

잠수함 동력원으로서의 연료 전지



白 現 種
國科硏 선임연구원
이학박사

“
재래식 잠수함의
잠항 능력을 향상시키기 위해
제안된 AIP 장치들도 끊임없는 기술의
진보와 경쟁 그리고 실선 적용에 의한
검증을 거쳐 미래에는 어느 한 AIP 장치가
표준으로 자리잡게 될 것으로 추측된다.
시스템 자체의 소음수준이 낮을 것으로 기대되는
연료전지 AIP도 많은 홍보와 관심 속에서
실선용이 개발 중이다. 하지만 모든
AIP 장치들이 제각기 고유의 비효용성을
갖고 있는 것처럼 연료전지 역시 안전성
저하를 비롯한 여러 가지 부담을 추가한다는
점에 유의해야 할 것이다.
”

재

래식 잠수함의 수중 추진동력은 공기
중에서 작동시킨 디젤엔진으로부터 얻
어 납축전지에 저장한 전기로 단기간
유지된다.

일반적으로 재래식 잠수함의 잠항 능력은 정
숙주행시 2~3일, 고속주행시 1~2시간에 불과
하다. 축전지에 저장된 전기가 방전되면 잠수함
은 수면 가까이 떠올라 대기를 흡입하여 디젤엔
진을 가동해야 하는데, 이때 재래식 잠수함의
온밀성은 크게 약화된다.

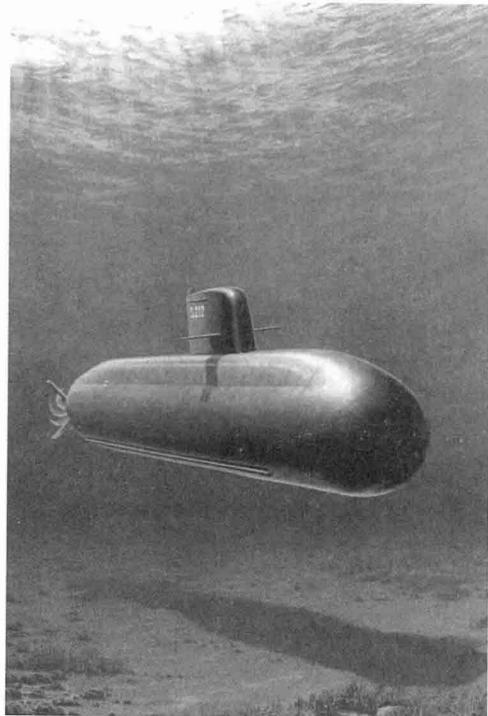
이와 같은 재래식 잠수함의 제한된 잠항 능력
을 향상시키기 위해 공기 무관추진(Air

Independent Power, AIP) 장치가 개발되고 있으며 AIP 장치는 정숙주행에 의한 잠항 능력을 14~20일로 늘릴 수 있는 것으로 평가되고 있다.

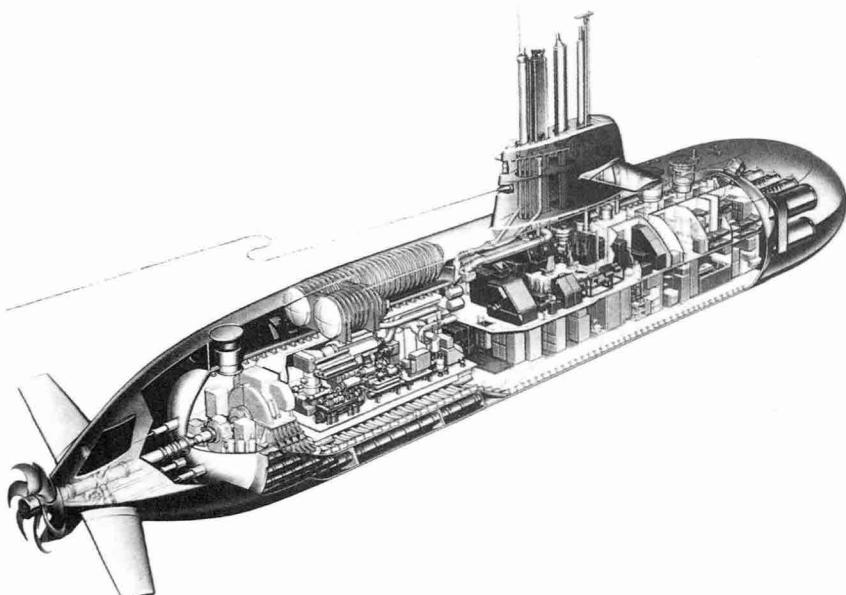
현재 개발 중이거나 개발 완료된 AIP 장치로는 연료전지, 스텔링 엔진, 폐회로 디젤엔진, 메스마(MESMA) 등이 있다. 이들은 공통적으로 액체산소를 탑재하며 수소를 사용하는 연료전지를 제외하면 디젤유를 연료로 사용할 수 있다.

