

## 수소용 엔진 현황과 전망

## Current Status and Prospect of Hydrogen Fueled Engines

김윤영, 이종태\*

성균관대학교 대학원, 성균관대학교 기계공학부\*

## 1. 서론

수소가스는 독특한 연소특성이 있어 내연기관에 사용하는 경우 열효율이 석유계연료를 사용하는 경우보다 상대적으로 증가하는 장점이 있다. 수소연료를 최초로 내연기관에 적용한 것은 1805년 Rivaz의 무압축기관까지 거슬러 올라간다. 또한 1820년 세계 최초로 자동운전에 성공한 Cecil의 기관도 수소연료를 사용하였으므로 내연기관의 원조는 수소연료용 엔진(이후 수소엔진이라 함)이라 할 수 있다. 그러나 저출력에 의해 실용화되지 못하고 내연기관의 개발은 석탄가스 및 석유계연료에 의존하였다. 항공기의 항속거리 증가를 위해 수소엔진개발이 한때 시도되었으나 역화발생에 의해 제약되었다. 그 후 배기저감 및 대체에너지의 입장에서 1970년경부터 재시도되어 다양한 방식의 수소엔진과 차량이 제시되었다. 실용화는 신뢰성, 저장방식 및 수소사용에 대한 불안감 등에 의해 지연되었지만 저공해자동차 생산 의무화를 기회로 BMW가 2000년 세계최초로 수소엔진이 탑재된 양산용 수소자동차를 공개하였다. 또한 배기성능 및 효율 향상을 도모하고 수소에 대한 불안감을 동시에 일식할 수 있는 수소-천연가스엔진과 발전기 및 기타 동력원의 수소엔진 개발 연구가 진행되고 있다. 최근에는 50%이상의 고효율을 달성할 수 있는 프리피스톤 수소기관과 리니어 발전기를 결합시킨 수소연소 리니어 발전시스템이 제시되어 수소엔진의 가능성이 재평가되고 있는 상황이다.

여기에서는 수소엔진에 관한 인식을 높이고자 수소연료를 기존엔진에 사용하는 경우의 적용성, 수소엔진의 종류 및 개발현황 등에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 내연기관 연료로서의 수소연료의 적용성

수소연료는 비등점이  $-253^{\circ}\text{C}$ 로 상온에서

항시 가스상태이므로 수소엔진도 LPG 및 CNG엔진과 같이 단순한 가스연료 전환엔진이라 생각하고 있다. 그러나 수소연료는 표 1과 같이 기존의 탄화수소계 연료와 아주 다른 연소특성이 있다. 이로 인해 내연기관에 사용시 그림. 1과 같은 장단점이 수반되며, 내연기관 연료로서의 적용성은 다음과 같다.

첫째, 수소연료의 넓은 가연한계, 적은 점화에너지 및 빠른 연소속도는 고부하 운전영역에서 수소엔진 개발에 가장 큰 관건인 조기착화 및 역화를 발생시킨다. 그러나 희박혼합기를 사용하는 저부하 운전영역에서 연소향상에 의한 열효율 증가에 기여한다. 둘째, 수소연료의 단위 질량당 발열량은 가솔린연료에 비하여 약 2.7배 정도 크지만 밀도가 가장 작은 가스상태로 엔진에 공급된다. 동일 실린더내에 수소-공기 예혼합기를 흡입시키는 경우 수소의 체적이 약 30% 정도가 되어 발열량은 오히려 약 15%정도 감소한다. 더욱이 역화발생 억제를 위해 희박혼합기를 사용하면 출력은 가솔린엔진에 비해 약 30-40%정도나 감소한다. 셋째, 수소연료의 자기착화온도는 디젤유보다 약  $240^{\circ}\text{C}$  정도 높아 압축착화를 어렵게 하지만

표 1. 수소와 이소옥탄의 특성비교 ( $0^{\circ}\text{C}$ , 1atm)

