

저공해 대형 LPG엔진 기술



강 건 용
(KIMM LP가스엔진연구사업단)

- '80 - '84 경희대학교 기계공학과(학사)
- '84 - '86 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '88 - '93 포항공대 기계공학과(박사)
- '98 - '99 미국 위스콘신대학교 Post Doc.
- '86 - 현재 한국기계연구원 LP가스엔진연구사업단 단장



이 진 옥
(KIMM LP가스엔진연구사업단)

- '87 - '91 경북대학교 기계공학과(학사)
- '91 - '93 포항공대 기계공학과(석사)
- '93 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

21세기 미래형 엔진기술은 기존의 가솔린엔진과 디젤엔진의 비중이 점차 감소하면서 연료전지엔진, 하이브리드엔진, 수소엔진, 가스엔진, 전기자동차 등 다양한 형태의 동력원으로 개발 대체되고, 운행지역의 지형 특수성 및 비용을 고려한 시장원리에 의해 저공해 차량이 적절하게 보급될 것이다. 이들 중에서 특히 단기적으로 개발 적용이 가능한 것으로써 기존엔진으로부터 개조가 용이한 가스엔진인 LPG엔진과 CNG엔진이 주목되고 있으며, 국내에서도 최근 이 두 엔진에 대한 저공해성 검증 및 보급정책 우선 순위에 있어 논란이 되고 있다. 사회적인 측면에서 이러한 저공해 가스엔진은 대도시 환경오염원으로 알려진 대형 경유차량을 대체하도록 개발을 요구하지만, 기술적인 측면에서는 소형엔진 보다 대형엔진 기술이 훨씬 어려움이 많다. 이 논문에서는 현재 전세계적으로 5백만 대 정도가 저공해 차량으로 운행되고 있는데 비해 국내 LPG엔진기술의 낙후로 그 동안 저공해자동차로서 크게 주목받지 못하였던, LPG엔진기술에 대해 기술현황을 분석하고 최근 국내에서 관련 연구들이 시작된 대형 LPG엔진에 대하여 개략적으로 언급하고자 한다.

2. LPG의 자동차 연료특성

LPG (Liquid Petroleum Gas, 액화석유가스)는 프로판(C_3H_8)과 부탄(C_4H_{10})이 주성분으로 국내는 KS M2150에서 용도 및 조성에 따라 요구성

질이 규정되어 있으며, 자동차연료로서의 프로판 혼합비는 계절 및 지역에 따라 최고 30%까지 조성되어 공급된다. 한편 유럽은 일반적으로 프로판혼합비를 60%로 공급하고 있어 국내 자동차용 LPG가 부탄이 주성분인데 반하여 프로판이 주성분이다.

LPG의 주요한 특성으로는 표 1에서 보듯이 낮은 가압에 의해서도 액화되어 수송이 용이하고 자동차에 이용하기가 매우 편리하다는 것이

다. 즉, LPG는 저압에서 액화되어 기체상태보다 약 1/250 수준으로 부피가 감소하므로 LPG자동차는 가스연료차임에도 불구하고 주행거리가 길고, 연료탱크의 콤팩트화 및 차량중량의 감소 등이 가능하다.

또한 표 2에서 보듯이 LPG는 가솔린에 비하여 발열량이 높고, 옥탄가는 RON 100이상으로 내노크성이 우수하여 엔진의 성능이 우수하면서도 정숙하다. 더구나 LPG는 엔진흡입 시 완전한

표 1. 같은 양의 연료에 대한 차량 이동거리

	가솔린	LPG	LNG	CNG	메탄올	에탄올
이동거리	100%	74%	65%	25%	56%	66%
연료체적(리터)	75	102	117	302	132	106
연료탱크무게 (Kg)	70	90	120	288	121	97