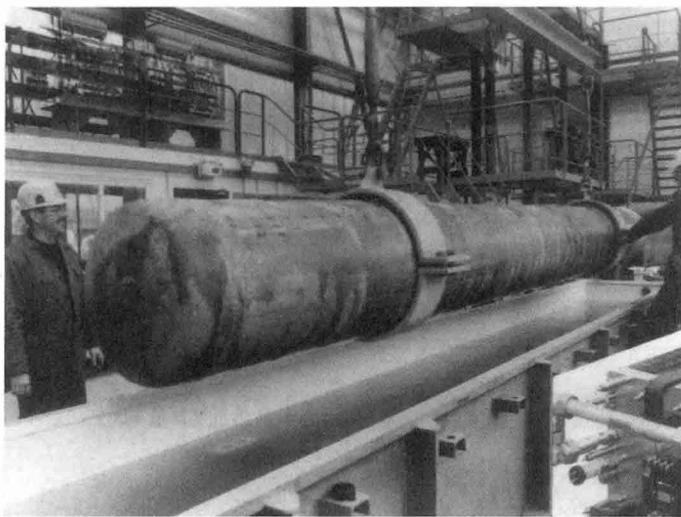
그런데 현재 제안되어 있는 AIP 장치 중 어느 것이 가장 우수한가라는 질문에 대한 해답은 서로 다른 장단점과 각국이 처한 상이한 작전환경으로 인해 매우 얻기 어렵다.

특히, 연료전지는 열기관 원리를 이용하는 여타 AIP 장치와는 달리 전기화학적 원리를 이용하는 비교적 낯선 기술분야이기 때문에 기본 특성에 대한 이해없이 장단점을 올바로 파악하기란 쉽지 않다.



2000년초에 취역예정인 세계 최초의 연료전지 추진동력 잠수함(독일 212)





수소 저장 장치

그리고 AIP 장치에는 잠항 능력의 향상이라는 순기능 뿐만 아니라 다양한 역기능도 있으나 이는 잘 알려져 있지 않다. 이 글은 수소와 관련된 기본 지식을 정리하고 연료전지의 원리와 잠수함 탑재에 대해 논의함으로써 연료전지 AIP에 대한 이해를 돋고자 하였다.

수소의 물리화학적 성질

수소는 무색, 무취, 무미하며, 수소의 인체 흡입으로 인한 직접적인 장애는 없다. 다만, 수소의 농도가 너무 높으면 공기 중 산소분압이 낮아져 질식할 수 있다. 예를 들어 공기 중 수소의 농도가 50%이면 해발고도 3,000~4,000미터에서의 산소분압에 해당한다.

그리고 수소는 가장 가벼운 기체로 몇 가지 극단적인 성질을 갖고 있다. 열전달률, 음속, 평균분자속도가 가장 크고 점도와 밀도가 가장 낮다. 이러한 성질로 인해 수소가 틈새를 빠져나가는 속도는 공기에 비해 3.5배 빠르며 화염의 전파속도도 메탄가스에 비해 약 4배 빠르다. 공기 중에서 수소의 연소가능 농도는

4~74.2%로 메탄가스의 5~15%에 비해 월등히 넓은 범위이고, 수소의 비등점은 영하 253°C로 산소나 질소보다 낮아 액체상태의 수소가 공기 중에 노출되면 산소와 질소를 응축시켜 순간적으로 연소 가능한 혼합물을 형성한다.

수소의 연소열은 디젤유에 비해 약 3배 많은 119.93kJ/g이며, 발화점은 메탄가스와 비슷한 585°C이지만 발화에 필요한 에너지가 작아 미세한 정전기에도 쉽게 발화된다. 수소의 연소 생성물은 물이지만 공기 중에서 연소하면 고온의 화염으로 인해 공해물질인 질소산화물(NOx)도 생성된다.

수소의 연소는 화염의 전파속도가 빠르기 때문에 폭발적인데 이는 한 역사적 사건으로 인해 인상 깊게 알려져 있다. 1936년 나치독일이 제작한 힌덴부르크호 비행선이 수소를 풍선에 채워 운항하다가 1937년 5월 미국 래이크허스트시 상공에서 폭발한 것이다. 인류가 만든 최대의 비행체가 화염 속에서 순식간에 사라져 버린 사건은 당시 대단한 충격이었다.

