

수소이용 열기관의 기술 개발

최준섭

한국기계연구소 부설 한국해사기술연구소

1. 서 언

수소는 전 우주의 원자중 90%로서, 자원의 지역적 평등성과 양의 무진장성, 그리고 연소시 물로 되는 무공해인점과 산화물로부터 다시 분리, 재생될 수 있어, 자연계의 순환원리에 바탕을 둔 에너지로서, 공해문제가 심각한 현재 근본적으로 환경문제를 치유할 수 있는 강력한 연료원으로 대두되고 있다.

특히 석유파동 이후, 연소가스가 깨끗하고 무제한으로 존재하는 수자원으로부터 만들어지는 수소는, 석유대체에너지의 후보로 주목되어, 그 제조에서부터 이용까지의 기술개발이 진행되어 왔다. 그러나 급일에 있어서, 석유사정은 완화되고 있지만, 석유는 유한이며, 최근의 산성비나 지구의 온실화 등의 환경오염의 진행을 생각해 보면, 수소이용의 기반기술을 확립하여 나가는 것이 점점 중요하다.

그 기술개발의 일환인 수소이용 열기관의 연구는, 수소를 연료로서 이용하는 왕복동형엔진, 가스 터빈, 스크램제트(Scramjet)엔진, 그리고 수소를 작동가스로서 이용하는 스테링엔진에 이르기까지 광범위한 동력원에 대하여 행하여지고 있다.

본문에서는 수소연료의 물리적 화학적 성질 및 연료의 특성에 따른 열기관의 구조와 작동원리를 기술하겠으며, 나아가 몇가지의 연구개발의 실례를, 외국의 것을 인용하여 제시하고, 이상의 것을 종합하여 수소자동차의 문제점과 장래의 전망에 관해 기술하겠다.

2. 수소의 성질

수소를 이용하는 엔진에서는 그 가스의 성질 및 그 연료로서의 연소특성이 엔진성능에 큰 영향을 미친다. 여기에서 그 특성에 관해서 요약해 두겠

다.

수소가스의 물리적 성질과 열화학 및 연소특성을 각각 공기와 석유연료를 대표하는 이소옥탄과 비교한 결과를 표1, 2에 나타낸다.

표1. 수소가스의 물리적 성질(0°C, 1atm)

* 1kg/cm³

기 체	수 소	건조한 공기
분자량	2.016	28.964
비중량 g/lit.	0.08987	1.2931
가스정수 kg.m/kg.°C	420.55	29.27
공기에 대한 비중	0.0695	1
*정압비열 kcal/kg.°C	3.403	0.240
*정압몰비열 kcal/kmol.°C	6.84	6.95
*정적비열 kcal/kg.°C	2.417	0.171
*정적몰비열 kcal/kmol.°C	4.85	4.96
*비열비	1.409	1.402
점성계수 kg.sec/m ²	0.8566X10 ⁻⁶	1.7580X10 ⁻⁶
등점성계수 cm ² /s	0.935	0.133
*열전도율 kcal/m.h.°C	0.151	0.0208
*온도전도율 m ² /h	0.511	0.0963
*Prandtl수	0.684	0.71
확산계수 cm ² /s	0.611	0.178
	(공기중)	
	0.550	(산소의 공기중에의 확산)
		(CO ₂ 중)
음속 m/s	1260	331
액체중에의 용해성	근소	
고체중에의 용해성	Pd, Pt, Ni, Ti, Fe 등에서는 흡장이 큼	

으로 분사를 가능하게 할 것인가가 문제였다. 고압 분사법에서는, 분사장치의외도 고압가스를 어떻게 발생시킬 수 있는가가 문제였다. 그러나 최근에는 이 문제도 해결되고 있다.

그림 1은 Hama등이 개발한 저압분사방식의 실린더 헤드부를 표시한다. 본 엔진은 배기량 2 lit., 4사이클 불꽃점화방식으로 각 기통은 흡기밸브 2개, 배기밸브 1개 및 수소가스흡입용 밸브 1개로 구성된다. 수소가스밸브는 수소가스를 직접 분사하기 위하여, 수소밸브경을 31mm로 크게 하고, 밸브양정을 1mm, 밸브의 열림기간을 92°C로 작게함으로, 4기압에 있어서도 필요수소량을 실린더내에 분사가 가능하다.

