

고압 LPG/디젤연료의 분무특성 비교

임희성* · 박권하**

(한국해양대학교)

Comparison of LPG/Diesel Sprays in High Pressure Injection System

Hee Sung Lim* , Kweonha Park**

(Korea Maritime University)

Abstract : LPG gains many advantages of a high octane number, low emissions and low cost over conventional fuel. The fuel has been naturally used in engines to save running cost, but the first generation fuel feeding system was not satisfied with stringent requirement for exhaust emissions. A liquid direct injection system into a cylinder has been suggested as a next generation system to maximize a fuel economy as well as to reduce emissions. In this paper LPG sprays are compared with diesel sprays in a high pressured surrounding condition in order to understand the high pressure spray characteristics.. The spray images show that LPG spray penetrates further soon after the injection, then the sprays stays in a distant. It may explain the flashing effect of LPG.

Key Words : Spray Characteristics(분무특성), LPG(액화석유가스), Diesel(디젤), High Pressure Injection(고압분사)

1. 서론

가솔린과 디젤을 연료로 사용하는 대부분의 동력원은 강화되고 있는 배기규제와 함께 환경 친화적인 기술의 개발이

요구되고 있다. 70여년 동안 차량의 연료로서 사용되고 있는 LPG연료는 현재 사용하고 있는 기관을 크게 개조하지 않고도 배기를 저감할 수 있는 대체연료기술로써 받아들여지고 있다. 증발혼합기를 이용한 기존 시스템의 효율과 출력의 향상을 위하여 연료공급을 전자제어하게 되었고 근래에 들어서는 더욱 정교한 제어를 위하여 가스분사시스템이 적용되고

* 한국해양대학교 기계공학과 대학원

** 한국해양대학교 기계정보공학부

있다. 하지만 가스를 공급하는 시스템으로는 연비의 향상, 배기의 저감 및 고부하 영역에서의 출력저하를 개선하는 데에 한계가 있다. 따라서 LPG를 액체로 분사하는 시스템이 제안되고 있는데, 흡기포트에 분사하는 형식과 연소실내에 직접분사하는 형식으로 구별된다. 포트분사식 LPG-MPI시스템은 상용화되어 보급이 확대되고 있다. 실린더내에 액체 LPG를 직접분사하는 시스템은 아직 기초적인 연구가 진행되고 있는 상황이지만 지구온난화가스인 이산화탄소 배출의 감소를 위한 미래기술로서 제시되고 있다.

LPG 분사의 특성은 디젤이나 가솔린의 분사특성과 크게 구별되는 데, 보통 압력의 분위기에서 급속히 증발하는 특성을 가지고 있기 때문이다. Brown과 York⁽¹⁾는 분사LPG의 미립화에서의 급속 증발(flushing)을 관찰하였고 Kitamura 등⁽²⁾과 Wildgen과 Straub⁽³⁾는 분사노즐에서의 비등현상을 발표하였다.

가솔린 기관을 LPG로 전환했을 경우의 특성에 대하여, Lowi Jr. 등⁽⁴⁾은 주요 배기배출물인 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물 및 이산화탄소가 가솔린기관에 비하여 20~60% 정도 감소함을 보여 주었다. Hollemans⁽⁵⁾는 LPG는 저온시동시에 특히 효과가 있다고 말하고 있으며, 이 외에도 많은 연구들⁽⁶⁻¹¹⁾은 이와 유사하게 배기저감의 효과를 보여주고 있는데, LPG를 증발시켜 가스의 상태로 공급하는 시스템에서는 출력저하를 가장 큰 문제점으로 지적하고 있다⁽¹⁰⁾.

디젤기관에 대한 성능비교를 조사한 Rushmoor Borough 의회의 결과⁽¹²⁾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⁽¹³⁾에서는 디젤기관과 비교하여 95%까지 NOx의 저감을 예측하고 있다.

한편 액체분사에 대한 연구들을 살펴보면, Sierens⁽¹⁴⁾은 실험과 이론적인 연구에 의하여 MPI액체분사 시스템을 개발하였는데, 증발식 LPG엔진에서는 15% 정도의 출력저하를 나타내는 반면 액체분사시스템에서는 가솔린과 거의 유사한 출력을 유지함하면서 연료소모량 및 배기의 감소를 가져왔다.