Property	Unit	Hydrogen	Iso-octane
Lower calorific value	(kJ/kg)	120110	44360
Stoichiometric air/fuel ratio	(mass)	34 : 1	15 : 1
Adiabatic flame temperature	(volume)	2.38 : 1	59.5 : 1
Spontaneous ignition temp.in air	$^{\circ}\text{C}$	2384	2270
	$^{\circ}\text{C}$	580	500 (340)
Minimum spark ignition energy	mJ	0.02	0.29
Flamability limit in air at $25^{\circ}\text{C}$	$\lambda$	10 - 0.14	1.4 - 0.26
	(vol. %)	4 - 75	1.2 - 6
Laminar burning velocity at $\lambda = 1$	m/s	1.70	0.58

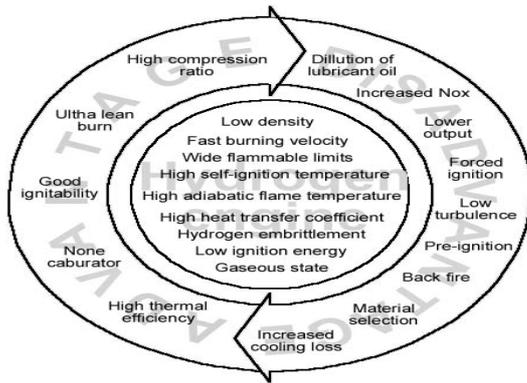


그림 1. 수소기관의 특성 및 장단점

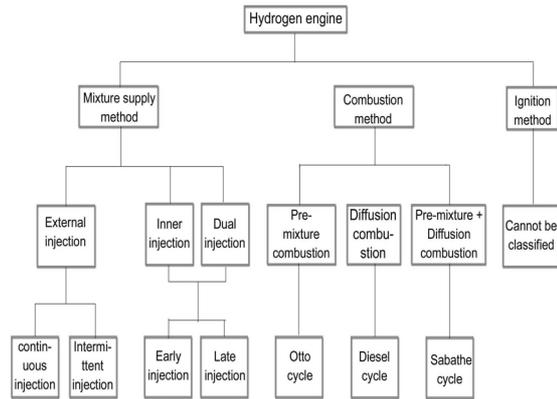


그림 2. 수소기관의 분류

고압축비화가 가능하여 효율 향상의 요인이 된다. 넷째, 수소연료의 높은 단열화염온도 및 큰 열전달계수는 엔진의 냉각손실 및 연소실 벽표면온도를 증가시키는 요인으로 연소실 각부의 열적 장해를 유발시킬 수 있다. 다섯째, 연소축진을 위해 통상 실린더내의 유동증가를 도모하나 수소연료는 연소속도가 빠르므로 오히려 역효과를 준다는 결과가 있다. 유동에 대해 상세한 검토가 요구되지만 연소실개발이 용이하다는 것을 의미한다. 여섯째, 수소-공기 혼합기의 연소생성물에는 탄소 및 유황 성분이 포함된 유해배출가스와 입자상 물질 등이 없다. 단지 수소의 단열화염온도가 석유계 연료보다 높으므로 NO<sub>x</sub>의 생성은 증가된다. NO<sub>x</sub>만의 저감은 비교적 용이하고 또한 저온 촉매가 가능하므로 거의 무공해에 가까운 배기수준이 가능하다.

### 3. 수소엔진의 분류

수소엔진은 기존엔진을 개조한 것이 일반적이다. 수소엔진화에 적합하지 않은 부분도 있지만, 수소연료의 적응성이 비교적 우수하여 큰 무리가 없는 것으로 볼 수 있다. 개발된 수소엔진은 그림 2와 같이 연료공급 방식에 따라 흡기관내 분사방식, 실린더내 분사방식과 두 방식을 병행한 이중분사방식으로 구분된다. 연소방식으로는 예혼합연소인 otto cycle, 확산연소인 diesel cycle과 예혼합연소와 확산연소를 병행하는 dual cycle 수소엔진으로 구분할 수 있다. 수소는 자기착화온도가 높아 압축착화하기 어려우므로 점화방식에 따라 구분하기 어렵다.

