

천연가스자동차 기술개발동향



이 장 희(KIMM 엔진환경연구부)

- | | | |
|-------------|---------|--------------|
| 1976 - 1980 | 한국항공대학교 | 항공기계공학과 (학사) |
| 1980 - 1982 | 한국과학기술원 | 항공공학과 (석사) |
| 1992 - 현재 | 한국과학기술원 | 기계공학과 (박사과정) |
| 1982 - 1987 | 한국기계연구원 | 연구원 |
| 1987 - 현재 | 한국기계연구원 | 선임연구원 |

1. 머리말

1930년대에 이탈리아에서 개발되기 시작한 천연가스 자동차(NGV)는 1970년대에 몇차례의 석유위기를 겪으면서 석유 에너지의 대체연료로 뉴질랜드등에서 본격적으로 연구가 시작되었고, 1990년대에 와서는 천연가스의 저공해성에 착안한 세계각국에서 경쟁적으로 개발이 급속히 진행되고 있으며 그 결과 주요선진국을 중심으로 전세계적으로 약100만대이상의 차량이 개조되어 운행중인 것으로 알려져 있다.

특히 최근에 와서는 급속한 차량의 증가로 인하여 자동차 배출오염물질이 급격히 증가, 대도시 대기 오염의 주된 원인으로 등장함에 따라 이에 대한 해결책의 하나로 부각된 천연가스 자동차에 대한 심도있는 연구가 진행되고 있으며, 연료 자체에 탄소성분이 적어 단위발열량당 이산화탄소의 배출량이 적으므로 지구 온난화문제 해결을 위한 CO₂ 총량규제시대에 적합한 대체연료로서 선진 각국에서는 이의 보급을 적극 추진 중에 있다.

국내에서도 한국기계연구원에서 국내 최초로 1994년 기아자동차, 창원기화기와 공동으로 2.5톤 청소차에 대하여 혼소(dual fuel)방식의 천연가스차량을 소련의 NAMI와 국제 공동과제로 수행하여 개발 완료한 이후로 국립환경연구원 산하의 자동차공해연구소주관하에 창원기화기와 공동으로 시내버스차량에 대한 혼소방식의 천연가스차량개발이 이루어 졌으나 국내의 미흡한 천연가스 공급망으로 인하여 확산보급되지 못하였다.

표 1. 연료별 물성치 비교^[8]

	단 위	메 탄 (CH ₄)	프로판 (C ₃ H ₈)	노말헵탄 (n-C ₇ H ₁₆)	수 소 (H ₂)	메탄올 (CH ₃ OH)	가솔린	경 유
H/C	-	4	2.67	2.5	-	4.0	1.85	1.90
저위발열량	MJ/mol (MJ/kg)	0.80 (50.0)	2.04 (46.4)	2.66 (45.7)	0.24 (120.0)	0.64 (19.9)	5.06 (44.3)	- (43.12)
혼합기발열량 /Nm ³ (λ=1)	MJ/Nm ³	3.40	3.68	3.71	3.19	3.50	3.73	-
발화 온도	K	905	777	703	844	746	570	523-533
단열화염온도 (λ=1, 대기압)	K	2226	2267	2270	2382	1955	2272	2278
최대연소속도 (φ)	cm/s	37 (1.06)	43 (1.14)	41 (1.13)	291 (1.7)	52 (1.01)	38 (1.17)	41 (1.08)
연소 하한계	vol% (λ)	5.0 (1.99)	2.1 (1.96)	1.8 (1.76)	4.0 (10.0)	6.0 (2.19)	1.0 (1.66)	-
연소 상한계	vol% (λ)	15.0 (0.59)	9.5 (0.40)	8.4 (0.31)	75.0 (0.14)	36.0 (0.24)	6.0 (0.26)	-
화염 거리	mm	2.5(2.0)	1.8(1.7)	3.0(1.8)	-	-	-	-
비중(공기비)	-	0.554	1.521	2.005	0.070	1.106	3.944	-
연소후 Mole 증가율	%	0	4.03	4.69	-14.8	24.6	5.78	-
RON	-	136	110	102	112	112	84-94 [98-99]	-
MON	-	140.1	97	94.4	91.0	91.0	76-83 [86-88]	-
세탄가	-	-	-	-	-	-	-	50-60*

* []은 고급휘발유 기준임.

자동차 제작3사에서 환경부의 저공해 차량 보급계획에 부응하여 1996년 전소(dedicated)방식의 승용차를 각 3대씩 개발·제작(현대-엑센트, 대우-시에로, 기아-스포티지)하여 한국가스공사 주관하에 현재 안산지역에서 시범운행중에 있으며, 쌍용자동차에서도 병용(bi fuel)방식의 천연가스자동차 개발을 추진중에 있다.