수소의 생산, 보관 및 운송

• 수소의 생산

수소의 생산 방법으로는 물을 초고온의 열로 분해하거나 빛으로 광분해하여 추출하려는 시도

수소저장합금

합 금	수 화 물	수화물 밀도(g/cc)	수소 무게비(Wt%)	수소 밀도(g/lH ₂)
FeTi	FeTiH _{1.9}	5.47	1.80	98.5
LaNi ₅	LaNi ₅ H _{6.7}	6.59	1.53	100.8
Mg ₂ Ni	Mg ₂ NiH ₄	2.57	3.59	92.3

가 있으나 아직 연구 단계이며, 실험실에서 소량의 수소를 얻기 위한 금속의 화학적 변화방법을 제외하면 전기분해법과 탄화수소로부터 수소를 얻는 방법이 있다.

전기분해법은 전기화학적 과정이 잘 알려져 있고 수소의 순도도 높다. 전기분해법에 필요한 것은 전기와 물뿐이며 부산물로 산소도 얻을 수 있다. 그러나 수소 생산비가 높아 제한적으로 활용되고 있다.

현재 수소의 상업적 생산에 가장 많이 쓰이는 방법은 탄화수소를 이용하는 것이다. 탄화수소 중 가장 유리한 물질은 천연가스에 있는 메탄으로, 수소의 비율이 다른 탄화수소에 비해 높아 수소 수득률이 높고 황화합물이 적어 수소 순도도 비교적 높다. 수소추출 과정은 다음과 같이 2단계로 이루어져 있다.



반응 1은 흡열반응이고 반응 2는 촉매를 필요로 한다. 앞의 반응식은 간단하지만 실제 과정은 복잡하다. 그리고 수소를 반응물로부터 분리하

고 정제하는 과정도 필요하다.

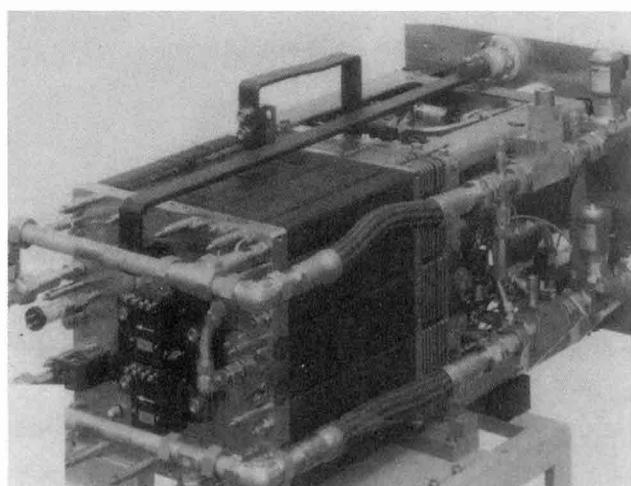
• 수소의 저장

수소의 저장 방법으로는 수소를 기체상태로 저장하는 방법, 액체상태로 저장하는 방법, 그리고 수소저장합금에 흡수시키는 방법이 있다.

수소저장합금은 수소분자를 금속격자 사이에 침투시켜 저장하는 것으로 위의 표에 제시된 것들이 잘 알려져 있다.

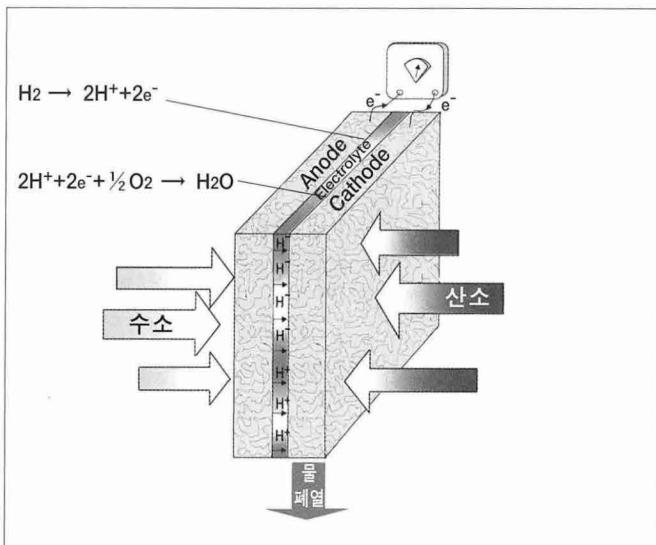
액체수소의 밀도가 69.9g/l이므로 위의 표에서 보는 바와 같이 수소저장합금의 수소저장 효율이 액체수소보다 더 높다. 그런데 수소저장합금의 밀도가 수소흡수 전후로 변하기 때문에(예를 들어, FeTi의 경우 6.49g/cc에서 5.47g/cc) 충전과 방출을 오래 반복하면 수소저장합금이 먼지처럼 변하면서 성능이 저하된다.