흡기관내 분사방식은 기존의 흡기관내로

공급되는 연료공급관만을 수소용으로 개조하면 되므로 개발된 수소엔진의 상당부가 채택하고 있다. 이 방식은 예혼합기 공급방식이므로 초회박연소가 가능하고 흡기 스톨링이 없으므로 부분부하 시에 고효율이 얻어진다. 단지 흡기관 분사방식에는 항시 역화의 가능성이 상존한다. 역화를 회박혼합기의 사용으로 억제하는 경우 현저한 출력의 감소가 수반된다. 흡기관내에 체류하는 가연혼합기를 줄여 역화를 억제하고자 연속분사방식의 수소공급관을 가능한 흡입밸브 근방에 삽입하거나, 흡입과정 중에만 간헐적으로 수소가스를 분사하는 방식이 채택되고 있다. 간헐분사방식은 수소가스가 흡기관내에 잔류하는 양은 줄지만 역화방지에 효과적이 아님이 밝혀졌다. 실린더내 분사방식은 디젤기관과 마찬가지로 흡입과정 중에 공기만을 흡입시키고 압축행정중 수소가스를 실린더내에 직접 분사하는 방식이다. 수소가스가 흡기관내에 없으므로 역화는 근본적으로 발생되지 않는다. 또한 실린더내에 분사되는 수소가스의 체적만큼 흡입 공기량이 증가하므로 저출력의 문제도 동시에 해결된다. 실린더내 분사방식은 수소가스의 분사시기에 따라 압축초기 및 압축후기방식으로 나눌 수 있다. 압축초기 실린더내 분사방식은 압축행정 전반기에 수소가스를 직접 분사하므로 비교적 저압의 수소연료를 사용할 수 있다. 역화는 발생하지 않으나 압축행정동안 가연혼합기가 실린더내에 존재하는 예혼합연소이므로 조기착화의 가능성이 상존한다. 압축후기 분사방식은 압축행정 후반에 고압의 수소가스를 분사하는 방식으로 디젤기관과 같은 확산연소를

한다. 연료분사시간을 조절하여 연소속도를 제어할 수 있는 유일한 방식이다. 실린더내 후기분사방식은 역화뿐만 아니라 조기착화도 없으며, 고압축비가 가능하고 출력향상도 도모할 수 있다. 단, 기밀성 및 내구성이 확립된 고압수소분사밸브, 점화장치와 고압수소연료 공급시스템의 개발이 선구되어야 한다. 이중분사식 수소엔진은 저부하 운전 영역에서 흡기관내 분사식으로 고열효율을, 고부하 운전영역에서 실린더내 분사방식으로 역화 억제 및 고출력을 도모하여 모든 운전 영역에서 고효율 및 고출력을 달성하고자 저자들이 제시한 수소기관이다. 이 기관은 실린더내 직접분사의 분사시기에 따라 압축초기 및 압축후기방식으로 분류할 수 있다. 수소가스의 분사시기의 차이에 따른 기관의 장단점은 상기에 논한 바와 같다.

연소방식에 의해 분류하면 흡기관내 분사방식 및 압축초기 실린더내 분사방식은 예혼합연소이므로 otto cycle에 해당된다. 압축후기 실린더내 분사방식은 확산연소이므로 diesel cycle이다. 압축초기 이중분사방식은 연소초기에 수소-공기 가연 예혼합기가 형성되므로 otto cycle 수소기관이다. 압축후기 이중분사방식은 예혼합기 착화와 분사된 연료의 확산연소가 수반되므로 dual cycle 수소엔진으로 분류된다.

4. 수소엔진의 개발 동향

가. 국외의 수소엔진 연구

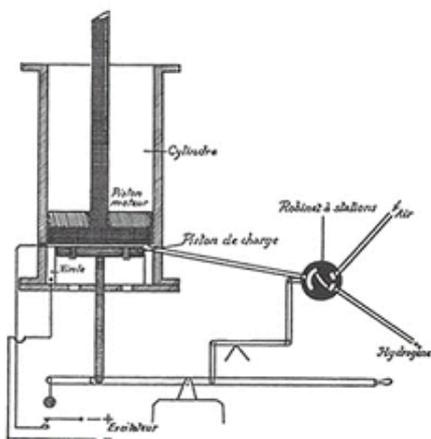


그림 3 Isaac de Rivaz의 엔진(1805)

