

잠수함 공기불요 추진체계에 대한 연구: 현재 운용 중인 잠수함을 중심으로

장 준 섭^{*,1)}

¹⁾ 대우조선해양 중앙연구원

A Study on the Submarine Air Independent Propulsion System: Focused on Submarines Currently in Operation

Junseop Jang^{*,1)}

¹⁾ R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Korea

(Received 29 October 2020 / Revised 4 May 2021 / Accepted 16 July 2021)

Abstract

Submarines are weapons systems that have been proven to be useful in battle since World War I and have continued to improve the efficiency of propulsion systems in order to be used efficiently on the battlefield. In particular, countries that unable to utilize nuclear propulsion systems make efforts to increase the efficiency of Air Independent Propulsion systems, and typical examples are fuel cells, Stirling engines and MESMA. It is also expected that the development of new propulsion systems such as hydrogen-reformer fuel cells, metal-air fuel cell and direct combustion propulsion systems will continue, so the characteristics of these will be examined and the performance based on the published data be checked in this thesis.

Key Words : Submarine Air Independent Propulsion System(잠수함 공기불요 추진체계), Fuel Cell(연료전지), Stirling Engine(스털링 엔진), MESMA(메스마)

1. 서 론

잠수함은 물속을 다니면서 전투를 수행하는 함정을 의미하며, 1900년 최초의 현대식 잠수함인 홀랜드 6번 함을 시작으로 추진기관과 무장 등의 성능이 비약적으로 발전해 왔다. 특히 1차 세계대전에서 독일은 비

대칭 전력의 수단으로서 잠수함을 운용하여 2배나 많은 규모의 전함을 가지고 있었던 영국을 패전 직전까지 몰고 가며 잠수함의 효용성을 입증하였다. 2차 세계대전에서도 독일, 미국과 일본은 수백 척의 잠수함을 건조하여 수천 척의 함선을 침몰시키는 전과를 올리기도 하였다. 2차 세계대전이 종료된 이후에도 잠수함은 특유의 은밀성으로 전장에서 유용하게 사용되어 왔으며, 특히 인도-파키스탄 전쟁, 포클랜드 전쟁과 이라크전에서 함정을 침몰시키고 지상을 공격하는 임

* Corresponding author, E-mail: gojangjs@naver.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

무를 수행하였다^[1].

잠수함의 개발 역사에서 내부공간과 출력(효율)의 문제는 가장 먼저 고려해야 할 문제였다. 출력을 높이려면 내부공간이 늘어날 수 있으며, 이에 따라 내부공간을 늘리면 추진할 때 물 속에서의 저항력 증가로 더 많은 출력을 필요하게 된다. 따라서 크기 대비 높은 출력을 가진 잠수함을 연구하였으며, 이를 위해서는 효율이 좋은 추진기관을 탑재하여 운용할 필요가 있었다. 또한 물속에서는 공기가 다른 기체들을 원하는 만큼 사용할 수 없기 때문에 배터리나 원자로 등의 특별한 추진기관을 사용해야 하였다. 홀랜드 6번함부터 사용된 대표적인 수중 추진기관은 배터리였으며, 1,2차 세계대전을 거치면서 배터리의 성능이 비약적으로 향상되어 2차 세계대전이 끝날 즈음에 건조된 독일의 U-21함은 5노트로 350마일까지 항해할 수 있었으며, 오늘날 잠수함의 배터리 성능과 큰 차이가 없었다^[2]. 이후 추진기관의 혁신적인 변화는 1945년 미국의 원자력 잠수함 개발이며, 미국의 개발에 이어 러시아, 영국, 프랑스, 중국과 인도의 강대국들은 앞 다투어 원자력 잠수함을 개발하였다. 원자력 잠수함은 배터리나 디젤엔진을 탑재한 잠수함에 비해 지속적으로 고속을 낼 수 있어 월등히 우수한 추진성을 가지고 있다. 또한 7~30년 주기로 핵연료만 교체해 주면 원자로의 작동에는 외부의 기체가 필요하지 않고 운영 중에는 폐기물이 발생하지 않아 수중에서 장기간 항해가 가능하다^[3].

