

분사압력변화에 따른 액체 LPG 분무특성 -디젤분무와의 비교-

임희성* · 박권하**

Liquid LPG Spray Characteristics With Injection Pressure Variation -Comparison with Diesel Spray-

Hee-Sung Lim and Kweon-Ha Park

Key Words: 분무특성(Spray Characteristics), 엘피지(LPG), 디젤(Diesel), 분사압력(Injection Pressure)

Abstract

Liquefied petroleum gas (LPG) has been used as motor fuel due to its low emissions and low cost. The fuel feeding system has been improved with stringent requirement for exhaust emissions. LPG carburetion system was first introduced, then the system has been changed to a precisely controlled gas injection system, but this gas feeding system has a limitation on improving power output. In order to improve an engine performance, a multi-point port injection system was introduced recently, and a liquid direct injection system into a cylinder was suggested as a next generation system to maximize a fuel economy as well as a power. This study addresses the analysis of the LPG spray from diesel injectors. The spray images are visualized and compared with diesel sprays in a wide injection pressure range. The photographs show much wider dispersion of LPG sprays.

1. 서론

LPG는 70여년 동안 차량의 연료로서 사용되고 있다. 처음 도입되었던 기화기

시스템은 효율의 증가를 위한 전자시스템을 도입하여 연료공급을 제어하게 되었고 근래에 들어서는 더욱 정교한 제어를 위하여 가스분사시스템이 적용되고 있다. 하지만 가스를 공급하는 시스템으로는 연비의 향상, 배기의 저감 및 고부하 영역에서의 출력저하를 개선하는 데에 한계가 있다. 따라서 LPG를 액체로 분사하여 연소실에 공급하는 시스템이

* 한국해양대학교 기계공학과 대학원

** 한국해양대학교 기계공학부

제안되고 있는데, 흡기포트에 분사하는 형식과 연소실내에 직접분사하는 형식으로 구별된다. 포트분사식 MPI시스템은 LPG엔진에서 상용화되어 보급이 확대되고 있다. 실린더내에 액체LPG를 직접분사하는 시스템은 지구온난화와 관련하여 특히 강조되고있는 이산화탄소 배출의 감소를 위하여 미래의 기술로서 제시되고 있다.

가솔린 기관을 LPG로 전환했을 경우의 특성에 대하여, Lowi Jr. 등⁽¹⁾은 주요 배기배출물인 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물 및 이산화탄소가 가솔린기관에 비하여 20~60% 정도 감소함을 보여 주었으며 탄화수소인 경우에는 CNG 보다 좋은 대체연료는 견해도 있다. Hollemans⁽²⁾는 LPG는 저온 시동시에 특히 효과가 있다고 말하고 있으며, 이 외에도 많은 연구들⁽³⁻⁹⁾은 이와 유사하게 배기저감의 효과를 보여주고 있는데, LPG를 증발시켜 가스의 상태로 공급하는 시스템에서는 출력저하를 가장 큰 문제점으로 지적하고 있다⁽⁷⁾.

디젤기관에 대한 성능비교를 조사한 Rushmoor Borough 의회의 결과⁽¹⁰⁾에 의하면 CO는 비슷한 수준이지만 다른 배출물은 매우 감소됨을 알 수 있으며 특히 NOx는 80%, 입자상물질의 배출은 100% 감소된다고 보고하고 있다. 유사한 연구로서 홍콩의 환경사무국⁽¹¹⁾에서는 디젤기관과 비교하여 95%까지 NOx의 저감을 예측하고 있다.

한편 액체분사에 대한 연구들을 살펴보면, Sierens⁽¹²⁾은 실험과 이론적인 연구에 의하여 MPI액체분사 시스템을 개발하였는데, 증발식 LPG엔진에서는 15% 정도의 출력저하를 나타내는 반면 액체분사시스템에서는 가솔린과 거의 유사한 출력을 유지함을 보였으며 연료소모량

및 배기의 감소도 가져왔다.

실린더내에 LPG를 직접분사하는 연구는 가솔린 직접분사식과 같은 형식의 액체 LPG 직분식에 관한 연구^(13,14)와 디젤분사와 같은 형식의 연구⁽¹⁵⁾로 구분되며 미래의 기술로서 제시되고 있다.