또한 수소저장합금은 수증기, 일산화탄소, 황화합물 등과 같은 불순물에 의해서도 쉽게 성



연료전지의 모습

연료전지의 작동원리



능이 저하되므로 고순도의 수소를 사용해야 한다. 수소저장합금은 밀도가 높아 자체로도 매우 무거우며, 수소의 충·방전시에 요구되는 냉각과 가열을 위해 수소저장합금 내에 조밀한 열교환 튜브를 장착하므로 복잡할 뿐 아니라 수소저장 밀도를 낮추고 전체 시스템의 무게를 증가시킨다.

수소저장합금으로 가장 우수한 것은 비싸지만 란탄-니켈(LaNi₅) 합금이다. 티탄-철(FeTi) 합금은 란탄-니켈 합금에 비해 수소를 빼내기 위해 더 많은 열을 가해야 한다.

수소를 액체상태로 보관하기 위해서는 액화설비와 초저온을 유지하기 위한 단열설비가 필요하므로 경제성이 낮다. 또한 고도의 진공용기라 할지라도 불완전한 단열로 인해 액체수소의 기화손실을 막을 수 없다.

수소를 저장하는 가장 손쉬운 방법은 기체상태의 수소를 150~400 기압으로 가압하여 저장하는 것이다. 그러나 20~30kg 짜리 금속탱크에 400 기압의 수소를 저장하여도 2.5kg 정도의

수소만 저장할 수 있으므로 저장효율이 낮다. 이때 수소 밀도는 33g/l이다.

수소는 수소저장합금의 원리와 마찬가지로 여러 종류의 금속격자 사이로 파고 들어가 수소취화현상을 일으킨다. 수소취화현상을 일으킨 금속은 바삭바삭하고 부서지기 쉽게 변한다.

따라서 수소 배관이나 용기를 제작할 때 이 문제도 조심스럽게 다뤄야 한다. 단, 고순도의 수소를 요구하지 않는 경우엔 일산화탄소, 알코올과 같은 불순물을 섞음으로써 이 문제를 간단히 비

켜갈 수도 있다.

• 수소의 운송

수소는 천연가스와 동일한 방법으로 운송 가능하다. 그러나 수소를 파이프라인으로 운송할 경우 수소의 밀도가 낮기 때문에 천연가스에 비해 약 3배의 펌프에너지가 소모되고 고압탱크를 이용할 경우에도 운송효율이 천연가스보다 낮다.

연료전지

수소를 에너지원으로 활용하려는 최초의 과학적 탐색은 1948년에서 1955년에 걸친 캐나다 토론토 대학의 수소 내연기관 연구였다. 뒤를 이어 1950년대 NASA 루이스 연구소의 전신인 NAC 루이스 연구소에서 개발한 수소 연료 제트엔진이 마틴 B57폭격기에 장착되었으나 후속 개발은 이루어지지 않았고 1968년엔 미국의 가스기술연구소에서 수소를 사용하는 가정용 스토

주요 연료전지의 특성

전해질	작동온도	장점	단점	현황
알칼리	70~200°C	높은 출력밀도, 고 효율	CO ₂ 에 취약	시험중
양성자교환막	80~110°C	높은 출력밀도, 긴 운전수명	CO에 취약, 반응생성을 처리 곤란, 고가	시험중
인산	150~210°C	기술 성숙	낮은 효율, 짧은 운전수명	상업화
용융탄산염	550~650°C	고 효율	짧은 운전수명, 높은 반응온도	시험중
고체산화세라믹	1000~1100°C	긴 운전수명	낮은 효율	연구중

브와 그릴을 개발하였으나 대중화엔 이르지 못하였다.

1960년대에 이르러 미국의 우주항공위원회의 주관으로 제미니, 아폴로 프로젝트에 사용할 연료전지가 개발되었다. 우주선에는 사람의 손이 필요 없고 안정적인 전기공급장치가 필요했다. 연료전지는 배터리와 유사하지만 수소와 산소를 공급하면 연속적으로 전기를 뽑아낼 수 있다는 점이 배터리와 다르다.