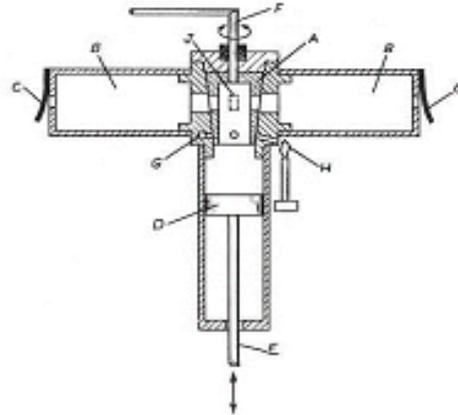


그림 4 William Cecil의 수소기관(1820)

내연기관에 수소연료를 최초로 사용한 것은 그림3과 같이 1805년 스위스의 Rivaz가 Papin의 화약기관에 연료로서 수소(추후 메탄가스)를 사용한 가스진공기관이다. 피스톤은 연소압력에 의해 자유로이 상승되는 프리 피스톤방식이며, 실린더내의 압력이 강하하는데 따른 진공압과 피스톤의 자중으로 동력을 발생한다. 밸브 및 점화장치의 작동이 수동식이므로 자동운전을 하는 내연기관이라 할 수 없다. 세계최초로 자동운전에 성공한 내연기관 역시 수소연료를 사용하였으며, 그림 4에 Cecil의 수소기관을 나타낸다. 기본원리는 상기 엔진과 동일하나 수소-공기 예혼합기를 도입하고 이를 화염점화하는 통로를 개폐하는 콕 밸브가 설치되어 있다. 콕 밸브는 피스톤의 축과 링크기구로 연동되어 자동적으로 회전한다. 이 기관은 간신히 무부하 연속운전이 가능하였을 뿐 동력을 얻지 못하였다. 원인은 불명확하나 수소연료의 큰 비체적과 역화억제를 위해 희박혼합기를 사용하는데 의한 것으로 생각된다. 이후 역화가 발생되기 어려운 석탄가스 등으로 내연기관이 개발되었다.

한때 수소연료가 갖는 고발열량을 이용하여 항공기의 항속거리를 증가시키고자 항공용 수소엔진의 개발을 시도한 적이 있지만 실패한 이후 간헐인 연구가 진행되었을 뿐이다. 수소엔진 연구에 다시 관심이 주어진 것은 1970년대 초 유해배기가스 저감과 석유계 연료의 대체를 위해서이다. 각국에서 개발된 수소엔진의 실례는 다음과 같다.

일본에서는 1970년 무사시 공업대학에서

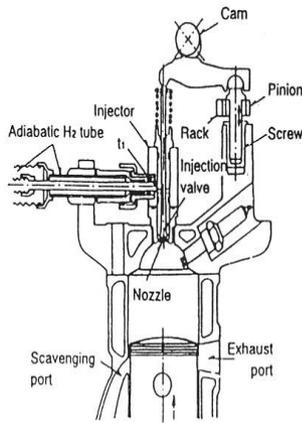


그림 5 캠구동식직접분사시스템(Musashi대학)

흡기관내 연속분사방식의 자동차용 수소엔진을 제작한 것이 최초이다. 개조사항은 기존기관에 장착되어 있는 기화기를 제거하고 수소공급파이프를 흡기관내에 삽입한 것이다. 고부하 운전영역에서는 역화가 심하게 발생되어 엔진이 멈추는 경우가 종종 있었다고 한다. 그림. 5는 무사시 3호에 탑재된 수소엔진을 나타낸다. 2사이클 기관이며 실린더내 초기분사방식이다. 수소분사밸브는 캠에 의해 작동되며, 수소분사량은 로커암 지지점의 나사를 랙크와 피니온으로 회전시

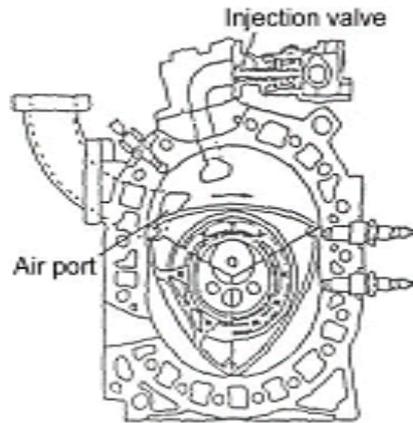


그림 7 로터리형 수소기관 (Mazda)

켜 조절한다. 실린더내 분사방식이므로 역화는 발생하지 않으나 조기착화가 발생한다. 조기착화의 발생은 실린더내에 있는 가연혼합기가 모종의 착화원에 의해 착화되는데 기인하므로 디젤기관과 같이 실린더내에 수소가스를 분사함과 동시에 점화시키면 억제가능하다.

