

국내외 PEMFC 개발 동향 및 선박 적용에 관한 고찰

이창용^{*†}

* 국립인천해사고등학교 교사

A Study on the Development Trends of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells and Application to Ships

Chang-Yong Lee^{*†}

* Teacher, Division of Marine Engineering, Incheon National Maritime High School, Incheon 22304, Korea

요 약 : 국제해사기구(IMO)는 국제해운 분야의 온실가스(Green House Gas, GHG) 감축을 위하여 각국의 기술 개발 및 에너지 효율성 제고에 관한 정책 시행을 적극적으로 권장하고 있다. 이러한 IMO의 환경규제와 관련된 정책들은 해운 분야 전반에 큰 영향을 미치고 있으며, 선주들에게도 막대한 부담으로 작용하고 있다. 선박에서 발생하는 GHG 배출을 억제하기 위한 가장 합리적인 방안은 탄소제로배출(Zero Emission) 선박의 개발로 귀결된다. 즉 친환경 연료로 추진하는 연료전지선박(Fuel Cell Ship, FCS)의 개발이 IMO의 규제를 벗어날 수 있는 대안인 것이다. 아시아, 북미, 유럽 등의 각국에서는 독자적으로 PEMFC를 개발 및 생산하여 국제공인등록 기관으로부터 형식승인 인증을 획득함으로써 국제표준화의 선점을 추구하고 있다. 현재 다양한 연료전지(Fuel Cell, FC) 중에서 선박용으로 권장하는 것은 크게 고분자전해질 연료전지(PEMFC), 용융 탄산염 연료전지(MCFC) 및 고체산화물형 연료전지(SOFC) 등의 세종류가 있다. 본 연구에서는 글로벌 FC 시장에서 지속적인 성장이 예상되는 PEMFC를 대상으로 하여 국내외 개발 동향, 제조업체별 규격, 성능 및 선박에 적용한 실증적 사례를 분석하였다. 그리고 PEMFC를 선박에 적용할 경우, 고려해야 할 사항과 개발 방향에 관하여 제안하고자 하였다.

핵심용어 : 국제해사기구, 환경규제, 온실가스, 연료전지선박, 고분자전해질 연료전지, 탄소제로배출

Abstract : The International Maritime Organization(IMO) recommends the active implementation of national policies on technological development and energy efficiency to reduce Green House Gas (GHG) in the international shipping sector. Such IMO environmental regulation policies have a great impact on the entire shipping sector and are also a heavy burden on ship's owners. The most reasonable way to curb GHG emissions from ships comes down to the development of zero-emission ships. In other words, the development of a fuel cell ship (FCS) driven by an eco-friendly fuel is an alternative that can escape the IMO regulations. Countries in Asia, Northern America, and Europe independently develop and produce PEMFC, and are pursuing international standardization by acquiring approval in principle from an internationally accredited registration authority. Currently, there are three types of fuel cells (FC) that are recommended for ships: a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC), a Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), and a Solid Oxide Fuel Cell (SOFC). In this study, PEMFC, which is expected to grow continuously in the global FC market, was analyzed domestic and international development trends, specifications, performance, and empirical cases applied to ships. In addition, when applying PEMFC to ships, it was intended to suggest matters to be considered and the development direction.

Key Words : IMO, Environmental regulations, Green house gas, Fuel cell ship, Polymer electrolyte membrane fuel cell, Zero emission

1. 서 론

최근 세계 경제의 급속한 성장으로 인하여 해운업계도 활황을 이어가고 있다. 전 세계 무역량의 약 90%가 해상 운송으로 이루어지기 때문에 선박은 다른 운송 수단에 비하여

중요성이 매우 높다. 그러나 경제성장에 기여하는 만큼 해양 환경 문제 또한 야기하고 있는 것이 현실이다. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 국제해운 분야에서 발생하는 온실가스(Green House Gas, GHG)의 배출을 규제하기 위하여 제72차 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)에서 선박에서 발생하는 온실가스의 배출량을 2008년 대비 2050년까지 50% 이상 감축하기

† greenpia77@naver.com, 032-770-1000

로 결정하였다(IMO, 2018). 이러한 IMO의 해양 환경규제에 대응하기 위해서는 선박에서 발생하는 GHG 배출을 감축하는 것이 가장 시급하다. 중장기적인 관점에서 볼 때, GHG를 배출하는 화석연료의 사용을 줄이고 대체 연료를 사용하는 친환경 선박의 개발이 가장 효과적인 대안이라 할 수 있다.

친환경 선박의 연료로서 수소가 각광 받고 있으며, 수소를 에너지원으로 이용한 기술을 선점하기 위하여 국내외의 기업들은 많은 투자를 하고 있다.

수소는 상온에서 무색, 무취 및 무독성의 기체이고, 기체 중에서 가장 가볍고 재생 가능한 에너지이며 우주에서도 가장 풍부한 원소이다. 그리고 산소와 반응하여 전기에너지를 발생시키고 부산물로 물을 생성하므로 탄소제로배출(Zero Emission)을 실현할 수 있는 최적의 대체 연료로 평가받고 있다.

Saito(2018)은 탱크에서 프로펠러까지 동력이 전달되는 과정에서 연료유에 따른 CO₂의 배출을 분석한 결과, LNG의 경우 CO₂ 배출량이 55 g/MJ 이상이고 CH₄로부터 메탄올을 사용할 경우, 70 g/MJ 이상 배출되는 반면에 수소의 경우에는 CO₂ 배출이 0인 것을 조사하였다.

특히 수소는 화학적 특성 때문에 매우 낮은 체적 에너지 밀도를 나타내지만 높은 중량 에너지 밀도를 나타내는 것이 특징이다. 현재 선박의 연료로 사용되고 있는 중유(HFO)의 에너지 밀도는 약 43 kJ/g이지만, 수소는 약 142 kJ/g으로 HFO에 비해 3배 이상 높다(Jafarzadeh and Schjølberg, 2017).