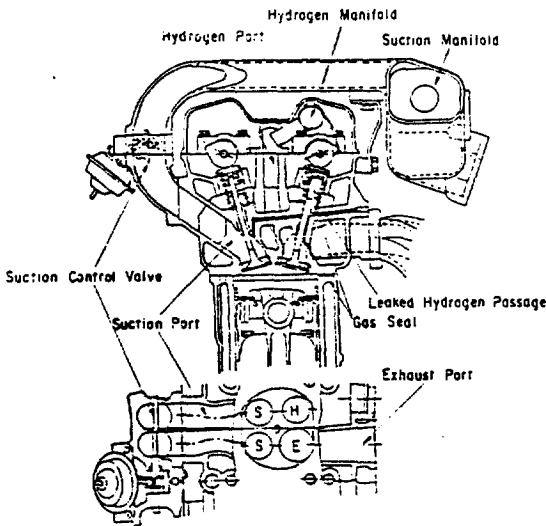


Fig. 1. Outline Diagram of Experimental Cylinder head.

이와 같이 엔진본체의 연구에서, 종래형의 엔진을 수소형으로 개조하는 지침이 얻어져 구체적인 개조도 기술적으로 가능하다는 것이 실증되었다. 그러나 수소를 연료로서 이용하는 엔진에 있어서의 재료상의 문제점은, 엔진의 실제가동 시간이 짧기 때문에, 현재에서는 지적되지 않고 있다.

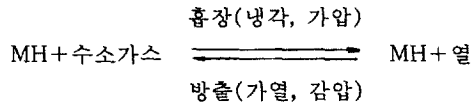
3. 2 연료 탱크

수소를 연료로 이용하는 경우에, 연료탱크는 중요한 과제이다. 수소의 저장형태에는, 고압가스, 극저온(-253°C)의 액화수소(LH₂) 및 금속수소화합물

(Metal Hydride, MH로 약함)이 있다. 고압가스와 극저온의 액화수소는, 물리적으로 압축 또는 액화하여 고압상태나 극저온상태에서 저장하는 방법이다. MH저장방법은, 수소를 흡장하는 특수금속의 다음과 같은 가역반응을 이용하여, 수소의 흡장 및 방출을 행한다.

표3. 엔진 기본제원

형 식	4사이클 불꽃점화기관
배 열	직 렬
기 통 수	4기통
내경 × 행정	88.5 × 80mm
배 기 량	1968cm ³
연소실형상	Pent Roof
밸브구동기구	DOHC
흡배기방식	Cross flow
밸브수	16 4(흡2, 배1, 수1)/기통
수소공급방식	기계구동실린더내분사법



위의 3가지의 저장성능을 자동차용 탱크를 예로 하여서 비교한 결과를 표4에 표시한다.

고압가스의 저장은, 보통의 고압용기에서는 부피나 중량으로도 저장밀도가 낮다. 액체수소에서 저장은 부피나 중량적으로도 저장밀도가 높지만, 극저온을 필요로 하며, 용기주변으로부터의 열전달로 인해서, 액체수소가 증발하기 때문에 장시간저장이 어렵다는 결점이 있다. 액체수송의 저장은 금후의 극저온기술과 고성능의 단열재 개발에 많은 기대를 걸고 있다. MH로서의 저장은 특별한 고압용기나 저압용기는 필요없고, 대형의 충전설비도 필요하지 않으므로, 저장탱크는 크던 작던 문제가 안된다. 또한 상온, 상압 근처에 있어서 장시간의 저장이 가능하고, 체적당의 저장밀도는 기체수소와 같으나, 중량당의 저장밀도가 작다.

