

기술보고

수소에너지 기술 개발 현황과 선박적용 동향

한원희* · 최정식** · 최재혁***

* 목포해양대학교 기관시스템공학부, ** 목포해양대학교 대학원, *** 한국해양대학교 기관시스템공학부

The Trends of Hydrogen Energy Technology Development and Application to Ship

Won-Hui Han* · Jung-sik Choi** · Jae-Hyuk Choi***

* Division of Marine Engineering System Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

** Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

*** Division of Marine System Engineering Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

요 약 : 수소에너지는 환경오염과 화석에너지 고갈에 따른 에너지 문제를 해결할 수 있는 유력한 대안으로 주목받고 있다. 수소에너지 시대 개막을 위한 준비는 아직 걸음마 단계이나 정부의 지속적이며 전폭적인 정책적·재정적 지원과 더불어 각 분야의 연구·기술개발 활성화 노력을 통해 조속한 시일 내에 실현될 것으로 예상된다. 세계 무역의 견인차 역할을 맡고 있는 선박에 수소에너지 기술을 도입하고 활용하기 위한 준비와 연구가 절실하다. 일각의 수소 연료전지선박에 관한 연구와 실증이 활발히 진행 중인 사실은 고무적이다. 이와 함께 보다 대형화되는 선박과 해상 특수한 환경 속에서 수소에너지를 직접 이용해 항행에 필요한 동력을 얻을 수 있는 수소엔진과 같은 다양한 방법에 관한 연구도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 수소에너지, 환경오염, 수소엔진, 연료전지, 선박적용

Abstract : Hydrogen energy begins to grab the attention as a leading alternative to solve environmental pollution and energy issue. The preparation for the hydrogen energy age is at the primary stage. But it is expected that the utilization of hydrogen energy is a feasible objective through government policy and invigoration of studies in relevant fields of industry. The preparation and research are badly in need to equip a ship with hydrogen energy engine. Some researches on ship with fuel cell are in progress, however, considering a ship that has become larger and it is being operated in special circumstances, the researches on ship with hydrogen energy engine is keenly necessary. And more concerns and supports are required in this regard.

Key Words : Hydrogen energy, Environmental pollution, Hydrogen engine, Fuel cell, Application to ship

1. 서 론

최근 화석에너지 고갈에 대한 위기감이 팽배한 가운데 전 세계적으로 대체 에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 인도네시아 발리에서 개최된 제13차 기후변화협약 당사국총회에서는 “발리 로드맵”을 채택하였고, 이에 따라 선진국은 교토의정서의 의무감축국에 상응하는 노력을, 개발도상국은 기술적·재정적 지원을 통해 온실가스 배출을 줄이도록 규제하고 있다. 2008년 일본에서 개최된 G8 확대정상회의에서도 2050년까지 온실가스 배출을 50% 감축하기로 선언한데 이어 한국 정부는 저탄소 녹색성장을 국가비전으로 제시한 바 있다. 이처럼 전 세계적으로 문제시되고 있는 GHG(Green House Gas)의 육상부문 배출규

제와 더불어 선박량 증가 등으로 인해 점차 늘고 있는 해운분야의 온실가스 배출 저감을 위해 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 국제해양오염방지협약(MARPOL 73/78) 부속서 VI, 대기오염방지협약 개정을 통해 상선(LNG선, 컨테이너선, 유조선 등)의 질소산화물을 현 수준 대비 80% 감축하고, 탄소세 부가를 의무화하는 등 선박기인 대기오염물질 배출을 적극 규제하고 있다(최 등, 2010).

탄소 중심 에너지기반의 붕괴 우려와 더불어 온실가스 배출 규제, 각종 환경문제 등 다양한 문제의 해결과 저탄소 녹색성장을 위한 대안으로서 수소에너지와 그 이용 기술에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다. 이에 본고에서는 국내외 수소에너지 기술개발 현황을 살펴보고 선박기인 대기오염물질 배출 감축과 운항 효율 제고를 위한 수소에너지 기술의 선박적용 동향을 짚어보고자 한다.

* 대표저자 : 종신회원, winhan@mmu.ac.kr, 061-240-7224

2. 수소에너지 기술개발 현황

2.1 수소에너지 개요

2.1.1 수소에너지

수소(水素, hydrogen)는 양성자 1개와 전자 1개로 이루어진 가장 간단한 원소이며, 우주의 90%를 구성할 정도로 흔한 원소이나, 순수 수소의 형태로 자연에서 단독으로 존재하지 않으며, 항상 산소나 탄소와 결합된 형태로만 발견된다.

수소는 공기 중의 산소와 결합하면서 1그램당 28,681칼로리의 열을 방출하며, 공기 중에서 연소 시 약 2,300도, 산소분위기에서 연소 시에는 약 3,000도까지 온도가 상승한다. 또한 수소의 자연발화온도는 585℃로 메탄(CH₄)이나 프로판(C₃H₈)보다 높다. 수소는 자연 상태에서 물 또는 석유처럼 항상 다른 원소와 결합된 형태로 존재하기 때문에 수소를 얻기 위해서는 에너지를 투입하여 순수 수소형태로 전환해야 하는 특징이 있으며, 이는 전기에너지와 같은 에너지 담체(Energy carrier) 또는 2차 에너지로 이해하는 것이 일반적이다. 다만 전기에너지와 다른 점은 비교적 대량 저장이 용이하다는 것이다(김, 2005).

2.1.2 수소에너지 기술

수소에너지 기술은 물, 유기물, 화석연료 등 화합물 형태로 존재하는 수소를 분리하고, 생산하여 이용하는 기술을 총칭한다. 수소는 물을 전기분해하여 가장 쉽게 제조할 수 있으나 생산한 수소에너지의 경제성이 낮아 대체전원 또는 촉매를 이용한 제조기술연구가 진행 중이며, 경제성과 안전성을 고려한 다양한 저장과 수송방법에 대한 연구가 활발하다.

Fig. 1은 수소 생산에 필요한 원료와 동력원, 생산된 수소를 저장하는 방법 및 이용 등 개략적인 수소에너지 시스템을 나타낸 것이다.

Table 1은 수소의 제조(생산), 저장 및 이용기술에 대한 기술별 개발내용을 정리한 것이다.

