

분사노즐 근처의 LPG 분무거동

LPG Spray Behavior Near Injection Nozzle

조현철** , 오승우* , 이기훈* , 배영주* , 박권하*

H. C. Jo, S. W. Oh, G. H. Lee, Y. J. Bae, K. H. Park

Abstract

Liquefied petroleum gas (LPG) has been used as motor fuel due to its low emissions and low cost. This study addresses the analysis of the LPG spray behavior near injection nozzle. The LPG spray photographs are compared with sprays of diesel fuel at the same conditions. The LPG spray photos show that the dispersion characteristic depends very sensuously on the ambient pressure soon after injection. The spray angle is very wide in a low ambient pressure condition until the saturated pressure at this test condition, but the angle value is quickly reduced at the condition over the pressure.

주요기술용어 : 직접분사식엔진(Direct injection engine), LPG/ 디젤 분무(LPG/Diesel spray), 급속증발(Flashing effect), 분무각(Spray angle)

1. 서 론

디젤과 가솔린을 주원료로 사용하는 수송기계원동기로부터 배출되는 배기가스는 대기오염의 주원인이 되고 있다. 선진국을 중심으로 대기 환경 개선을 위한 규제가 강화되고 있으며, 규제만족을 위한 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 대체연료기술은 이러한 연구중의 하

나이다. 그중 LPG연료는 안전성과 효율성을 검증 받아 수송기계의 대체연료로서 널리 사용되고 있으며 사용이 점차적으로 증가하고 있다. LPG엔진의 최근연구는 흡기포트에 분사하는 방식(MPI)과 연소실내에 직접분사하는 방식으로 나누어진다.

Holleman은 LPG가 Cold Start시 효과가 크다고 했으며 유해배기가스저감을 보고하였다⁽¹⁾ 디젤기관과 비교해서 영국의 Rushmoor Borough의회⁽²⁾는 유해가스인 NOx가 80%, PM이 100%감소함을 보고하였고 홍콩환경사무국⁽³⁾에서는 95%의 NOx 감소를 발표하였다. 따라

* 한국해양대학교 기계공학과

** 한국해양대학교 대학원

서 LPG가 다른 연료와 비교하여 청정연료로서 유해물질을 감소시켜 환경오염에 기여할 수 있다는 것을 입증하였다. 기존에 나와 있는 연료 공급방식과는 다른 액상분사장치에 대한 연구에서 Sierens⁽⁴⁾는 많은 실험과 이론적 연구를 통한 MPI분사시스템을 개발하였다. 액체분사시스템이 증발식 LPG엔진과 비교하였을 때 15%의 출력향상을 보이며, 가솔린과 비교하여 유사한 출력을 보여준다. 또한 연료소비량 및 배기가스가 감소된다고 발표하였다. LPG는 낮은 압력 조건에서 급속히 증발하는 급속 증발 특성을 가지고 있는데 디젤이나 가솔린에서는 이러한 특성을 찾아볼 수 없다. Brown과 York⁽⁵⁾의 논문에서는 LPG분사과정에서의 급속증발(flushing)을 관찰하였고 Fusimoto 등⁽⁶⁾은 미립화 특성을 분석하였다.

이상의 연구들을 종합하면 LPG연료는 디젤 연료와 비교하여 유해배기가스인 NOx, soot등이 감소하는 반면, 최대 출력저감과 엔진열효율향상에 대한 문제점을 갖고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 LPG연료의 특성인 급속 증발과 혼합 등을 명확히 이해할 필요성이 있다. 본 논문에서는 실린더 내에 직접 분사하는 방식의 LPG엔진에 적용 시 필요한 기초자료확보를 위하여 분위기 압력이 변화 할 때의 LPG분무의 분사 직후 특성을 디젤 연료의 분무와 비교분석 하고자 한다.

2. 실험장치의 구성 및 실험조건

Table 1. Test Case

Fuel	hole dia. (mm)	Rail pressure (MPa)	Trap pressure (MPa)	Trap Temp (K)
LPG	0.22	10	0.1, 0.4, 0.7	298, 500
Diesel				

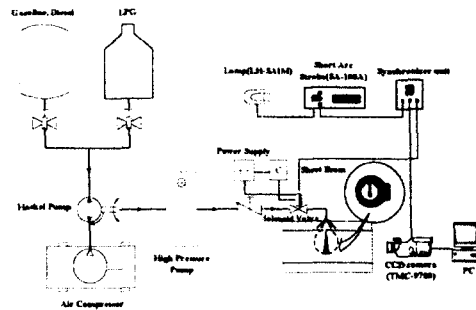


Fig.1 Experimental Setup

2.1 실험장치

LPG와 디젤유의 분무를 가시화하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험장치를 구성한다. 디젤유는 대기상태에서 액체이지만 LPG는 기상이기 때문에 가압된 볼베를 사용하며, 압축펌프로 연결되는 라인에는 별도의 밸브를 장착하여 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 연료의 압력을 조절한다. 압축된 연료는 압력탱크에 저장된 후 전자밸브를 통하여 분사노즐로 공급된다. 여기서 근접센서로 감지된 솔레노이드 밸브의 신호를 받아들인 동기장치(synchronizer)에서는 원하는 시간의 경과 후 광원과 카메라에 신호를 보냄으로써 분무 특성을 가시화 한다. 광원은 출력 1~1.6J/F, 광원 주파수 범위는 0~60Hz, 광원 발광시간은 18~23μs Short Arc Strobe (SA-100A)를 사용한다. 원통형 렌즈에 의하여 만들어진 sheet beam을 분무 중심을 통과하도록 측면 가시화 창을 통하여 비춘다. 이때 발생한 산란광을 셔터속도가 1/60~1/16,000sec이고 760(H)×484(V)인 PULNiX의 TMC-970 CCD카메라를 사용하여 가시화한다.