이상의 연구를 종합하면 Poulton⁽¹⁶⁾에 의해 정리된 것과 같이, LPG연료는 경제적이며 청정한 연료이고 탄소퇴적이 없어서 엔진수명을 향상시킨다. 또한 저온 시동시의 배기저감에 특히 효과적이며 관심이 점점 증가되고있는 지구온난화 가스인 이산화탄소의 배출을 감소시키는 연료로서 기술개발이 요구된다.

본 연구에서는 실린더 내에 액체LPG를 분사하는 기술개발을 위하여 요구되는 LPG분무의 특성을 파악하기 위하여, LPG 분무를 디젤분무와 비교 평가하고자 한다.

2. 실험장치의 구성 및 실험조건

LPG 연료의 액체분무와 디젤분무를 가시화하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 구성한다. 디젤유는 대기상태에서 액체이지만 LPG는 기화하기 때문에 가압된 봄베를 사용하며, 각각으로부터 압축펌프로 연결되는 라인에는 밸브를 장착하여 차단할 수 있도록 한다. 액체로 공급된 연료는 최대 2000kg/cm²까지 압축할 수 있는 고압 하스켈펌프에 의하여 압축된다. 이 펌프의 구동은 압축공기에 의하여 구동되며 그 양을 조절함으로써 연료의 압력을 조절한다. 압축된 연료는 압력탱크에 저장된 후 전자밸브를 통하여 분사기로 공급된다. 밸브의 열림시간을 시간제어보드에서 제어함으로써 분사의 기간을 조절한다. 본 실험에서는 연속분무의 특성을 살펴보기 위하여 DC

45V 전압을 3초간 전자밸브에 공급하여 연속 분무를 가시화한다. 광원과 카메라는 동시제어 되는데, 광원은 출력1.5J, 펄스기간 50nsec의 스파크형 스트로보이며 이미지는 768× 484 CCD 카메라와 프레임그래버를 사용하여 가시화한다.

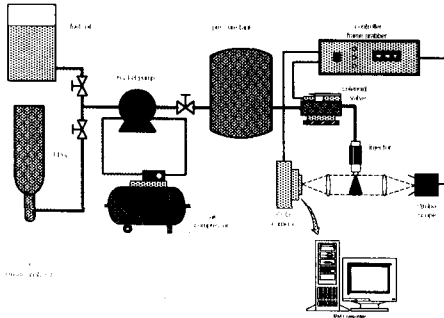


Fig. 1 Experimental setup

실험조건은 Table 1과 같이 주어진다. LPG와 디젤유를 각각 공급하며 분사기의 노즐홀 직경크기는 0.22mm, 0.30mm 두 가지이며, 분사압력을 50에서 500kg/cm²까지 변화시키면서 실험한다.

Table 1 Test cases

Fuel	noz. hole dia. (mm)	Nozzle type	Rail pressure (kg/cm ²)
LPG	0.22	Single hole	50, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500
	0.30		
Diesel	0.22		
	0.30		

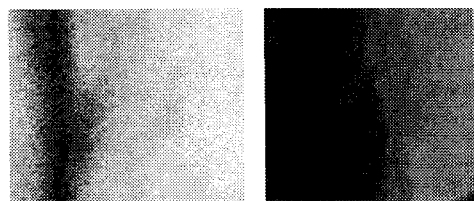
3. 결과 및 고찰

Fig. 3 (a), (b), (c), (d)는 각각 LPG와 디젤분사의 0.22mm, 0.30mm 분공경에서

의 분무형상을 나타낸다. 디젤분무는 폭 방향의 확산정도가 느려서 150mm하방까지 가시화를 하며 LPG는 75mm까지만 가시화 한다. Table 2 및 Fig. 4, Fig. 5는 모든 경우에서의 분무각을 보여주는 데, 모든 경우에 있어서 LPG분무의 확산정도가 월등함을 보여주며 특히 저압분사인 경우에 더욱 큰 차이를 나타낸다.