수소는 1 kWh당 연료의 소비량을 나타내는 비연료소모율(Specific Fuel Consumption, SFC)도 Table 1과 같이 여러 종류의 연료 중에서 가장 낮다. 에너지효율 측면에서도 LNG와 Methanol은 40%, HFO는 45%를 나타내는 데에 비하여 수소는 55%로 가장 높다(Nerem, 2018). 이러한 효율성 때문에 수소를 이용한 연료전지의 개발이 가속화되는 것이다.

Table 1. Specific Fuel Consumption of the various fuel

Fuel	Methanol	HFO	LNG	Hydrogen
SFC [g/kWh]	429	186	173	46

연료전지(Fuel Cell, FC)는 에너지를 충전하여 사용하는 2차전지와는 달리 수소와 산소의 화학적인 반응을 이용하여 전기에너지를 발생시키는 발전장치이다. FC는 연료의 연소 과정이 없으므로 공해물질을 배출하지 않고, 내연기관(Internal Combustion Engine, ICE)과 같은 폭발과정이 없으므로 소음과 진동이 적고, 적은 유지보수 비용 등의 장점을 가지고 있다(Shakeri et al., 2020).

FC의 종류는 전해질의 종류와 작동 온도에 따라 크게 5가지로 구분하는데, 고분자전해질 연료전지(Polymer Electrolyte

Membrane Fuel Cell, PEMFC), 알칼리 연료전지(Alkaline Fuel Cell, AFC), 인산형 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), 용융 탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC), 고체산화물형 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 등이 있다(Sürer and Arat, 2022).

DNV-GL(2019)는 7가지 FC 기술을 평가한 결과, 고체산화물형 연료전지(SOFC), 고분자전해질 연료전지(PEMFC)가 해양에서 가장 많이 사용될 것으로 전망하였다. 그래서 본 연구에서는 글로벌 FC 시장에서 지속적인 성장이 예상되는 PEMFC를 대상(Fortune Business Insights, 2020)으로 하여 국내외 개발 동향, 제조업체별 규격, 성능 및 선박에 적용한 실증적 사례를 분석하였다. 그리고 PEMFC를 선박에 적용할 때 고려해야 할 사항과 개발 방향에 대하여 제안하고자 하였다.

2. PEMFC의 작동 원리

PEMFC의 스택(stack)을 구성하는 단위 셀은 연료극(anode), 공기극(cathode) 및 고분자전해질 막으로 이루어져 있으며, 각 셀은 분리판(separator)에 의해 분리되어 있다. 특히 촉매(catalyst)가 포함된 전극(anode, cathode)과 전해질막으로 구성된 것을 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)라고 하며, MEA의 크기와 셀의 적층 수에 따라 출력이 달라지므로 PEMFC의 핵심이라고 할 수 있다. MEA는 anode로 공급되는 수소에서 양이온(H⁺)만 통과시키고, 전자(e⁻)는 통과하지 못하도록 하는 역할을 한다(Shakeri et al., 2020).

PEMFC에 수소 이외의 연료를 사용할 경우, 개질기(reformer)를 거쳐서 순수한 수소만 공급되어야 하며, PEMFC에서 발생하는 화학적 반응식은 (1)~(3)과 같다.

Anode reaction:



Cathode reaction:



Total reaction:



Fig. 1은 PEMFC의 작동 원리를 나타낸 것이다. anode로 공급된 수소는 catalyst에 의해 H⁺와 e⁻로 분리된다. e⁻는 외부 회로를 거쳐서 cathode로 이동하고, H⁺는 전해질막을 통과하여 cathode에 도달한다. 이때 cathode에 공급된 산소(O₂)는 H⁺와 e⁻가 함께 반응하여 물(H₂O)을 생성하게 된다(Pritchard et al., 2009).

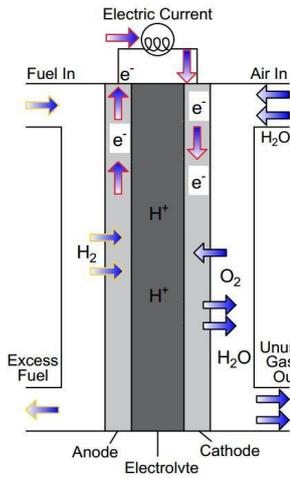


Fig. 1. Operating principle and structure of an PEMFC.

Table 2는 연료의 종류와 작동 온도에 따른 연료전지의 종류를 나타낸 것이다. 고온에서 작동하는 PAFC, MCFC 및 SOFC 등은 열회수를 감안할 때 효율이 80~85%로 높다(Tronstad et al., 2017). 한편, PEMFC는 작동 온도가 50℃~85℃ 범위로 낮고, 스택의 효율만을 볼 때에는 50~60% 정도로 높다. 또, 높은 전력 밀도를 유지할 수 있어서 전력 수요에 빠른 응답성을 보이며, 저온에서도 빠른 시동이 가능하다. 그리고 크기를 소형화할 수 있고, 휴대용으로도 제작이 가능한 장점이 있다. 그러나 연료로 사용되는 수소에 황과 일산화탄소 같은 불순물이 포함되어 있거나 운전 중에 고분자 막에 수분 함량 조절이 불량해지면 효율이 떨어지는 단점이 있다(Tronstad et al., 2017).

Table 2. Types and features of fuel cells

Type	Fuel	Operating Temperature(°C)	Efficiency(%)
PEMFC	hydrogen	50 ~ 85	50 ~ 60(electrical)
PAFC	hydrogen	150 ~ 220	40(electrical)
	LNG		80(with heat recovery)
	methanol diesel		
MCFC	hydrogen	600 ~ 700	50(electrical)
	LNG		85(with heat recovery)
	methanol		
	diesel		
SOFC	hydrogen	800 ~ 1,000	60(electrical)
	LNG		85(with heat recovery)
	methanol		
	diesel		
DMFC	methanol	50 ~ 120	20(electrical)

3. PEMFC 개발 현황

전 세계의 FC 시장은 한국, 미국, 일본을 중심으로 형성되었으며, 연평균 성장률(CAGR)이 약 30% 이상 성장할 것으로 전망하고 있다. 특히 PEMFC 시장 규모는 2020년 기준으로 15억 6천만 달러였으며, 2021년에는 21억 달러에서 2028년에는 227억 4천만 달러로 2021~2028년 연평균 성장률이 40.6%에 이를 것으로 예상하였다(Fortune Business Insights, 2020).