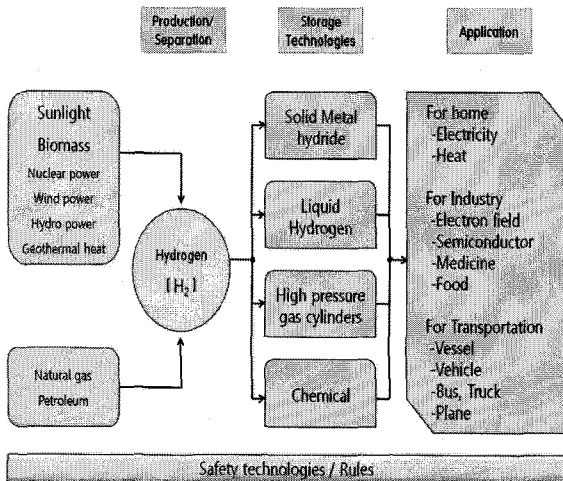


Fig. 1. Hydrogen energy system.

Table 1. 수소에너지 기술별 기술개발 내용

대분류	중분류	기술개발 내용
제조 (생산)	물로부터 수소 제조 (세계적으로 연구단계임)	· 전기분해(SPE, 태양광, 풍력 등 대체전원이용 등) · 저온열분해(산화물, 유황화합물, 염화물, 요드화물 등) · 바이오(광합성 직·간접, 혐기발효, 광합성 발효 등) · 광촉매(금속산화물, 페롭스카이트, 제올라이트 등)
	화석연료 이용 수소제조	· 수증기개질(상용화 되어 있음) · 고온열분해(이른정립, 촉매, 반응기) → 미국 개발단계 · 플라즈마 개질(반응기, 플랜트 건설) → 미국 상용화
	수소정제	· 고순도 수소 제조(PSA, MH이용 등) → 선진국 기술확립
저장	물리적 저장	· 기체저장(상용화 되어 있음) · 액체저장(저장용기, 극저온 연구 등) → 독일 상용화 · 고체저장(재료, 고용량저장, 무게 등) → 일부 상용화 · CNT(재료, 합성, 공정기술 등) → 선진국 개발단계
	화학적 저장	· CO ₂ 이용 메탄올, 에탄올 합성(상용화 되어 있음)
이용	이용	· 가정(전기, 열), 산업(반도체, 전자, 철강 등), 수송(자동차, 배, 비행기) → 수소의 제조, 저장기술이 확립 되지 않아 실용화된 사례가 없음
	안전대책	· 역화방지 등 연구사례 없음

2.2 수소에너지의 국내·외 기술개발 동향

2.2.1 국내 기술개발 동향

수소에 관한 국내 연구는 1970년대 말 관련 기초연구를 시작하였고, 1989년 과학기술처의 지원으로 한국에너지기술연구소(2001년 1월 한국에너지기술연구원으로 개칭)가 연구 총괄을 맡아 수소에너지와 관련한 기초연구를 대학 및 연구소와 함께 수행하였으나, 1단계 연구지원을 끝으로 마감되었다. 이후 1989년까지 수소의 제조기술·저장기술 및 안전대책기술 관련 9개의 특정 연구과제가 수행되었다. 한편 1988년 시작된 대체에너지기술개발 사업으로 1992년부터는 수소에너지 분야의 연구개발 지원이 시작되었지만, 대부분이 대학에서 수행된 기초연구 수준으로 진행되었다(김 등, 2001).

2000년 10월부터 5년간 과기부 지원 아래 수소제조에 대한 장기적 원천기술 확보를 목표로 고효율 수소제조기술개발을 시작한 이후 이를 1단계로 조기 종료하고, 2003년 9월부터 프론티어 사업으로 확대개편, 10년간 연 100억 규모의 수소에너지 제조·저장·이용(연료전지 제외) 기술 전반에 대한 기술개발 프로그램을 진행 중이다.

지식경제부(舊, 산업자원부)는 2003년 12월 수소 연료전지 사업단을 구성하고, 수소연료전지 분야의 기술 개발 상용화를 목표로 하였으나, 2008년 한국에너지자원기술기획평가원 설립으로 중단, 해체되고 사업단이 맡았던 역할은 한국에너지기술평가원과 에너지관리공단으로 분산 이양되었다.

2003년부터 본격적인 정부 주도의 기술개발 및 실용화 사업을 추진 중인 우리나라는 2020년까지 연료전지자동차 5만여대, 수소 스테이션 600여기 보급을 목표로 하고 있으나, 기술개발 선진국에 비해 원천기술 및 기술 자립도가 매우 부족하고 수소 안전에 대한 연구가 취약한 상황이다.

현재 국내의 기술현황은 제조부문에서 천연가스로부터 수소

제조 기술 일부 확보 및 탄화수소 촉매반응에 의한 연속적 수소제조(성균관대학교), 천연가스로부터 대량수소제조·저장기술을 개발(한국가스공사) 중이며, 수소저장 부문은 실험실 규모의 액체저장법(-253℃) 및 수소저장합금을 이용한 수소저장법과 탄소나노튜브를 이용한 수소저장(전남대) 기술을 개발 중이다. 천연가스와 LPG를 이용한 수소스테이션 건설 및 실증연구가 한국가스공사를 중심으로 진행 중이며, 국내 수소 생산 및 수송·저장·이용설비의 안전성과 신뢰성 연구를 위해 한국표준과학연구원에 수소안전 연구동을 건립, 운영하고 있다.

Table 2는 국내 수소에너지개발 지원 사업의 주요내용을 정리한 것이다.

2.2.2 해외 기술개발 동향

(1) 미국의 연구현황

1990년 마츠나가 수소연구 개발 법안을 통과시켜 5년 계획의 수소에너지 시대를 대비한 요소기술 개발과 1996년 통과된 미래수소법안(1996~2001, 총1.65억불을 수소의 생산·저장·이용 등에 관한 연구와 실증 사업에 투자)을 통해 중장기적인 수소에너지 프로그램을 진행 중이며, 2025년에는 장기목표로 전체에너지 공급량의 10%를 태양 등 재생 가능한 에너지로 부터 제조된 수소를 공급하도록 설정하고 있다. 2040년경에는 미국의 1일 석유수입량(1,100만배럴) 수준을 수소·연료전지가 대체할 것으로 추산하고, 수소인프라(Hydrogen Fuel Initiative)와 연료전지자동차 연구파트너십(Freedom CAR)에 2008년 이후 5년간 17억불을 투자할 예정이다.