3.1. 분사압력증가에 따른 디젤분무

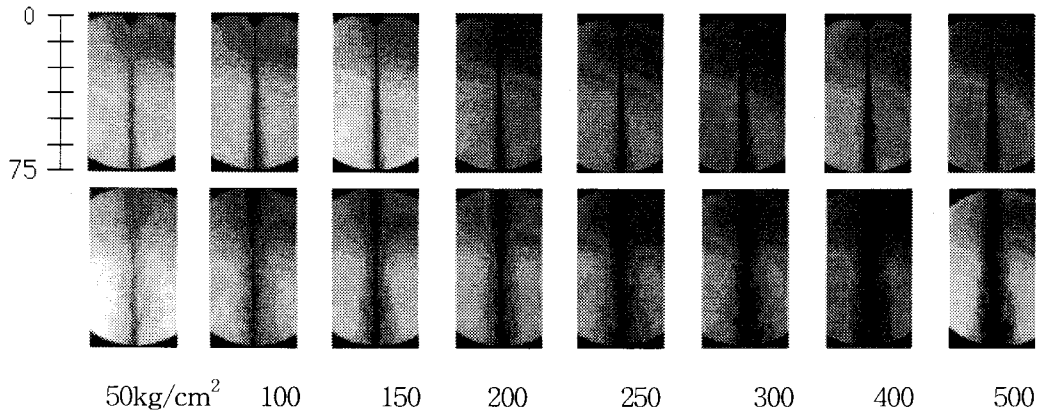
0.22mm 분공경에서 분사속도가 느린 50kg/cm² 분사압의 경우에는 분사된 디젤액적의 느린 진행을 보여주는데 분무액주의 거동이 다소 흔들거리는 모양을 나타낸다. 한편 압력이 증가하여 500kg/cm²가 되면 분사직후부터 곧장 아래로 진행하는 분무를 보여주며 노즐로부터 150mm 아래에까지 아직 미립화되지 못한 액주의 진행이 선명하게 보여진다(Fig. 2). Table 2에서 보여주는 것처럼 분무 퍼짐의 정도를 나타내는 분무각은 고압영역을 제외하면 분사압력의 증가에 큰영향이 없음을 보여준다.



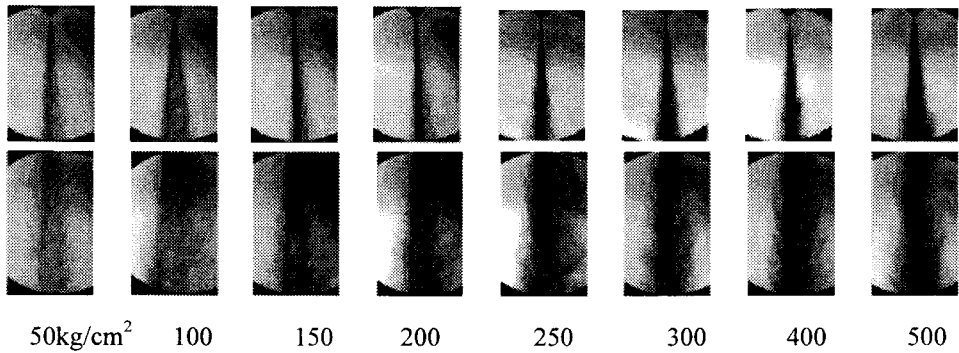
(a) 50kg/cm² (b) 500kg/cm²

Fig. 2 Comparison of diesel sprays around 140mm from injector

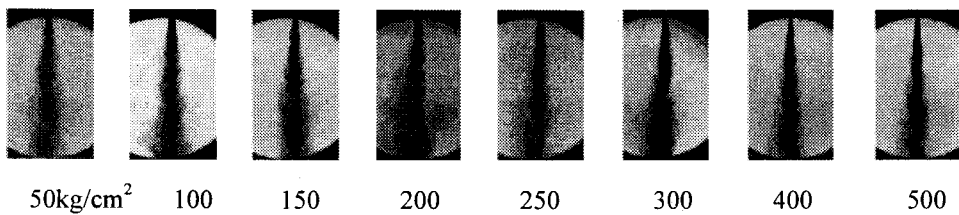
0.30mm 분공경의 경우에도 0.22mm인 경우와 유사한 현상을 나타내지만 분무의 폭이 분공면적의 증가 정도로 증가되는 것을 알 수 있다. 즉 0.22mm에서는 분사각이 4~5° 정도인 반면 0.30mm에서는 8~11°의 분포를 나타낸다. 압력



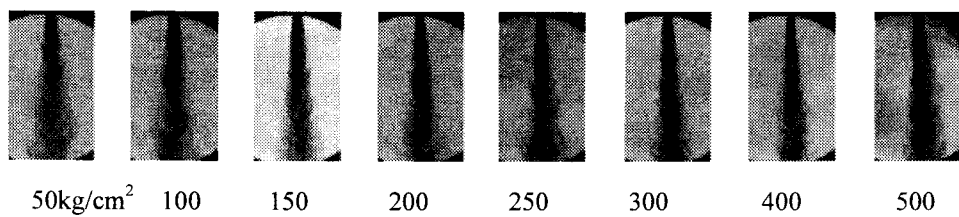
(a) 0.22mm nozzle hole diameter diesel injection