이와 같은 저장법중에서, 액체수소 및 MH방식의 연료탱크에 대해서 개발이 진행되고 있다. 액체

최 준 섭

표4. 200km주행에 필요한 연료탱크의 비교
(가솔린연비 10km/lit. 상당기준)

저장 형태		밀도 kg/lit.	연료			총 중량 kg	저장밀도 wt %
			중량 kg	중량비율 wt %	용적 lit		
150기압 고압가스		0.0135	5.52	100	409	476	1.16
액체 수소		0.0715	5.52	100	77	61	9.0
MH	LaNi ₅	6.59	403	1.37	61	673	0.82
	TiFe	5.47	303	1.82	55	494	1.12
	Mg ₂ Ni	2.56	154	3.59	60	297	1.86

수소용 탱크에 대하여서는, 그 저장 성능을 높이기 위하여 저온용기의 개량이 진행되고 있다. 그림 2는 미국의 UCLA가 사용한 LH₂ 탱크를 나타낸다. 이것은 구형(球型)으로서, 내용적이 190 lit., 7.5cm 간격의 2중벽 사이를 진공으로 하여 열의 이동을 막아, 1일의 증발은 실용시 3.3%이다. 또 알루미늄 합금제이기 때문에 가볍고, LH₂의 최대무게가 59kg으로서, 가솔린엔진의 경우와 거의 같은 무게이다. 또, 수소의 최대압력은 2기압으로서, 이 탱크를 포함한 연료계통은 그림 3과 같다. 탱크내에 12Watt의 작은 전기히터를 넣었다. 이 열로서 LH₂를 증발시켜, 이것을 엔진냉각수(80°C정도)를 써서 열교환기로서 상온까지 가열하여 엔진에 흡입한다. 압력이 작동 중 높아졌을 때는, 안전밸브가 열리어

방출한다. 또 차고에 들어가 있는 동안에는, LH₂가 증발하여 고압으로 되어 수소가스를 차내에 방출할 때, 환기가 나쁘고 점화원이 있으면 발화의 위험이 있기 때문에, 산화촉매를 통과하여 저온 그대로 공중의 산소와 화합하여 수증기로서 내보낸다.

최근에는 서독의 항공우주연구소(DFVLR)에서는, 2중벽의 진공단열용기의 내부용기의 지지(支持)에 강화플라스틱을 사용한 자동차용 탱크(용적 130 lit., 탱크총중량 70kg, 증발 손실 1.7%/1일)을 개발하였다.

MH를 이용한 연료탱크의 구조의 한 예를 그림 4에 표시한다. MH탱크는, 흡장금속[예를 들면 Lanthanum-rich nickel합금:(LR)Ni_{5.0} Al 0.1], 수소가스, 용기, 열교환기재, 필터 등으로 구성된다. 이

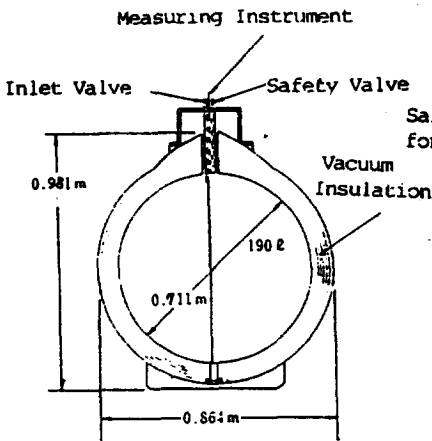


Fig. 2. LH₂ Tank of UCLA.

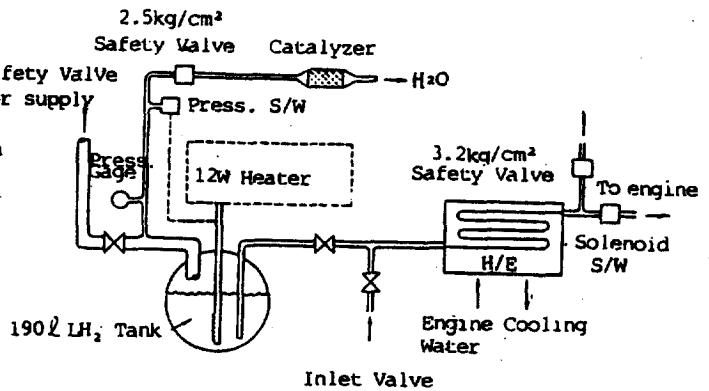


Fig. 3. Outline Diagram of LH₂ Fueled System.