수소 저장분야에서 미국은 자동차 기업 위주로 수소저장용기 연구가 진행 중이며 특히, DOE(U.S Department of Energy) 주도로 수소연료전지 및 연료전지 자동차용 수소저장장치가 개발 중이며, 350bar급 고압 기체수소 저장용기는 개발이 완료되어 실증확립 단계로 경량화 및 원가절감 연구가 이루어지고 있다. 또한 700bar급 압력용기 개발 및 실증 기술에 대한 연구와 경량화 및 고압 액화를 통한 수소저장밀도 향상방안에 대한 연구도 활발한 상황이며, Lincoln Composites는 all-composite 탱크(type4)로 ISO 15869 기준을 충족하면서 700bar에 견디는 저장용기를 개발하였다.

수소 이용분야에서는 캘리포니아 Fuel Cell Partnership 등 수소 스테이션 개발관련 프로젝트가 진행 중이다.

안전 분야에서는 2003년 발표한 Hydrogen Fuel Initiative에서 5년간 12억불의 연구개발 투자계획을 확정하고 수소 안전 관련, 수소 교육 훈련 분야, 안전 패널 및 안전 센서 기술 개발 등 다양한 연구를 수행하였다.

(2) 일본의 연구현황

최근 신에너지 개발을 적극적으로 추진한 일본은 세계적으로 편재해 있는 재생 가능한 에너지를 이용, 물로부터 수소를 제조하고 이것을 수송 가능한 매체로 전환해 다소비 지역에 공급하는 등 효율적 에너지 이용을 목적으로 1992년 통상산업성에 의해 수소이용 국제 클린에너지 시스템기술(World Energy

Table 2. 국내 수소에너지개발 지원 사업

주관 부처	주요 내용	관련 사업	사업기간 (연구비)
교육 과학 기술부	· 고효율수소제조기술개발사업 (국책과제, 3년으로 종료 됨) · 열화학적, 생물학적, 광촉매를 이용한 수소 제조 과제 수행(3개)	-	2000~2003 (총 30억)
	· 고효율 수소에너지제조·저장·이용·기술개발 · 태양광을 이용한 수소제조기술 개발 보급 · 새로운 수소저장 기술 및 신소재 개발 등	21세기 프론티어 사업(단)	2003~2013 (연 100억 수준, 9.5년)
	· 차세대 고온가스료(VHTR, Very High Temperature Reactor) 개발 · 수소생산 기술 실증완료 등	원자력 수소생산 기술개발.	2004~2021 (총9,861억, 18년간)
지식 경제부 (舊, 산업자원부)	· 대체에너지개발 및 이용, 보급촉진법(1987제정, 2002 개정)		
	· 관련 14개 과제 종료	-	1992~2002 (총 64.59억)
	· 수소연료전지분야 기술개발	수소 연료전지 사업단	2004~2008

Network, WE-NET)이 제안되었다. 1993년부터 2020년까지 28년간 I, II, III기로 구분하여 총 24억불을 투자하여 연구개발을 실시할 계획으로 I기(1993~1998)에는 조사연구, 기초연구 및 요소기술 연구를 통해 대규모 수소 제조 기술, 수소 수송 및 저장 방법, 수소 이용 기술에 관한 기초기술을 확립하는 목표였다. II기(1999~2002)에는 중·단기 실용화를 목표로 하는 수소 자동차 시스템, 수소 공급 스테이션, 자동차용 수소 저장 재료, 고체 고분자형 연료전지 및 수소 디젤엔진 개발을 포함하여, 연구를 진행하였다. 수소의 안전성과 관련되는 데이터의 획득과 안전기술의 확립 등 수소용 기기들의 국산화 및 수소의 제조·저장·수송 등과 관계되는 기술개발에 착수 하는 등 2003년부터 2007년까지 5년간에 걸쳐 국가적 지원 아래 수소에너지 분야에 대한 활발한 연구가 수행되었다.

1991년부터 1999년까지 NEDO(New Energy and Industrial Development Organization)와 RITE(Research Institute of Innovative Technology for the Earth) 주관 하에 환경 조화형 수소제조기술 1단계 사업에 24억엔을 투입하였다.

수소 저장분야에서는 도요타, 닛산 자동차를 비롯 미국의 다임러-크라이슬러, 포드 자동차, 한국의 현대 자동차, 프랑스의 푸조-시트랭과 각국의 연료탱크 부품 제조사 등 20여개 회사 합작으로 700bar급 수소저장 기술 공동 개발에 합의하였다.

수소 이용분야에서는 연료전지차량 운행 및 나프타, 가솔린 등 다양한 방식의 연료 개질 사용을 통한 수소 스테이션 개발 프로젝트가 진행 중이며, 2003년 연료전지 자동차 시판 및 6개소의 수소 스테이션을 시범 설치 운영 중이다.

2010년까지 연료전지자동차 5만대, 가정용/건물용 연료전지 210만kW 공급을, 2025년에는 3백만대 보급과 1,000만kW 공급을 목표로 설정하고 있다.

안전 분야에서는 안전 확보를 위한 법규개발 및 수송용 연료전지의 안전연구로 차량관련기기, 수소 인프라, 고정식 연료전지의 안전 연구 등이 진행 중이다.

(3) 유럽의 연구현황

300개 이상의 정부 및 참여기업 협의체를 통해 European Hydrogen & FC Technology Platform(HEP)를 구축, 2050년까지 비전을 설정하고 있다. 또한 CUTE(Clean Urban Transport for Europe)는 18.5억 유로가 투자되는 연료전지 버스 운영을 위한 프로그램으로 런던, 마드리드, 암스테르담, 함부르크 등 9개 도시에서 30여대의 버스 운영을 위해 부생 수소 이용방식, 천연가스 및 메탄올 수증기 개질방식, 풍력·태양광·지열 등 대체에너지를 활용한 물-전기분해 방식 등 다양한 형태의 수소 공급 스테이션을 시도 중이며, 실증 시험에 있는 대표적인 연구 프로젝트이다.