하지만 원자력 잠수함의 건조를 위해서는 제반 국제조약 및 협약으로 인해 핵연료의 구매나 건조 승인 등의 문제를 해결해야 한다. 따라서 일부 국가에서는 디젤 잠수함의 한계를 어느 정도 극복할 수 있는 공기불요 추진체계(Air Independent Propulsion System)를 연구하기 시작하였으며, 현재 11개국에서 60척의 공기불요 추진체계 잠수함을 운용하고 있다^[4].

본 논문은 각 공기불요 추진체계별 작동원리 및 특성과 함께 성능(효율), 안전성(폭발 위험성, 연료 저장성과 작동온도 등) 위주로 분석할 예정이다. 먼저 2장에서는 현재 운용되고 있는 추진체계와 앞으로 개발 가능한 추진체계의 작동원리와 주요 특성을 살펴보고, 3장에서 공개된 성능 데이터를 바탕으로 출력, 속력과 체적 등에 대한 관계식을 이용하여 성능계수를 분석하도록 하겠다.

아쉽게도 잠수함의 성능과 관련된 데이터는 공개된 자료가 많지 않으며, 이에 따라 이를 종합적으로 비교

분석한 연구결과는 없고 일부 추진체계에 대한 단편적인 자료밖에 없는 상황이다. 본 논문에서는 현재 운용 중인 잠수함을 대상으로 Jane's Fighting Ships과 Wikipedia에 공개된 비교적 신뢰성 있는 자료를 수집하여 분석하였다.

2. 공기불요 추진체계

2.1 공기불요 추진체계 현황

2.1.1 고분자 전해질형 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)

연료전지는 물을 전기분해하면 산소와 수소가 발생하는 현상의 역반응을 이용한 것으로, 함 내에 적재하고 있는 산소와 수소를 반응시킬 때 발생하는 화학적 에너지를 전기적 에너지로 바꾸어 준다. 연료전지의 기본적인 형상은 Fig. 1과 같이 좌우 전극이 가운데의 전해질을 싸고 있는 형태로 되어 있으며, 좌측에서 공급된 수소는 촉매전극에 의해 수소이온과 전자로 분리된다. 생성된 전자는 도선을 통해 이동하여 전류가 되며, 수소이온은 전해질을 통해 우측으로 이동하여 산소와 결합하여 물이 된다. 다른 AIP 시스템이 50% 이하의 효율을 가지는 반면, 연료전지는 70% 수준의 효율을 가지기 때문에 가장 효율적인 AIP 체계로 알려져 있다^[5]. Table 1은 연료전지별 특성이며 이 중에서 PEMFC는 100 °C 이하의 저온에서 작동되며, 소/중형으로 제작하기에 적합하여 잠수함의 추진용으로 채택되었다.

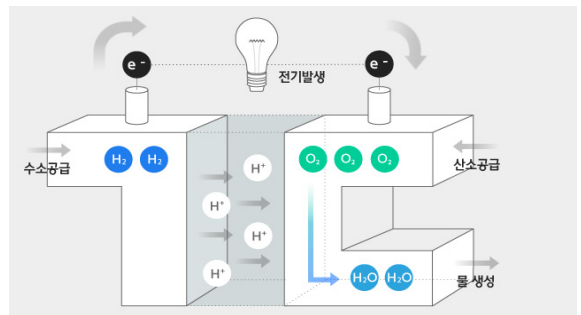


Fig. 1. Operation principle of fuel cell

PEMFC에 사용되는 산소는 산소탱크에 액화된 상태로 저장되며, 수소는 폭발의 위험이 있어 특별한 방법을 이용하여 저장한다. 대부분의 국가에서는 특수 합

금에 저장된 형태의 수소를 사용하며, 스페인에서는 바이오 에탄올을 탱크에 저장한 뒤 개질기를 이용하여 바이오 에탄올 내의 수소를 추출해서 사용한다⁷⁾.