실린더내에 LPG를 직접분사하는 연구는 가솔린 직접분사식과 같은 형식의 액체 LPG 직분식에 관한 연구^(15,16)와 디젤분사와 같은 형식의 연구⁽¹⁷⁾로 구분되며 미래의 기술로서 제시되고 있다.

이상의 연구를 종합하면 Poulton⁽¹⁸⁾에 의하여 정리된 것과 같이, LPG연료는 경제적이며 청정한 연료이고 탄소퇴적이 없어서 엔진수명을 향상시킨다. 또한 저온시동시의 배기저감에 특히 효과적이며 관심이 점점 증가되고있는 지구온난화가스인 이산화탄소의 배출을 감소시키는 연료로서 기술개발이 요구된다.

본 연구에서는 직접분사식 고압액체 LPG를 디젤기관의 연소실에서 적용하기 위한 기초자료확보를 위하여 고압분사압력에서의 분무특성을 파악하고자 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 장

착하여 차단할 수 있도록 한다. 액체로 공급된 연료는 최대 200MPa까지 압축할 수 있는 고압 하스켈 펌프에 의하여 압축된다. 이 펌프의 구동은 압축공기에 의하여 구동되며 그 양을 조절함으로써

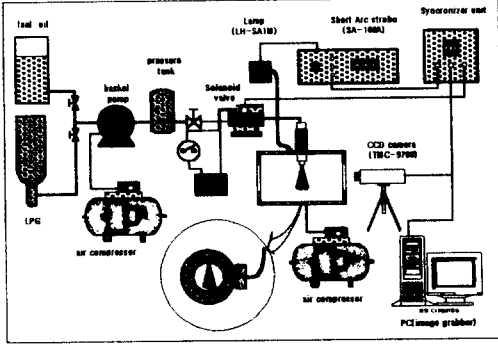


Fig.1 Experimental setup

연료의 압력을 조절한다. 압축된 연료는 압력탱크에 저장된 후 전자밸브를 통하여 분사기로 공급된다. 본 실험에서는 분무의 특성을 살펴보기 위하여 DC 45V 전압을 전자밸브에 공급하여 밸브를 개방한다. 근접센서로 감지된 밸브의 움직임 신호를 받아드린 동기장치(synchronizer)에서는 원하는 시간 지연 후 광원과 카메라에 신호를 보냄으로써 분무거동을 시간별로 가시화한다. 광원은 출력 1~1.6J/F, 광원 주파수 범위는 0~60Hz, 광원 발광시간은 18~23 μ s에서 작동하는 Short Arc Strobe (SA-100A)와 Lamp(LH-SA1M)를 사용한다. 원통형 렌즈에 의하여 만들어진 sheet beam을 분무 중심을 통과하도록 측면 가시화창을 통하여 비춘다. 이때 발생한 산란광을 셔터속도가 1/60~1/16,000sec이고 768(H) \times 484(V)인 PULNiX의 TMC-970 CCD 카메라를 사용하여 가시화한다.

실험조건은 Table 1과 같이 주어진다.

Table 1 Test cases

Fuel	noz. hole dia. (mm)	Nozzle type	Rail pressure (MPa)
LPG	0.22	Single hole	15, 25, 50, 75, 100, 150
Diesel	0.22		15, 25, 50, 75, 100

LPG와 디젤유를 각각 공급하며 분사기의 노즐홀 직경크기는 0.22mm이다. 분사압력을 디젤은 15MPa에서 150MPa까지, LPG는 15MPa에서 100MPa까지 변화시키며 분위기 압력은 0.9MPa로 유지한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 디젤 분무 특성

Fig.2는 분사압력(rail pressure)이 15MPa~150MPa까지 변화할 때 분무 관통거리 (90mm)까지의 분무 진행을 0.2ms 간격으로 가시화한 결과를 보여주고 있다. 분사압력이 15MPa인 경우 90mm까지 진행하는데 많은 시간이 소요되고 있음을 보여 주는데, 분사 시작 직후 물방울 모양으로 노즐선단에 모여 있던 분무가 빠른 속도로 분사되는 이후 분무에 의하여 아래로 밀려 내려감을 보여주며 계속되는 더 빠른 속도의 분무 액적들이 분무를 아래로 진행시킨다. 이후 분무진행이 둔화되고 안정된 분무형태를 유지하게 된다. 이는 분무 액적들과 정지하고 있던 주위공기유동과의 상호작용에 의한 결과라고 보여진다. 분사