수소는 기체로서 가장 가볍고, 확산계수, 열전도율 및 동점성계수는 공기와 비교해서 매우 크다. 따라서 연료로서 이용하는 경우, 수소는 체적이 크고, 새기가 쉽고, 누설되더라도 쌓이지 않고 확산하기 쉽다. 한편, 작동가스로서 이용하는 경우, 누설 되기는 쉽지만, 전열성능이 좋고, 관로저항이 적어 흐르기 쉽다.

에서는, 수소는 단위 중량당의 발열량은 2.7배 크지만, 단위체적당 발열량은 역으로 1/20로 적다. 수소와 공기의 이혼혼합기중에서 수소의 체적비율은 약 30%를 점하기 때문에, 혼합기 단위 체적당의 발열량은 이소옥탄에 비해 약 15% 적게 되고, 통상의 용적형 엔진에서는 출력상 불리한 요인으로 된다.

표2. 연료의 연소 및 열화학적 특성

연료명	수소	이소옥탄
분자량	2.016	114.22
비중 15°C/15°C	0.06952	0.696
비등점 °C	-252.8	99.2
저위발열량 체적기준 kcal/m ³	2580	54045
중량기준 kcal/kg	28670	10599
이혼혼합비 Vol.%	29.5	1.65
가연한계 Vol.% 하한계	4.0	1.1
상한계	75.0	6.0
최저 자발화온도 °C	571	447
인화 온도 °C	-	-13
연소속도 cm/s 최대치	310	38
혼합비	43.0	1.93
Vol.%		
단열화염온도 °C	2130	1960
점화에너지 mJ최소치	0.019	0.28
이혼혼합비	0.020	0.29
이혼혼합기 1lit.당 발열량 kcal/lit.(가스)	0.763	0.900
이혼혼합기에 있어서 연소전후의 체적변화	14.8%감	5.8%증
소염(消炎)거리 cm	0.057	0.18
최소치 이혼혼합비	0.057	0.20

수소가스를 공기와 혼합하여 연소시키면, 석유연료보다 가연범위가 상당히 넓고 연소속도가 약 8배 빠르고, 점화에 필요한 에너지는 약 1/15이며, 화염이 전파될 수 없는 소염거리는 약 1/3이다. 이런 점에서 수소는 점화하기 쉽고, 타서 확산하기 쉬운 특징이 있다. 그러나 수소는 스스로 착화하는 온도(자발화온도)는 겨구로 높고, 디젤 등의 압축착화엔진에는 부적합한 일면이 있다. 열화학 특성

이상의 비교에서, 수소가스 성질이나 연소특성도 공기나 석유연료와는 아주 다른 성질을 갖고 있기 때문에, 이들의 특성을 살린 이용방법을 검토할 필요가 있다.

3. 수소가스의 엔진

3.1 엔진 본체

내연기관에 수소를 사용한 것은 19세기 전반에 시작되었으며, 2차대전중에는 포워된 레닌그라드에서 연료문제를 해결하기 위해서 가솔린 대신 수소를 사용할 수 있도록 엔진이 개조되었다. 그 후 수소엔진은 대체연료나 배기가스문제가 크게 문제시되었던 70년대 후반에 많이 행하여 졌다.

카뷰레타 방식의 불꽃점화의 가솔린 엔진을 수소가스를 써서 운전하는 경우, 저부하운전시에는 상당히 회박한 혼합기에서도 운전이 가능하고, 열효율도 높고, 유일의 유해 배기물인 NO_x도 무시할 정도의 이점이 있지만, 부하를 높여가면 역화 등의 이상연소를 일으켜서 운전이 불가능하게 된다.

이 역화를 방지하고, 비출력을 향상시키는 방법으로서, 흡입행정에서 공기만을 흡입하고, 압축행정 중에 실린더내에 직접 수소를 분사하는 방법이 연구되었다. 이 실린더내의 분사법에는, 압축최고압력보다 낮은 압력에서 압축행정전반에 분사하는 저압분사법과, 압축최고압력보다 높은 압력에서 압축행정후반에 분사하는 고압분사법이 있다.