승용차부분에서도 대우중공업과 현대자동차에서 전소방식의 시내버스차량을 개발하여 '97 서울 국제대중교통전(SI TRANS '97)에 출품 전시하였으며, 아시아자동차에서도 전소방식의 엔진을 개발중에 있다.

본 소고에서는 천연가스의 연료적 특성과 국내외적으로 현재까지 진행된 천연가스자동차 기술에 대해 각 시스템별로 기술적인 특징을 분석 정리하고, 국내실정을 고려하여 천연가스 자동차

의 기술개발 방향을 제시하고자 한다.

2. 천연 가스의 연료적 특성

천연가스는 상온에서 기체인 탄화수소계 연료로서 전세계 매장량은 120조m³로 추정되고 있으며, 그 성분은 산지별로 조금씩 다르나 주성분이 메탄(CH₄)으로 구성되어 있어 천연가스의 연료적 특성은 메탄의 연료적 특성에 의해 좌우된다. 따라서 탄소 성분이 작아 이산화탄소(CO₂)의 배출이 적으므로 지구온난화 방지책의 하나로도 사용될 수 있는 대표적인 대체 연료중 하나로서 그림1에 나타난 바와 같이 단위 발열량당 이산화탄소 배출량이 가솔린 대비 22% 감소되고 있으며^[8], 그 물성치는 표 1과 같다.

일반적으로 천연가스의 비중은 공기보다 낮아

대기로의 확산이 쉽고, 자발화 온도가 높아 차량 충돌시의 안전성은 LPG나 가솔린에 비해 비교적 높은 것으로 평가되고 있으며^[3], 연소 범위가 넓어 희박연소가 가능하다. 그러나 가솔린에 비해 자발화 온도가 높아 높은 점화 에너지를 필요로 하며, 연소 속도가 느리므로 점화시기를 진각시키거나 급속연소방식이 채택되어야 한다. 뿐만 아니라 단위 질량당 발열량은 높으나 단위 체적당 에너지 밀도가 낮아 연료통의 부피와 무게가 증가하는 단점이 있으나 기체 연료 사용에 의한 연료 계통에 잔유물이 '형성되지' 않아 엔진의 내구성이 향상되는 장점과 냉시동성의 개선에 의한 배기가스 저감과 더불어 전소엔진의 경우에는 높은 옥탄가에 의해 압축비 상승이 가능하므로 출력의 향상을 꾀할수 있다.

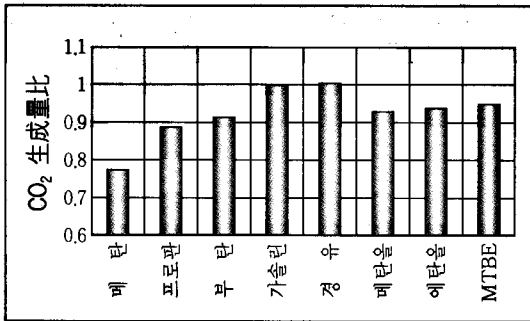


그림 1. 단위 발열량당 CO₂ 생성비

3. 천연가스 차량의 종류

천연가스 자동차는 연료 탑재 방식에 따라 압축천연가스(CNG, 이하 CNG로 표기) 자동차, 액화 천연가스(LNG, 이하 LNG로 표기) 자동차

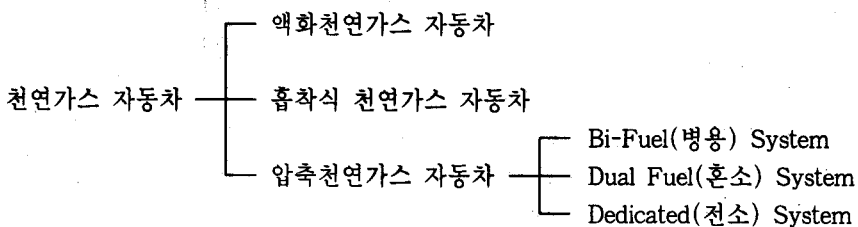
및 활성탄을 이용한 흡착식 천연가스(ANG) 자동차로 분류되며,^[4] 흡착식 천연가스(ANG) 자동차는 활성탄 등의 흡착제에 천연가스를 30~60kg/cm로 가압하여 저장하는 방식으로서 충전 압축기등 충전 시설비용 등의 절감이 가능하나 흡착제의 비용이 고가이고 저장효율이 낮아 현재의 기술 수준으로는 실용화에는 많은 문제점이 있으므로 이에 대한 소개는 생략하기로 한다.