독일의 경우 German Hydrogen Energy Project를 통해 정부의 수소 및 연료전지 관련 기술개발에 지속적으로 투자를 늘리고 있으며, Hysolar 프로젝트에 약 85백만DM, 뮌헨 공항 수소화 프로젝트에 30백만DM을 투자하고 있다. 또한 자동차 기업(벤츠社) 중심으로 수소에너지 자동차를 개발, 상용화하였으며, 수소엔진, 연료전지 시스템을 개발 중이다.

아이슬랜드는 2030년경 현재 35%에 달하는 화석연료 사용을 수소에너지로 완전히 대체하는 5단계 시나리오 완성을 목표로 연구 개발 중이며, 덴마크에서는 수소전차(電車)를 유럽 최초 상용화를 목표로 연구개발을 추진하고 있다.

유럽은 수소 안전 분야에서 EC(European Community) 및 국가별로 수소·연료전지에 대한 RCS(Regulations, Codes & Standards)관련 연구를 수행 중이며 CUTE/ECTOS 실증 프로그램을 통해 수소 충전소 및 자동차 관련 RCS를 보완하고 있다. 또한 가상 연료전지 발전소 프로그램을 토대로 연료전지 50대를 7개 EU국가에 설치 및 운전·안전개념·센서·시험방법·설치 기준 등에 대해서도 연구하고 있다.

Table 3은 수소 스테이션 개발과 관련된 주요 프로젝트를 미국, 일본 및 EU국으로 분류한 것이다.

Table 3. 수소 스테이션 개발 관련 주요 프로젝트

미국 SCAQMD 시험사업 ¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> · H2 Fuel Cell & Infrastructure 기술개발 사업 및 Freedom Car & Fuel 사업 연계 · 캘리포니아 Fuel Cell partnership · 승용차 및 버스 운행 지원 · 시카고, 미시간, 네바다주 등으로 확산
일본 JHFC 사업 ²⁾	<ul style="list-style-type: none"> · WE-NET(2002년 종료) dsurP, 도쿄 및 요코하마 지역 중심으로 총 10개 충전소 구축 · 연료전지 차량 34대 운행 · 나프타, 가스질린, LNG, LPG 등 다양한 방식의 연료개질 사용(6개소)
EU CUTE·ECTOS 사업 ³⁾	<ul style="list-style-type: none"> · Framework(FP5) 프로그램과 연계 · 유럽 주요 9개 도시, 버스 30대 운행 · 전기분해 4개소, NG(Natural Gas) 개질 3개소, 액화수소 2개소

1) SCAQMD; The South Coast Air Quality Management District(남부해안대기관리지구, LA Country·Orange Country·Riverside Country·San Bernardino Contry 등 4개 Country로 구성)로 대기오염이 심각한 미국 캘리포니아 남부해안지역을 대상으로 매 3년마다 대기질 변화와 전망 등을 반영해 대기관리계획을 수립하고 추진하여 대기환경 개선에 기여.

2) JHFC(Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project), 수소에너지 시

(4) 기타 국가의 연구현황

캐나다는 정부 주도로 Ballard(연료전지), Dynetek(수소저장 용기), Fuel Cell Tech (시험장비) 등 분야별 세계 최고기업 육성 및 수소하이웨이, 수소마을 건설 등 정부·기업 공동의 'h2EA 프로그램'을 통해 수소경제 조기 진입 추진을 목표로 하고 있다.

중국도 지난 2001년부터 2011년까지 '863프로젝트'로 중앙정부 수소기술개발사업을 추진, 자동차산업의 기술 경쟁력을 높이기 위해 연료전지 자동차 개발을 지원하고 있으며 한림원도 올해까지 1200만 달러를 투자해 수소기술 보유를 통한 국가경쟁력 제고를 추진 중이다.

러시아는 우주프로그램을 통해 수소기술 연구를 시작, 이미 활용하고 있는 국가로 액체 수소를 이용한 시험용 비행기 시험 등을 포함 우주항공과 관련한 수소엔진 개발을 활발히 전개 중이며, 2006년 6월 대통령의 수소에너지 기술개발과 보급 강조에 따라 적극적인 기술 개발 연구가 진행 중이다.

3. 수소에너지 기술의 선박적용 현황

3.1 수소 연료전지 개요

연료전지는 대부분의 경우 수소(연료극, Anode)와 산소(공기극, Cathode)의 화학반응에 의하여 연료(수소)가 갖고 있는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 발전장치(기술)로 원리상 열기관이 갖는 열역학적인 제한(Carnot 효율)을 받지 않으며, 화학반응을 통해 전기, 순수(純水) 및 열을 생성한다. 연료전지의 발전효율은 기존 발전장치보다 높은 30~40%, 열효율 40% 이상으로 총 70~95%의 높은 효율과 무공해, 무소음 등 환경문제를 야기하지 않고, 다양한 용량으로 제작 가능하며 전력 소비지내 설치가 용이해 송전 등으로 인한 손실을 줄일 수 있는 특징을 갖는다. 반면 연료전지의 높은 가격과 몇 년 후 관련 장비와 함께 교체해야 하는 짧은 수명은 개선해야 할 과제로 지적된다(조, 2009).

연료전지는 전해질의 종류에 따라 분류되며, Table 4는 이를 간단히 정리한 것이다.

3.2 수소 연료전지 선박의 연구개발 현황

3.2.1 연료전지선박

연료전지에서 생산된 전기로 추진모터를 구동해 추진력을 가지는 선박을 연료전지선박이라 한다. 연료전지를 채용한 선박은 높은 열효율로 연료비 절감과 배기가스의 획기적 감축 등 강화되는 환경규제에 대응이 용이하며, 발전기용 보조엔진이 불필요하므로 선박설계에도 유연성을 가질 수 있는 장점이 있다. 반면, 연료전지에 사용하는 고가의 전해질 막이나 백금 촉

구속과 보급을 목표로 다양한 수소연료전지자동차의 기초데이터와 환경영향, 연료효율, 안전성, 내구성, 효율성 등을 연구개발과 실증사업을 통해 확인하고 분석하는 프로젝트.

3) ECTOS(Ecological City Transport System, 아이슬랜드) 전체 에너지 소비의 60%, 전력의 99.9%가 수력과 지열에 의존하고 있는 아이슬랜드에서 사용하지 않는 풍부한 자연 에너지를 이용해 대규모 수소에너지 시스템을 실현하기 위한 수소 프로젝트로 1999년 발표.