이들의 실린더내의 분사형 엔진의 유효성은, 고압수소가스용기를 사용한 실험에서 지적되었지만, 본 방식을 실용적으로 하기 위해서는, 연료공급압력을 고려한 수소밸브의 구동법과 유량제어방법에 기술적인 과제가 있었다. 결국 저압분사법에서는, 그 공급압력이 실린더 내압보다도 높아, 압축행정 전반의 좁은 범위에서 필요량의 수소를 어떤 방법

탱크에는 연료저장의 기능외에 수소가스의 충전이나 발생을 용이하게 하기 위하여 열교환기 및 수소가스 중의 MH의 미립자를 제거하기 위하여 필터 기능이 필요하며, 또한 자동차용 MH탱크에는 진동에 의한 MH의 침하 등을 방지하는 기능도 필요하다. 이외에 MH탱크의 운반성을 좋게 하기 위해서는, 액체수소방식과 같은 용기만의 문제가 아니고, 탱크의 다기능을 고려하면서 그 구성요소를 종합적으로 검토할 필요가 있다.

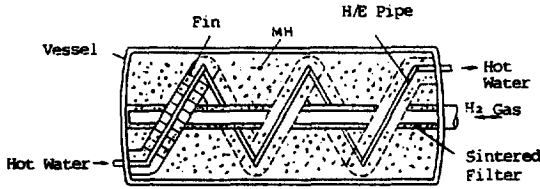


Fig. 4. Outline Diagram of MH Tank.

또한 MH이용은, 자동차 연료탱크외에 히트펌프, 수소의 정제, 연료전지의 전극 등 그 범위가 넓어지고 있다.

탱크가 실용화되어, 그 폐열회수기술이 이동용 동력으로 적용되면, Total Energy 효율을 상당히 높일 수 있다.

4. 수소자동차

수소자동차는 수소의 운반법과 탱크에서부터 엔진에의 수소의 공급법이 석유연료와는 아주 틀린 것이 특징으로서, 이런 요구를 만족시키며, 더우기 엔진성능도 향상시키는 방법에 대하여, 자동차의 연료·엔진계를 하나의 시스템으로 개발할 필요가 있다. 여기에서 종래에 개발된 예를 들어본다.

4. 1 고압수소차

미국 UCLA에서 Ford "Boss" V-8, 5.75 lit. 엔진을 수소연료로 개조했다. 이차는 400기압의 고압용기 2통을 운전석의 뒤에 적재한 것으로서, EGR로서 이상연소 및 NOx를 제어하는 방식을 취했다.

그림 5는 일본 무사시공대에서 사용했던 고압수소차의 연료계통도를 표시한다. 수소의 공급은 ①의 150기압 용기로부터 ②의 감압밸브에서 2기압으로 만든 후 ③의 Vaporizer를 거친 후 ⑤의 기

화기에서 공기와 혼합시켜 ⑦의 엔진에 공급한다. ①의 수소압력용기는 150기압으로, 무게 약 55kg, 체적 7Nm³의 수소를 압입하였는데, 그 열량은 1통분이 가솔린 2.3 lit분이었다. 이와 같이, 고압용기는 가솔린에 비하여 그 연료 계통의 중량이 30배에 달한다. 그러나 만일 1,000기압에 견디고, 동시에 같은 중량의 용기가 가능하다면, 4배정도 되는 것이기 때문에, 역으로 가장 유망한 수소 운반 수단이 된다.

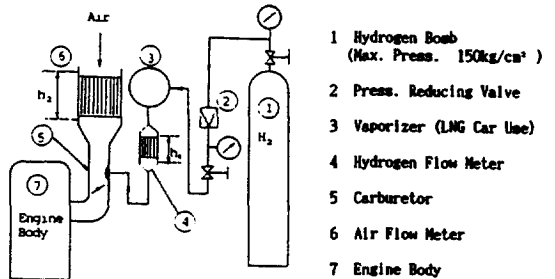


Fig. 5. Outline Diagram of High Pressure Hydrogen Fueled System.