표 2. 자동차연료 특성 비교표

Properties	Unit	Gasoline (Euro95)	Diesel	LPG		Methane (CNG)
				Butane	Propane	
Chemical Structure	-	C ₄ -C ₁₀	C ₁₀ -C ₂₀	C ₄ H ₁₀	C ₃ H ₈	CH ₄
H/C Ratio	-	1.85	1.95	2.50	2.67	4.0
Liquid Density	kg/l	0.755	0.845	0.58	0.50	0.42
Gaseous Density	kg/m ³ (0°C)	NA	NA	2.68	2.00	0.72
Research Octane No.	RON	95.2	NA	91.8	112.1	>120
Motor Octane No.	MON	85.2	NA	89.0	95.4	>120
Cetane Number	CN	NA	45-55	NA	NA	NA
Stoichiometric A/F Ratio	kg/kg	14.7	14.6	15.5	15.7	17.2
	m ³ /m ³	NA	NA	32.1	24.4	9.56
Auto Ignition Temp.	°C	350	250	365	470	650
Ignition Limits	lambda	0.4-1.4	0.48-1.35	0.36-1.8	0.42-2.0	0.7-2.1
Boiling Point	°C	30-195	180-370	-0.5	-42	-162
Vapor Pressure : 37.8°C	bar (abs)	0.69(sum) 0.94(win)	NA	3.5	13	NA
Heat of Vaporization	MJ/kg	0.30	0.25	0.36	0.37	0.51
Lower Calorific Value	MJ/l	32.5	35.9	26.5	23.2	21.0
	MJ/kg	43.0	42.5	45.7	46.3	50.0
	MJ/m ³ (°C)	NA	NA	123.5	93.2	35.9
Combustion Energy of Air Fuel Mixture (stoich)		3.76	3.78	3.71	3.68	3.40
Specific CO ₂ Formation	g/MJ	74.2	73.7	65.4	64.7	54.8

표 3. 대기오염물질 배출허용기준과 LPG버스 배출량

구 분	경유차 배출허용기준 (g/kwh)		배출량 (g/kwh)	
	한 국	EUROIII	경유버스	LPG버스
HC	1.2	0.7	0.7	0.5
CO	4.9	2.5	2.45	0.5
NOx	6.0	5.0	7.35	1.0
PM	0.1	0.1	0.36	0.05
Smoke	25%	-	19%	0

LPG버스 자료는 TNO에서 1996년 DAF버스로서 13 mode test 결과임
 배출허용기준 : 한국 2001. 12. 31까지, EUROIII 2000년 이후

기체로 혼합되고 간단한 분자구조를 가지므로 연소효율이 높아 유해배출가스의 배출량이 적다. 그리고 LPG는 내노크성이 우수하다는 점과 황(Sulfur)과 같은 불순물이 적다는 점 때문에 엔진의 내구성측면에서도 유리하다.^{[1],[2]}

LPG자동차의 인프라구조(Infra-structure)를 고려해 보면 국내에는 이미 620여 개의 LPG충전소가 설치되어 있고, LPG충전소는 저압의 충전시스템이므로 그 가격차해도 싸다는 이점을 가진다. LPG는 가솔린에 비하여 저 발열량과 옥탄가가 높아 가솔린엔진에 비하여 동등이상의 출력이 가능하나, 국내의 LPG엔진이 가솔린엔진은 MPI (Multi Point Injection)방식을 사용하는 데 반해 아직도 믹서방식을 사용하고 있어 LP 가스에 의한 흡입공기량 감소로 엔진출력이 가솔린엔진보다 저하되는 약점이 있다. 물론 믹서엔진에서는 MPI엔진에서와 같은 연료분사시의 기화잡열에 의한 흡입공기의 냉각 및 밀도향상 효과도 없다.

LPG는 연소속도가 느리면서도 자발화온도가 높아 옥탄가가 높으므로 내노크성이 우수하며, 기체연료로서 엔진에서의 연소도 안정하다. 이러한 이점으로 가솔린엔진보다도 소음 및 진동이 적어 엔진도 정숙하다. 물론 디젤엔진에 비하여는 연소 Cycle자체특성으로 소음 및 진동이 현저히 줄어들며 대형엔진의 경우는 소음이 2~3dB[A]정도 저감되는 것으로 보고되고 있다.^{[3],[4]}

3. LPG의 저공해성 및 연료시스템

표 3에서는 대형 경유차 배출허용 기준과 경유버스 대비 LPG버스의 유해가스 배출량을 나타낸다. LPG버스에서는 경유버스에 비해 입자상물질(PM)이 현저히 저감되며 특히 매연(Smoke)는 전혀 배출되지 않는 등 뚜렷한 저공해 특성을 보이고 있다. 질소산화물인 NOx의 경우는 경유버스에 비해 13% 수준을 나타내는 등 대도시 환경오염원인 대형 경유버스를 대체할 새로운 에너지원임을 확인 할 수 있다.