매 사용에 따른 높은 가격 및 저렴한 수소의 대량 수급과 저장 이 어려운 점은 문제로 지적된다.

Table 4. 연료전지 종류별 개요

연료전지 종류	적용 대상	전해질 ⁴⁾	주연료	기술수준
인산형 [PAFC]	분산전원	인산 (H ₃ PO ₄)	천연가스, 메탄올	상용화 단계
알칼리형 [AFC]	특수목적	수산화칼륨 (액체)	수소	사용 중
고분자전해질형 [PEMFC] 직접메탄올 [DMFC]	소형전원 자동차	이온(H ⁺) 전도성 고분자 막	수소, 메탄올	개발 및 실증단계
용융탄산염형 [MCFC]	복합발전 열병합발전	용융탄산염 (Li ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃)	천연가스, 석탄가스	개발단계
고체산화물형 [SOFC]	복합발전 열병합발전	고체산화물 (Ytria-stabiliz ed zirconia)		개발단계

3.2.2 국내의 연료전지선박의 연구개발 현황

선박에서 배출되는 황산화물(SO_x), 질산화물(NO_x) 등의 유해 가스 및 이산화탄소(CO₂)와 같은 GHG(Greenhouse Gas)의 최소화과 더불어 효율 극대화를 통한 운항 비용 절감을 목적으로 선박용 연료전지 연구가 본격화되고 있다. 이미 유럽에서는 연료전지선박(Fuel Cell Ship)이 시험 운행되고 있는 가운데, 국내에서도 STX 중공업과 포스코 파워 등의 기업을 중심으로 연구개발이 진행되고 있으며, 학계와 관련 연구소 등에서도 연료전지선박 개발을 위한 연구회가 결성되는 등 많은 관심과 연구가 진행되고 있다(김과 김, 2008).

3.2.3 타당성 평가 연구 현황

(1) 해외현황

① FCShip 프로젝트(EU)

Fuel Cell technology for Ships, 2002년부터 2년간에 걸쳐 유럽연합(EU)의 노르웨이 선주협회를 중심으로 6개국 21개 파트너가 참여한 프로젝트로 선박용 연료전지 개발 로드맵 작성, 전기동력 발생용과 추진용 연료전지의 가능성 검토, 해상용 연료전지의 요구조건 및 안정성 등에 관한 기초연구와 연료전지선박 시스템의 가능성 및 개발방향 검토로 경제적·환경적 잠재력을 확인한 타당성 연구의 대표적 사례로 꼽힌다.

② 선박용 연료전지 연구(일본, 조선연구협회)

일본의 IHI, 가와사키 중공업, 미즈비시 중공업 등 대부분의 조선사가 참여한 해상 연료전지의 요구조건 도출에 관한 타당성 연구 사례로 LNG선, 페리선 등의 연료전지 적용 가능성을 검토하였다.

(2) 국내현황

한국선급(사)을 중심으로 기계연구원 및 국내 선박용 연료전

지 업계의 친환경 연료전지선박 연구회 결성 및 워크숍 개최 등을 통해 전문가들의 인적 네트워크 구성, 연구개발, 기술 구축 및 상용화에 초석을 마련하고자 하는 움직임이 있으나 아직 연구 및 개발 실적은 없는 형편이다.

3.2.4 국내의 연료전지선박 시스템의 개발 및 실증 연구 현황

(1) 해외현황

① ZEMShip(Zero Emission Ship) Project

유럽연합(EC)의 후원으로 2006년 11월 출범한 연료전지선박 계획의 성공으로 연료전지를 채택한 내륙 수상용 최초의 여객선이 독일 함부르크에 등장하였다. 채용된 연료전지는 선박용이 아닌 기존 연료전지 버스에 사용되던 모델을 차용하여 50kW 2기가 장착되었고, 50kW 연료전지 하나는 40개의 cell로 이루어진 6개의 Stack으로 구성되어 있으며, 선박 인증은 독일선급협회가 맡았다.

여객선에는 최대 100명까지 승선이 가능하며, 2008년 초부터 2010년 상반기까지 시험 운항을 통해 모니터링 및 각종 데이터를 수집한다.

② FellowShip Project

2003년 노르웨이 선급에 의해 시작되어, 1단계 프로젝트로 가능성 연구(2003~2005)가, 2단계 시연을 목표로 한 프로젝트가 완료되어 2009년 9월 329kW의 실선용 연료전지(MCFC)를 이더릭스(Eidesvik)사의 바이킹 레이디(Viking Lady)호에 설치하여, 항해 테스트와 여러 검사를 실시하고 있으며, 현재까지 상선에 설치된 최초이자 최대의 연료전지 기술로 평가되고 있다(Fig. 2).

FellowShip 프로젝트는 노르웨이 연구위원회, 이노베이션 노르웨이 및 독일의 연방 경제기술부의 지원으로 초기 웰리너스와 바르질라(Wallenius Marine and Wartsila Corporation) 그리고 DNV(Det Norske Veritas)를 비롯한 다수의 기업이 참여하였으며, 선박용 연료전지 개발은 MTU 사가, 선박디자인은 Wartsila Ship Design 社가 맡았고 선박에 설비된 전력망과 연료전지와의 전력 컨트롤 시스템 개발은 Wartsila Norway가 수행하였다. 또한 연료전지의 실선 설치작업에 관한 모든 안전문제는 DNV 책임 아래 이루어졌다(연료전지 설치를 위한 최초의 선급규정 개발).



Fig. 2. The vessel of Viking Lady.

③ METHAPU Project

유럽연합이 지원하는 METHAPU(Validation of a Renew

4) 전해질 : 물에 녹은 상태에서 이온(+, -)으로 쪼개져 전류가 흐르는 물질.(염화나트륨, 황산, 염산, 수산화나트륨, 수산화칼륨, 질산나트륨 등이 있음)

able Methanol-based Auxiliary Power System for Commercial Vessels, 이하 METHAPU) Project는 상업 선박에서의 메탄올 연료 이용 기술의 성숙도 평가, 메탄올을 이용하는 고체산화물 연료전지(SOFC) 기술의 해양 분야 적용 평가, 선박에서의 메탄올 사용을 위해 필요한 기술개발 및 선박연료로서의 메탄올 이용에 필요한 규제 도입 지원 등과 더불어 장·단기 환경 영향평가와 대형 고체산화물 연료전지 제품 및 메탄올 이용 기술 개발을 위한 연구 활동 지원을 전략적 목표로 한다.

