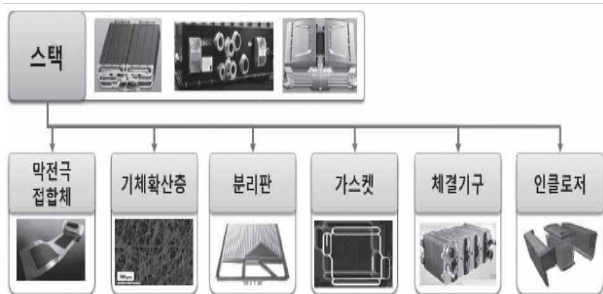


그림 3 수소전기차 스택 구성품 (출처: 신영증권)

연료전지시스템은 연료전지 스택, 수소공급장치, 공기공급장치, 열관리장치로 구성된다. 특히, 연료전기차의 핵심기술인 연료전지 스택은 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA), 기체확산층, 분리판, 가스켓 등으로 구성되는 수소전기차에서의 가장 핵심기술이다 (그림 3). 스택 중앙

막전극접합체는 백금촉매와 탄소 지지체로 이루어진 다공성에 위치하는 연료극 및 공기극과 양 전극 사이에 전해질막이 접합된 구조이다. 막전극접합체 옆면으로 수소와 산소 통로와 물을 공급 및 배출하는 역할을 하는 기체확산층과 분리판 등이 위치하여 핵심기술인 연료전지 스택을 구성된다.

표 1 연료전기차 주요 구성품 명칭 및 기능

명칭	기능
수소공급장치	전기화학반응을 위한 연료극으로 수소를 공급
공기공급장치	전기화학반응을 위한 공기극으로 공기(산소)를 공급
열 및 물 관리장치	전기화학 반응 중 발생하는 열과 물을 방출 관리
모터	전기화학반응에 의해 발생된 전기를 기계에너지로 변환하여 구동력을 생산 연료전기차에서 내연기관 차량의 엔진 역할
전력변환장치	DC 전력을 전자기기 구동을 위한 AC 전력으로 전환 연료전지 스택에서 생산되는 DC 전력을 모터 구동 전압 수준으로 변환
고압용기	수소저장 용기는 가볍고 부피가 작아야 하기 때문에 탄소섬유 복합재 압력용기를 사용
고압밸브 배관류	고압 수소를 저장탱크에 충전하기 위해 필요한 고압배관, 압력조절밸브 등

스택뿐만아니라 연료전지시스템은 수소와 공기를 스택에 공급하는 수소 및 공기공급장치와 연료전지 스택에서 발생하는 열을 방출하여 스택 온도를 관리하는 열관리장치, 스택 폐열을 활용할 수 있는 공조장치 등으로 구성이 된다. 수소저장 장치는 연료전지 시스템에 수소 연료를 공급하는 연료공급장치로서 기능을 하고, 수소를 700 bar로 저장하는 고압용기, 고압수소를 연료전지 스택으로 공급하는 고압밸브 및 배관류, 고압용기 내 압력 및 온도가 상승할 경우 수소를 방출하는 안전장치, 수소충전 관련 장치 등으로 구성이 된다. 수소충전 관련 장치는 수소충전 시 압축기 압력, 공급유량, 탱크용기 상태 등 모니터링 및 제어하는 시스템으로, 수소탱크, 압력조절밸브, 압력센서, 수소센서 등으로 구성된다.

이외에도 이차전지를 구동 배터리(Traction battery)로 내장하고 있으며, 주로 연료전지 스택으로부터 또는 구동장치에 의해 발생한 전기를 저장하는 역할을 한다.

## 2.2 연료전지 종류별 특성 분석

### 2.2.1 저온형 연료전지시스템

연료전지 시스템의 작업온도 등급에 따라 PEMFC, DMFC(Direct Methanol Fuel Cell), AFC(Alkaline Fuel Cell)를 저온형 연료전지로 구분할 수 있다 (표 2). PEMFC은 연료전지 셀 중앙에 수소가이온만이 전도되는 전해질필름이 위치하고 있다. 폴리머 필름 양면에는 백금촉매가 코팅된 가스투과전극 사이의 중앙에 위치하고 있으며 이 촉매는 반응가스들을 막과 전극표면으로 분리시키고 동시에 발생된 전자들을 전도시키는 중요한 역할을 한다. 화학반응에 의해 양극에서는 수소 이온 및 전자이온들이 발생하게 되고 음극에서는 물이 발생하게 되면서 액체 혹은 스팀의 형태로 공기와 배출시킨다. PEMFC 운전온도는 80 °C로 작동하기 매우 좋은 상온시동이 가능하며 전체 연료전지 종류 중에서 용도성 및 우수성이 높는데 반해 대표적인 단점으로는 고순도의 연료를 주입해야하기 때문에 시스템이 복잡해진다.