그림 6은 상기 목적에 맞추어 개발된 수소엔진이다. 수소연료는 유압구동식 고압분사밸브를 사용하여 압축과정의 상사점 근방에서 8MPa의 고압으로 실린더내에 분사된다. 점화장치는 고온으로 가열된 열면에 수소를 분사하여 점화한다. 열면점화방식은 소모전력이 크며 내구성이 저하되므로 압축후기 직접분사식 수소엔진에서도 분사시기와 점화시기의 매칭을 통해 스파크 점화방식을 시도한 바 있다. 일본기계연구소에서는 4valve 가솔린기관의 배기밸브 1개를 수소분사밸브로 개조한 실린더내 초기분사방식의 수소엔진을 개발하였다. 분사밸브의 흡입면적이 크므로 0.4MPa의 저압수소가스를 단기간 내에 흡입할 수 있는 특징이 있다. 그림 7은 Mazda에서 개발한 로터리 수소엔진의 개략이다. 로터리엔진은 밸브가 없고 각 과정이 수행되는 위치가 바뀌어 연소실 온도가 비교적 저온이므로 왕복형 피스톤기관보다 연소실내에 열점이 생성되기 어려워 역화의 방지에 유리하다. 또한 큰 구조 변경없이 기존 기관과 유사한 출력을 얻을 수 있어 수소엔진으로의 적응성이 우수하다. 수소연료 공급방식은 흡기관 및 실린더내 초기분사방식이 검토되었다

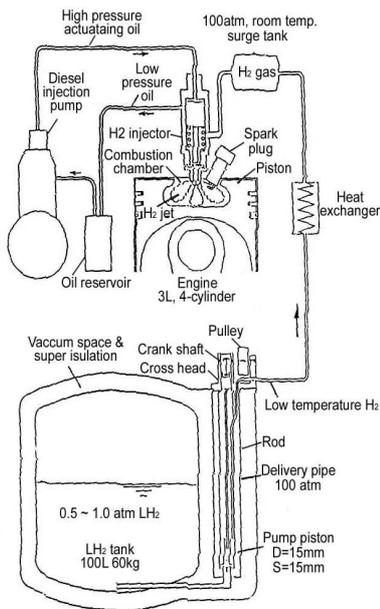


그림 6 압축후기 직접분사식 수소엔진 시스템 (Musashi대학)

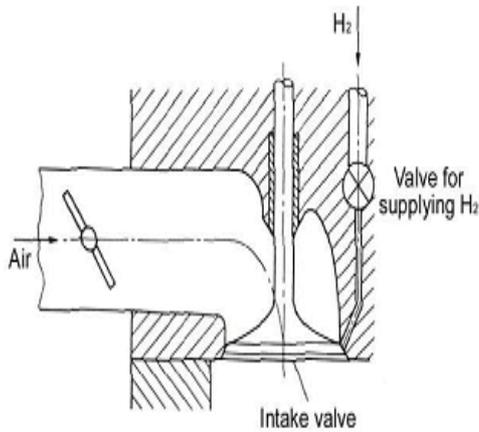


그림 8 흡기밸브 시트부의 간헐 수소 공급방식 (Miami 대학)

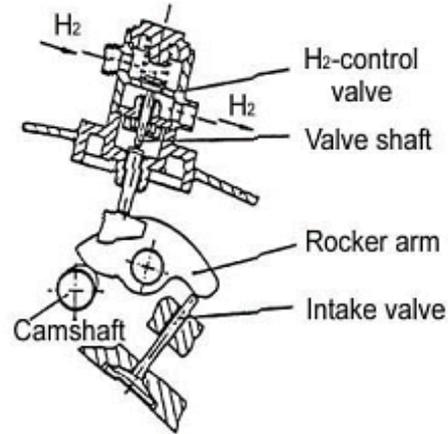


그림 10 수소분사밸브 구동용 로커암장치 (BMW)