3.1 액화 천연가스자동차

액화 천연가스 자동차는 -162℃로 냉각 액화한 천연가스(LNG)를 극저온 단열용기에 저장하여 연료로 사용하는 방식으로서 LNG를 기화기(vaporizer)에서 기화하여 mixer나 흡기매니폴드 분사하여 연료로 공급하는 방식과 기화된 천연가스를 고압으로 가압하여 저장하였다가 실린더 내로 직접분사하여 실린더내의 점화플러그에 의해 점화시키는 방식이 있으며, 현재로서는 전자의 방식만이 실용화된 기술로 초기보급단계에 있으며, 실린더내 직접분사기술은 연구단계에 머물고 있다.

LNG 자동차는 CNG 자동차에 비해 주행거리가 길다는 장점이 있으나 LNG 단열 용기의 개발, LNG 충전 기술 개발등이 선행되어야 하며 최근에 이러한 기술등이 개발되어 실용화초기단계에 접어들었으며 미국에서만 약 700대의 차량이 운행중인 것으로 보고되고 있다.^[9]

일본에서도 자동차기술연구소에서 1992년 그림 2와 같은 시스템을 사용하여 550cc급 경자동차를 개조하여 LNG자동차의 시작품을 제작하였



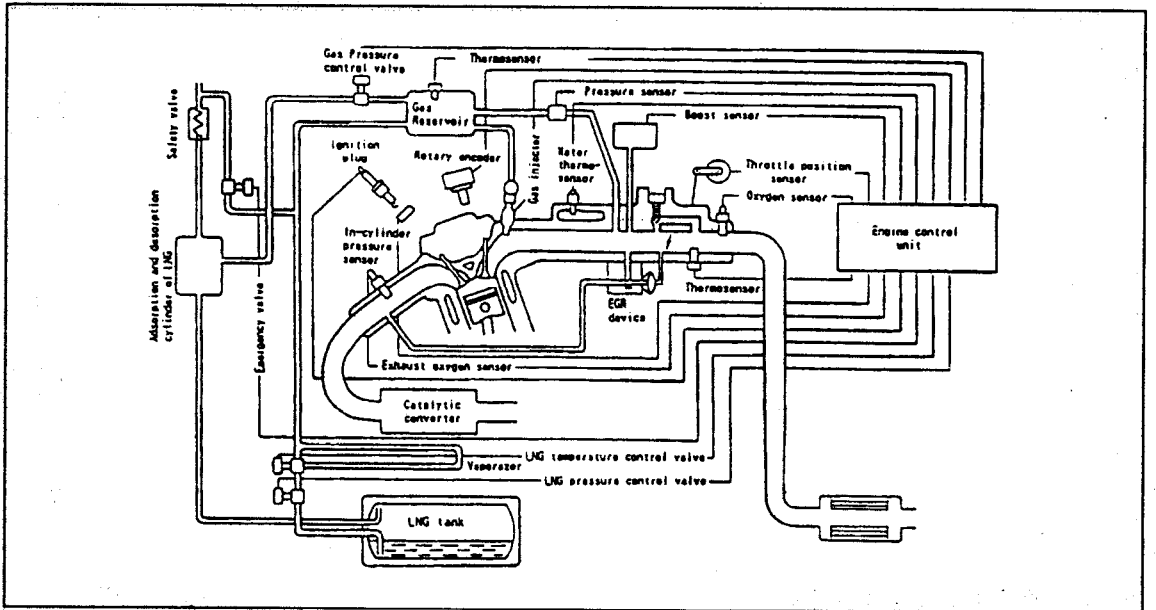


그림 2. LNG 자동차의 엔진시스템 구성도^[6]

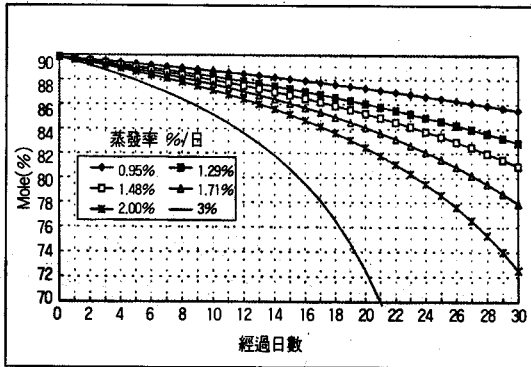


그림 3. 증발율 변화에 따른 메탄의 성분변화^[9]

으며, 현재는 일본가스협회 주관하에 LNG자동차에서 실린더내 직접분사기술에 관한 연구가 진행되고 있다.