연료전지는 우주선에 쓸 목적으로 개발되었으나 최근 환경에 대한 우려가 증가함에 따라 깨끗한 에너지원으로 주목 받기 시작하였다. 응용 범위는 휴대형 컴퓨터 전원에서부터 대형 발전소까지 다양하게 검토되고 있지만 자동차 동력으로 이용하려는 시도가 현저하다.

이는 연료전지가 공해를 유발하지 않아 도심 공해 방지책과 잘 부합하기 때문이다. 그러나 아직 수소를 자동차에 실을 방안이 마땅치 않아 실용화에 어려움을 겪고 있다.

앞서 논의한 바와 같이 수소저장함금은 너무 무거워 이를 움직이는 데에만 엄청난 에너지가 필요하고 액체수소는 액화에 필요한 에너지 손실과 액체수소의 기화손실이 크고 단열탱크의 제작이 어려우며, 기체수소는 저장용량이 너무 작다.

• 연료전지의 원리

연료전지의 기본구조는 P.34의 그림과 같이

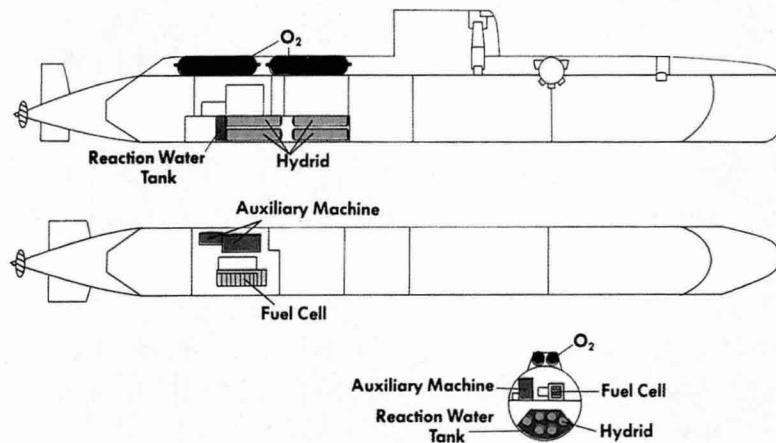
연료(수소)가 공급되는 양극과 산화제(산소)가 공급되는 음극, 그리고 양극과 음극 사이로 이온이 흐르는 전해질로 구성된다. 연료로는 수소뿐만 아니라 반응성이 높은 메탄, 메탄올, 일산화탄소 등을, 산화제로는 공기를 이용하는 방법도 연구중이다.

연료전지는 전해질의 종류에 따라 여러 형태가 있다. 그림에서와 같이 H⁺ 이온이 양극에서 음극으로 움직이는 인산 연료전지와 양성자교환막 연료전지, 음극에서 양극으로 O⁻ 이온이 움직이는 고체산화세라믹 연료전지, OH⁻ 이온이 움직이는 알칼리 연료전지, CO₃⁻ 이온이 이동하는 용융탄산염 연료전지가 알려져 있다. 이들의 특성을 요약하면 위의 표와 같다.

연료전지는 기계적 구동이나 엔트로피 상승에 따른 열효율 손실이 적다. 연료의 종류에 따른 열역학적 특성과 이론적 효율은 P.36 아래 표에 제시된 바와 같다.

P.36 아래 표에서 보는 바와 같이 연료전지의 이론적 효율이 80% 이상이지만 실제로는 이보다 낮다. 연료전지의 부속장치를 구동하는 데 전기가 소모되기 때문이기도 하지만 더 중요한 이유는 연료전지를 열역학적 가역조건에서 운전 할 수 없기 때문이다. 열역학적 가역조건을 유지하려면 반응속도가 극도로 느려야 하므로 실용성이 없다. 다르게 말하면, 전류를 많이 흘릴 수록 반응속도가 증가하고 열역학적 비가역성이 심화되면서 효율이 저하된다.

연료전지 추진장치



연료전지의 잠수함 탑재

• 공기무관추진(AIP) 장치의 기능

AIP 장치는 기존의 재래식 잠수함에 추가하여 사용하는 개념을 바탕으로 하고 있으며, 전술한 바 대로 수중 체재 능력을 4~7배 향상시키는 데 주목적이 있다. 그런데 AIP 장치에 의한 운항거리는 정숙운전을 기준으로 대략 1,500 해리로 재래식 잠수함의 최대 운항거리의 15% 정도에 불과하다.