미국에서는 1971년 Perris Smogless자동차협회에 의해 수소엔진이 제작된 것으로 보고되었다. 세계최초로 액체수소를 사용하였으며, Ford픽업에 탑재하여 주행하였다. 1973년에는 Billings Energy Corporation에 의해 흡기관내 분사방식이며, 역화방지를 위해 물분사를 하는 수소기관을 개발하였다. LASL(Los Alamos Scientific Lab)에서도 가스믹서를 사용하여 흡기관내에 수소가스를 공급하고 역화방지법으로 배기가스 재순환(EGR)방식을 채택한 수소엔진을 개발하였다. 1974년에 UCLA에서 개발한 수소엔진은 2개의 가스믹서를 사용하였다. 한개는 연료-공기 당량비  $\Psi=0.45$ 정도의 희박혼합기를 분사하며, 다른 하나로 수소량을 제어하였다. 희박수소공기혼합기를 사용에 따

른 저출력 보상을 위하여 LASL과 DFVLR(Deutsche Forschungs und Versuchsanstalt Für Luft und Raumfahrt)가 공동으로 제작한 3.9ℓ 6기통의 수소엔진에는 터보과급기를 부착하였다. 역화방지로서는 물분사를 사용하였다. Miami대학에서는 그림. 8과 같이 흡입밸브 시트부에 수소공급관을 설치하여 흡입밸브가 열리는 동안만 간헐적으로 수소가스를 공급하는 방법을 제시한 바 있다.

유럽에서는 Ahen대학이 그림 9와 같이 흡입밸브 근방에 공기를 공급하여 역화억제하는 연구를 하였다. Mercedes-Benz는 1975년 압축초기 실린더내 분사식 수소엔진을 개발하였고, 1982년에는 흡기관 분사식 수소엔진이 탑재된 MH(Metal Hydrid) 수

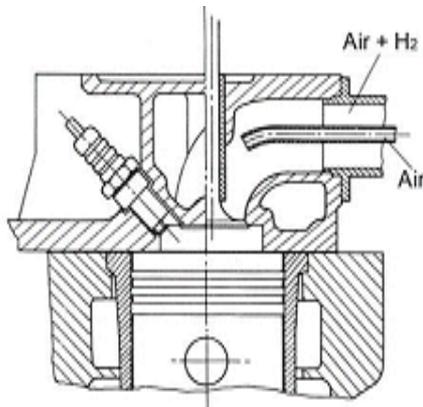


그림 9 흡입밸브 근방의 공기첨가 수소기관 (Ahen)

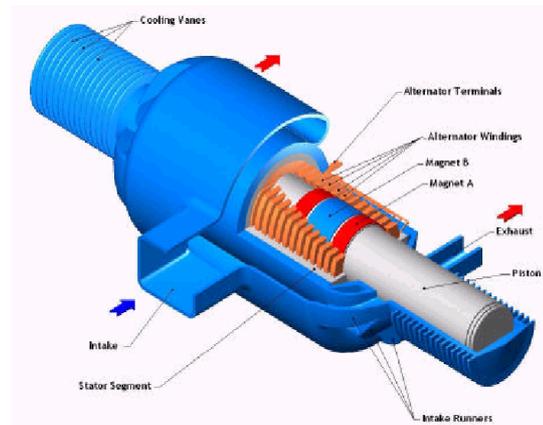


그림 11 프리피스톤 수소연소 리니어 발전시스템 (DOE)

소자동차를 개발하였다. BMW는 1978년부터 수소엔진연구를 시작하여 각 실린더에 연속적으로 수소가스를 분사하는 2ℓ 4기통의 흡기관분사식 수소엔진을 개발하였다. 그림 10은 BMW가 개발한 수소연료분사장치의 일레이다. 수소분사밸브는 로커암의 움직임에 의해 개폐되며, 각 기통의 흡기관내에 간헐적으로 분사된다. 기관은 3.4ℓ, 6기통이며, 과급기가 부착되어 있다.