PEMFC는 1962년 1kW급 PEMFC 스택 2개로 구성된 모듈을 Gemini 우주선 3호부터 12호에 최초로 사용하였고, 1990년대 들어서 Ballard사에 의하여 PEMFC 기술이 크게 향상되었다. 그 이후에 휴대용, 수송용 및 마이크로-CHP 보급 등으로 확산되었고, 출하량에서 다른 FC에 비하여 지속적으로 우위를 점하고 있다.

Fig. 2는 2016년~2020년까지 최근 5년간 연료전지의 종류별 출하량을 나타낸 것이다. 2020년에는 약 5,360 만개의 출하량과 생산 전력이 약 1,030 MW에 이를 것으로 추산하였다(E4tech, 2020).

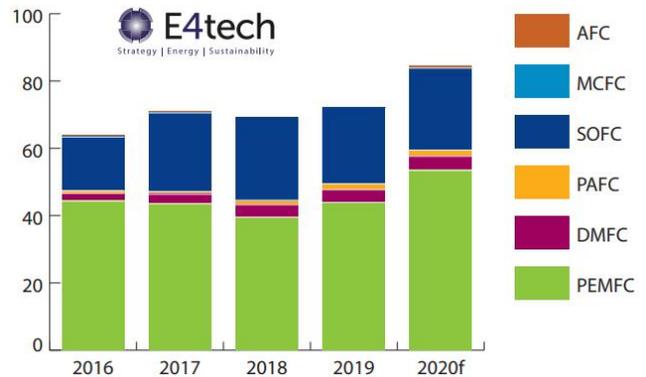


Fig. 2. Shipments by type of fuel cell from 2016 to 2020.

3.1 한국의 PEMFC 개발 현황

산업통상자원부에서는 2021년 6월에 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제 11조에 따라 수소전문기업 11곳을 선정하여 국내 최초로 발표하였고, 9월에 8곳을 추가 지정하였다. 그리고 ‘수소전문기업’은 총 4분야로 나누어 연료전지 분야 6곳, 생산·저장 분야 3곳, 모빌리티 분야 5곳, 충전 분야 5곳으로 구분하였고, 2040년까지 수소전문 기업 1,000개로 육성할 계획이라고 밝혔다.

Table 3은 연료전지 분야의 전문기업과 주요 생산품을 나타낸 것이다. 연료전지를 제조하는 업체는 두산퓨얼셀, 범한퓨얼셀, 에스퓨얼셀 등이 있으며 두산퓨얼셀과 에스퓨얼셀

은 각각 발전용 PAFC와 건물용 PEMFC를 주로 생산하고 있다. 특히 범한퓨얼셀은 독일 Siemens에 이어 2018년 세계 2번째로 잠수함용 150 kW PEMFC 제품을 상용화하였으며, 2021년 소형선박용 연료전지 솔루션 개발을 완료하였다(Bumhan Fuel Cell, 2020).

Table 3. Domestic companies in the fuel cell field

Field	Specialized Company	Main Products
Fuel Cells (FCs)	Doosan Fuel Cell	Power Generation Fuel Cell
	Bumhan Fuel Cell	
	S-Fuel Cell	
	GPhilos	Fuel Cell Inverter
	HI AIR KOREA	Fuel Cell Module
	ANNPARTNERS	Power Generation Fuel Cell

범한퓨얼셀은 잠수함용 연료전지 개발 기술을 바탕으로 5 kW급 PEMFC 제품인 ‘BHH050’를 건물용 연료전지 시스템으로 출시하였다. 크기는 500 (W) mm × 650 (D) mm × 1400 (H) mm 이고, 동작 온도는 -20 °C ~ 45 °C였으며, 기동시간은 10분 이내로 짧은 것이 특징이었다(Bumhan Fuel Cell, 2020).

3.2 일본의 PEMFC 개발 현황

일본은 2015년 연료전지 상업화 프로그램인 ‘Ene-farm’의 구현을 통하여 2019년 말까지 300,000개 이상의 연료전지 시스템을 상용화하였으며, 2030년 말까지 1 GW의 연료전지 기반 시스템을 목표로 하고 있다(Mordor Intelligence, 2021c).

일본의 연료전지 시장 규모는 크지 않지만 여러 기업의 협력을 통하여 연료전지 시장이 발전되어 왔다. 대표적 기업으로는 DENSO Crafting the Core, Mitsubishi Hitachi Power Systems, Fuji Electric, Toshiba Fuel Cell Power Systems, Panasonic, Aisin Seiki 등이 있다(Jonathan, 2019).

특히 Panasonic은 일본 PEMFC 시장의 약 50%의 점유율 차지하고 있으며, 5 kW급 PEMFC인 ‘H2 KIBOU’를 2021년에 출시하였다. 본체의 크기는 834 (W) mm × 417 (D) mm × 1,766 (H) mm이고 중량은 205 kg, 작동 온도는 -10 °C ~ 40 °C였으며, 효율은 최대 56% 정도였다. 최대 10대의 유닛을 동시에 연결하여 50 kW의 출력을 낼 수도 있었으며, 10대의 유닛을 하나의 단위 유닛으로 하여 메가와트(MW)급 출력도 가능하였다(Panasonic, 2021).