그리고 AIP 장치의 출력은 최대 4~6노트의

속력을 낼 수 있는 크기에 지나지 않으므로 고속주행시에는 배터리에 의존할 수 밖에 없으며, AIP 장치의 소음은 아무래도 배터리보다는 커서 극도의 정숙성이 요구되는 작전환경에서도 배터리가 최선의 동력원일 것이다. 뿐만 아니라, 수중에서 배터리보다 더 안전하고 신뢰성 있게 작동할 수 있는 AIP 장치는 아직 존재하지 않는다.

즉, AIP 장치는 어디까지나 특별히 필요한 경우에 사용하도록 예비된 보조동력임에 유의하여야 한다. 다만, 앞으로 십 수년 후에는 재래식 잠수함의 디젤엔진을 제거하고 AIP만 탑재한

연료전지 연료의 열역학적 특성

연료	반응식	ΔH^*	ΔG^{**}	Eh^{***}	η^{****}
수소	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	2.97	2.46	1.23	83.0
메탄	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	9.25	8.50	1.06	91.9
메탄올	$CH_3OH + 3/2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	7.55	7.29	1.21	96.7
일산화탄소	$CO + 1/2 O_2 \rightarrow CO_2$	2.94	2.67	1.34	90.9

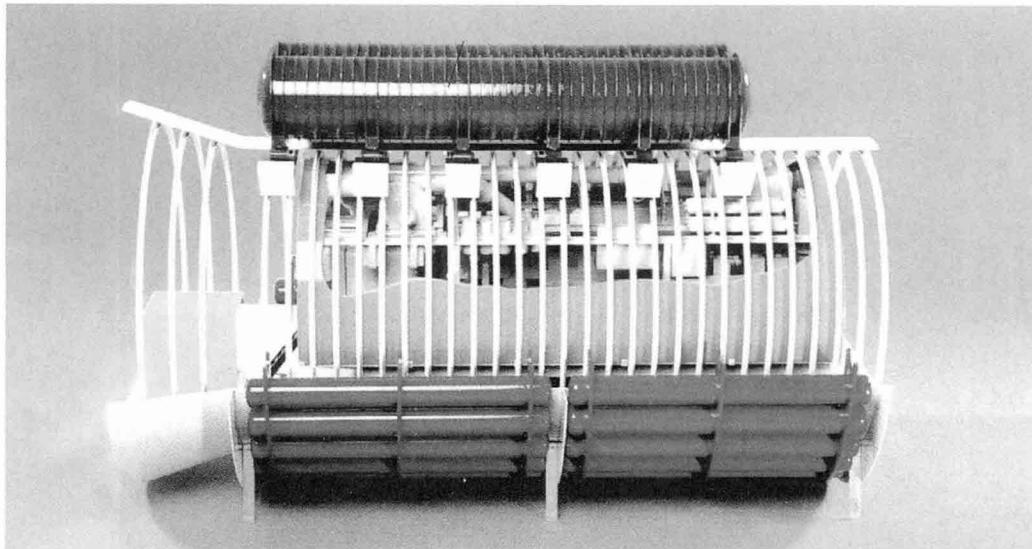
* 연료 원자 1개당 엔탈피(eV)

** 연료 원자 1개당 깁스 자유 에너지 (eV)

*** 이론적 전압 (V)

**** 이론적 효율 ($= \Delta G / \Delta H$)

독일식 연료전지 AIP의 배치 모형



잠수함이 등장할 전망이지만 이는 이 글의 논의 범위를 벗어나므로 언급하지 않았다.

• 연료전지 AIP의 특징

현재까지 알려진 바에 의하면, 독일, 캐나다, 러시아 등 3개국이 잠수함용 연료전지를 개발 중이다.

각국의 연료전지는 아래 표에 정리한 바와 같이 전해질의 종류와 수소 저장방법이 서로 다르며, 액체산소를 탑재하는 공통점이 있다.

독일은 1988년에 구 U1 잠수함에 알칼리형 연료전지를 탑재하여 해상시험은 실시한 바 있으나 지금은 잠수함용으로 적절한 것으로 평가 받고 있는 양성자교환막형 연료전지를 개발하고 있다.

러시아는 우주선용으로 개발된 알칼리형 연료전지를 잠수함에 사용할 예정이며, 수소 저장방식도 서방기술에 비해 낙후된 것이다.

연료전지 AIP는 산소와 수소를 대량 탑재하므로 고도의 안전대책이 요구된다. 약간의 수소 누설로도 좁은 잠수함 내에서 연소 가능한 4% 이상으로 수소가 농축되기란 어렵지 않기 때문이다.