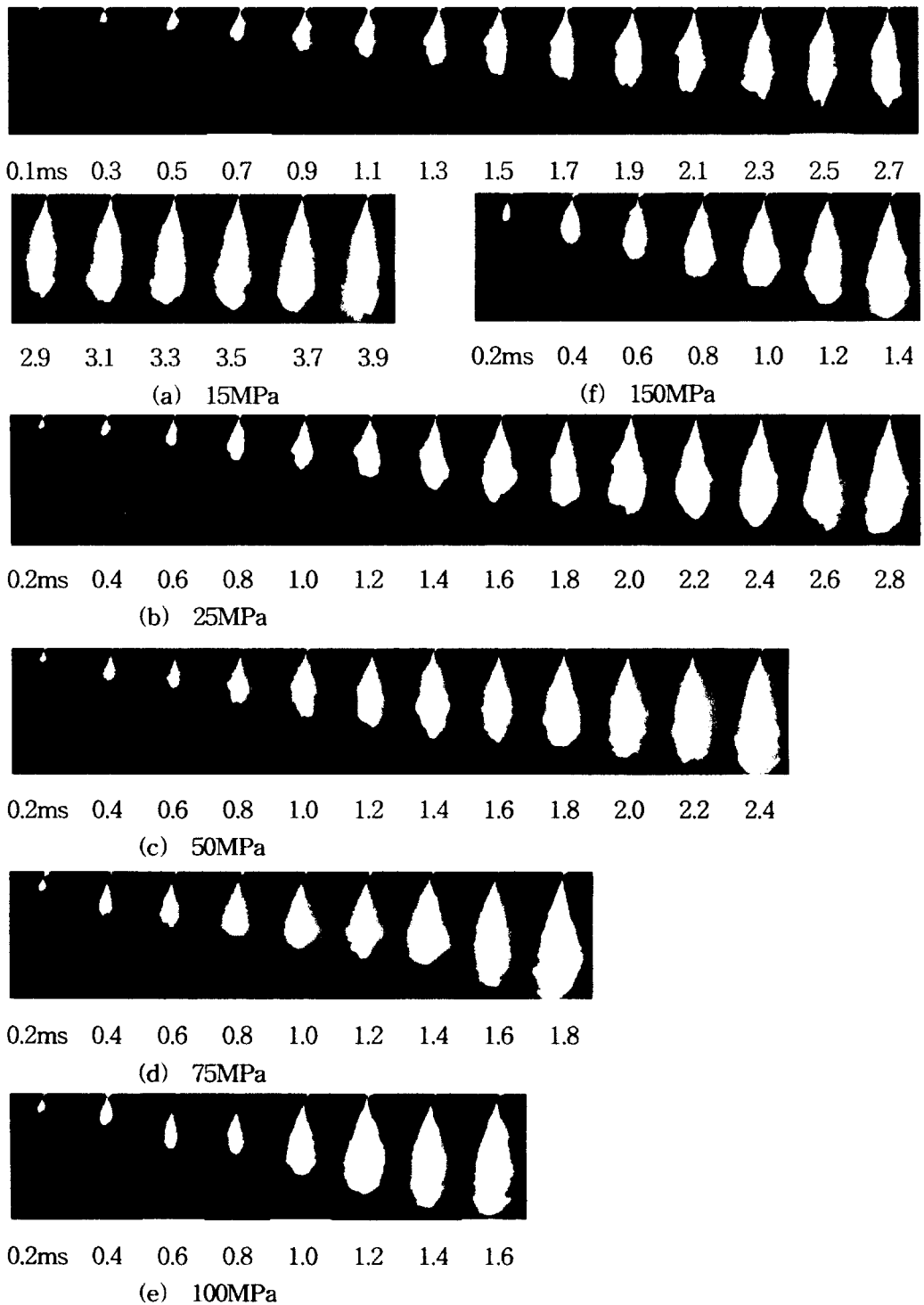


Fig.2 Diesel Spray developments with injection pressure variation

빨라 압력이 증가하면 비례하여 분무의 진행이 짐을 알 수 있는데, 초기에 큰 저항을 받는 초기 분무 액적들의 느린 거동과 이후 고속 분무 액적들의 거동이 분리되는 것을 보여준다. 전반적으로 압력의 증가는 주위공기와의 저항증가에 의하여 더욱 넓은 분무 분포를 나타낸다. 특히 Fig.3에서 보여주는 것처럼 분무진행거리 90mm에서의 분무형태, 즉 연소실 벽면 근처의 분무형태를 보면 분사압력 15MPa과 150MPa이 매우 다른 것을 알 수 있다. 고압분사에서는 고속으로 분출되는 분무 유동이 주위공기 유동을 활성화시키고 특히 벽면 부근에서는 매우 강한 와유동을 발생시킴으로써 분무선단의 좌우로 분무액적들을 분산시키고 있다.. 이는 고압분사의 벽면 충돌 현상은 액적들의 퇴적현상보다 유동의 활성화에 의한 액적 확산효과가 더욱 강화될 것이라는 것을 보여준다.