④ SSFC Project 및 MARAD, WTA

미국의 대표적인 연구사례로 SSFC(Navy's Ship Service Fuel Cell) 프로젝트는 ONR(Office of Naval Research) 주관으로 美해군과 FCE社가 방위 산업과제로 수행중이며, 선박 추진 전력용 연료전지 시스템용 BOP(Balance of Plant)⁵⁾를 개발하고 있다. 또한 전투력 증강, 연료예산 절감 및 친환경적 동력발생 장치개발을 목적으로 MCFC를 선박의 주동력용으로 사용하기 위해 2.5MW급 시스템 실용화에 한창이다.

MARAD(US Maritime Administration)은 434TEU Feeder(진기·디젤 추진)선에 연료전지 적용을, WTA(Water Transit Authority)에서는 PEMFC의 고속페리 적용을 검토한 바가 있다.

⑤ NYK Super Eco Ship 2030 Project

일본 선사 NYK가 2030년까지 기존 화석연료 추진 선박에 비해 약 69%의 CO₂ 배출 저감효과를 가진 8,000 TEU급 연료전지 컨테이너선 개발 계획을 발표하였다.

NYK Super Eco Ship 2030의 설계에는 자회사 MTI, 이탈리아 선박 설계사 Garroni Progetti, 핀란드 해상기술 컨설턴트 Elomatic Marine이 참여한다.

⑥ 기타

이 밖에도 스위스의 소형여객선 및 레저보트용 연료전지 개발, 아이슬랜드의 어선 동력용 연료전지 추진선 개발, 네덜란드의 레저 보트용 60~70kW PEMFC 개발 프로젝트(Fuel Cell Boat Project), - CRTENA가 주관하는 - 이탈리아의 500kW MCFC 개발 프로젝트(MCWA P Project) 및 독일의 100~500 kW PEM/MCFC과 200kW 이하 PEM/SOFC 개발 프로젝트 등이 있다.

(2) 국내현황

2009년 STX 중공업이 2014년까지 1천억을 투자, 선박용 수소연료전지를 개발하기로 하였고, 포스코 파워는 4년간 총 500억원을 투자해 선박용 연료전지 시스템 개발을 추진할 계획으로 알려졌으며, 한편 지식경제부 주관으로 연안·항만·4대강 및 내수면을 운항하는 정원 250인급 쌍동선형 연료전지여객선 개발을 검토한 바가 있다.

3.3 수소엔진 기술 현황

3.3.1 수소엔진 개요

수소내연기관(이하 수소엔진)은 기존 내연기관에 연료로 수소를 사용하는 것으로 수소의 넓은 가연한계를 이용함으로써 초회박 연소가 가능하고 높은 효율을 가지며, 주변 기후환경에 상관없이 항상 기체 상태로 Warm-up이나 Cold Start에 대한 문제가 없다. 더불어 오염물질이 거의 배출되지 않는 친환경적 동력시스템으로 1920년대에 연소 및 성능에 대한 본격적인 실험이 시작된 이래 엔진형식, 제어방식, 운전조건 등 많은 기술 축적이 있었다.

수소엔진은 외부 혼합기 형성(External Mixture Formation) 방식과 내부 혼합기 형성(Internal Mixture Formation) 방식으로 대별되며 각각의 특징은 다음과 같다.

외부혼합기 형성 방식은 Air Suction Port에서 수소를 분사하여 실린더 내부로 혼합기를 보내는 방식으로 저압 분사라도 혼합기 형성에 문제가 없어 CNG 인젝터 사용이 가능하나, 수소의 낮은 밀도로 인해 혼합기 전체 부피의 30%를 수소가 차지함으로 가솔린엔진에 비해 낮은 출력을 낸다. 또한 흡기 밸브가 열려있는 동안 혼합기가 실린더 내부에 남아있는 고온의 배기가스 또는 실린더 내부의 열점(Hot Spot)에 의해 점화되는 역화(Backfire)와 조기점화(Pre-ignition) 등의 문제점이 있다.

내부 혼합기 형성 방식은 흡기 밸브가 닫힌 후 수소를 실린더 내부로 직접 분사하여 흡입된 공기와 혼합하여 역화와 조기점화의 문제를 해결했으며, 이론 공기연료비로 운전 시 직접분사식 가솔린 엔진보다 높은 출력을 가진다(배와 윤, 2006).

이론적으로 수소의 연소 후 생성물은 순수(純水, H₂O)이나 실제 연소 뒤에는 높은 연소 온도로 인해 다량의 질소산화물(NO_x)과 윤활유의 연소로 인한 CO, CO₂, HC가 배출된다. NO_x 발생은 공기연료비와 관계가 깊으며, 공기과잉률(λ) 증가를 통한 회박연소에서는 거의 Zero(0)에 가까운 값을 나타낸다. 또한 부하에 따라 변화하는 윤활유 연소에 따른 탄소화합물의 주류는 CO, CO₂(특히 CO₂)이나 이는 기존 석유연료 엔진의 배출량에 비해 미미한 양이다.

3.3.2 수소엔진 개발 현황

(1) 해외현황

① BMW (Bayerische Motoren Werke AG, 독일)

자동차 회사로는 세계 최초로 수소엔진을 개발하기 시작했으며, 1978년 수소엔진 차량연구를 시작하여 1979년 1세대 프로토타입 520i을 개발하였고, 745i Turbo(1984, 가솔린-수소 이중 연료 시스템, 역화방지용 워터 인젝터 장착), 735i(1988년), 725i(1995년)를 거치며 1996년 상용화가 가능한 4세대 개발을 완료하였다. 2000년 750hL을 거쳐 2004년에는 H2R을 내놓았고 2008년에는 이를 일부 변경한 Hydrogen 7을 출시했다.