(b) 0.30mm nozzle hole diameter diesel injection



(c) 0.22mm nozzle hole diameter LPG injection



(d) 0.30mm nozzle hole diameter LPG injection

Fig. 3 Spray shapes with injection pressure variation

Table 2

Injection angles with test conditions

	Measuring Position from nozzle tip(mm)	Nozzle hole dia. (mm)	Rail Pressure(kg/cm ²)							
			50	100	150	200	250	300	400	500
Diesel	35	0.22	4	5	5	4	5	5	6	7
		0.3	9	11	8	8	8	10	10	11
	70	0.22	13	14	13	13	13	14	14	14
		0.3	15	17	18	18	19	19	19	20
LPG	35	0.22	22	22	20	18	17	13	11	9
		0.3	26	26	22	20	18	17	15	12
	70	0.22	23	23	20	22	21	20	19	19
		0.3	24	23	21	24	23	23	20	20

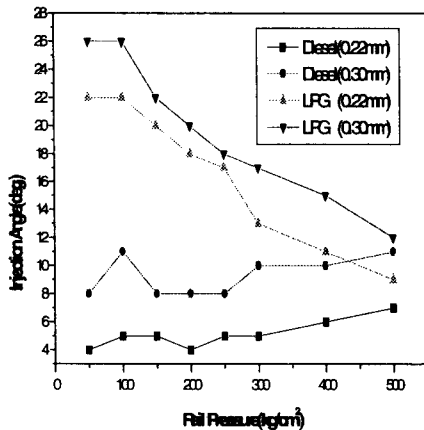


Fig. 4 Injection angles measured at 35mm from the nozzle tip

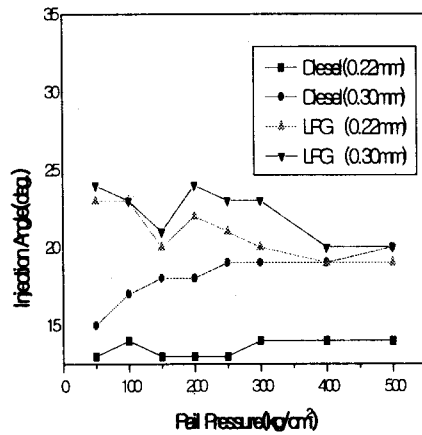


Fig. 5 Injection angles measured at 70mm from the nozzle tip

변화에 따라 분사각이 크게 변화하지는 않지만 분사압력 100kg/cm^2 에서 기하학적 관계로 갑자기 증가한 것을 제외하면 압력의 증가와 더불어 증가함을 보여준다.

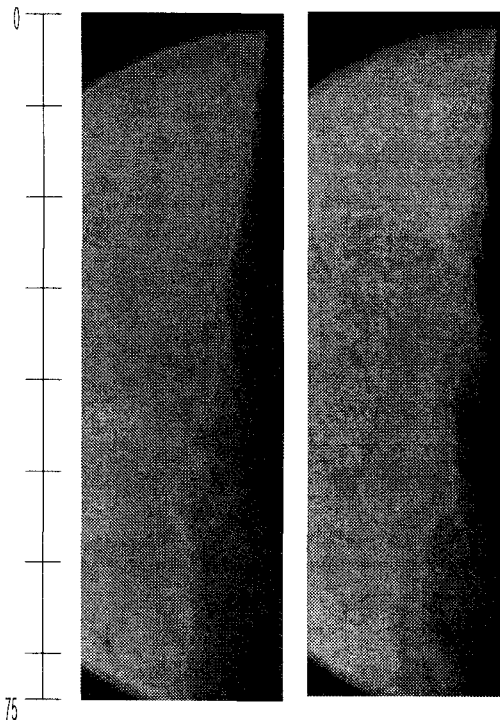
3.2. 분사압력증가에 따른 LPG분무

LPG 분무의 경우에는 디젤분무의 특성과 많은 차이점을 보여준다. 압력이 낮은 50kg/cm^2 에서는 분사직후인 노즐선단에서부터 분무의 확산이 활발히 진행되며 아래로 분무가 진행되면서 더욱더 주위로 퍼져나감을 알 수 있다. 분사압력이 증가되면 분사직후에 분무의 퍼짐이 감소하면서 빠르게 아래로 진행하는 것을 보이지만 40mm 이상 진행되면 저압 분사와 유사한 정도까지 폭방향의 확산이 이루어짐을 알 수 있다(Fig. 4,5,6).