(a) 15MPa (b)150MPa

Fig.3 Comparison of diesel sprays near wall

Fig.4와 Fig.5는 디젤분무진행거리와 분무폭의 변화를 분사후 시간의 축으로 최대거리 90mm까지를 측정하여 나타내고 있다. 분무 진행거리의 경우 분사압력 15MPa에서는 4.0ms까지 지속되고 있는 반면 150MPa의 경우에는 1.4ms에 벌써 90mm를 지나고 있음을 알 수 있다. 분사 압력의 증가와 함께 분무진행거리가

증가됨을 보여주며 시간의 흐름에 따라 더욱 큰 차이를 나타내고 있다. 분무폭의 변화 역시 압력의 증가와 함께 증가됨을 알 수 있지만 압력이 증가하면서 다소 압력증가에 비례하지 않는 구간들이 나타남을 보여준다. 전체적인 분무 퍼짐의 정도가 분사압력에 따라 크게 증가됨을 알 수 있는데 이는 분사 속도증가에 의한 운동량의 증가와 주위 공기 유동활성화에 의한 확산의 결과로 생각된다.

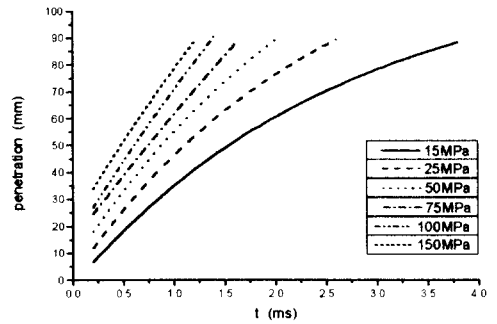


Fig.4 Diesel spray penetration with time from injection start

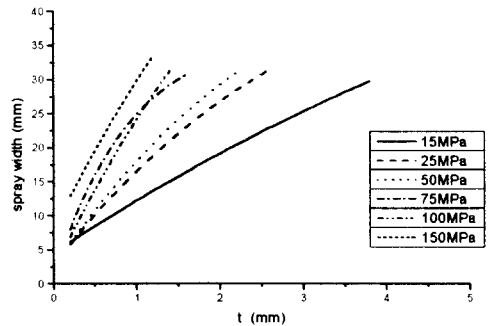


Fig. 5 Diesel spray width with time from injection start

3.2 LPG 분무 특성

분사압력의 변화와 분사 시간에 따라 변

화하는 LPG 분무 사진을 Fig.6에서 보여준다. 디젤 분사의 경우와 같이 압력 증가와 함께 빠른 분무 진행을 보여주는 데 초기 분무가 노즐 팁부근에 모여 있는 형상을 보이지 않고 있으며 분무 진행거리가 어느 정도에 이르면 거의 유사한 거리에서 더 이상 진행하지 않고 정체되어 있는 것을 알 수 있다. 디젤과 비교할 때 압력의 증가가 분무 전체 형태에 크게 영향을 주지 않는다는 것을 보여준다. Fig.7과 Fig.8은 LPG 분무의 진행 거리와 폭변화를 나타내고 있는데 디젤의 경우 계속적으로 분무가 진행됨을 보여주는 반면 LPG의 경우 분사 압력의 증가와 함께 어느 정도 분무 진행

후(15MPa에서는 75mm, 25MPa은 80mm, 50MPa은 90mm 정도)에는 더 이상 분무가 진행하지 않는다는 것을 알 수 있는데 이는 분무증발이 빠른 LPG 특성 때문인 것으로 판단된다. 분무 폭의 경우에는 압력이 가장 낮은 15MPa을 제외하면 대부분 퍼짐의 정도가 혼조세를 나타나는 것을 알 수 있다.