② Ford (Ford Motor Company, 미국)

포드 자동차는 가솔린 하이브리드와 수소연료전지의 중간 단계로 가솔린엔진보다는 획기적인 친환경적 배기가스 배출 성

5) 연료전지 BOP(Balance of Plant)는 연료전지 코어인 스택(Stack, Electrode, Electrolyte, Bipolar Plate 등으로 구성) 이외에 열관리시스템(열 교환기), 물 관리 시스템(펌프, 콘덴서, 가습기), 공기 공급 장치(송풍기, 압축기, 필터), 유체제어기 등으로 구성.

능을 충족하고, 연료전지 자동차보다는 상대적으로 저비용의 기술로서 수소엔진을 연구하고 있으며, 2001년 발표한 P2000과 2003년 Focus왜건(Model U와 H2RV 장착), 2004년 F-350 그리고 2005년 E-450을 출시하였다.

포드사의 전문가들은 도시열효율이 최고 52%, 제동열효율 최고 37%, HC, CO는 거의 Zero이고 NO_x는 5~6ppm으로 후처리 장치 이용 시 거의 제로를 나타내며 현재 가솔린 엔진과 동일한 가격의 엔진을 최적화된 수소엔진으로 전망하고 있다.

③ Mazda (Mazda Motor Corporation, 일본)

1991년 첫 수소 로터리 엔진인 HR-X 프로토타입(Proto type)을 시작으로 1993년 MX-5 Miata의 실험 수소 버전을 개발하였고, 2003년 RX-8 Hydrogen RE를 발표하였으며, 이듬해 일반 도로상의 시험운전을 실시하였다.

로터리 엔진은 고온 부분의 연소실과 저온 부분의 공기 흡입실이 각기 분리되어 있어 역화 문제를 해결하고, 조기착화 등의 원인이 되는 배기가스 배출밸브가 없어 수소연료 적용이 용이한 엔진이다(Verhelst and Wallner, 2009).

Fig. 3은 Mazda Renesis Hydrogen Rotary Engine의 주요 구성부와 실제 사진을 나타낸 것이다.

(2) 국내현황

1970년대 오일쇼크, 환경오염 대책 등의 이유로 선진국을 위시한 세계 여러 나라의 수소엔진 연구·개발이 활발히 진행된 것에 비해 국내에서는 관련 연구가 미흡하였을 뿐만 아니라 수소엔진의 실용화에 대한 부정적 견해가 많았다. 그러나 1980년대 초 수소엔진 연구가 시작되었고, 1980년대 후반에는 직접분사식 수소엔진 연구를 시작하여 1993년 국내 최초의 수소엔진 장착 자동차를 제작하였다.

이외에도 수소엔진의 역화제어법, 이중분사식 수소엔진, 수소를 첨가한 CNG, LPG, 가솔린 및 디젤기관과 프리피스톤 수소엔진 등의 연구 수행으로 일부 분야에서는 상당한 연구 성과를 보이고 있다(이, 2006)

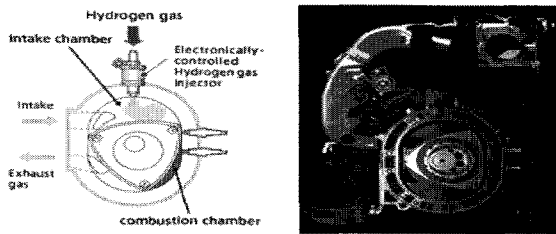


Fig. 3. Mazda Renesis Hydrogen Rotary Engine.

Table 5는 수소엔진 개발의 주요 문제점과 해결방안을 나타낸 것이다.

Table 5. 수소엔진 개발의 주요 문제점 및 해결방안

문제점	원인	해결방안
역화 및 조기착화	넓은가연한계, 빠른연소속도	· 역화방지 : 흡기관내 체류 혼합기 제어, VVT(소기), 회박 혼합기 사용, 물 분사 등 · 조기착화 방지 : 연소계 냉각
NOx 발생	급격한열방출에 의한 고온 연소	· 회박연소 · 배기 재순환 장치(EGR), 수증기 첨가 등 · NOx 촉매 이용
인젝터 내구성	수소연료의 윤활성 부족	· 전용 인젝터 개발 : 고체 밸브 윤활제 코팅 인젝터(BMW, Ford 社)
윤활유 회색	연소생성물의 윤활유 혼입	· Blowby 방지를 위한 공기/오일 분리장치 설치(Ford社)
수소 저장장치	MH 탱크 과중량	· 탄소섬유 보강 알루미늄 고압가스 탱크(Ford 社) · 고압 액화수소 탱크(BMW社)

① 직접분사식 수소엔진 연구

직접분사식 수소엔진은 흡기관 내에 수소와 공기의 혼합기가 없으므로 역화가 발생하지 않으며, 체적이 큰 가스 상태의 수소를 사용함으로써 나타나는 출력저하도 보상할 수 있다.

국내에서는 1987년 말부터 연구되기 시작해 1993년 국내최초의 수소자동차 '성균1호'와 '성균2호' 개발에 결정적 역할을 한 바 있다.

② 이중분사식 수소엔진 연구

1992년 경 처음 제시된 이중분사식 수소엔진은 직접분사식 수소엔진의 단점인 혼합기의 불균질성과 고압수소인젝터의 기밀성 저하에 의한 열효율 감소와 고부하 영역에서 역화 발생으로 출력이 낮아지는 흡기관 분사식의 단점을 제거하여, 역화가 없는 저부하 영역에서는 흡기관분사식으로 수소를 공급, 고부하 영역에서는 혼합을 향상을 위한 소량의 수소를 흡기관에 공급하고 나머지를 압축과정 중 실린더 내에 분사하는 방식이다.

이중분사식 수소기관의 열효율은 직접분사식에 비해 약 19% 가량, 토크는 흡기관 분사식에 비해 최대 60%까지 증가되는 결과를 보였고, 분사 천이영역에서의 토크도 큰 변동 없이 공급되는 연료의 증가량에 따라 선형적으로 상승하여 전 운전영역에서 안정된 운전능력이 확보되면서 고출력, 고효율 달성이 가능하였다.