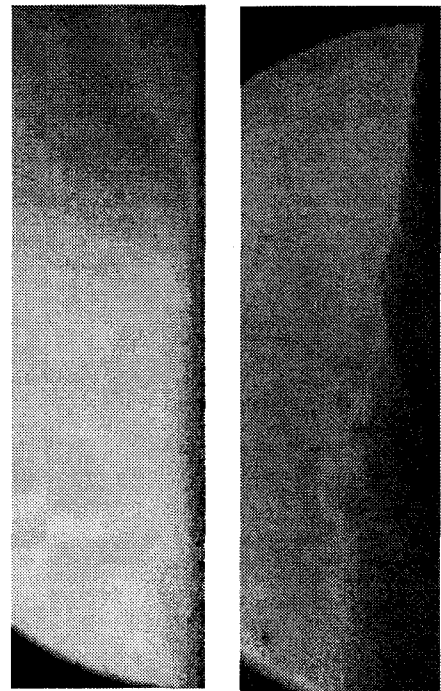
분공크기의 영향은 디젤의 분사에서처럼 분공의 증가와 함께 분사각의 증가를 보여주지만 그 정도가 매우 적다.

3.3. 디젤과 LPG분무의 비교

낮은 압력인 50kg/cm^2 인 경우는 직접 분사식 가솔린엔진의 분사압력과 유사한 분사압력으로 디젤분사기에서의 결과이지만 가솔린타입의 직분식LPG 기관의 설계에서도 참조할 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 7에서 보여주는 것처럼 분무의 퍼짐 정도가 분사각으로 생각할 때 5 배이상 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 축방향 즉 분사방향으로의 분무거동을 위한 모멘텀의 감소가 예상된다. 즉 LPG의 경우 분사속도보다는 연소실내의 공기유동에 더욱더 민감한 반응을 보일 것으로 생각된다.



(a) 50kg/cm^2 (b) 500kg/cm^2
Fig. 6 Comparison of sprays



(a) Diesel (b) LPG
Fig. 7 Comparison of sprays (50kg/cm^2)

압력의 증가에 대한 영향은 디젤의 경우에는 매우 명확하게 나타나는 반면 LPG에서는 많이 둔감한 것을 알 수 있는데, $500\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서의 디젤분무는 분사축 중심에 두터운 액주를 형성하면서 150mm 이상 분무가 거동함을 나타내는 반면 LPG에서는 분공으로부터 40mm 정도까지 빠르게 진행된 후에 주위공기와 혼합되면서 신속하게 확산되는 것을 알 수 있다. 분공경의 증가에 대해서는 디젤분무의 경우 분공면적의 증가분 정도로 분사각이 증가되는 것을 보여준 반면 LPG에서는 초기분무 영역을 제외하면 매우 유사한 정도의 확산현상을 보여 준다.

이상의 비교된 결과를 저압의 경우 직접분사식가솔린엔진의 설계측면에서, 고압의 경우 소형고속디젤엔진의 설계측면에서 고찰함이 필요하다. 직분식가솔린기관에서는 분사된 액적들의 분사속도가 중요한 인자가 되며 주위공기의 유동과 함께 연소실내에서 분무의 거동을 결정하기 때문에 분사기의 위치를 고려하여 점화플러그의 위치를 결정하게 된다. LPG의 경우에는 증발점이 150°C 정도인 가솔린보다 매우 낮은 -50°C 정도로 분사직 후에 대부분의 연료가 증발함으로써 분사관성력에 의한 분무의 거동효과가 매우 약화되며 오히려 주위공기의 유동에 의한 영향이 커질 것으로 생각됨으로 연소실내의 유동형성에 있어서 가솔린에서 보다 더욱 정교한 설계가 예상된다.

소형고속디젤기관의 경우에는 디젤분무의 미립화와 기화의 한계 때문에 연소실 설계의 어려움이 있다. 즉, 연소실이 소형화 되면서 분사된 연료의 자유분무 길이가 줄어들고 연소실벽면에 쉽게 충돌하여 유막을 형성하기 때문에 이를 방지하기 위하여 스윙유동을 강화하고 분

사기를 연소실 중앙에 위치시키며 분공 크기를 줄이면서 고압분사를 수행하여야 한다⁽¹⁷⁾. 이를 감안하면 LPG의 경우에는 고압분사를 수행하는 경우에도 디젤분사와 같은 분사축 부근에 액주가 형성되지 않기 때문에, 분사된 LPG연료가 액체의 상태로 벽면에 충돌하는 것을 피할 수 있으며 충돌하는 경우에도 빠르게 증발되어 연소실내로 확산되기 때문에 고압 LPG 액체분사 시스템은 고속소형의 연소실에도 적합할 것으로 생각된다.