그러나 LNG를 사용하는 경우에는 LNG 단열 용기로 흡입되는 열원에 의하여 용기내의 LNG 성분중 비점이 낮은 메탄성분이 먼저 증발하여 증발가스(BOG, Boiled Off Gas)가 되고, 증발가스에 의하여 용기내의 압력이 상승하므로 용기의 파손을 방지하기 위하여 증발가스를 엔진에 우선적으로 공급하여 연소시키거나 대기중으로 방출하여야 한다. 따라서 시간이 경과함에 따라

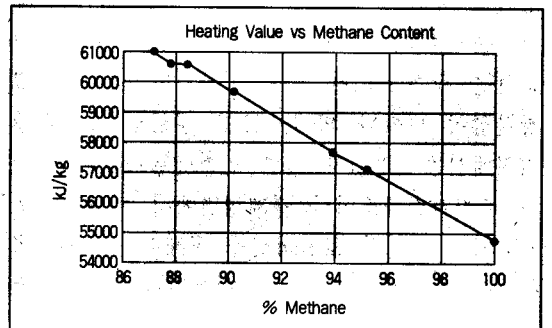


그림 4. 메탄성분변화에 따른 발열량 변화^[21]

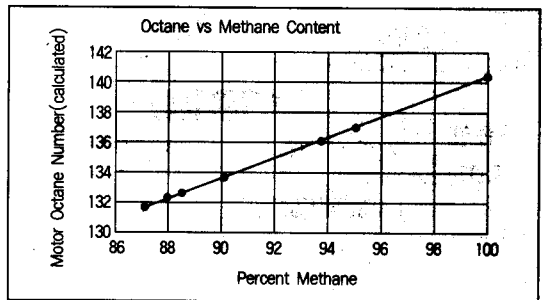


그림 5. 메탄성분변화에 따른 옥탄가 변화^[21]

용기내에는 메탄성분이 감소하고 고비점의 연료 성분이 농축되는 weathering 현상이 발생하게 된다.

그림 3, 그림 4, 그림 5는 weathering현상의 결과를 나타낸 것으로서 연료의 증발율을 3%/일로 가정했을 때 충전후 21일이 경과하면 연료의 메탄성분이 100%에서 70%로 감소하고^[9], 이에 따라 발열량이 최대 37%, 옥탄가가 24%정도 감소하는 것으로 보고되고 있다.^[22] 따라서 차량에서의 엔진연소성능이 변하므로 이에 대한 기술적 대응방안이 강구되어야 하겠다.

3.2 압축 천연가스 자동차

주행거리가 짧고 차량의 적재공간이 작아진다 는 단점에도 불구하고 지금까지 개발보급된 대부분의 천연가스 차량은 기술적인 한계로 인하여 압축 천연가스 차량에 초점이 맞추어져 있으며, 압축 천연가스 자동차는 개조(conversion)하는 방식에 따라 신차제작시에 천연가스차량으로 제작하는 OEM방식과 기존에 사용중인 엔진을 개조하는 방식(retrofit)으로 구별되며, 표 2에 그 장단점이 나타나 있다. CNG 공급망이 완비된 지역에서는 OEM에 의한 전소(deidcated) 방식이 배기가스측면이나 경제성면에서 이상적이나, 천연가스 차량의 보급확산을 위해서는 CNG 공급망이 미비된 지역에서도 사용가능한 천연가스

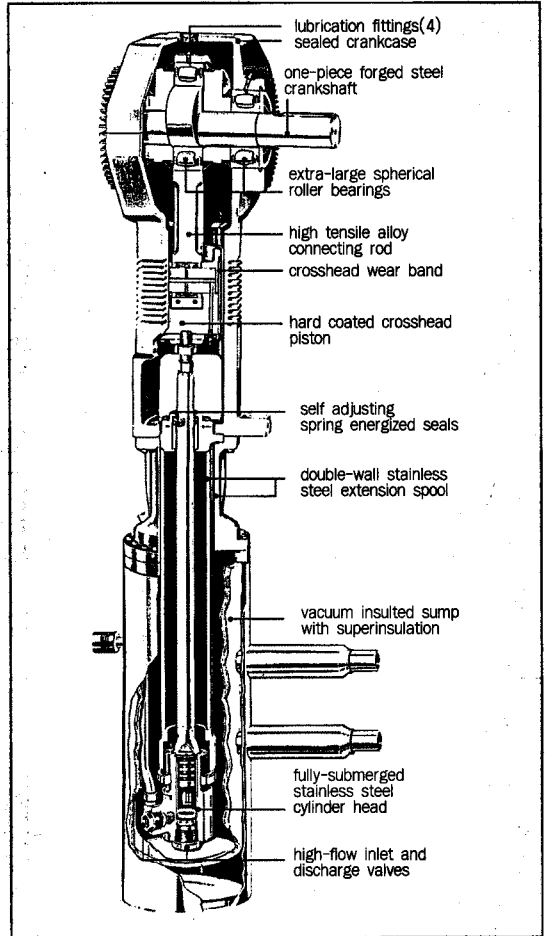


그림 6. LNG용 고압펌프(CVI)^[5]