DMFC은 PEMFC와 스택 및 이온교환막이 동일하지만 메탄올을 리포머를 통하거나 직접 메탄올을 연료로서 이용한다. 이를 통해 음극에서는 물이 발생하게 되고 양극측에서는 이산화탄소가 발생한다는 것이 PEMFC와 상이하다. 대표적인 문제점으로는 이산화탄소의 반응으로 인해 백금촉매의 효율이 저하될 수 있으며 양극 측면의 전압이 450 mV 이하일 경우 이산화탄소로 인한 촉매의 손실이 발생할 수 있다.

AFC은 미국의 우주개발 프로그램에 다수 적용된 사례가

있으며 높은 수소 및 산소 순도의 조건 등으로 인해 우주발사체의 전원과 같이 특수한 분야에만 사용할 수밖에 없지만 셀의 작동효율은 60~70%로 전체 연료전지중에서 가장 높다. 전해질로 고농도 수산화칼륨을 이용하여 약 100 °C 정도의 작업온도가 가능하다.

표 2 저온형 연료전지시스템 장단점 분석

구분	장점	단점
PEMFC	높은 전류밀도 단순한 셀 구조 짧은 시동 시간 긴 수명 고부하 가능	고비용 시스템 CO 촉매 손실
DMFC	연료보관 용이성 (에탄올) 높은 에너지밀도	고비용 시스템 촉매 손실 가능성 (메탄올 공급 시)
AFC	고효율 연료전지 저비용 시스템	고순도 가스 요구 짧은 수명 적용 분야 제한성

### 2.2.2 고온형 연료전지시스템

고온형 연료전지로는 운전온도가 200~1,000 °C 범위에 들어오는 PAFC, MCFC, SOFC 등이 있으며, 주로 중대형 건물 혹은 발전용으로 사용되고 있다 (표 3). PAFC(Phosphoreare Acid Fuel Cell)는 고농도 인산을 전해질로 사용하며 이온교환막이 적용되는 연료전지와 마찬가지로 이산화탄소 함유 반응가스 적용이 가능하다. 운전온도는 약 200 °C이며 비교적 높은 작동 온도로 인해 이산화탄소에 대한 민감성이 비교적 낮다. 이로 인해 천연가스와 공기를 이용한 운영이 가능하고 긴 수명으로 인해 발전소용으로 사용되고 있다. 연료전지 시스템 단독의 효율은 40%로 비교적 낮은 편이지만, 전기와 열을 동시에 활용하는 경우 전체 시스템 효율을 상당부분 개선시킬 수 있다.

MCFC(Molten Carbonat Fuel Cell)의 운전온도는 650 °C로 부식성이 강한 알칼리성탄산염용액을 전해질로 사용하고 있으며 양극 챔버셀 내에서 리포머 프로세스가 가능하기 때문에 직접 천연가스 혹은 다른 탄화수소 함유 연료를 사용할 수 있다. 높은 작동온도로 인해 시동을 위해 상당시간이 소요되기 때문에 장기간 일정 전류를 생산하는데 적합하다. 프로세스 중 발생하는 폐열의 온도가 400 °C에 달하기 때문에 이를 회수하면 상당부분 개선시킬 수 있다.

SOFC(Solid Oxid Fuel Cell)은 고온형 연료전지 중 가장 높

은 운전온도로 750~1000 °C에 달하며 높은 작업온도로 인해 수소연료는 물론 천연가스 등 탄화수소 가스의 이용이 가능하다. 전해질로는 지르코니아 등 산화물을 주로 사용하고 있다.