③ 역화억제 및 흡기관 수소엔진 연구

수소엔진의 역화는 실린더 내부에서 발생하는 알 수 없는 점화원에 의해 정상적인 불꽃점화 전 흡입되는 혼합기를 조기착화시켜 화염이 흡기관내로 역류하는 현상으로, 점화원으로는 실린더내부의 열점(Hot Spot)과 Crevice Volume내의 혼합기가 지목되어 연구되었고, Crevice Volume의 혼합기가 팽창과정 중 실린더내로 역류하는 것은 피스톤스랩에 의해 피스톤링의 틈새가 생기는 것에 원인이 있는 것으로 파악하고, 피스톤스랩이 없는 프리피스톤 수소엔진의 연구가 고려되기 시작하였다.

한편, BMW사 등은 비교적 저가로 실용화 가능한 수소엔진 자동차 라는 인식아래 흡기관 수소엔진에 대해 상용화를 추진하고 있으며, 우리나라의 현대자동차도 2005년부터 흡기관분사

6) 어떤 구조물이나 장비에 대하여 형상이나 설계 적합성 또는 성능 등을 평가하기 위해 만든 실물 크기의 모형.

식 수소엔진 개발에 동참하고 있다.

④ 수소첨가 혼합연료 엔진 연구

기존 엔진에 사용되는 연료에 소량의 수소가스를 첨가하면 연소 및 배기 특성이 개선되고, 온실효과를 일으키는 CO₂ 배출 저감 효과를 높일 수 있다. 수소를 첨가하는 대표적인 연료로 천연가스를 들 수 있으며, 수소-천연가스 엔진은 부하에 따라 수소첨가량을 최적화(20~35%정도)하여 공급할 수 있는 장점과 CO, HC, NO_x 등의 배출가스가 규제치를 만족할 수 있는 것으로 파악되었다. 또한 LPG연료에 수소를 첨가하는 경우의 배기 성능과 열효율 등에 관한 연구수행 및 액체연료인 가솔린에 수소를 첨가한 경우의 연소촉진효과 등에 관해서도 검토되었다. 한편, 수소-디젤엔진에서 수소가 미립자물질배출과 NO_x 배출농도에 미치는 영향을 검토하여 미립자 물질을 최소로 배출하기 위한 수소 첨가율이 있음을 확인하였고, NO_x 배출량은 경유만 사용한 경우 보다 약 2배 증가하나 배기가스재순환방식(EGR)율이 30%인 경우 약 77%의 배출량 감소를 보이는 것으로 파악되어 EGR이 수소-디젤기관에서도 효과적임을 확인하였다.

⑤ 프리피스톤 수소엔진 및 기타 연구

프리피스톤엔진은 크랭크 기구가 없어 실린더 내부의 압력 에너지를 최대한 팽창 일로 변환시키고, 피스톤 관성력에 의한 압축중대와 각부의 마찰 손실 감소로 인하여 고효율 달성이 가능한 엔진으로 내연기관 개발 초기부터 개발된 기관이다.

이외에 수소연료용 프리피스톤엔진과 리니어발전기를 결합한 수소연소 리니어 발전시스템 및 수소-가스터빈 등에 관한 연구도 수행된 바 있다.

3.3.3 수소엔진 선박의 연구개발 현황

일본의 야마구치현(山口縣) 시모노세키시(下關市)의 수산대학교와 시내 선박회사 등으로 구성된 산학연계조직인 “수소엔진선박연구회”가 세계최초로 수소를 연료로 동력을 생성, 추진하는 선박의 수소엔진 개발을 추진하여 2004년부터 2년여의 연구로 10마력급의 선박 외부장착형과 20마력급의 선박 내부장착형 등 2종류의 수소엔진을 개발하여 공개실험을 실시한 바 있다. 이 실험에서 외부 장착형은 항행에 성공하였으나, 내부 장착형은 구조상의 문제로 항행에 실패하였다. 한편, 안타깝게도 국내의 수소엔진 선박의 논의, 연구 및 개발 성과는 전무한 실정이다.

4. 맺음말

수소에너지 시대 개막을 위한 준비는 아직 기초 단계이지만, 지속적인 수소에너지 기술개발과 더불어 정부의 정책적 지원, 그리고 각 분야의 연구 활성화를 통해 그 시기를 앞당길 수 있을 것으로 사료된다.

육·해상을 초월, 세계 물류 수송의 견인차 역할을 수행하는

해상무역의 증추인 선박에도 수소에너지 기술 도입에 관한 적극적인 논의와 함께 각종 오염물질 배출을 줄이고, 지구 온난화를 방지할 수 있는 준비와 연구가 절실히 필요하다. 참언하면, 수소에너지 기술의 선박적용 기술개발 방향은 기존 연료전지선박 연구·개발을 위시하여 초대형 선박이 필요로 하는 큰 동력을 충분히 제공할 수 있고, 기존 선박의 디젤엔진 시스템의 일부 변경을 통해 수소엔진으로 전환, 효율을 극대화할 수 있는 시스템 기술의 개발 및 도입을 염두해 두어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

[1] 김건, 김영규(2008), 연료전지선박의 개발필요성, pp. 1-29.
 [2] 김산해(2005), 정적연소기내에 직접분사된 수소의 분무 및 연소특성에 관한 실험적 연구, 국민대학교 석사학위논문, pp. 1-38.
 [3] 김종원, 심규성, 한상도(2001), 수소에너지 기술현황, 전력전자학회지, 제6권, 제2호, pp. 35-41.
 [4] 배충식, 윤현숙(2006), 세계의 수소엔진 기술, 한국자동차공학회, 오토저널 제28권, 제2호, pp. 44-52.
 [5] 이종태(2006), 국내 수소연소 엔진의 연구개발 역사 및 동향, 한국자동차공학회, 오토저널, 제28권, 제2호, pp. 14-25.
 [6] 조정경(2009), 연료전지 산업의 용도별 개발현황 및 향후전망, KDB 산은월보, 제647호, pp. 118-136.
 [7] 최정식, 최재혁, 한원희(2010), 수소에너지 기술개발 현황과 선박적용, 한국마린엔지니어링학회, 공동학술대회 논문집, pp. 391-392.
 [8] Verhelst, S. and T. Wallner(2009), Hydrogen-fueled internal combustion engines, Progress in Energy and Combustion 35, pp. 490-527.

원고접수일 : 2010년 06월 04일
 원고수정일 : 2010년 07월 16일 (1차)
 : 2010년 09월 17일 (2차)
 게재확정일 : 2010년 09월 24일