Table 1. Characteristics by fuel cells type⁶⁾

구 분	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
발전량	mW~kW	kW~MW		
크기	소/중	중	중/대	소/중/대
온도	30~100 °C	~220 °C	~650 °C	600~1000 °C
효율	50~60 %	70~80 %	70~85 %	70~85 %

2.1.2 스텔링 엔진(Stirling engine)

스텔링 엔진은 닫힌 공간 안의 가스를 서로 다른 온도에서 압축과 팽창을 반복하여 열에너지를 운동에너지로 바꾸는 장치이다. 스텔링 기관의 작동원리를 Fig. 2에서 살펴보면, (사이클1)압축과정으로 피스톤이 냉각부를 압축하여 냉각된 기체를 가열부로 보내고, (사이클2)가열과정에서 가열부로 이동된 기체가 열에 의해 뜨거워지며, (사이클3)팽창과정에서는 충분히 가열된 기체가 실린더 내에 팽창압을 형성하여 실린더를 밀어낸다. 이후 (사이클4)냉각과정에서는 가열부의 기체가 냉각부로 이동하여 냉각된다. 실린더는 기체의 압축과 팽창에 의한 왕복운동을 크랭크에 전달해 주며, 이는 크랭크에 의해 회전운동으로 바뀐다.



Fig. 2. Operation principle of stirling engine

스텔링 엔진의 닫힌 공간 안에서 수소, 헬륨과 공기의 혼합기체가 작동가스의 역할을 하며, 이 혼합기체에 열을 가해주는 연료는 디젤연료와 액화산소를 1:4의 비율로 혼합된 형태로 사용된다⁸⁾.

2.1.3 MESMA(Module Engine Sous Marin Autonome)

MESMA 시스템은 Fig. 3에서와 같이 에탄올과 산소를 혼합하여 연소시켜 열에너지를 발생시키고, 이를 이용하여 증기발생기에서 증기를 발생시킨 뒤 증기터빈을 구동하여 전기를 발생시키는 방식이다. 이는 파키스탄의 Agosta90B급 잠수함에 탑재되어 있으며, 앞으로 개발될 인도의 Scorpene급 잠수함에도 MESMA 시스템이 탑재될 예정이다⁹⁾.

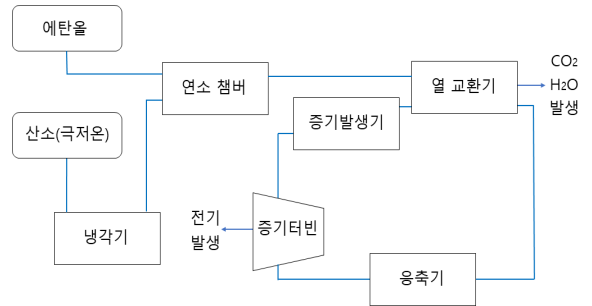


Fig. 3. Operation principle of MESMA system¹⁰⁾

2.2 향후 개발 가능한 공기불요 추진체계

2.2.1 수소 개질형 또는 액화수소 활용 연료전지

수소 개질형 연료전지는 2.1.1에 언급한 연료전지인 PEMFC의 한 종류이다. 여기에 사용되는 수소는 안정적으로 저장하기 위해 수소를 포함한 화합물의 형태로 함 내에 저장되고, 필요시에 개질장치(Reformer)를 이용하여 처리된 뒤 발생하는 수소를 이용하여 연료전지를 작동시킨다¹¹⁾.

화합물의 종류는 Table 2에서와 같이 메탄, 메탄올과 암모니아가 있다. 메탄(CH₄)과 메탄올(CH₃OH)은 액화 수소에 비해 30 % 수준의 저장탱크가 필요하고, 메탄올의 경우는 대기압과 실온에서 저장이 가능하지만 개질과정에서 탄소산화물(CO_x)이 발생하기 때문에 이를 포집하여 액화시키는 장치가 필요하다^{6,11)}. 암모니아(NH₃)는 10 bar의 압력과 -34 °C 온도의 탱크에 저장이 가능하여 이를 위한 탱크의 제작은 상기의 연료에 비해 용이할 것이며 크기는 수소 대비 54 % 수

준이다. 하지만 개질과정에서 질소산화물(NO_x)가 발생하여 이를 처리하기 위한 장치가 필요하며 암모니아 자체가 유독성이 강하므로 안전설비를 추가로 설치해야 한다. 또한 액화수소는 폭발의 위험이 있으며 저장온도가 매우 낮아 두꺼운 단열재가 부착된 저장탱크에 저장을 해야 하는데, 화석연료에 비하여 7.6배 크기의 저장탱크가 필요하다^[12,13].