3.3 디젤/LPG 분무 특성 비교

디젤과 LPG의 특성을 비교하기 위하여 분사압력 15MPa과 150MPa에서 디젤과 LPG 분무거리, 초기 분무형상 및 90mm 진행시의 분무형상을 Fig.9~Fig.12에 나타낸다. 분사 초기의 분무형상을 보면 디젤의 경우 압력이 증가하면 그만큼 넓게 퍼지면서 진행되는 반면 LPG의 경우에는 크게 변화하지 않음을 보여준다. 또 LPG의 경우 퍼짐의 정도가 디젤에 비해 매우 작음을 알 수 있으며 동시에 Fig.9에서 보여주는 것처럼 초기 분무 진행거리가 매우 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 LPG 고유의 급속증발 특성에 기인한 것으로 노즐 출구에서 급격히 압력이 낮아질 때 LPG가 급속팽창하면서 정적실 내로 밀려나오는 영향으로 생각된다. 이 현상은 분사압력이 증가하면서 둔화됨을 보여준다. 분무가 90mm 진행된 Fig.12의 사진으로부터 알 수 있는 것은, LPG의 경우 분무의 선단 부위에는 많은 연료들이 증발되고 희박한 액적 분포를 보여준다. 압력이 낮은 15MPa에서는 이 현상이 더욱 뚜렷하게 나타난다.

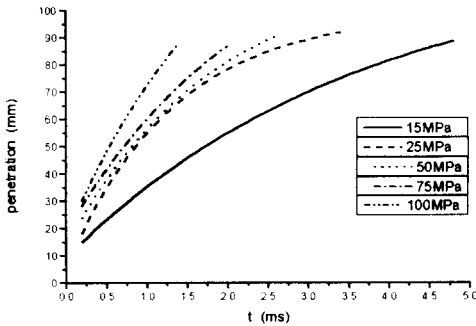


Fig.7 LPG spray penetration with time from injection start

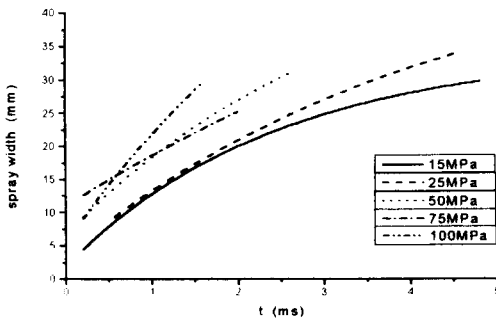


Fig.8 LPG spray penetration with time from injection start



0.1ms 0.3 0.5 0.7 0.9 1.1 1.3 1.5 1.7 1.9 2.1 2.3 2.5 2.7



2.9 3.1 3.3 3.5 3.7 3.9 4.1 4.3 4.5 4.7 4.9

(a) 15MPa



0.2ms 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8



3.0 3.2 3.4 3.6

(b) 25MPa



0.2ms 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8

(e) 100MPa



0.2ms 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8

(c) 50MPa



0.2ms 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 2.0 2.2

(d) 75MPa

Fig.6 LPG Spray developments with injection pressure variation

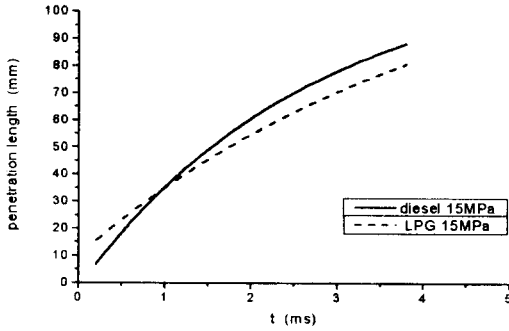


Fig.9 Comparison of diesel/LPG spray penetration at rail pressure 15MPa

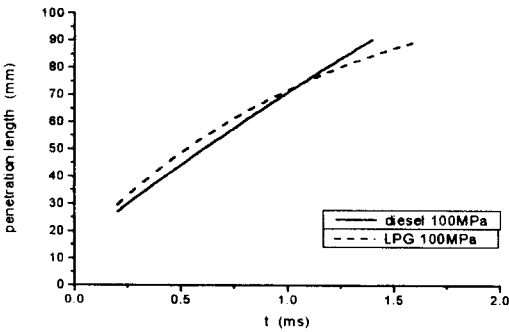


Fig.10 Comparison of diesel/LPG spray penetration at rail pressure 100MPa



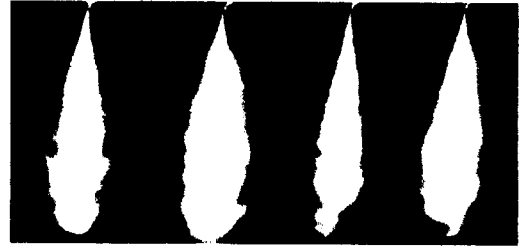
(a) (b) (c) (d)