표 3 고온형 연료전지시스템 장단점 분석

구분	장점	단점
PAFC	긴 수명 CO 민감도 낮음	낮은 효율 긴 시동시간 고비용 시스템
MCFC	고효율 시스템 폐열 활용성 연료 범용성 저렴한 전해질	수명 문제 CO <sub>2</sub> 관리필요 금속 부식 문제 고비용 시스템
SOFC	고효율 시스템 폐열 활용성 긴 수명 전해질관리 불필요	높은 작동온도 부식 문제 고비용 긴 시동시간

## 2.2 수소연료전지시스템의 선박 적용을 위한 기술적 고찰

수소연료전지 추진선박은 연료전지 수소차량과 마찬가지로 연료전지 스택에서 생성된 전기를 이용하여 선박 추진 동력을 얻는 친환경 선박이다. 기존 중질유 추진선박과 비교하면 내연기관에서 수소연료전지시스템으로 선박 주기관의 변화와 추진기로 동력 전달을 위한 전력관리시스템의 추가 구성이 달라진 점이라 볼 수 있으며, 발전기를 선박 주기관으로 사용하는 LNG 추진선박과는 주기관이 연료전지시스템으로 바뀐 것

을 제외하면 상당부분 유사한 시스템 구성을 가지는 것으로 판단된다.

아래 표 4에서 연료전지 자동차와 수소연료전지 추진선박 간의 비교 사항들을 나타내었다. 1990년대 중후반부터 시작된 국내 기업·연구기관들의 연구개발을 통해 현재 차량의 수소 연료전지시스템은 세계최고수준의 기술력을 자랑하나, 선박의 경우, 국내에서 체계적으로 수행된 연구결과를 확인하기 어려우며 소수의 국제적인 선박용 엔진 제작사들을 중심으로 형성된 기술 진입장벽을 넘는 것 또한 쉽지 않은 현실이다.

수소연료전지 안전성 및 성능 검증 역시 필요하다. 2015년부터 3년간 일본 국토교통성 지원으로 수행된 일본의 소형연료전지 선박 개발 프로젝트에서는 개발을 위한 필수 기초시험 항목으로 염분, 동요 경사 상태, 진동·충격 하에서 연료전지의 성능 테스트를 명시한 바 있다 (표 5).

상기 언급된 사안 외에 수소의 연료공급 형태 (대형선박의 경우 액화수소 형태로 수소연료를 저장할 수 있음), 연료전지 부하 조건의 차이, 내구성 등 역시 주요 기술적 사안으로 다뤄져야 할 것으로 사료된다.

## 2.3 선박의 연료전지시스템 적용 사례 분석

연료전지시스템을 적용하여 추진되는 선박 개발 프로젝트는 2000년대 중반 이후 기술 선진국들을 중심으로 꾸준히 수행되어 오고 있다. 2006년부터 수행된 ZEMShip 프로젝트에서는 승객 100명 규모 선박에 50 kW급 PEMFC를 2기 장착하였으며 이를 통해 선박 적용 연료전지의 효율 40~50%를

표 4 연료전지 자동차와 수소연료전지 추진선박 간의 비교

구분	연료전지 자동차	수소연료전지 추진선박
개발 필요성	환경문제 : 대기오염 및 지구온난화 경제성 : 고효율 수송수단의 수요 증가 에너지안보 : 에너지 자립을 통한 국가경쟁력 제고	환경문제 : 해상 및 연안 대기오염 정책성 : 국제해사기구의 온실가스 감축 규제 에너지안보 : 에너지 자립을 통한 국가경쟁력 제고
연구개발 현황	(해외) 90년대 초반 : ZEV 규제 발효로 연구 착수 (해외) 90년대 후반 : 시제품 출시·시범운행 (해외) 00년 이후 : 시스템 대형화 및 원가절감 추진 (국내) 90년대 중반 : 개발 착수 (국내) 01년 : 시범운행 및 충전인프라 구축 (국내) 현재 : 차량 900여대, 충전소 15곳 운영	(해외) 90년대 중반 : 연료전지 적용성 검토 (해외) 00년 : EU 중심으로 개발로드맵 수립 (해외) 03년 : EU Fellow ship 프로젝트 착수 (해외) 현재 : 실증 및 상용화 프로젝트 수행 (국내) 현재 : 기술개발 부진
개발사	엔진기술을 보유한 전 세계 자동차 제조사 : 혼다, 메르세데스 벤츠, GM, 현대차 등	선박용 엔진 제작사 중심 : MAN, Wärtsilä, Rolls-Royce 외 소수
기술적 장벽	높은 제조 원가, 수소 충전 인프라 등	대형화, 선도기술 부재, 해상환경 고려 등