3.3 중국의 PEMFC 제조업체

중국의 연료전지 시장은 2020년 ~ 2025년 동안에 CAGR이

약 11.2% 성장할 것으로 예상되며, 특히 2020년 기준으로 아시아 태평양 지역의 PEMFC 시장은 중국이 높은 점유율을 차지하고 있었다. 중국은 정부 차원에서 연료전지에 대한 수요를 주도하고 있고 저탄소 경제로 전환하기 위하여 청정에너지 기술을 활용하는 방법에도 더욱 집중하고 있다. 또, 2025년까지 연료전지 시스템 비용을 킬로와트당 4,000 위안까지 달성하는 것을 목표로 하고 있다(Mordor Intelligence, 2021a).

중국 내에 PEMFC 제조업체는 Shanghai Shenli, Sunrise Power, Pearl Hydrogen, Jiangsu Huayuan, Foton, Feichi Bus, SAIC, Dongfeng, Yutong 등이 있으며, 생산된 FC는 주로 연료전지 차량용으로 공급되고 있다(Market Insights Reports, 2020).

최근에 중국선급협회(CCS)는 PEMFC 공급업체인 Troowin Power System Technology에서 독자적으로 설계, 개발 및 생산한 선박용 연료전지인 ‘TWZFCSZ series’에 대하여 중국 최초의 형식승인 인증서를 부여하였다. Table 4는 ‘TWZFCSZ series’ 연료전지의 사양을 나타낸 것이다. TWZFCSZ FC는 연안, 내륙의 하천 및 호수 등을 항해하는 선박용으로 제작되었다(Troowin, 2013).

Table 4. Specifications of TWZFCSZ fuel cell

Spec.	Model Number	
	TWZFCSZ-60	TWZFCSZ-80
Rated Power (kW)	60	80
Dimension (W × L × H) (mm)	827 × 1600 × 1235	827 × 1600 × 1235
Weight(kg)	338	350
Ambient temperature for storage (°C)	-40 ~ 60	-40 ~ 60
Cold start (°C)	-20	-20
System Efficiency	> 50 %	> 50 %

3.4 북미의 PEMFC 개발 현황

미국은 연료전지에 관한 자체 기술을 가장 많이 보유하고 있으며, PEMFC 시장 규모는 2020년 기준으로 14억 달러로 추산하고 있다. 캐나다는 2020년 ~ 2027년 기간 동안 CAGR이 17.1% 성장할 것으로 예측하고 있다(GlobeNewswire, 2020).

북미의 PEMFC 제조업체로는 Alteryg(미국), Ballard(캐나다), Hydrogenics(캐나다), Nuvera(미국), Plug Power(캐나다) 등이 있으며, 제조업체별로 생산하는 PEMFC의 사양은 Table 5와 같다(Alteryg, 2017; Ballard, 2016; 2018; 2020a; 2020b; 2021a; 2021b; Plug Power, 2020; 2021).

Ballard의 FCwave™는 해양 환경에서 사용할 수 있도록 개

국내의 PEMFC 개발 동향 및 선박 적용에 관한 고찰

발된 PEMFC로서 노르웨이 선급(DNV)으로부터 선박용 연료 전지 모듈 부분에 있어서 유럽 최초로 형식승인을 받았다. 이 시스템은 정격 출력이 200 kW이며, 운항 거리에 따라 1.2 MW로 확장 가능한 것이 특징이다(Ballard, 2021c).

Hydrogenics의 HyPM[®] HD 30과 HD 45 제품은 고효율용 FC를 생산하기 위하여 조합되는 단위 모듈로 사용되고 있다

(Hydrogenics, 2022).

Nuvera[®] E-Series는 항만에서 사용되는 Top Loader, Rich Stack, Forklift, Rubber tire gentry, Yard Truck 등과 같은 항만 장비의 연료전지로 탑재되어 항만 분야에서 사용되고 있는 수천 대의 디젤 동력 장비를 대체함으로써 GHG의 배출을 감소시키는 데 활용되고 있다(Nuvera, 2022).

Table 5. Specifications of PEMFCs by PEMFC Manufacturers in North America

Manufacturer	Model Number	Rated Power (kW)	Dimension (W × L × H) (mm)	Weight (kg)	Ambient temperature for storage (°C)	Operating Voltage (VDC)	Operating Current(A)	System Efficiency (%)	
Alteryg	FPS-148N	1	406.4 × 431.8 × 1198.8	108.8	- 40 ~ 50	48	21	-	
	FPS-2.5 48N	2.5		127			52	-	
	FPS-548N	5		190.5			105	-	
Ballard Power Systems	FCwave [™]	200	738 × 1220 × 2200	875	- 40 ~ 60	350 ~ 720	2 × 300, 1 × 550	53.5	
	FCvelocity [®]	MD	30	480 × 900 × 375	125	- 25 ~	85 ~ 180	0 ~ 300	-
		HD 85	85	869 × 1130 × 487	256	-	260 ~ 420	-	-
		HD 100	100	869 × 1200 × 506	285	-	357 ~ 577	-	-
	FCmove [®]	HD	70	816 × 1812 × 415	250	- 30 ~ 50	250 ~ 500	20 ~ 240	57
	FCmove [®]	HD ⁺	100	802 × 1996 × 440	260	- 30 ~ 50	280 ~ 560	20 ~ 360	57
		FCvelocity [®] 9SSL	3.8	760 × 92 × 60	7.1	2 ~ 60	12.9	300	-
			4.8	760 × 104 × 60	7.2		16.1		-
			10.6	760 × 174 × 60	10.7		35.4		-
			14.4	760 × 220 × 60	13		48.2		-
			17.3	760 × 255 × 60	15		57.9		-
21.2	760 × 302 × 60	17	70.7	-					
FCgen [®]	LCS	63.4	443 × 675 × 110	38.5	- 25 ~ 85	176	360	-	
Hydrogenics	HyPM [®]	HD 8	8.5	406 × 379 × 261	52	- 10 ~ 55	20 ~ 40	0 ~ 380	51
		HD 10	10.5	406 × 408 × 261	47		24 ~ 48	0 ~ 425	53
		HD 15	16.5	406 × 494 × 261	55		32 ~ 64	0 ~ 425	53
		HD 30	31	406 × 719 × 261	72		60 ~ 120	0 ~ 500	59
		HD 45	45	406 × 848 × 255	95		88 ~ 180	0 ~ 450	59
		HD 90	93	1085 × 1582 × 346	360		180 ~ 360	0 ~ 500	59
		HD 180	198	1525 × 955 × 690	654		0 ~ 500	360 ~ 720	55
Nuvera Fuel Cells	Nuvera [®]	E-45-HD	54	600 × 1000 × 500	187	- 30 ~ 45	170 ~ 290	312.5	-
		E-60-HD	67				190	180 ~ 270	375
Plug Power	ProGens E-Mobility	15	674 × 985 × 567	248	- 20 ~ 40	280 ~ 430	-	-	
		30	833 × 1341 × 415	257			-	-	
		125	700 × 1430 × 400	363			- 20 ~ 55	500 ~ 750	-
	GenSure HP	250	2348 × 12032 × 2390 (40ft container)	-	- 30 ~ 50	480	-	-	
500		-		-			49		
1000		-		-			-		