Fig.11 Spray comparison at about 20mm length

(a) Diesel 15MPa, (b) Diesel 100MPa
(c) LPG 15MPa (d) LPG 100MPa

4. 결론

디젤/LPG 분무에 대한 분사압력 변화의 영향을 고찰한 결과를 종합하면, 디



(a) (b) (c) (d)

Fig.12 Spray comparison at about 100mm length

(a) Diesel 15MPa, (b) Diesel 100MPa
(c) LPG 15MPa (d) LPG 100MPa

젤의 경우 분사 압력의 증가는 주위공기 유동을 크게 활성화하며 분무길이와 폭을 현저하게 증가시킨다. LPG의 경우에는 분사압력과 급속증발 효과(flashing effect)가 동시에 분무형상에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 디젤분무와 비교하여 초기 분무의 폭이 좁고 많은 액적들이 증발되며 분무의 진행이 시간에 따라 급격히 둔화되는 특성을 보여준다.

후기

본 논문은 과학기술부 한·영 공동연구기금사업에 의한 연구결과의 일부로서 관계자 여러분께 사의를 표합니다

참고문헌

- (1) R. Brown and J.L. York, "Spray formed by flashing liquid jet", AICHE-Journal, vol. 8(2), pp. 149-153, 1962.
- (2) Y. Kitmura, H. Morimitsu and T. Takahashi, "Critical superheat for flashing of superheated liquid jets", Industrial Engineering Chemical

- Fundamentals, vol. 25, pp.206-211.
- (3) A. Wildgen and J. Straub, "The boiling mechanism in superheated free jets", *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 15(2), pp. 193-207, 1989.
 - (4) A. Lowi Jr. and W.P.L. Carter, "A Method for evaluating the atmospheric ozone impact of actual vehicle emissions", SAE paper 900710, 1990.
 - (5) B. Hollemans, Technical Reference Paper, TNO Road Vehicle Research Institute, 1999.
 - (6) E. Bass, B. Bailey and S. Jaeger, "LPG conversion and HC emissions speciation of a light-duty vehicle", SAE paper 932745, 1993.
 - (7) M. DeLuchi, Greenhouse gas emissions from LPG, Gasoline, Diesel fuel, Methanol, CNG and electric vehicle, R.F. Webb Corp., 1990.
 - (8) R. Klausmeier, Assessment of environmental, health and safety issues related to the use of alternative transportation fuels, Gas Research Institute, 1989.
 - (9) R.F. Webb and P.J. Delmas, "New perspectives on auto propane as a mass-scale motor vehicle fuel", SAE paper 911667, 1991.
 - (10) A. Gerini, G. Monnier and R. Bonetto, "Ultra low emissions vehicle using LPG engine fuel", SAE paper 961079, 1996.
 - (11) 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.
 - (12) Cleaner fuel conversion of leased cars to run on liquid propane, Rushmoor Borough Council, UK, 1998.
 - (13) A proposal to introduce LPG taxis, Planning, Environment and Lands Bureau, HK, 1999.
 - (14) R. Sierens, "An experimental and theoretical study of liquid LPG injection", SAE paper 922363, 1992.
 - (15) 서희준, 오승묵, 정용일, 배충식, "연소모사장치를 이용한 LPG 직접분사식 엔진 연소특성 연구", '99춘계자동차공학회논문집 pp3-8, 1999.
 - (16) 조규백, 정동수, "직접분사식기관 적용을 위한 LPG연료의 실린더내 분무특성에 관한 연구", '99춘계자동차공학회논문집 pp76-81, 1999.
 - (17) H. Fusimoto, Y. Iwami and J. Senda, "Atomization characteristics of liquefied n-Butane spray with flash boiling phenomena", Pro. of ICLASS-'97 Seoul, 1997.
 - (18) M.L. Poulton, Alternative Fuels for Road Vehicles, Computational Mechanics Publications, UK & USA, 1994.
 - (19) J. Bierbaumer, R. Cichocki and W. Ospelt, "CO2 emission reduction - the contribution of modern HSDI engines", 5th Eng. Workshop, SAE Korea, 1998.