대표적인 것인 활용 사례는 Fig. 4와 같은 메탄을 개질형 연료전지가 있으며, 개질장치를 통해 수소의 발생과 폐기인 이산화탄소의 발생을 확인할 수 있다.

Table 2. Storage characteristics of hydrogen-containing fuels and liquefied hydrogen^[13]

구 분	압력 (bar)	온도 (°C)	탱크 크기 (단열재 고려)
메탄	1	-162	2.3
메탄올	1	20	2.3
암모니아	1	-34	4.1
	10	20	
액화수소	1	-253	7.6

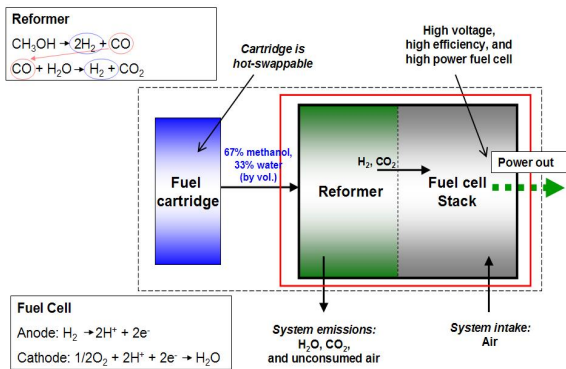


Fig. 4. Operation principle of RMFC (Reformed Methanol Fuel Cell)^[14]

2.2.2 금속-공기형 연료전지(Metal-air Fuel Cell)

금속-공기형 연료전지는 금속과 전해질을 공기 중의 산소와 전기화학 반응시켜 발생하는 전기를 활용하는 것으로, Fig. 5는 대표적인 ZAFC로 양극인 AE (Air-gas diffusion Electrode)와 음극인 금속(아연)으로 이루어져 있다. 양극에서는 공기 중의 산소를 소비하

여 전기화학적으로 산화된 뒤 전해질을 통해서 음극으로 이동되며, 이는 음극에서 다시 환원되어 전기가 발생한다.

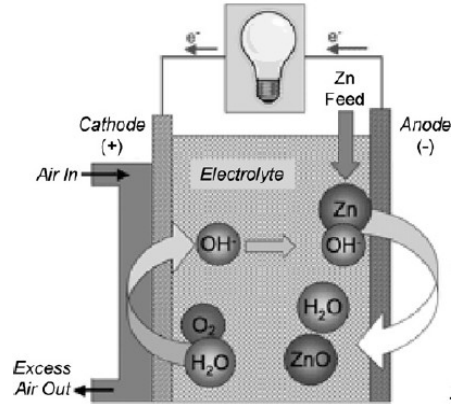


Fig. 5. Operation principle of ZAFC (Zinc Air Fuel Cell)^[15]

단위 무게 당 에너지 발생량과 개방회로를 형성했을 경우 전압발생은 Table 3과 같으며 이를 통해 리튬, 칼슘과 마그네슘을 이용하면 비교적 효율이 좋은 연료전지를 개발할 수 있음 알 수 있다. 하지만 실용화를 위해서는 폭발 위험성, 가격과 제작의 편의성 등을 고려해야 하는데, 현재 실용화가 활발히 이루어지고 있는 것은 아연, 알루미늄과 마그네슘 공기형 전지이다.

Table 3. Energy and voltage characteristics of metal-air fuel cells^[16]

구 분	저장 에너지 (Wh/kg)	개방회로 전압 (V)
리튬-공기	5210	2.91
실리콘-공기	4217	1.6
알루미늄-공기	4300	1.2
칼슘-공기	2990	3.12
마그네슘-공기	2789	2.93
소듐-공기	1677	2.3
게르마늄-공기	1480	1
철-공기	1431	1.3
아연-공기	1090	1.65

2.2.3 직접 연소형 추진체계

직접 연소형 추진체계는 기존의 디젤유를 대체하는 연료를 사용하여 엔진을 작동하는 것으로, 함 내에서 효율적으로 엔진을 작동시킬 수 있다면 큰 에너지를 발생시킬 수 있다. 앞서 2.1.2에서 언급한 MESMA 시스템도 직접 연소형 추진체계의 일종이며, MESMA에서 사용되는 에탄올 이외에도 다양한 연료를 활용하여 추진체계를 개발할 수 있다.