4. 2 액체수소차

수소엔진은 예혼합방식보다 실린더내 직접분사가 여러가지 뛰어난 성질을 갖고, 2사이클에서는 NOx도 미량이다. 그러나 분사를 자동차용 엔진에 실용화하기 위해서는, 고압수소를 요하고, LH₂로서 운반할 때에는 방출압력이 낮기 때문에 가압이 필요하다. 이 때문에 압축기는 엔진행정 체적의 1/3로서 구동동력도 크고, 예혼합 저출력이 오히려 좋게 된다. 이것을 LH₂펌프로서 고압가스탱크에 압송하면, 아주 소형의 펌프로서 작은 동력으로 할 수 있다. 이 때에 LH₂펌프의 개발이 문제로서, 그것은 LH₂는 -253°C의 극저온이기 때문에, He이외의 물질은 전부 고체이기 때문에, 회전부에 윤활제가 없다는 것과, LH₂자신의 점도는 물의 약 1/77로 매우 작다. 그 뿐만 아니라 금속에서는, 접촉부에서 서로 타서 부착된다. 또 LH₂의 기화잠열도 108kcal/kg(중량당 물의 1/5, 가스체적당 수증기의 1/45)으로 작기 때문에, 펌프내에서 기화하기 쉬운 점과, 더우기 틈새로부터 누설하기 쉬운 것 등의 문제점이 있기 때문이다. 일본 무사시공대에서

는 상기의 점을 거의 해결하여, 토출압력 10기압의 펌프를 LH₂ 탱크내에 삽입시켰다. 펌프는 70Watt의 직류모타로 구동, 잉여분은 탱크에 회수 시키는 방법을 썼다. 이것을 2사이클 경4륜 승용차에 탑재시켜 무사시 3호차를 만들었다. 1987년도에는 무사시 7호차가 보고되었는데, 이것은 16년간의 개발결과였다.

그림 6은 연료계통으로, 펌프출구는 LH₂이며, 최적분사온도는 분사밸브입구에서 -50℃정도이기 때문에, 엔진냉각수로서 조절, 가열하여, 일단 1 lit.의 Surge탱크에 넣어 그곳에서 3개의 실린더분사밸브에 분배한다. 그 사이의 파이프는 2중진공단열한 것이 사용된다.

그림 7은 무사시 3호차의 개략도이다. 이차는 뒷자석에 LH₂탱크를 적재시켜서 실용성이 적었는데, 그 이후 4호차부터는 뒷자석다음에 설치해서 이 문제를 해결하였다.

아직도 해결해야 할 문제로서는, 단열성능이 좋은 탱크와 더욱 고성능의 LH₂펌프의 개발이 필요하며, 수소액화가격의 저하 등이 남아 있다.

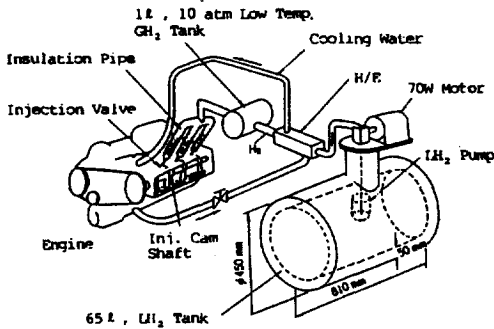


Fig. 7. Arrangement of Functional Components for Musashi 3.

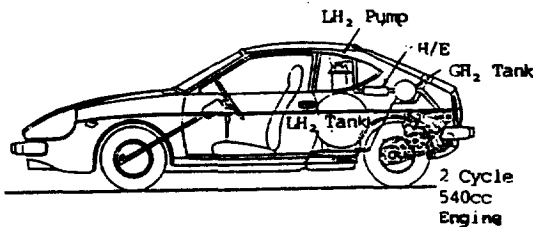


Fig. 6. Outline Diagram of Fuel System for Musashi 3.