3.5 유럽의 PEMFC 개발 현황

유럽의 연료전지 시장은 2021년 기준으로 약 7.1%로 글로벌 시장에서 한국, 미국, 중국, 일본, 유럽 순으로 가장 낮은 비중을 차지하고 있다. 특히 독일이 주요 FC 시장을 점유할 것으로 예측하고 있으며, 영국과 기타 유럽 국가들이 뒤를 이을 것으로 전망하고 있다(Mordor Intelligence, 2021b).

유럽의 PEMFC 제조업체로는 Siemens Energy, Proton Motor Fuel Cell GmbH, PowerCell Sweden AB, Nedstack Fuel Cell Technology, Intelligent Energy 등이 있으며, 제조업체별로 생산하는 PEMFC의 사양은 Table 6과 같다. Siemens Energy의 FCM 34와 FCM 120은 세계 최초로 잠수함에 적용된 PEMFC로서 독일의 U 212A급 잠수함에는 FCM 34, 214 및 209PN 급에는 FCM 120 모듈이 장착되어 있다(Siemens, 2013).

Proton Motor Fuel Cell GmbH는 (Proton Motor, 2021; 2022)와 같이 출력 범위가 다양한 PEMFC를 개발하고 있으며, PowerCell Sweden AB는 PowerCell(2021a; 2021b; 2021c)의 소용량 PEMFC를 비롯하여 최근에는 Marine System 200과 같이 IMO의 해양 표준 및 요구 사항에 따라 해양 분야에 적용할 수 있는 PEMFC를 개발하였다(PowerCell, 2021d).

Nedstack Fuel Cell Technology의 PemGen Series는 정격 출력이 1.36 kW인 연료전지 스택(FCS13-XXL)을 각각 12개나 60개로 조합하여 출력을 증가시킨 것이다(Nedstack, 2022a; 2022b).

Intelligent Energy의 모든 제품은 CE 및 FCC 인증에 따라 설계되어 있으며, Forklift 용의 PEMFC를 주로 생산하고 있다(Intelligent Energy, 2021a; 2021b; 2021c; 2021d).

Table 6. Specifications of PEMFCs by PEMFC Manufacturers in Europe

Manufacturer	Model Number	Rated Power (kW)	Dimension (W × L × H) (mm)	Weight (kg)	Ambient temperature for storage (°C)	Operating Voltage (VDC)	Operating Current(A)	System Efficiency (%)
Siemens Energy	FCM 34	34	480 × 1450 × 480	650	75	50 ~ 55	650	59
	FCM 120	120	530 × 1760 × 500	900	75	208 ~ 243	560	54
Proton Motor Fuel Cell GmbH	PM 200	24	294 × 395 × 237	15.9	- 35 ~ 45	14 ~ 28	0 ~ 150	47 ~ 67
		48	294 × 489 × 237	19.3		22 ~ 55		
		72	294 × 583 × 237	22.7		42 ~ 83		
		96	294 × 676 × 237	26.1		56 ~ 110		
		120	294 × 771 × 237	29.5		70 ~ 138		
	PM 400	144	294 × 861 × 237	32.9	- 35 ~ 45	84 ~ 165	0 ~ 500	47 ~ 67
		168	294 × 957 × 237	36.3		98 ~ 193		
		72	436 × 580 × 279	46		42 ~ 83		
		96	436 × 673 × 279	55		56 ~ 110		
		120	436 × 768 × 279	64		71 ~ 137		
PowerCell Sweden AB	Power Generation System	5	440 × 557 × 1218	125	5 ~ 45	25 ~ 59	up to 80	50
		30	665 × 462 × 696	150	- 30 ~ 45	105 ~ 225	20 ~ 235	54
	Heavy Duty System	100	606 × 696 × 674	170	- 30 ~ 45	250 ~ 500	45 ~ 420	55
	Marine System 200	200	730 × 900 × 2200	170	5 ~ 45	550 ~ 1000	50 ~ 450	54
Nedstack Fuel Cell Technology	PemGen MT-FCPI-100	100	1100 × 2010 × 2090	2500	- 5 ~ 45	600 ~ 1200	0 ~ 400	50
	PemGen MT-FCPI-500	500	2440 × 6060 × 2900	15000	- 10 ~ 40	500 ~ 1000	0 ~ 1200	50
Intelligent Energy	IE-Lift™ MHE	1.2	196 × 294 × 294	10	- 10 ~ 40	24 ~ 48	25 ~ 50	-
	IE-Lift™ 801	1.2	225 × 550 × 300	10	5 ~ 40	24 ~ 48	25 ~ 40	-
	IE-Lift™ 802	2.5	450 × 550 × 300	18	5 ~ 40	24 ~ 48	52 ~ 80	-
	IE-Lift™ 804	4.0	450 × 550 × 300	20	5 ~ 40	24 ~ 48	83 ~ 120	-

4. PEMFC의 선박 적용에 관한 실증 사례

4.1 국내의 실증 사례

최근 국내에서는 연료전지선박(Fuel Cell Ship, FCS)을 상용화하기 위한 실증적 연구가 활발히 진행되고 있다. 중소벤처기업부와 울산광역시는 국내 최초로 FCS의 상용화를 위한 실증을 진행하였다. 실증 과정에서 에이치엘비(주)가 개발한 FCS인 ‘블루버드(Bluebird)’는 태화강에서 첫 실증운항에 성공하였다. 이 선박은 25 kW FC와 51 리터 수소탱크 8대가 있고, 10노트까지 속력을 낼 수 있으며 배터리를 함께 사용할 경우, 8시간 동안 운항이 가능하였다. ㈜빈센의 10 m급 수소전기보트인 ‘하이드로제니아(HYDROGENIA)’는 25 kW의 FC 1개와 92 kWh의 battery 2개가 조합되어 출력을 내도록 설계된 것으로 10노트 정도로 운항이 가능하다(Monthly Hydrogen Economy, 2021).