그림 1은 유럽 대도시에서 운행중인 저공해 LPG버스를 나타내며, 그림 2는 일반 주유소에서 가솔린과 LPG연료를 함께 판매하는 유럽의 연료유통망을 나타낸다.



그림 1. 유럽의 저공해 LPG버스



그림 2. 네덜란드 주유소

이러한 LPG차량의 저공해성은 LPG연료시스템의 연료조절성능에 크게 지배되는 데 표 4에서 LPG 연료시스템의 분류를 보여준다. 가장 초보적인 시스템은 기계적인 벤츄리관 원리로 LPG연료를 공급하는 것으로서 공연비 조절이 어려운 단점이 있으며, 이것에서 발전한 제2세대 기술은 피드백 기능을 보강하여 공연비 조절기능을 강화한 시스템이며(현재 국내 LPG시스템), 제3세대 기술은 기존의 가솔린엔진에서 사용중인 다점분사(Multi-point Injection, MPI)개념을 도입하여 역화방지 및 연료조절특성을 한층 개선시켰다. 특히 액상다점분사(Liquid Propane Injection, LPI) 시스템은 엔진출력의 저하를 막으면서 연료조절기능을 극대화시킨 최상의 시스템으로 알려져 있다. 대형 LPG엔진에서 문제가 되는 노킹 현상 억제에서 LPG액상 연료가 기화하면서 흡기온도를 저하시켜 많은 장점을 가진다.^[5]

4. 대형 LPG엔진의 연료시스템

대형엔진은 주로 디젤사이클로 작동되는 엔진

이므로 LPG연료를 사용하기 위해서는 오토사이클로 변경되어야 한다. 그러나 오토사이클 변경 시 배기가스의 온도상승(700℃ 이상) 및 데토네이션 등으로 인한 엔진운전영역의 제한으로 이어지며, 디젤엔진 배기가스의 온도상한선이 통상 700℃ 정도이므로 디젤엔진재료를 이용한 stoichiometric 연소 가스엔진의 공학적인 BMEP 한계를 극복하기 위해서는 대형 LPG엔진에 아래의 3가지 전략이 적용될 수 있다.

- 순수하게 lean-burn 연소방식의 전략
- Stoichiometric 연소와 EGR에 의한 희석 전략
- 부분부하에서 stoichiometric 연소, 고부하에서 EGR 희석 전략

표 5는 stoichiometric 연소시스템과 lean-burn 연소시스템을 비교하는 결과를 보여준다. Stoichiometric 연소방식은 삼원촉매기를 사용할 수가 있어서 배출가스 측면에서 유리함을 보이고 있고 lean-burn 연소방식은 NOx감소가 문제가 되지만 엔진효율은 향상됨을 보이고 있다. 연소방식에 따른 배출가스수준은 향후 유럽의 배기규제를 모두 만족할 수 있는 것으로 그림 3에서 보이고 있다.