4. 3 MH수소차

MH수소차는 엔진, MH탱크, 배열열교환기, 수소감압장치, 수소제어장치 및 전자제어장치로서 구성되며, 그 개략도를 그림 8에 표시한다. MH용기를 갖는 수소차는 MH용기와 엔진시스템의 상호협력 제어에 의해 기능을 발휘한다. 이점이 엔진과 연료탱크의 기능이 독립하여 있는 LH₂방식과 크게 다르다. MH엔진시스템은 MH탱크로부터 엔진에 수소를 공급하고, 여기서 그 연료를 연소시켜서 동력을 얻어내고, 그의 폐열을 MH탱크로부터 수소가스를 발생시키기 위한 열원으로 이용하는 열순환시스템이다. MH로부터 수소가스를 발생시키는 열원이 수소가스의 발열량의 일부로 제약되는 것과, MH탱크의 가열은 늦어진다는 것이다. 그렇지만 자동차에서의 수소가스의 사용유량의 변화는 시간적으로 빠르다는 특징이 있다. 따라서, 엔진의 출력제어에 수반하여 수소사용유량의 변화에 MH탱크로부터의 수소공급유량의 응답성이 중요한 점이 되고 있다. 또한, 현재에서, MH는 무겁기 때문에 택시 등과 같은 소형차에는 부적합하고, 시내버스와 같이 중량이나 공간의 제약이 적은 곳과, 더우기 1회의 보급으로서 주행하는 거리가 짧은 곳에서는 사용가능하다. Hama등이 개발한 6인승 소형차는 그림 8과 같고, 주행시험한 결과 최고속도는 108km/h, 60km/h 정속주행시의 연비, 1km/lit.(가솔린환산)의 성능이 얻어졌다. MH자동차에서는 MH의 저장밀도, 용기내의 압력과 온도, 열전도율등에 많은 과제가 남아있으며, 최근에는 MH용기의 간소화를 위해 흡장급속을 고열전도체로서 마이크로 캡슐화하여 압축성형함으로써, 전열추진 및 미분화 등을 방지하는 것이 연구되고 있다. 이와 같이 흡장급속 및 열교환기술의 과제를 해결해야 할 방법을 고려해야 한다.

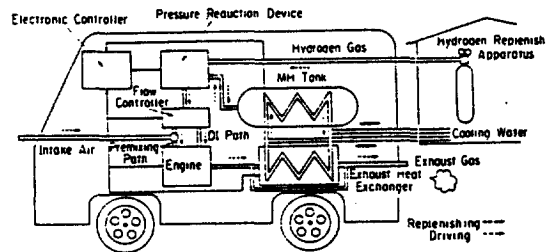


Fig. 8. System Diagram of experimental Vehicle.

5. 결 언

인공연료로서 가장 간단하며, 양질의 연료인 수소를 엔진에 사용하기 위하여, 다음과 같은 사항이 예상된다.

- 1) 수소의 경제적인 제조법의 개발과 열기관에 적용했을 때 물리적 화학적 안전성에 관한 연구가 필요하다.
- 2) 수소를 엔진연료로서 사용하기 위한 수소의 기본적인현상, 예를 들면 표면착화, 화염구조, 공기와의 혼합 등에 있어서의 폭넓은 기본적인 연구가 필요하다.
- 3) 수소자동차에 수소를 탑재하여 운반할 때의 운반 및 공급법을 포함하여 하나의 시스템으로 평가해야 하며
- 4) 그 일 예로서 LH₂의 탱크, 펌프 및 단열향상 등의 극저온 기술과, MH일 경우 엔진과 탱크의 상호협조제어를 위한 수소발생능력의 확보 등의 문제
- 5) MH의 재료문제 즉, 경량이며 운반성의 향상과 고압수소차의 경우 1,000기압이상의 고압 재료 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. White, M.E. et al., AIAA Paper 86-0159(1986)
2. Sakai, T. et al., Sunshine Journal 9-2 (1988), 8.
3. Suda, S., Int. J. Hydrogen Energy, 12-5 (1987), 323.
4. Petkov, T. et al., Int. J. Hydrogen Energy, 14-7 (1989), 449.
5. Hama, J., "Study of Hydrogen-Fueled Engine (I)-(III)", J. of Mechanical Engineering Laboratory (1980-1982), 1.
6. 古濱監修, 電氣自動車, 新型原動機 (山海堂 1980), 167.
7. 物理學辭典編纂委員會編, 物理學辭典 (培風館 1986)
8. 濱純, 自動車技術, 40-2 (1986), 232.
9. Hama, J. et al., SAE Paper 880036
10. Ohta, T. and Abe, I., Int. J. of Hydrogen Energy 10-5 (1985). 275.
11. Fruhama, S. and Sawada, T., Proceedings of 5th World Hydrogen Energy Conf. (1984). 1493.
12. 太田時男: 水素 Energy (森北出版社 1987)
13. Nomura, M. et al., Int. J. of Hydrogen Energy, 6-4 (1981), 397.
14. Veziroglu N. T., Int. J. of Hydrogen Energy, 12-2 (1987), 99.