직접 연소형 추진체계의 활용 가능성은 해당 연료의 연소특성을 분석하여 판단한다. Table 4에서 메탄, 메탄올, 암모니아와 수소는 디젤유에 비해서 지나치게 발화온도가 높아서 이들 연료의 활용을 위해 대용량의 냉각장치를 필요로 한다. 또한 최소 점화 에너지는 암모니아를 제외하고 우수한 수준이나, 최대 화염 속력은 수소를 제외하고는 디젤에 비해 매우 낮은 수준을 나타내고 있다.

Table 4. Combustion characteristics of major fuels^[13]

연료 종류	최소 점화 에너지(mJ)	발화온도(°C)	최대 화염 속도(m/s)
메탄	0.28	630	0.37
메탄올	0.14	385	0.50
암모니아	680	650	0.09
수소	0.018	520	2.91
디젤	20	210	1.28

이러한 연소 특성을 보완하기 위해서는 점화플러그를 강화하거나 압축비를 상승시키는 등 엔진의 기술을 향상시키는 방법과 다른 연료를 혼합하여 점화 특성을 보완하여야 한다. 대표적으로 스파크 점화 방식은 암모니아에 수소와 가솔린을 혼합하고, 압축착화 방식의 경우는 암모니아에 디젤엔진을 혼합하는 방법으로 현재 연구가 진행 중이다.^[13]

3. 공기불요 추진체계 성능 및 특징 분석

3.1 분석을 위한 이론

수중에서 항해하는 잠수함에 필요한 출력, 속력과 부피 등에 대한 관계식은 다음과 같다^[17,18].

$$P = P_{prop} + P_{rest} = 0.5\rho C_d D^{2/3} v^3 + D/22 + 25 \tag{1}$$

P : 출력(kW), P_{prop} : 추진력,
 P_{rest} : 기타 출력, C_d : 저항계수,
 D : 부피(m³), v : 전진 속도(knots)

P 는 추진력과 기타 출력의 합이며, 추진력은 잠수함이 물의 저항을 밀어내면서 항해하는데 필요한 전력이고 기타 출력은 함의 전투체계, AIP 체계, 유압계통이나 승조원의 거주 등에 필요한 전력을 의미한다. 식 (1)에서 추진력은 속력의 세제곱에 비례하고, 부피의 2/3승에 비례하며, AIP 시스템 탑재 잠수함의 기타 출력은 일반적으로 잠수함의 부피에 의해 근사적으로 결정된다. 잠수함의 속력과 출력과 관련된 데이터는 일부에 대해서만 공개되어 있고 함정별로 출력, 크기(부피)와 저항계수가 다르기 때문에 이 식을 활용하여 나머지 데이터를 계산하여 비교분석이 가능한 자료로 변환할 것이다.

3.2 성능 및 특징 분석

스털링 엔진은 열역학적으로 고효율이고, 부하 대응 특성이 좋으며 배출가스가 적고 저소음과 저진동의 장점을 가지고 있다. 하지만 가열을 위한 가동시간이 길고 작동 유체의 열팽창과 수축을 이용하기 때문에 많은 양의 유체가 필요하여 크기 대 출력비는 낮다^[16]. 스웨덴과 일본에서 스텔링 엔진을 채택하여 운용하고 있으나, 유사한 규모의 잠수함 PEMFC에 비해 64%의 출력밖에 내지 못한다. 따라서 현재 운용 중인 AIP 중에서 PEMFC가 가장 효율적이다. 이에 따라 일본은 앞으로 개발될 잠수함에 스텔링 엔진 대신에 연료전지의 탑재를 고려 중이다^[19-21]. 또한 MESMA 시스템은 에탄올과 산소가 연소할 때 700 °C의 고온이 발생하며, 에탄올(C₂H₆O)이 연소할 때 발생하는 이산화탄소를 포집하여 60 bar로 액화시켜야 하기 때문에 시스템의 크기에 비해 출력은 작다.