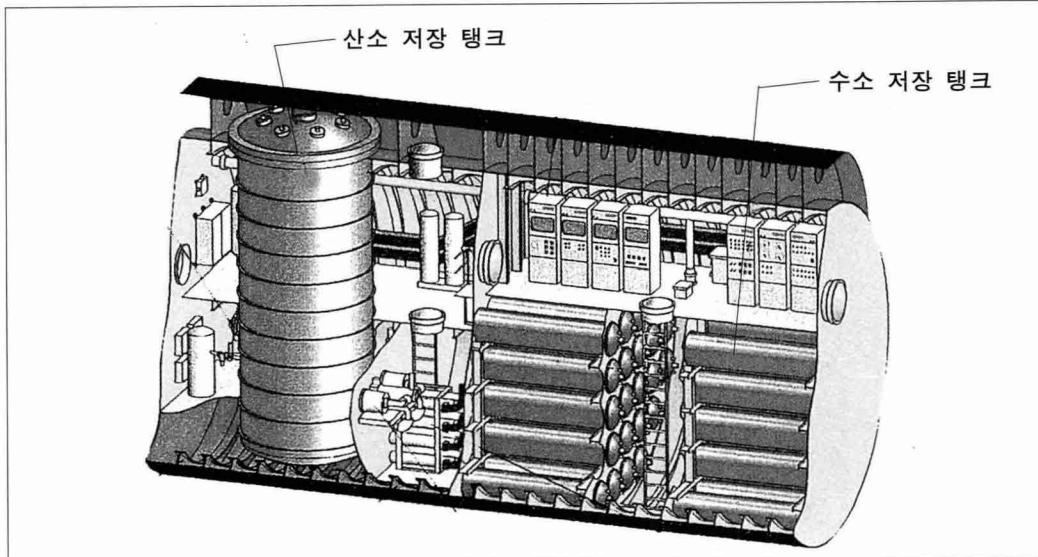
독일의 차세대 잠수함인 212 잠수함에서 수소 배관은 질소를 채운 이중배관을 쓰는 대책과 아울러, 지금까지 전 세계적으로 제안되어 있는 모든 AIP 탑재 잠수함과는 달리(수소 저장탱크 와) 산소 저장탱크를 압력선체 밖에 설치할 예정이다.

압력선체의 형상이 복잡해지는 어려움을 감수

잠수함용 연료전지의 종류

개발국	전해질 종류	수소 저장방식	산소 저장방식
독일	양성자교환막	티탄-철 수소저장합금	액체산소
캐나다	양성자교환막	메탄올	액체산소
러시아	알칼리	액체수소	액체산소

러시아식 연료전지 AIP의 배치도



하고서라도 산소 저장탱크를 압력선체 바깥에 설치하려는 의도는 안전성 향상에 있는 것으로 판단된다. 그런데 러시아는 산소 저장탱크를 액체수소 저장탱크와 함께 압력선체 내에 탑재하므로 러시아 고유의 특별한 안전대책이 필요할 것이다.

캐나다에서는 수소대신 메탄올을 탑재하여 연료전지 구동시에만 필요한 만큼 수소를 생산하여 사용하는 방안을 연구중이다. 이 방법은 저장 공간이 적으며 수소 저장에 따른 부담을 덜 수 있고 1ppm 이하의 농도로도 양성자교환 막의 성능에 치명적인 영향을 주는 황화합물의 개입을 효과적으로 막을 수 있다는 점에서 유리하다.

대신, 메탄올로부터 생성되는 이산화탄소를 잠수함 밖으로 배출하는 장치가 추가로 설치되며 연료전지 시스템의 효율이 수소탑재방식에 비해 15% 가량 떨어진 45% 정도로 감소한다는 점이 불리하다.

그리고 연료전지가 메탄올 저장방식이 아니

라 수소탑재방식인 경우에는 잠수함 기지에 수소 공급시설을 갖추어야 하며, 연료전지는 일반 산업용보다 높은 순도의 수소를 사용하므로 경우에 따라서는 별도의 정제시설이 필요할 수도 있다.

또한 잠수함 내의 수소저장으로 인해 AIP 탑재공간의 부피가 다른 AIP 장치에 비해 크므로, 잠수함의 배수량 증가에 따른 추진성능의 저하 현상은 수소탑재방식의 연료전지 AIP에서 상대적으로 더할 것이다.

운전 중 발생하는 소음문제는 최대한의 대책을 세우는 부분이며 비교적 소음이 큰 AIP 장치도 정숙운전을 기준으로 했을 때 군 요구조건을 만족하는 것으로 알려져 있다. 연료전지에도 모터, 펌프를 비롯한 소음원이 있으나 소음이 크지 않으므로 정숙운전에서의 소음문제는 쉽게 극복 가능할 것으로 생각된다.