4. 결론

이상의 압력변화에 따른 LPG분무와 디젤분무의 비교결과는 다음과 같이 정리된다.

■ 디젤분무의 경우는 분사압력의 증가에 따라 분무축 주위에 두터운 액주를 형성하면서 곧장 아래로 진행한다.

■ LPG에서는 분사압력의 변화가 초기분무의 진행에는 영향을 주지만 40mm 이상 진행된 후에는 크게 영향을 미치지 않는다.

■ 분공의 크기가 증가하면 디젤분무의 경우 분사각이 크게 증가하지만 LPG에서는 큰 영향이 없다.

■ 모든 분사압력 및 분공의 크기에서 LPG는 디젤에 비하여 확산의 정도가 매우 크며 분사방향으로의 진행은 둔화되는 것을 보여준다.

■ $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도의 낮은 압력에서 연소실에 LPG를 직접분사하는 연소실은 분사된 분무연료가 주위 유동에 매우 민감감하기 때문에 연료가 점화플러그 근처에 모일 수 있도록 적절한 내부유동형성을 위한 정교한 설계가 요구된다.

■ 고속소형직분식 연소실에 LPG를

적용하는 경우, LPG의 신속한 증발특성에 의하여 액적의 실린더 벽면충돌 현상을 피할 수 있음으로 연소실을 설계하는데 있어서 디젤분사의 경우보다 쉽게 접근할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) A. Lowi Jr. and W.P.L. Carter, "A Method for evaluating the atmospheric ozone impact of actual vehicle emissions", SAE paper 900710, 1990.
- (2) B. Hollemans, Technical Reference Paper, TNO Road Vehicle Research Institute, 1999.
- (3) E. Bass, B. Bailey and S. Jaeger, "LPG conversion and HC emissions speciation of a light-duty vehicle", SAE paper 932745, 1993.
- (4) M. DeLuchi, Greenhouse gas emissions from LPG, Gasoline, Diesel fuel, Methanol, CNG and electric vehicle, R.F. Webb Corp., 1990.
- (5) R. Klausmeier, Assessment of environmental, health and safety issues related to the use of alternative transportation fuels, Gas Research Institute, 1989.
- (6) R.F. Webb and P.J. Delmas, "New perspectives on auto propane as a mass-scale motor vehicle fuel", SAE paper 911667, 1991.
- (7) A. Gerini, G. Monnier and R. Bonetto, "Ultra low emissions vehicle using LPG engine fuel", SAE paper 961079, 1996.
- (9) M.E. Payne, J.S. Segal and M. Newkirk, "Use of butane as an alternative fuel emissions from a conversion vehicle using various blends", SAE paper 952496, 1995.
- (10) Cleaner fuel conversion of leased cars to run on liquid propane, Rushmoor Borough Council, UK, 1998.
- (11) A proposal to introduce LPG taxis, Planning, Environment and Lands Bureau, HK, 1999.
- (12) R. Sierens, "An experimental and theoretical study of liquid LPG injection", SAE paper 922363, 1992.
- (13) 서희준, 오승묵, 정용일, 배충식, "연소모사장치를 이용한 LPG 직접분사식 엔진 연소특성 연구", '99춘계자동차공학회논문집 pp3-8, 1999.
- (14) 조규백, 정동수, "직접분사식기관 적용을 위한 LPG연료의 실린더내 분무특성에 관한 연구", '99춘계자동차공학회논문집 pp76-81, 1999.
- (15) H. Fusimoto, Y. Iwami and J. Senda, "Atomization characteristics of liquefied n-Butane spray with flash boiling phenomena", Pro. of ICLASS-97 Seoul, 1997.
- (16) M.L. Poulton, Alternative Fuels for Road Vehicles, Computational Mechanics Publications, UK & USA, 1994.
- (17) J. Bierbaumer, R. Cichocki and W. Ospelt, "CO2 emission reduction - the contribution of modern HSDI engines", 5th Eng. Workshop, SAE Korea, 1998.