이를 증명하기 위해서 Table 5에서 현재 운용 중인 공기불요 추진체계의 종류별 크기와 출력 값 등을 활용해 보겠다. 이 값과 식 (1)에서의 출력, 부피, 전진 속력과 관계를 이용하여 214급 잠수함의 최대 속도 성능계수를 1이라고 가정하여 함종별 최대 속도 성능계수를 확인할 수 있다. 성능계수가 가장 높은 공기불

요 추진체계는 PEMFC로 평균 0.99이며, MESMA는 0.85, 그리고 스텔링 엔진은 0.73이다. 여기서 소류급과 하루시오급은 각각 0.72와 0.58의 성능계수 값을 도출하였으나, 이 함정들은 반복각선체를 가진 함정으로 실제 성능계수 값은 이보다 낮은 값을 가질 것으로 판단된다.

Table 5. Performance data of AIP systems^[4,18,22,23]

종 류	함급	크기 (톤)	출력 (kW)	항해 속력 (kts)	$C_d \times 10^6$	최대 속력 성능계수	
PEMFC	단 각 선 체	214	1829	240	-	3658	1
		212	1859	306	최대 8 순항 4	3837	1.12
		209	1678	240	-	3651	1.04
		돌핀2	2400	240	-	3650	0.86
		S80A	2965	300	순항 4 (15일)	3650	0.92
MESMA	Agosta 90B	1980	200	최대 8 순항 4	3612	0.85	
스텔링	반 복 각 선 체	A17	1626	150	-	3655	0.75
		A19	1625	150	최대 5	3658	0.75
		A26	2000	195	-	3655	0.83
		소류	4100	300	-	3840	0.72 - α
		하루 시오	3759	240	-	3824	0.58 - α

또한 속력별 항해 가능기간은 얼마나 많은 연료를 적재하는가에 따라 달라지게 될 것이나, 연료의 적재에 따라서 함정의 크기는 커지게 될 것이다. 또한 공기불요 추진체계의 연료가 되는 액화산소, 수소와 에탄올은 항해 중에 충전할 수가 없어 사용 가능 기간은 제한될 것이다. 이에 따라 공기불요 추진체계를 탑재한 모든 잠수함은 공기불요 추진체계 이외에 디젤엔진과 축전지를 탑재하고 있어서, 공기불요 추진체계의 연료를 무한정으로 탑재할 수가 없다. 항해 가능기간은 대부분의 국가에서 공개하지 않고 있으며, Table 5에서 유일하게 공개된 자료는 스페인의 S80A

급 잠수함으로 4 kts의 속력으로 15일간 항해할 수 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 최대 속력을 모르기 때문에 최대 속력을 각각 5 kts, 6 kts, 7 kts, 8 kts로 가정하고 식 (1)을 이용하여 각 속력별 항해 가능 기간을 계산해 보면 Table 6과 같다.

또한 Table 5에서와 같이 공기불요 추진체계의 최대 순항속력은 5~8 kts으로 기존 디젤-전기 추진 잠수함의 최대 속력인 21.5~25 kts에 비해 30 % 수준임을 확인할 수 있다.

Table 6. Navigable duration by speed(days)

구 분	속 도(kts)					
	3	4	5	6	7	8
최대 속력 5 kts	18.3	15	11.6	-	-	-
최대 속력 6 kts	17.0	15	12.5	10.1	-	-
최대 속력 7 kts	16.3	15	13.2	11.3	9.3	-
최대 속력 8 kts	15.9	15	13.7	12.2	10.5	8.9

공기불요 추진체계 중 PEMFC를 탑재한 스페인 S80A급 잠수함의 항해 지속능력인 4 kts 속력, 15일을 항해거리 성능계수를 1로 가정해 보자. 여기에 수중에서 축전지로 항해하는 디젤-전기 잠수함의 데이터를 이용하여 각 잠수함의 항해거리 성능계수를 계산하면 Table 7과 같다. 여기에서 디젤-전기 잠수함의 배터리는 0.17~0.38의 항해거리 성능계수 값을 가진다는 것을 알 수 있으며, 동일한 항해속력으로 항해하였을 경우 공기불요 추진체계가 2.6~5.9배의 거리를 항해할 수 있음을 알 수 있다.