표 2. 압축천연가스 차량의 시스템 비교 (○: 유리, △: 중간, ×: 불리)

		단 위	비 용	배기감소 효과	기술적 난이도	비 고
가솔린 (LD)	신 규 차량	Dedicated	○	○	△	• CNG 연료공급망 완비시 가능
		Bi-Fuel	△	△	○	• 초기보급에 유리 • 가솔린 모드/CNG모드 전환기능 • CNG모드에서 출력 감소
	사용차	Bi-Fuel	△	△	○	• 위와 동일함
디젤 (LD, HD)	신 규 차량	Dedicated	○	○	△	• CNG 연료공급망 완비시 가능
		Dual Fuel	×	△	○	• 초기보급에 유리 • 제작사에서도 기존 디젤엔진 이용하여 개발
	사용차	Dual Fuel	△	△	○	• 초기보급에 유리 • 가격이나 기술적 측면에서 훨씬 유리 하나 CNG 사용비율이 적으면 사업 의미가 감소

겸용시스템(bi fuel 혹은 dual fuel)이 현실적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 최근에 와서는 CNG공급망의 확충에 따라 대기오염 개선효과가 큰 전소 방식이 본격적으로 보급되고 있다.

CNG를 차량에 공급하기 위한 시설로 충전시설이 있으며, 현재까지는 2단 내지 3단 압축기를 사용하여 저압의 가스를 200bar의 고압으로 실린더에 충전하여 왔으나, 최근 개발된 충전기술은 LNG를 그림 6과 같은 고압펌프를 사용하여 액체상태에서 고압으로 압축하고 고압상태에서 기화하여 바로 실린더에 충전하는 방식(LCNG 충전)이 소개되고 있다. 이방식에 의하면 충전에너지 90%이상 절감할수 있다고 한다^[5].

3.2.1 병용 방식(Bi-Fuel System)

병용방식은 기존의 가솔린 엔진에 mixer 또는 가스 인젝터, 압력조정기등 전환키트와 압축천연가스 저장용기등 천연가스 연료 공급장치를 추가 설치하여, 필요에 따라 가솔린 또는 천연가스로 운행이 가능한 시스템으로서 기존 엔진의 개조가 불필요하여 기존 차량에 대한 개조가 쉬운 장점이 있어 현재 사용중인 천연가스 자동차의 대부분이 이 시스템을 채택하고 있다.

단점으로는 CNG모드에서 출력이 약 10-20% 정도 감소하며, 압축용기 탑재 등에 의한 차량의

적재 공간 감소와 차량의 무게가 증가하게 되며 CNG 전소시스템에 비해 배기 저감효과가 적고, 초기 설치비가 증가한다. 그림 7은 기계연구원서 1996년 기아의 스포티지 차량을 개조한 병용방식의 엔진시스템 구성도이다.

3.2.2 혼소 방식(dual fuel system)

혼소 방식은 기존의 디젤엔진에다 천연가스 연료 공급장치를 추가 설치하여, 필요에 따라 경유 또는 경유+천연가스(혼소 모드)로 운행이 가능한 시스템으로서, 혼소 모드에서는 흡기매니폴드에서 mixer나 가스 인젝터로 연료를 공급, 혼합기를 형성하여 실린더 내로 흡입하고 압축 말기에 고압의 경유를 pilot injection하여 경유의 압축 착화에 의해 점화가 일어 나도록 하고 있다.

장점으로는 기존 엔진의 개조가 불필요하여 기존 차량에 대한 retrofit이 쉬운 뿐 아니라 출력 저하도 없다. 단점으로는 병용방식과 마찬가지로 부가적인 천연가스 공급장치가 설치되므로 차량의 적재공간 감소와 무게 증가, 초기 설치비의 증가등이 있으며, 혼소 모드에서는 두 가지 연료를 동시에 제어해야 하는 등 시스템이 복잡해진다.

배기 가스측면에서는 기존의 디젤 차량에 비해 매연 및 NOx의 배기 저감효과는 탁월하나 HC 및 CO는 기존의 경유차보다 증가하여 전반적으로 CNG 전소시스템에 비해 배기 저감효과가 적다.