상기 두 선박은 범한퓨얼셀의 PEMFC 및 battery를 함께 동력원으로 사용되는 하이브리드(Hybrid) 형이며, 국내의 순수한 PEMFC 선박은 여전히 상용화되지 못하고 있는 실정이다.

4.2 국외의 실증 사례

국외의 경우는 1960년대 잠수함에 최초로 FC가 적용된 이후 많은 실증 연구가 진행되었으며, 2000년대 이후부터 다양한 종류의 FC를 해양 분야에 적용하는 실증 프로젝트가 수행되었다. 여러 종류의 FC를 선박에 적용하는 실증 프로젝트가 약 23개(2017년 기준)가 진행되었지만, 그 중에서 PEMFC가 적용된 것은 8건 정도였다. Table 7은 PEMFC를 기반으로 한 선박의 개발 사례를 연대순으로 나타낸 것이다. 대부분의 실증 프로젝트에서의 출력은 PEMFC와 battery가 조합된 Hybrid 시스템으로 구성되어 있었다(Sürer and Arat, 2022; Tronstad et al., 2017).

최근에는 PEMFC를 적용한 FCS인 ‘Water-Go-Round’가 북미에서 최초로 상용화되었다. 이 선박은 길이 21 m이고, 최고 선속이 22노트이며 84명이 승선할 수 있는 페리선이다. 이 선박에는 Hydrogenics의 360 kW PEMFC인 ‘HyPM™-R120’가 설치되어 있으며 100 kWh의 Li-ion battery와 250 bar의 압축수소 242 kg이 적재되어 있어서 약 1~2일 정도 항행할 수 있다(Kammerer, 2019).

Table 7. Examples for the development of PEMFC based Ships.

Project or Ship Name	R&D Partners	Explanatory	Capacity(kW) of PEMFC	Type of Vessel	Year
Class 212A/214 Submarines	CMR Prototech, ARENA-Project, ThyssenKrupp Marine System, Siemens	· Hybrid propulsion using a diesel engine and fuel cell - 306 kW, 30~50 kW per module(212A), 120 kW per module(214)	34 (212A), 120 (214)	Submarine	2003 ~
ZemShip - Alsterwasser	Proton Motors, GL, Alster Touristik	· Hybrid system - 2 × 48kW(PEMFC) - 360 Ah at 560 V(7 lead gel battery) - 12 × 50 kg(H ₂ storage tank at 350 bar)	2 (pieces) × 48	Passenger ferry	2006~2013
MF Vågen	CMR Prototech, ARENA-Project	· Hybrid system - 12 kW(PEMFC), 25 kWh(Li-ion battery)	12	Passenger ferry	2010
Nemo H ₂	Rederij Lovers etc.	· Hybrid system - 60~70 kW(PEMFC),30~50 kWh(battery) - 6 × 24 kg(H ₂ storage tank at 350 bar)	60~70	Passenger ferry	2012 ~
Hornblower Hybrid	Hornblower	· Hybrid system - Diesel generator, batteries, PV, wind and 32 kW PEMFC	32	Passenger ferry	2012 ~
Hydrogenesis	Bristol Boat, Trips etc.	· Only PEMFC system - 12 kW PEMFC	12	Passenger ferry	2012 ~
SF-BREEZE	Sandia National Lab., Red and White Fleet	· Only PEMFC system - 41 × 120 kW(PEMFC) - 1200 kg(LH ₂ storage tank)	120	Passenger ferry	2015 ~
RiverCell - Elektra	TU Berlin, Ballard, BEHALA, DNV - GL, etc.	· Hybrid system - 3 × 100 kW(PEMFC), 2050 kWh(battery) - 6 × 125 kg(H ₂ storage tank at 500 bar)	3 (pieces) × 100	Canal tugboat	2017~2019
Water - Go - Round	Sandia National Lab., BAE System, Hydrogenics etc.	· Hybrid system - 3 × 120 kW(PEMFC), 1000 kWh(battery) - 242 kg(H ₂ storage tank at 250 bar)	3 (pieces) × 120	Passenger ferry	2018~2019

5. 결 언

해운 분야의 환경규제가 엄격해지고 기후 변화에 대응하기 위하여 대체 연료로서 수소에너지가 사용되는 것은 필연적이라고 할 수 있다. 배출량이 많은 연료 집약형의 선박에는 수소연료전지의 이점을 더욱 누릴 수 있을 것이다.

다른 FC에 비하여 낮은 운영 비용, 적은 유지보수 시간 및 짧은 시동 시간 등으로 인하여 PEMFC 시장은 규모도 크고 더욱 성장할 것이 예상된다.

이러한 PEMFC를 선박의 추진 동력원으로 사용하기 위해서는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

첫째, 실증적 연구에 활용된 PEMFC는 제조사에 따라 규격과 형식이 다양하였다. 규격화되지 않은 PEMFC는 선박과 같은 제한된 공간의 효율성을 저해할 수 있다. 그래서 선박 내에 공간 효율적인 연료전지실 구성을 위해서는 PEMFC의 규격화가 필요하며, 더 나아가서 중량이 가볍고 부피가 작으며, 에너지 밀도를 높일 수 있는 PEMFC의 개발이 필요하다.