Table 7. Performance data of diesel-electric submarines^[4]

함급	항해속력 (kts)	항해거리 (NM)	항해거리 성능계수
Kilo	3	400	0.30~0.36
Collins	4	400	0.28
Ming	4	330	0.23
Scorpene	4	550	0.38
Sauro	4	250	0.17

수소 개질형 연료전지는 메탄올과 암모니아가 수소보다 안정적이며, 저장을 위한 탱크의 크기를 줄일 수 있을 것으로 판단되어 효율적인 개질장치를 개발하면 PEMFC를 대체할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 개질과정에서 발생하는 탄소 및 질소 산화물을 고압으로 액화하여 저장하는 장치가 필요하다.

금속-공기형 연료전지는 현재 전기자동차의 배터리로 활용하기 위해 활발히 연구가 진행 중이며 전해질이나 배터리의 재료들이 저렴하여 다른 연료전지에 비해서 연구개발과 양산에 필요한 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이를 잠수함용으로 전환했을 경우 공기나 산소를 물속에서 얻을 수 없기 때문에 이를 탱크에 저장하여 사용해야 되므로 저장 공간 확보의 문제가 발생하며, 금속이나 양극의 부식에 따른 유해가스도 발생할 수 있어서 이를 제어하는 기술이 필요하다.

직접 연소형 추진체계는 현재 운용하고 있는 디젤 엔진의 연료를 다른 것으로 바꾼 것에 불과하기 때문에 연소를 위해 산소가 필요하고 폐기가 발생하는 문제가 있다. 산소는 액체의 형태로 저장한다고 하더라도 출력을 증가시킨다면 산소의 소모량은 기하급수적으로 늘어나서 큰 규모의 산소탱크가 필요하게 될 것이며, 메탄과 메탄올은 탄소산화물, 그리고 암모니아는 질소산화물이 발생하기 때문에 이를 처리하기 위한 장치가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서 잠수함 공기불요 추진체계로 사용되는 PEMFC, 스텔링 엔진, MESMA, 그리고 향후 개발 가능한 수소 개질형 연료전지, 금속-공기형 연료전지와 직접 연소형 추진체계의 작동원리와 특성에 대해 알아보았다. 또한 가장 우수한 성능을 가진 공기불요 추진체계는 PEMFC이며, 배터리를 사용하는 추진체계와 비교하여 훨씬 더 오랜 기간 동안 항해할 수 있음을 알 수 있었다. 다만, 이 추진체계는 배터리를 사용하는 것에 비하여 매우 낮은 속력에서 적합한 추진체계임을 확인할 수 있었다. 배터리는 수상에서 디젤엔진을 이용하여 재충전할 수 있는 반면, 공기불요 추진체계는 연료인 수소와 산소 등을 수상에서 재충전할 수 없기 때문에 매우 제한된 상황에서만 운용될 수 있다.

수소 개질형 연료전지 중 탱크의 크기, 그리고 압력

과 온도를 고려한 저장성으로 판단할 때 적합한 연료는 메탄올과 암모니아임을 알 수 있었다. 하지만 개질기와 탄소산화물과 질소산화물을 처리하기 위한 장치의 설치에 따른 공간이 고려되어야 한다. 금속-공기형 연료전지는 다른 연료전지와 마찬가지로 연료저장을 위한 대규모의 탱크가 필요하여 수중에서 안정적으로 활용되기 위해서는 꾸준한 연구가 진행되어야 할 것이다. 직접 연소형 추진체계에 활용될 수 있는 연료들의 연소 특성을 분석한 결과, 현재 수상에서 운용하고 있는 디젤유에 비해서 연소특성이 우수한 연료는 없다. 또한 대규모 냉각장치와 산소탱크의 설치, 배기가스의 처리에 따른 공간이 필요하다는 문제가 있다.

무기체계의 개발에는 막대한 비용과 시간이 소요되므로 철저한 선행연구를 통해 방향을 설정하여 필요 없는 소모를 줄여야 할 것이다. 이를 위해서는 전 세계에서 운용 중인 무기체계의 현황과 데이터를 분석하는 연구들이 진행되어야 할 것이다. 수상 함선의 추진체계는 비교적 새로운 기술이 개발되어 빠르게 적용되고 있지만, 이를 잠수함에 그대로 적용하는 데에는 어려움이 많다. 수중에서는 적체공간이 제한되며 충분한 양의 산소나 수소 등의 기체를 공급받기 어렵고 열과 폐기의 발생도 문제가 될 수 있기 때문이다.