그림 8은 캐나다의 Westport사의 혼소방식 연소시스템 구성도로서 LNG를 기화하여 고압으로

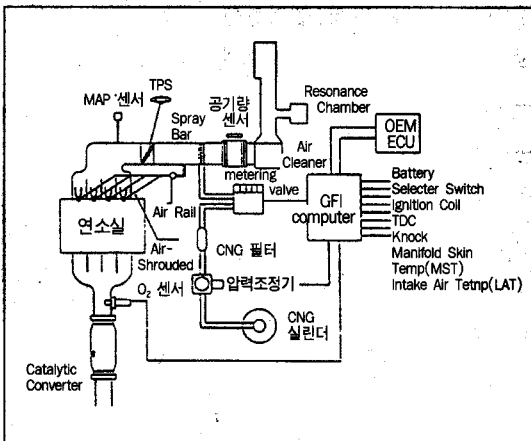


그림 7. 병용 방식의 엔진시스템 구성도(KIMM)

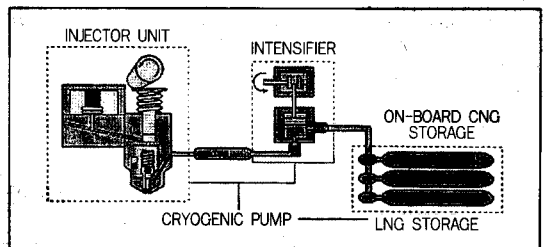


그림 8. Westport사의 혼소 시스템^[23]

압축하여 저장한 후 연료분사밸브를 통하여 실린더내로 직접 분사하고 있다. 연료분사밸브는 디젤 인젝터를 개량한 형태로서 하나의 노즐을 통하여 천연가스연료와 디젤연료를 동시에 분사하도록 되어 있으며 분사된 디젤연료의 자발화에 의해 점화가 일어난다. Westport사에서는 NRC등의 자금지원을 받아 1996년부터 1998년까지 Phase I, II, III 3단계사업으로 시스템 검증작업을 수행하고 있으며, 시운전결과 연비와 배기가스측면에서 유리하다고 한다.^[23]

3.2.3 CNG 전소(dedicated) 시스템

CNG 전소 시스템은 기존의 가솔린 엔진의 연료 계통을 완전히 제거하고 압축비를 증가시켜 연소를 최적화 하는 방법과 기존의 디젤 엔진의 연료 분사계를 제거하고 분사 노즐 설치부위에 점화플러그를 설치하여 오토사이클화하는 방법이 있으며, 연료 공급방식에 따라 mixer, 흡기매니폴드 분사, 실린더내 직접분사등이 있으나 mixer에 의한 연료공급방식은 다량의 연료공급이 가능하여 HD(Heavy Duty)엔진에 사용되고 있지만 공연비의 정밀제어가 어려워 이론 공연비방식보다는 회박연소방식에 적합하다.

그림 9에 나타나 있는 실린더내 직접 분사방식은 공기 이용률을 극대화 할 수 있고 예혼합 연소가 아닌 확산 연소가 가능하므로 예혼합 연소에 필연적으로 발생하는 crevice volume과 wall quenching에 의한 HC과 CO의 증가를 억제

할 수 있을것으로 기대되나 아직 실용화에는 미흡한 점이 있다. 따라서 흡기매니폴드 분사가 주로 사용되고 있으며, MPI(Multi-Point Injection)가 SPI(Single Point Injection)에 비해 성능이 우수하지만 경우에 따라서는 MPI인젝터의 불균일성과 각 기통별 흡입공기량의 차이등으로 인하여 SPI방식이 MPI방식에 비해 배기가스측면에서 유리한 결과가 나오기도 한다.^[20]

4. 천연가스 엔진의 배기가스 저감기술

현재 사용중인 천연가스 엔진의 배기 가스 저감기술은 회박 연소(lean burn)방식과 이론 공기량 연소(stoichiometric combustion)로 나누어지며, 일반적인 천연가스 엔진의 공연비 변화별 배기가스농도의 변화는 그림 10에 나타난 바와 같이 회박 영역으로 갈수록 NOx는 감소하고 HC는 증가하고 있다.

회박 연소방식의 개념은 회박 영역에서 연소시킴으로써 연소상태에서 NOx발생량을 줄이고 산화 촉매(oxidising catalyst)를 사용하여 회박 영역에서 증가하는 CO와 HC를 산화시켜 배기가스를 저감시키는 기술이다. 회박 연소의 경우 실화(misfire)가 발생하기 쉽고 연소속도가 느려 완전 연소가 어렵다. 특히 저부하시 실화가 발생하지 않도록 nebula 연소실같은 급속회박 연소실을 사용하고, 점화 장치(고점화에너지)를 개선하는등 보완이 요구되며, 실화 한계(misfire limit)는 연