둘째, PEMFC는 수소를 연료로 사용하기 때문에 가연 한계치가 4~75%로 넓으므로 폭발의 위험성을 줄여야 한다. 선급에서도 연료전지에 관한 규정을 제·개정하여 안정성을 높여나가야 하며, 특히 해상 운송 분야에 PEMFC를 채택할 경우에는 누출, 진동 및 염분에 의한 부식 등을 고려하여 내구성을 향상시킬 수 있는 방안이 반드시 마련되어야 한다.

셋째, 선박에 적용할 대용량의 PEMFC 생산 플랫폼(platform) 마련이 필요하다. 육상용으로 개발된 PEMFC의 소형선박에 적용 가능성은 실증 연구를 통하여 충분히 검증되었다. 그러나 장기간, 고출력, 연속적인 항해를 위해서는 PEMFC의 정격 출력을 증대시킬 필요가 있다. 즉 대용량의 FC를 단일 유닛으로 설치하는 것보다는 선박에서 소요되는 전력에 따라 단일 PEMFC 모듈을 조합하여 MW급으로 전력을 생산해야 하는 것이다.

넷째, PEMFC의 유지·보수 및 관리의 편의성이 제공되어야 한다. 항해 중에 PEMFC의 고장이 발생하면 단위 모듈의 전력 제어를 통해 블랙 아웃(black out)을 예방하고, 불량한 FC 모듈의 스택(stack)만을 쉽게 교체할 수 있는 정비 방식이 채택되어야 한다. 또 연료전지의 신뢰성 및 수명을 최적화할 수 있는 유지·관리 지침도 함께 개발되어야 한다.

마지막으로 국내의 PEMFC 시장의 활성화와 FCS의 기술력을 확보하기 위하여 국제표준화를 위한 PEMFC 개발이 절실하다. 국외의 PEMFC 개발 기술은 국내에 비하여 상당히 진행되었으며, 상업화된 선박이 등장함에 따라 국내 조선산업에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 PEMFC 기술 개발은 물론이고 국제공인등록 기관의 형식승인과 같은 절차적 과정이 조기에 시행되도록 해야 한다. 그러면 휴대

용·운송용·고정용 등의 다양한 분야에서 활용 가능한 PEMFC의 기술 선점이 가능해지고 그 결과 FC 분야 및 조선 분야에도 국가 경쟁력을 높일 수 있을 것이다.

References

- [1] Altery(2017), Altery Freedom Power System - Nacelle, Retrieved from <https://www.altery.com/products/fuel-cell-engines/> on 28 March 2022.
- [2] Ballard(2016), FCvelocity[®]- MD, Retrieved from <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/motive-modules> on 30 March 2022.
- [3] Ballard(2018), FCvelocity[®]- HD, Retrieved from https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcvelocity-hd.pdf?sfvrsn=2debc380_4 on 30 March 2022.
- [4] Ballard(2020a), FCvelocity[®]- 9SSL, Retrieved from https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcvelocity9ssl.pdf?sfvrsn=4aebc380_4 on 31 March 2022.
- [5] Ballard(2020b), FCgen[®]- LCS, Retrieved from https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcgen-lcs.pdf?sfvrsn=a6ebc380_4 on 31 March 2022.
- [6] Ballard(2021a), FCmove[®]- HD, Retrieved from https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcmovetm.pdf?sfvrsn=77ebc380_4 on 31 March 2022.
- [7] Ballard(2021b), FCmove[®]- HD⁺, Retrieved from https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/ballard-data-sheet-fcmove-hd-plus_september-2021.pdf?sfvrsn=240ddf80_2 on 1 April 2022.
- [8] Ballard(2021c), FCwave[™], Retrieved from https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcwavetm-specification-sheet.pdf?sfvrsn=6e44dd80_10 on 28 March 2022.
- [9] Bumhan Fuel Cell(2020), Fuel Cell & Hydrogen Technology, Retrieved from <https://bumhan.com/wp-content/uploads/sites/126/2021/02/Bumhan-Fuel-Cell.pdf> on 12 April 2022.
- [10] DNV-GL(2019), Comparison of Alternative Marine Fuels, Retrieved from <https://sea-Ing.org/> on 11 March 2022.
- [11] E4tech(2020), The Fuel Cell Industry Review 2020, Retrieved from <https://fuelcellindustryreview.com/> on 11 April 2022.
- [12] Fortune Business Insights(2020), Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Market Size, Share& COVID-19 Impact Analysis, By Application (Transport, Stationary, Others) and Regional Forecast, 2021~2028, Retrieved from <https://www.fortunebusinessinsights.com> on 11 April 2022.
- [13] GlobeNewswire(2020), Global PEMFC (Proton Exchange