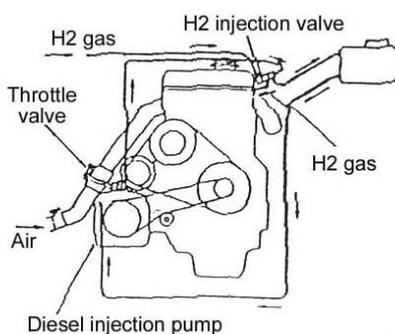
상기와 같이 수소엔진의 연구는 1970년경부터 시작되어 1990년경까지 선진각국에서 관심이 집중되었다. 그러나 수소엔진의 역화발생 억제에 어려움, 분사밸브의 신뢰성과 연료전지의 관심 및 수소연료공급에 대한 인프라 미비로 관련 연구는 답보상태였다.

수소엔진개발의 장점은 기존기술을 최대한 이용 가능하고 저비용으로 거의 무공해에 가까운 동력장치를 만들 수 있다는 것이다. 이러한 관념으로 BMW가 지속적인 연구를 하여 1999년 세계최초의 양산개념의 자동차용 수소엔진을 개발하였다. 그리고 2000년 5월 11일 세계최초로 양산용 수소자동차 BMW 750hl 15대를 베를린에서 공개하여 수소엔진에 대한 관심을 다시 집중시켰다. 수소연료는 액체수소를 사용하였고 가솔린도 사용할 수 있도록 되어 있다. 독일의 MAN B&W Diesel AG에서는 1999년 선박용 액체수소 디젤기관을 개발한 결과 현재의 선박용기관을 고효율 및 환경친화적으로 대체할 수 있음을 밝혔다.

미국 DOE는 최근 고효율 수소엔진의 기술적 및 경제적 가능성을 재평가하고 대규모적인 기술개발 사업을 진행 중이다. 특히 수소예혼합 압축착화 연소기술, 프리피스톤 및 리니어 발전기를 결합시킨 그림 11과 같은 수소연소 리니어 발전시스템의 경우 도시열효율 56%까지 향상시킬 수 있음을 밝혔다. 또한 DOE를 비롯한 세계각국에서는 수소와 천연가스 혼합연료를 사용하여 희박 운전영역 확장, 효율 향상 및 배기성능 개선을 이룰수 있는 수소-천연가스 중대형 동력시스템 기술개발 사업을 진행 중이다. 미국은 Sunline의 대륙횡단 수소-천연가스 충전소를 설치하고 2대의 시험버스를 운전하고 있으며 추가적으로 34대 정도의 시험차량을 운행할 계획으로 수소-천연가스엔진을 개발하고 있다.

#### 나. 국내의 수소엔진 연구

수소엔진이 첨단기술이며 실용화 가능성이 높지 않다는 인식아래 일부 문헌연구 및 수치해석을 제외하고 거의 연구가 이루어지지 않은 상황이었다. 단지 1987년 성균관대학에서 역화를 억제하고 안정된 연소가 가능한 실린더내 직접분사식 수소엔진을 국내 최초로 완성하였다. 기관성능특성에 관한 기초연구 등으로부터 수소엔진의 특성은 가솔린엔진과 정성적으로 유사한 점이 많으나 정량적으로 상당히 다르다는 것을 밝힌 바 있다. 그리고 직분식 고압분사밸브에 관심을 두어 기밀성과 신뢰성이 향상된 다양한



(a)



(b)