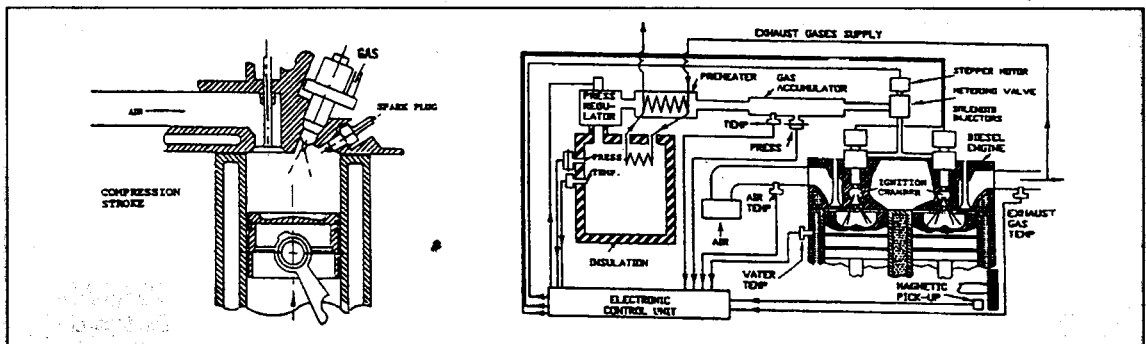


그림 9. 실린더내 직접분사시스템 구성도^[12]

소실 형상에 따라 다르지만 $\lambda=1.7 \sim 1.9$ 로 보고 되고 있다.^[14, 15] 회박 연소의 경우는 엔진출력은 20~30% 떨어지지만 연소 온도가 낮아 열손실 감소에 의해 열효율이 증가하고 배출가스 온도가 낮아 NOx 저감 및 엔진 내구성등의 문제가 발생하지 않으므로 디젤 엔진을 가스 엔진으로 개조할 경우 주로 쓰인다. 출력감소의 대책으로 TCI(turbocharger-intercooler)의 사용이 요구된다.

이론 공기량 연소($\lambda=1$)는 연료의 완전 연소에 필요한 공기를 공급하면서 엔진을 운전하는 것으로서 그림 10에서 나타난 바와 같이 $\lambda=1$ 일 때 유해배기가스가 다량으로 배출된다. 이 배기 가스를 삼원 촉매(three-way catalyst)를 사용하여 산화또는 환원반응을 일으켜 배기가스를 저감하는 기술이며, 이와 병행하여 배기 가스 재순환 장치(EGR)를 사용하여 연소실내 연소 온도를 낮추어 NOx의 발생을 억제하기도 한다.

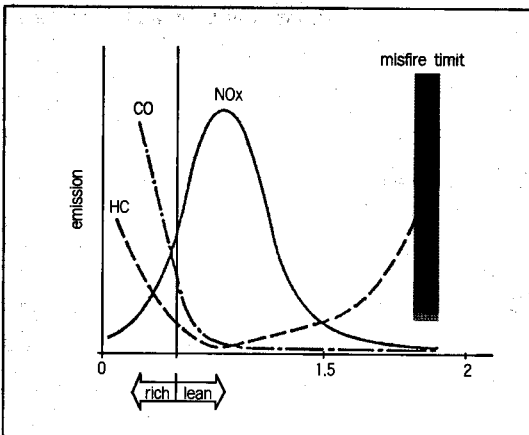


그림 10. 천연가스엔진의 공연비별 배기성분변화^[6]

삼원 촉매의 전환효율은 $\lambda=1$ 부근에서 최대를 나타내며 이론공연비 영역을 벗어나면 유해배기 가스의 산화 또는 환원반응이 급격히 저하한다. 따라서 이론 공연비로 제어함으로써 삼원촉매의 전환효율을 극대화하여 배기가스를 저감하는 것이다.

6. 결 론

도심의 대기오염이 심화됨에 따라 비교적 저 공해 차량인 천연가스차량이 널리 보급될 전망이다. 현재 국내의 빈약한 CNG 보급망과 기존 차량의 대기 오염문제를 단기적으로 해결하기 위해서는 천연가스 겸용(bi-fuel 또는 dual fuel) 엔진의 사용이 바람직하나, 장기적으로는 대기오염개선효과를 극대화하기 위해서 전소엔진의 개발보급이 요구된다.

연료공급방식은 LD 엔진에서는 공연비 제어가 쉬운 인젝터방식이 주로 사용되고 있지만, HD엔진에서는 천연가스 공급량의 문제로 인하여 mixe방식이 아직도 선호되고 있으며, 이론 공기량 연소방식이 배기가스측면에서는 회박연소방식보다 유리하여 LD엔진에서는 많이 사용되고 있으나, 출력이 중요시되는 HD엔진에서는 회박연소방식이 선호되고 있다.