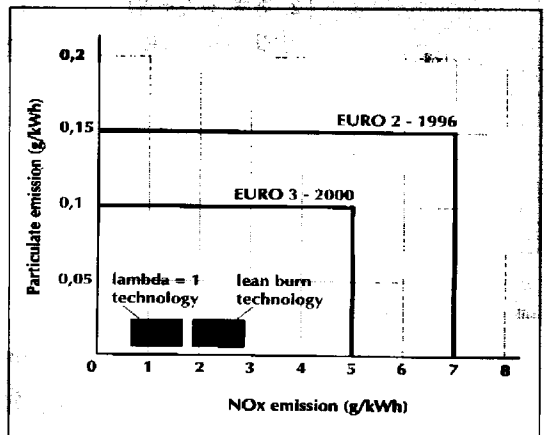


그림 3. 대형가스엔진의 연소방식에 따른 배출가스 수준

Stoichiometric 연소방식에서는 배기가스의 온도를 낮추기 위해 EGR(Exhaust Gas Recirculation,

표 4. LPG 연료시스템의 기술분류 및 장단점 비교

연료시스템	장 점	해결해야할 문제점
기화기방식 (Carburation)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 가장 저렴한 비용 2. 설치가 간편함 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 흡입공기 체적효율의 감소가 심하며 역화의 위험성 있음 2. 전자조절에 적합하지 않으므로 정확한 이상공연비 조절이 어려움 3. 연료의 실린더간 불균형이 심함
일점기체분사 (Single Point Vapor Injection)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 이상공연비 조절에 있어 기화기방식 보다 나음 2. 복잡한 시스템이 아님 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 낮은 주위온도 보상을 위해 vaporizer의 가열이 요구됨 2. 액체분사에 비해, 체적감소있고 기체분사는 증발압력 및 온도에 대한 정보가 필요함
일점액체분사 (Single Point Liquid Injection)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 흡기관, 포트와 실린더에서 연료액상의 기화로 흡기냉각효과가 있음 2. 전자조절장치에 대응되는 비교적 정확한 공연비 조절가능 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 연료가 모든 공급라인에서 액상을 유지해야함, 열소크로 인한 문제가가능성 있음 2. 상온에서 액상을 유지하기 위해, 상대적으로 고압(17bar) 유지해야 하고, 이는 저장용기에 액상펌프를 넣어야 하며, 여분의 연료를 재순환할 때 저장연료의 온도 및 압력을 상승시킴
다점기체분사 (Multi-point Vapor Port Injection)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 전자조절방식에 더 적합함 2. 실린더간 연료분배를 더욱 개선할 수 있음 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 저온 주위조건에 대해 vaporizer의 가열이 요구됨 2. 액상분사에 비해, 기상분사는 연료조절을 위해 기체의 온도 및 압력에 대한 정보가 필요함
다점액상분사 (Multi-point Liquid Port Injection)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 연료액상의 기화로 흡기냉각효과가 있음 2. 현재 전자조절방식에 보다 적합함 3. 실린더간 연료량의 분배가 정확히 이루어짐 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 연료가 모든 공급라인에서 액상을 유지해야함, 열소크로 인한 문제가가능성 있음 2. 상대적으로 고압(17bar) 유지해야 하므로 저장용기에 액상펌프를 넣어야 하며, 여분의 연료를 재순환할 때 저장연료의 온도 및 압력을 상승시킴 3. 적은 연료량으로 고온시동시 인젝터팁에서의 기화문제 해결

배출가스재순환) 기술을 이용하는데 이 방법이 lean-burn 방식에 대한 효과는 표 6과 같이 나타난다. 이것은 혼합기가 희박해 질수록 비에너지 감소로 연소온도가 내려가며 EGR 적용에서는 연소가스중의 CO₂, H₂O으로 구성된 잔류가스의 잠열흡수로 연소온도가 내려가게 되어 NO_x 발생을 억제하며 stoichiometric 연소조건 보다 배기가스 온도를 낮추게 하기 때문이다.

또한 stoichiometric 연소방식에서 배출가스를 획기적으로 저감하기 위해서는 3원촉매기의 효율을 극대화해야 하는데 이것은 공연비의 가변폭이 매우 좁고, 심지어 이 폭에 들어가더라도 HC/CO와 NO_x의 tradeoff 관계가 있기 때문에 산소센서를 이용한 아주 정밀한 공연비의 제어가 필요하며, 공연비를 3원촉매기 조절폭에 들어오도록 조절하기 위해서는 정확한 연료량 및 공

표 5. 대형 가스엔진의 stoichiometric 연소와 lean-burn연소방식의 배기가스 비교

Items		13-Mode results				
Fuel	Engine Type	HC g/kWh	CO g/kWh	NOx g/kWh	PM g/kWh	Efficiency %
LPG	SI stoich.+ 3 way cat.	0.2	0.8	0.8	<0.02	25.8
CNG	SI stoich.+ 3 way cat.	0.6	0.8	0.8	<0.02	26.9
LPG	SI lean burn with cat.	0.2	0.2	2.5	<0.02	27.7
CNG	SI lean burn with cat.	0.6	0.2	2.5	<0.02	29.0
CNG	SI lean burn w/o cat.	2.5	2.0	2.5	<0.02	29.0
Diesel 1993	Turbo-aftercooler Euro I	0.4	1.5	7.8	0.15	34.4
Diesel 1996	Turbo-aftercooler Euro II	0.4	1.5	6.8	0.12	34.4