연료전지 계통의 사소한 고장으로 인해 지구에서 40만 해리 떨어진 우주공간에서 아폴로 13호의 주동력이 상실되었던 것처럼, AIP 장치의

신뢰성은 잠수함의 가용성은 물론 생산성에도 영향을 미칠 수 있다.

잠수함용 연료전지 및 관련계통이 아직 개발 중이고 운용경험도 길지 않지만 독일 해군의 실선탑재 계획이 멀지 않았음을 미루어 볼 때 상당한 기술축적은 이루어졌을 것으로 여겨진다.

AIP 장치를 재래식 잠수함에 추가하면 이를 운용할 승조원과 정비사의 훈련이 필요하고 취득비, 운영비와 함께 유지보수비도 증가한다. 호주에서는 스텔링 엔진을 콜린스급 잠수함에 탑재할 계획이지만, 그 비용으로 신규잠수함을 구매하는 것이 더 낫다는 반론에 직면해 있다.

맺는 말

재래식 잠수함의 출현 초기에 여러 종류의 동력원이 경쟁을 거쳐 디젤엔진/배터리 방식이 적자로 살아 남았다. 재래식 잠수함의 잠항 능력을 향상시키기 위해 제안된 AIP 장치들도 끊임 없는 기술의 진보와 경쟁 그리고 실선 적용에 의한 견증을 거쳐 미래에는 어느 한 AIP 장치가 표준으로 자리잡게 될 것으로 추측된다.

지금 세계의 재래식 잠수함 시장은 AIP 장치들 간의 판매경쟁 속에 휘말려 있으며, 기선을 잡기 위한 치열한 홍보전으로 인해 성능과 관련된 진실이 흐려지는 경향마저 없지 않다.

시스템 자체의 소음수준이 낮을 것으로 기대되는 연료전지 AIP도 많은 홍보와 관심 속에서 실선용이 개발 중이다. 하지만 모든 AIP 장치들이 제각기 고유의 비효용성을 갖고 있는 것처럼 연료전지 역시 안전성 저하를 비롯한 여러 가지 부담을 추가한다는 점에 유의해야 할 것이다.

한편, AIP 장치의 출력이 작고 원자력 잠수함 보유국들이 자국용으로 AIP 장치를 채택할 계획이 없음을 감안할 때, 잠수함 동력원으로서의

원자력은 AIP 장치가 기술적으로 성숙한 미래에도 여전히 맹위를 떨칠 것으로 예상된다. ④

참고자료

- ▲ L.O. Williams, 「Hydrogen Power」, Pergamon Press, Oxford, 1980.
- ▲ C.D. Beachem Ed., 「Hydrogen Damage」, American Society for Metals, 1979.
- ▲ S. Kartha and P. Grimes, 「Fuel Cells : Energy Conversion for the Next Century」, Physics Today, p.54, Nov. 1994.
- ▲ R.A. Mams, P.R. Hayter and S.C. Moore, 「The Supply of Hydrogen for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Power Systems」, UDT Europe 98, London, 23-25 June 1998.
- ▲ Wolfgang Windolph, 「The Better AIP」, 〈Naval Forces〉, May 1998.
- ▲ L.C.L. Clarkin and D. Epp, 「The Development of a 40kWe Proton Exchange Membrane Fuel Cell Submarine Power Plant Demonstrator」, Canadian Navy and Ballard Power System, unpublished, 1996.
- ▲ Dale Grant, 「Canada Gets a Deal on Upholder Buy」, 〈Naval Forces〉, March 1998.
- ▲ Yuri Kormilitsin, 「Rubin Broadens its Horizons for International Cooperation」, 〈Military Parade〉, p.20, Sept. - Oct. 1998.
- ▲ Stuart Slade, 「Submarine Modernization」, 〈Naval Forces〉, May 1998.
- ▲ B. Bonnier et al., 「Low Signature Closed Cycle Diesel AIP System for Submarine」, UDT 97, Hamburg, 24-26 June 1997.
- ▲ Stan Zimmerman, 「Submarine Technology for the 21th Century」, Pasha Publications Inc., Arlington, 1990.
- ▲ Hindenburg호 관련 인터넷 주소 : <http://www.uoguelph.ca/~bmillen/>.
- ▲ Apollo 13호 관련 인터넷 주소 : <http://www.csr.utexas.edu/tsgc/archive/general/ethics/apollo.html>.