그림 12 직분식 수소 엔진개략과 성균 2호의 실물사진

불 밸브형 고압수소분사밸브를 개발하였다. 1993년에는 그림 12(a)와 같이 자동차용 직접분사식 수소엔진을 개발하고 고압가스 연료공급시스템과 차량 시스템화하여 수소자동차 “성균 1호”를 국내 최초로 주행 가능하였다. 곧 이어 그림 12(b)과 같은 수소자동차 “성균 2호”를 제작하여 93 EXPO에 전시함으로써 국내에서도 수소자동차를 개발할 수 있는 가능성을 보였다. 수소엔진에 대한 관심이 높아지자 G-7 차세대자동차 기술개발사업으로 수소자동차개발이 수행되었고, 1994년 현대자동차에서 액센트엔진을 베이스로 압축초기 저압분사 수소엔진을 개발하였다. 1997년에는 동일 방식의 수소엔진과 MH 수소저장 시스템을 티뷰론에 탑재한 수소자동차를 발표하였다. 1999년 성균관대학교에서는 모든 운전조건하에서 고효율 및 고성능을 달성할 수 있는 이중분사식 수소기관을 개발하였다. 2002년에는 대체에너지 기술개발사업의 일환으로 수소-천연가스를 이용한 중대형 동력시스템 이용기술개발에 관한 기초기술 및 요소기술 확립 연구를 NGV Tec이 주관하고 있다. 수소-천연가스 중대형 엔진의 연료공급 제어장치 및 시작 엔진의 개발과 기초 연소특성을 해석하는 단계이다. 2003년부터는 수소프론티어 사업의 일환으로 연료전지에 수준의 열효율 달성이 가능한 수소연소 리니어 발전 시스템개발에 관한 연구를 효성의 주관아래 진행 중에 있다

##### 5. 수소엔진의 전망 및 맺음말

현재 내연기관에서 유해배기가스가 발생되는 것이 환경적인 측면에서 단점으로 부각되고 있다. 수소엔진도 연소한다는 측면에서 기존의 내연기관과 동일하게 취급하는 경향이 있다. 그러나 주지의 사실과 마찬가지로 배기가스에는 탄소 및 황성분 및 입자상의 물질은 전혀 배출되지 않는다. 유일하게 생성되는 NOx는 거의 무공해수준으로 저감시킬 수 있는 기술이 확보된 상황이다. 내연기관은 다른 어떤 동력시스템에 비하여 비출력이 크며 열효율도 비교적 높다. 열효율은 임의 고정된 운전조건하에서 비교적 높아 선박용엔진의 경우는 거의 50% 수준에 접근하고 있다.

이러한 관점으로 보면 수소엔진은 운전조

건이 급격히 변화하는 자동차용 기관보다 부하 및 정속운전을 하는 발전기 등의 동력 시스템으로서 개발 가능성이 높다. 특히 수소연소 프리피스톤 동력시스템은 연료전지 수준의 고효율을 달성할 수 있는 수소엔진이다. 프리피스톤 수소기관은 기존의 왕복형 내연기관과 달리 왕복운동을 회전운동으로 변환하는 크랭크기구가 없어 기계손실이 적다. 또한 피스톤운동이 제약을 받지 않아 팽창과정이 길며 예혼합 압축착화가 가능하며 50%이상의 고효율을 달성할 수 있는 것으로 평가되고 있다. 최근 개발되고 있는 리니어 발전기와 매칭한다면 분산전원 및 하이브리드자동차의 동력시스템으로서의 적용성이 무한하므로 개발 가능성이 큰 기술이다.

한편 수소에너지이용에 대한 인식은 아직 안전성의 측면에서 부정적이다. 수소이용기술을 대중화시키기 위해서는 무엇보다 수소에너지에 대한 불안감 등과 같이 사회적으로 부정적인 인식을 불식시켜야 된다. 수소-천연가스 혼합연료 동력시스템은 수소가스와 천연가스를 동시에 사용하므로 본격적인 수소에너지 시대의 도래에 앞선 기술적 완충단계로서의 과도기적 수소에너지 이용기술로 수소에너지에 대한 불안감을 불식시키는 동시에 수소의 사용을 점진적으로 증가시키는 기술 개발로 볼 수 있다.

수소엔진은 기존의 내연기관과 달리 수소연료에 적합한 기술이 확립되어야 하고 또한 역화발생억제를 위해 해결해야 할 점이 많다. 그러나 내연기관 개발시 축적된 많은 기술의 활용이 가능하다. 또한 수소연료전지와 같이 현재 개발되고 있는 수소이용기술 중 가장 저비용으로 단기내에 실용화시킬 수 있는 기술로 평가되고 있다.

미래는 수소에너지 시대가 되리는 전망하에 국내에서도 수소 이용기술 확립에 관한 연구가 활성화되고 있는 상황이나 에너지효율, 기술축적과 비용면에서 가장 단기내에 실용화 가능성이 크며, 거의 무공해에 가까운 수소엔진의 개발에도 관심을 기울이는 것이 바람직한 것으로 생각된다.