본 연구의 분석결과가 무기체계 개발의 방향 설정에 도움이 되기를 기대하며, 향후 선박의 추진체계와 관련된 새로운 기술의 개발이 됨에 따라서 이 기술이 잠수함 추진체계로의 적용이 가능할 것인지 여부와 구형 성능에 대한 꾸준한 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] Wikipedia, "PNS Ghazi, HMS Conqueror(S48)," Accessed May 24, 2021. <https://en.wikipedia.org>.
- [2] Wikipedia, "SM U-21(Germany)," Accessed May 24, 2021. <https://en.wikipedia.org>.
- [3] J. S. Jang, "Understanding Nuclear Powered Submarine, 100 Questions and 100 Answers," ROKN Submarine Force Command, Changwon, pp. 19, 38-44, 2018.
- [4] Stephen Saunders, "Jane's Fighting Ships 2017-2018," IHS Jane's, London, UK, 2017.
- [5] J. T. Kim, "Understanding Submarine, 100 Questions and 100 Answers," ROKN Submarine Force Command, Chanwon, p. 79, 2015.

- [6] M. H. Kim, "Analysis on the Technology R&D of the Fuel Cell Systems for Power Generation in Ships," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 31, No. 8, Seoul, pp. 925-927, 2007.
- [7] T. Y. Oh, "Applications of Fuel Cell Technology in Hyundai Heavy Industries," *Hyundai Heavy Industries*, Ulsan, p. 4484, 2010.
- [8] Naver Knowledge Encyclopedia, "Stirling Engine," Accessed August 26, 2020. <https://terms.naver.com>.
- [9] Defense Industry Daily, "India Looks to Modify Scorpene Subs with MESMA AIP Propulsion," Accessed May 24, 2021. <https://www.defenseindustrydaily.com>.
- [10] Tomas D Baino, "Overview of Hull Design Electric Submarines with AIP System," 2018. Accessed May 24, 2021. <https://maritimereview.ph/2281/>.
- [11] J. K. Kim, "A Study on the Policy for Activating Environment-friendly CO₂-free Hydrogen Production," *Korean Energy Economics Institute*, Ulsan, pp. 14-15, 2019.
- [12] S. Y. Lee and H. J. Lee, "Potential Applicabilities of Ammonia in Future Hydrogen Energy Supply Industries," *the Journal of Industrial Chemistry*, Vol. 30, No. 6, Seoul, pp. 668-669, 2019.
- [13] Korean Register Research Headquarters, "Eco-friendly Future Ship Fuel Forecast," *Korean Register*, Pusan, pp. 12-13, 19-20, 25, 2020.
- [14] Wikipedia, "Reformed Methanol Fuel Cell," Accessed May 24, 2021. <https://en.wikipedia.org>.
- [15] Y. S. Yoon, "Zinc Air Fuel Cell Used Non-precious Metal," *KIC News*, Vol. 14, No. 6, Seoul, pp. 43-44, 2011.
- [16] Wikipedia, "Metal-air Electrochemical Cell," Accessed May 24, 2021. <https://en.wikipedia.org>.
- [17] D. M. Shin, "Optimization of an On-board Fuel Cell System for Submarine Operation," *Master of Science Dissertation*, University of Delaware, p. 14, 2018.
- [18] Mohammad Moonesun, "Optimum L/D for Submarine Shape," *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol. 45(1), pp. 41-42, 2016.
- [19] Y. D. Koo and Y. H. Lim, "Prospects for Domestic Supply through Analysis of Micro-CHP Current Status," *Korea Institute of Science and Technology Information*, Daejeon, p. 25, 2013.
- [20] W. S. Park and B. K. Koo, "Introduce the Technology Development Trends and Key Technology of Stirling Engine," *The Korean Institute of Electrical Engineers 2016 May*, Seoul, p. 2, 2016.
- [21] Sebastien Robin, "Meet the 22SS: Japan's New Stealth Submarine," 2019. Accessed May 24, 2021. <https://nationalinterest.org>.
- [22] Pakistan Defense Military Consortium, "Agosta 90B," Accessed May 24, 2021. <http://pakdef.org>.
- [23] Wikipedia, "Gotlant-Class Submarine," Accessed May 24, 2021. <https://en.wikipedia.org>.