현재의 천연가스엔진에서는 매니폴드에서 분사하여 혼합기가 엔진으로유입되는 예혼합연소가 대부분이나, 실린더내 직접분사기술이 실용화된다면 확산연소에 의한 새로운 연소시스템의 개발이 기대된다.

현재까지는 기술적인 어려움으로 인하여 전세계적으로 CNG 차량이 주로 보급되었으나 어느 정도 기술적인 어려움이 해결된 LNG 차량의 보급이 미국을 중심으로 확산되는 추세이다. 국내에서도 천연가스가 액체상태로 도입된다는 사실을 고려하면 LNG 차량의 보급이 경제성면에서 유리한 것으로 판단되며 국내에서도 이에 대한 관심을 가져야 할 것으로 사료된다. 뿐만아니라 CNG 차량의 경우에도 충전시설만은 에너지 효율을 고려하여 다단 압축기를 사용하는 것보다는 액상으로 가압하는 LCNG방식으로서의 전환이 필요할 것으로 사료된다.

국내에서도 하루빨리 천연가스 충전시설등 공급망이 구축되고 정부의 보급유인정책이 확립되

어 현재 안산지역에서만 시범 운행중인 천연가스 차량이 전국적으로 확산 운행되어 대도시 대기오염문제를 해결할 수 있기를 바라마지 않는다.

참 고 문 헌

- [1] 환경부, "자동차공해저감을 위한 CNG차 보급 활성화 Workshop", 1995. 12.
- [2] 정동수 외, "CNG/LPG 겸용 Fuel Injection 장치 개발에 관한 연구, KIMM 보고서, 1992.
- [3] 박 선 외, "CNG차량 개발 연구", 에너지기술 연구소 보고서, 1989.
- [4] 김관진, "천연가스 자동차의 개발동향", 세아기보
- [5] 조양수 외, "국외출장보고서", 한국가스공사 연구개발원, 1997.
- [6] 金榮吉, "天然ガス自動車", 自動車研究 第13卷 11號, 1991.
- [7] 日本ガス協會, "天然ガス自動車の實用化に向けて", 天然ガス自動車の實用化調査報告書, 1992.
- [8] 日本ガス協會, "天然ガス自動車の實用化に向けて", 天然ガス自動車の實用化調査報告書, 1996.
- [9] 日本ガス協會, "天然ガス自動車の實用化に向けて", 天然ガス自動車の實用化調査報告書, 1997.
- [10] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [11] D. Miele, T. Krepec and t. Glannacopoulos, "Electronic Injection System for Natural Gas in a Diesel Engine Development and Testing" SAE 890852, 1989.
- [12] T. Krepec, H. Kekedjan, M. Tummala and M. Pharand, "Towards Direct Gas Injection in NGV's", EV01, NGV94 Conference Proceeding, 1994.
- [13] M.G.Kingston Jones and D. M. Heaton, "Nebula Combustion System for Lean Burn Spark Ignited Gas Engines", SAE 890211, 1989.
- [14] B. Johansson and K. Olsson, "Combustion Chamber for Natural Gas Engines Part 1: Fluid Flow and Combustion", SAE 950516, 1995.
- [15] B. Johansson and K. Olsson, "Combustion Chamber for Natural Gas SI Engines Part 2: Combustion and Emissions", SAE 950516, 1995.
- [16] N. J. Beck, W. P. Johnson, A. F. George, P.W. Peterson, B. van der Lee and K. lopp, "Electronic Fuel Injection for Dual Fuel Diesel Methane", SAE 891652, 1989.
- [17] Christopher S. Weaver, "Natural Gas Vehicles - A Review of the State of the Art", SAE 892133, 1989.
- [18] Jacob Klimsra, "Performance of Lean Burn Natural Gas Fueled Engines - On Specific Fuel Consumption, Power Capacity and Emissions", SAE 901495, 1990.
- [19] Yoshiyuki Ko, Katsuyuki Kurihara, Takayuki Sakai, Ruiji Osuga, Byung-Chul Choi, Tadashi Ayusawa, and Eikichi Kim, "Reasearch and Development of LNG Vehicle for Practical Use", SAE 920594
- [20] Kevin D. Beaty and Rolf Egnell, "Development of a Low Emission VOLVO 9.6 Liter Natural Gas Fueled Bus Engine", SAE 921554, 1992.
- [21] Jerry L. Gibbs, Richard L. bechtold and Charles E. Collison, III, "The Effect of LNG Weathering on Fuel Composition and Vehicle Management Techniques", SAE952607, 1995.
- [22] Internet 자료, "Japan Focuses on LNG Vehicles Technology Project Development", LNG Express Online Issue 1997.
- [23] Internet 자료, "http://www.westport.com/", 1998.