TNO에서 1990부터 1997년까지 대형엔진에 대해 실험한 데이터들임

표 6. 희박연소와 EGR의 배기가스온도 및 엔진성능 영향

	DI Diesel Engine	Lean-Burn Gas Engine	EGR Dilution Gas Engine
BMEP, bar	14	12	12
Thermal Eff., %	43	38	36
Exhaust Temp., °C	570	550	700

표 7. 엔진의 공연비제어 정도에 따른 촉매기 효율 비교

Transient Air-Fuel ratio Control Accuracy	Transient Cycle Conversion Efficiency (%)					
	NOx		HC		CO	
	Lean Burn	EGR Dilution	Lean Burn	EGR Dilution	Lean Burn	EGR Dilution
	2-way	3-way	2-way	3-way	2-way	3-way
Poor	-	70	55	50	50	30
Fair	-	85	65	65	62	50
Good	-	97	73	75	70	92

기량이 필수적이고 연료분사의 반응성을 빠르게 하기 위해 포트내 다점분사가 바람직하다. 공연비의 조절성능에 따라 3원촉매의 효율은 표 7에서와 같이 많은 차이를 가지며 모드 운전시 촉매 활성화온도 이하인 냉간운전시 변환효율은 매우 낮아지게 된다.

5. 대형 LPG엔진의 설계범위

○ 연소실시스템 및 실린더헤드 - 베이스 직분식 디젤엔진의 연소시스템은 통상deep-bowl형 피스톤과 스윙형 흡기포트를 사용하므로, LPG엔진 변환시 흡기포트형상은 그대로 유지해도 되

고 피스톤의 형상의 개조가 필요하며 압축비와 급속연소를 고려하여야 한다. 따라서 연소실 형상은 노킹을 억제하고 효율을 개선하기 위해 화염전파속도를 극대화하고 화염도달거리를 최소화하도록 설계되어야 한다. 이를 위한 급속연소 방식으로 두 가지 경우가 있을 수 있는데 피스톤보울 근처에서 발생하는 스퀴시유동을 이용해 난류를 생성하는 콤팩트연소실 방식과 피스톤보울 형상을 이용해 벌크유동을 균일하게 깨뜨려서 강한 난류를 생성하는 Nebula 연소실 방식이 있다. Nebula형인 경우 기존의 피스톤테달부분이 가공으로 압축비 11.1:1 까지 개조가 가능하고 실린더헤드의 중앙에 인젝터 위치에 점화플러그

를 장착하고 피스톤의 밸브후퇴깊이는 디젤엔진의 피스톤-밸브의 틈새거리를 유지할 수 있도록 변형하여 dead volume을 최소화해야 한다.

○점화시스템 - 고에너지방전 (CD) 전자점화장치를 사용하여 희박한 영역에서 작동되더라도 적합한 점화능력을 가질 수 있도록 하여야 하며 점화시기는 연료 소비율과 배출가스생성에 중요한 영향을 미치므로 연소의 중앙부분 (50% 연소지점)이 TDC후 약 10도 근방에서 나타나도록 점화시기를 조절하는 것이 바람직하다.

○연료장치 시스템 - 정밀한 공연비와 점화시기의 제어가 배기가스를 감소시키고 효율을 증가시키기 위해서는 필수적이므로 액상다점분사 (LPI) 방식과 같이 진보된 연료시스템을 사용하여야 한다.

○전자조절장치 및 센서장착 - 가스엔진의 기본적인 전자조절방식은 가솔린엔진의 조절방식과 기본적으로는 같고 추가의 연료상태감지센서 (연료온도, 연료압력)가 필요한 수준이다. 희박연소(lean-burn)와 당량비 연소(stoichiometric)의 차이점의 핵심은 센서와 조절알고리즘의 차이로서 희박연소엔진의 핵심적인 조절알고리즘은 NOx를 낮은 수준으로 유지하면서 엔진의 운전안정성을 확보하는 것이다.

○엔진촉매장치 - stoichiometric 연소시스템을 사용하는 경우 EGR을 적용하더라도 당량비는 유지되므로 3원촉매기가 장착되어야 하며, 희박연소방식의 경우 de-NOx 촉매기, 2원촉매기 등이 장착되면 배기가스를 현저히 감소시킬 수 있다.