- Membrane Fuel Cells) Market 2020-2027-U.S. Market is Estimated at \$ 1.4 Billion, While China is Forecast to Grow at 19% CAGR, Retrieved from <https://www.globenewswire.com/news> on 35 March 2022.
- [14] Hydrogenics(2022), All Hydrogenics catalogs and technical brochures, Retrieved from <https://pdf.directindustry.com/pdf/hydrogenics-33492.html> on 2 April 2022.
- [15] IMO(2018), Report of the Marine Environment Protection Committee on its 72nd Session, Retrieved from <https://www.imo.org/en> on 4 March 2022.
- [16] Intelligent Energy(2021a), IE-Lift™ 801 Retrieved from https://www.intelligent-energy.com/uploads/product_docs/IE-Lift.pdf on 17 March 2022.
- [17] Intelligent Energy(2021b), IE-Lift™ 802 Retrieved from https://www.intelligent-energy.com/uploads/product_docs/IE-Lift_802.pdf on 17 March 2022.
- [18] Intelligent Energy(2021c), IE-Lift™ 804 Retrieved from https://www.intelligent-energy.com/uploads/product_docs/IE-Lift_804.pdf on 17 March 2022.
- [19] Intelligent Energy(2021d), IE-Lift™ MHE Retrieved from https://www.intelligent-energy.com/uploads/product_docs/IE-Lift_MHE_preliminary_new_wmlUvMk.pdf on 17 March 2022.
- [20] Jafarzadeh, S. and I. Schjøberg(2017), Emission reduction in shipping using hydrogen and fuel cells, ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Vol. 10, pp. OMAE2017-61401.
- [21] Jonathan, A(2019), Hydrogen and Fuel Cells in Japan, EU-Japan Center for Industrial Cooperation, Retrieved from https://www.eu-japan.eu/sites/default/files/publications/docs/hydrogen_and_fuel_cells_in_japan.pdf on 15 March 2022.
- [22] Kammerer, M(2019), Marine Fuel Cells and the Water-Go-Round, Retrieved from <https://www.gccocean.no/media/2688/water-go-round-mark-kammerer.pdf> on 29 April 2022.
- [23] Market Insights Reports(2020), Global PEMFC and Fuel Cell Electric Vehicle Market Research Report 2020, Retrieved from <https://www.marketinsightsreports.com/reports/01091739325/global-pemfc-and-fuel-cell-electric-vehicle-market-research-report-2020?Mode=07> on 10 May 2022.
- [24] Monthly Hydrogen Economy(2021), Hydrogen ship floating in Jangsaengpo Harbor of Ulsan, Retrieved from <https://h2news.kr/news/article.html?no=9218> on 30 April 2022.
- [25] Mordor Intelligence(2021a), China Fuel Cell Market-Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022-2027), Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/china-fuel-cell-market-industry> on 29 April 2022.
- [26] Mordor Intelligence(2021b), Europe Fuel Cell Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022-2027), Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-fuel-cell-market-industry> on 15 April 2022.
- [27] Mordor Intelligence(2021c), Japan Fuel Cell Market-Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022-2027), Retrieved from <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/japan-fuel-cell-market-industry> on 13 April 2022.
- [28] Nerem, T(2018), Assessment of Marine Fuels in a Fuel Cell on a Cruise Vessel, Retrieved from https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2564492/19196_FULLTEXT.pdf?sequence=1&isAllowed=y on 10 March 2022.
- [29] Nedstack(2022a), PemGen MT-FCPI-100, Retrieved from <https://nedstack.com/en/pemgen-solutions/maritime-power-installations/pemgen-mt-fcpi-100> on 1 May 2022.
- [30] Nedstack(2022b), PemGen MT-FCPI-500, Retrieved from <https://nedstack.com/en/pemgen-solutions/maritime-power-installations/pemgen-mt-fcpi-500> on 1 May 2022.
- [31] Nuvera(2022), Nuvera E-Series Fuel Cell Engines, Retrieved from <https://www.nuvera.com/enginesredefined> on 3 April 2022
- [32] Panasonic(2021), Panasonic Launches 5 kW Type Pure Hydrogen Fuel Cell Generator, Retrieved from <https://news.panasonic.com/press/global/data/2021/10/en211001-4/en211001-4.html> on 20 March 2022.
- [33] Plug Power(2020), ProGen E-mobility Spec Sheet, Retrieved from <https://www.plugpower.com/resources/> on 10 April 2022.
- [34] Plug Power(2021), GenSure HP Fuel Cell Generators, Retrieved from <https://www.plugpower.com/resources/> on 12 April 2022.
- [35] PowerCell(2021a), Power Generation System 5, Retrieved from <https://powercellution.com/power-generation-system-5> on 25 March 2022.
- [36] PowerCell(2021b), Power Generation System 30, Retrieved from <https://powercellution.com/power-generation-system-30> on 25 March 2022.
- [37] PowerCell(2021c), Heavy Duty System 100, Retrieved from <https://powercellution.com/heavy-duty-system-100> on 25 March 2022.
- [38] PowerCell(2021d), Marine System 200, Retrieved from <https://powercellution.com/marine-mw-solutions> on 26 March 2022.
- [39] Pritchard, D. K., M. Royle, and D. Willoughby(2009),

Installation permitting guidance for hydrogen and fuel cell stationary applications: UK version, Health and Safety Laboratory, RR715.

- [40] Proton Motor(2021), PM 200 Stack Module, Retrieved from <https://www.proton-motor.de/produkte/brennstoffzellen-stacks/> on 25 April 2022.
- [41] Proton Motor(2022), PM 400 Stack Module, Retrieved from <https://www.proton-motor.de/produkte/brennstoffzellen-stacks/> on 25 April 2022.
- [42] Saito, N(2018), The Economic Analysis of Commercial Ships with Hydrogen Fuel Cell through Case Studies, World Maritime University, Master of Science Thesis, pp. 1-97.
- [43] Shakeri, N., M. Zadeh, and J. B. Nielsen(2020), Hydrogen Fuel Cells for Ship Electric Propulsion: Moving Toward Greener Ships, IEEE Electrification Magazine, Vol. 8(2), pp. 27-43.
- [44] Siemens, AG(2013), SINAVY PEM Fuel Cell for submarines, Retrieved from https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:28615cde70250d0e81b68ba466bd77d7f5c68c73/sinavy-pem-fuel-cells.pdf?ste_sid=fd5fd691c3569f170a43bd4dc0d63b9b on 24 April 2022.
- [45] Sürer, M. G., and H. T. Arat(2022), Advancements and current technologies on hydrogen fuel cell applications for marine vehicles, International Journal of Hydrogen Energy.
- [46] Tronstad, T., H. H. Åstrand, G. P. Haugom, and L. Langfeldt(2017), Study on the use of fuel cells in shipping, EMSA European Maritime Safety Agency.
- [47] Troowin(2013), Marine fuel cell system of TWZFCSZ series, Retrieved from http://www.troowin.com/dianchi_en/404.html on 21 March 2022.

Received : 2022. 05. 09.

Revised : 2022. 05. 31. (1st)

: 2022. 06. 09. (2nd)

Accepted : 2022. 06. 27.