표 5 소형연료전지선박 개발을 위한 필수기초 시험항목 (일본 국토교통성 소형연료전지 선박 사업, 2015 ~ 2017)

항목	내용
염해 영향 평가 시험	염분 농도가 높은 해상의 공기가 연료전지의 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 육상에서 해상 분위기를 조성하여 연료전지의 성능저하 평가 시험을 실시
동요 경사 상태에서의 성능 시험	선박의 동요 및 경사가 연료전지의 발전 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 육상에서 동요·경사시의 부하 시험을 실시
진동·충격 시험	선박 운항시의 진동·충격이 연료전지에 미치는 영향 (가스 누설 여부)을 조사하기 위해 육상 시험기를 이용한 진동·충격 시험을 실시

달성하여 선박 주동력용 연료전지 개발이 본격화되었다. 선박 보조전원용 연료전지를 개발하기 위한 시도로 EU에서는 상업용 선박 세계 최대 용량의 Fellowship 프로젝트를 진행하였다. 천연가스를 연료로 하는 320 kW급 MCFC를 개발하였으며, 해상에서 100시간의 실증시험을 수행하였다. 근거리 수송용 기술인 여객선, 자동차 운반선, 크루즈선의 보조전원용 연료전지를 개발하는 Methapu 프로젝트는 2006~2009년까지 진행되어 20 kW급 SOFC를 처음으로 해상 조건에 적용하여 1,000시간의 실증 운영을 수행하였다. 1980년대부터 독일 하데베(HDW)에서는 잠수함의 수중 운용시간 증대를 위해 PEMFC를 적용하는 연구를 진행하였으며, 212A 및 214급 디젤 잠수함에 240 kW급 연료전지를 탑재하여 운용 중에 있다. 2003년부터 미 해군과 FCE社에서 2.5 MW급 MCFC를 활용한 선박 추진용 연료전지 개발을 수행하였으며, 육상에서 300 kW급 MCFC를 이용한 1000시간 액체연료 평가를 수행하였다. 2019년 중순에 건조가 완료될 미국 친환경 선박 연구기관인 GGZEM(Golden Gate Zero Emission Marine)이 캘리포니아 대기보전위원회와 공동으로 수행중인 Water-go-round 프로젝트의 수소연료전지 추진선박의 경우 600 kW급 PEMFC를 설치하는 것으로 알려져 있다. 여러 사례를 살펴볼 때, 주 기관 역할을 하는 연료전지의 경우 부하 변동성 때문에 주로 PEMFC를 사용하고 있으며, 일부 사례를 제외하고 보조전원용 연료전지의 경우 일정한 출력을 지속적으로 낼 수 있는 MCFC 및 SOFC가 선호되는 것으로 보인다.

### 3. 결론

수소연료선박이 가지고 있는 장점과 잠재력에도 불구하고 경제성, 기술성 등 많은 문제들을 내포하고 있어 당장 실용화하기에는 어려움이 있지만 환경성과 특수 목적성을 가지고 군사용, 관광용 등의 선박 등에 적용하여 기술력을 확보하고, 이로부터 축적된 기술과 경험을 토대로 향후 광범위한 선박으로 적용을 넓혀 나가야 할 것이다.

### 참고 문헌

국립외교원 외교안보연구소 [국제해사기구에서의 온실가스 저감방안 논의현황 및 한국에의 함의] (2018)  
 김재경 [수소연료전지 자동차 충전용 수소 시장조성을 위한 정책연구, 에너지경제연구원] (2017)  
 신영증권 [자동차산업 - 수소차 특집] (2017)  
 금하네이벌텍 [50kW급 연료전지 기반 선체 및 제조기술 개발, 지식경제부] (2012)  
 Fuel Cells Bulletin [Hyon wins DNV GL approval for maritime use of PowerCell module-based fuel cell solutions, Fuel Cells Bulletin] (2018)



임동하

- 1973년생
- 2007년 서울대학교 화학공학과 박사졸업
- 현 재 : 한국생산기술연구원 에너지플랜트 그룹장
- 관심분야 : 촉매화학공정, 수소에너지 등
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : dongha4u@kitech.re.kr