○흡기시스템 - 연료분사장치와 스토틀의 위치는 성능 및 차량설치 조건을 감안하여 설치하고, 각종 센서가 장착되어야 하며 연료 governor

에 스토틀밸브가 연계 구동되도록 하여야 한다. 희박연소방식의 경우 터보과급기와 인터쿨러의 장착이 요구되며, 이때 개조된 LPG엔진과 추가매칭이 요구되고 자연급기방식의 엔진의 경우 흡기관의 튜닝으로 약 15% 정도의 출력을 개선할 수가 있다.

○냉각시스템 - stoichiometric 연소방식 LPG엔진의 경우 높은 EGR율을 적용하더라도 연소가스의 온도가 상승해 실린더주위 및 배기시스템의 열부하가 증가되기 때문에 고온의 부품들을 효과적으로 냉각시킬 수 있는 추가적인 개선이 요구된다. 대형디젤엔진에서는 냉각수시스템이 실린더블록과 실린더헤드가 별도의 워터자켓으로 구동되고 있으나 냉각수의 용량 및 흐름속도를 증가하더라도 배기가스의 온도를 낮추는데는 큰 효과를 기대하기 어렵다.

○배기시스템 - 배기밸브 및 배기관의 열부하 증가로 인한 파손을 방지하기 위해 재료의 보강 등 추가적인 열부하 대책 시스템이 장착되어야 한다. 통상적으로 주조된 배기 매니폴드에서는 배기가스의 최고온도 조건을 750°C로 정하기 때문에 이보다 높은 고온조건에서는 SUS 및 세라믹코팅 등 추가적인 재료의 보강이 요구될 수 있다.

○밸브 오우버랩 축소 - 디젤엔진에 비해 소기과정중 혼합기의 손실이 HC 배출과 연계되므로 밸브 오우버랩 기간을 줄이도록 해야 한다.

6. 결 론

국내의 LPG차량은 연료의 청정성에 비하여 저공해자동차로 인정받지 못하고 있는 것은 국내 LPG자동차 연료시스템의 낙후성으로 인한 것이므로, 최신기술인 액상다점분사방식(LPI)의 기술을 개발하고 이를 현재 대도시 환경오염의

주범으로 알려진 대형 경유차량을 대체할 수 있는 대형 LPG차량에 적용할 경우, 획기적인 배출가스 저감이 가능하여 LPG연료의 저공해성을 보여줄 수 있는 기회가 될 수 있을 것이다. 그러나 대형 LPG엔진의 개발시 연소실이 대형화해짐에 따른 이상연소현상 문제와 배기가스온도 상승으로 인한 열부하 대응기술 등이 해결해야 할 난제로 남아 있어 많은 연구가 필요한 상태이다. 다행히 최근에 KIMM을 비롯한 국내 관련 연구기관 및 업체들의 LPI기술에 대한 관심이 고조되고 있고, 일부는 이미 국내상용화 개발에 착수하여 개발 중에 있어 3-4년 후에는 국내에서도 우수한 LPI시스템을 적용한 LPG자동차의 출현을 기대할 수 있게 되었다. 아직은 이러한 개발을 위한 분위기가 성숙되어 있지 않음에도 불구하고 저공해 LPG차량 개발에 지원을 아끼지 않은 가스회사측에 감사를 드리고 싶다.

참 고 문 헌

- [1] Automotive LP Gas 3rd Edition, by world LP Gas Association, 1998.
- [2] Speciated hydrocarbon emissions of SI engine during cold start and warm-up, by Toyota Motor Co, SAE 932706, 1993.
- [3] Alternative Fuels for Road Vehicle, by M.L. Poulton, 1994.
- [4] 가스안전, vol.25, 11/12월호, 1999.
- [5] Gaseous Fuels : Past Experiences and Future Expectations by M.van der steen, TNO VM9608, 1996.
- [6] A Comparative Analysis of Greenhouse Effects of Fossil Fuels Examined from the Global Viewpoint from Mining to Combustion, in the Journal of Energy in Japan No. 153 1998. Sep.
- [7] Determination of combustion products from Alternative Fuels Part I : LPG and CNG combustion products by SwRI, SAE 941903, 1993.
- [8] Ultra Low Emissions Vehicle Using LPG Engine Fuel by Renault, SAE 961079, 1996.
- [9] Propane the Clean Fuel of the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicle, by B. Hollemans, TNO VM 9504, 1995.