2.2 실험조건

실험조건은 Table 1과 같이 주어진다. LPG

와 디젤유를 각각 공급하며 분사노즐의 노즐 홀 직경크기는 0.22mm이며, 분사압력을 10MPa로 고정시킨 상태에서 분위기 압력을 0.1MPa, 0.4MPa, 0.7MPa, 분위기 온도를 298K, 500K로 변화시킨다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 초기 분무 형태(0.5ms 이후)

Figs. 2, 3은 분사직후시 0.5ms에서의 LPG, 디젤유의 초기 분무를 나타낸 것이다. 분사압력 10MPa에서 분위기 압력이 0.1MPa, 0.4MPa, 0.7MPa로 변화되었다.

Fig. 2의 LPG 초기분무의 거동을 살펴보면, 대기압상태인 0.1MPa의 분위기 압력에서는 분사직후 분무가 넓게 퍼지면서 앞으로의 진행보다는 옆으로의 퍼짐이 큰 반면, 압력이 증가하여 0.4MPa이 되면 앞으로의 진행이 증가되고 분무폭이 감소된다. 분무진행거리도 0.1MPa과 유사함을 보여준다. 주위압력이 더욱 증가하여 0.7MPa이 되면 분무진행거리가 더욱 줄어들고 분무폭이 조금 증가된다.

디젤분무인 Fig. 3의 경우에는 압력이 가장 낮은 0.1MPa의 경우에 분무진행이 가장 크며 압력이 증가되면서 점점 감소됨을 알 수 있다. Fig. 4는 이상의 거동을 분석하기 위하여 주어진 분무진행거리에 대한 분무폭의 비를 압력변화에 대하여 나타낸 그래프이다. LPG와 디젤유의 분위기압이 0.1MPa인 경우가 가장 높게 나타나는데 이는 저압분위기에서 분무 진행이 다른 압력과 비교하여 크기 때문에 폭방향의 퍼짐이 증가하여 나타난 현상으로 보여진다. 하지만 LPG의 경우는 매우 크게 나타나는데 이는 분사직후 LPG 연료의 급속증발에 의한 현상으로 생각된다.



0.1MPa 0.4MPa 0.7MPa

Fig. 2 Spray of LPG at 0.5ms after injection



0.1MPa 0.4MPa 0.7MPa

Fig. 3 Spray of Diesel at 0.5ms after injection

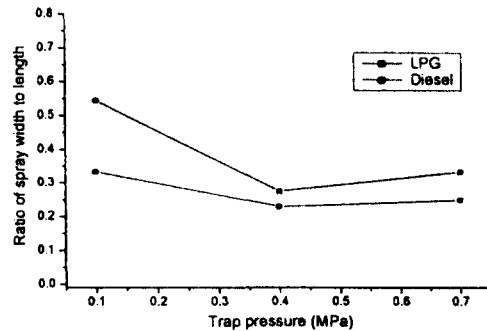


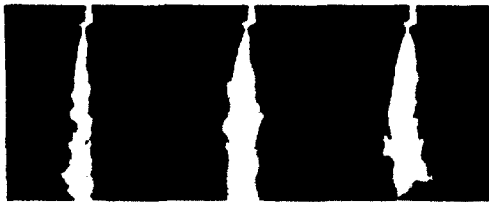
Fig. 4 Ratio of spray width to length at 0.5ms after injection start

3.2 분무 성장 후의 분무형태(50ms 이후)

3.2.1 상온(298K)에서의 분무형태

Figs. 5, 6은 분사시작후 50ms에서의 상온에서의 LPG와 디젤유의 분무형상을 나타낸 것이다. 연속적으로 분사되는 경우로서 초기분무의 형태는 더 이상 변화가 없는 정상상태이다. LPG의 경우 분위기 압력이 증가할 때 전체 분무폭이 증가된다. 하지만 상세히 살펴보면, 대기압 상태인 0.1MPa의 경우 분사직후의 분무가 다른 경우보다 상대적으로 넓게 퍼진 후 빠른 분사 유동과 함께 아래로 진행된다. 압력이 높은 0.4, 0.7MPa의 경우에도 분사직후 빠르게

폭방향으로 퍼지고 이후에도 연속적으로 퍼져 나간다. 디젤의 경우에는 분무가 분사직후 전혀 퍼지지 않고 분무진행과 더불어 선형적으로 퍼진다. 이러한 현상은 Fig. 7의 노즐끝단으로부터 주어진 분무각의 변화에서 잘 나타난다. LPG의 경우 노즐선단에서 큰 분무각을 보이는데 이는 분사직후의 급속증발에 의한 퍼짐으로 생각된다. 노즐로부터 10mm 이상이 되면 디젤과 같은 정도의 분무각을 갖는다.



0.1MPa 0.4MPa 0.7MPa
Fig. 5 Spray of LPG at 50ms after injection-298K



0.1MPa 0.4MPa 0.7MPa
Fig. 6 Spray of Diesel at 50ms after injection-298K

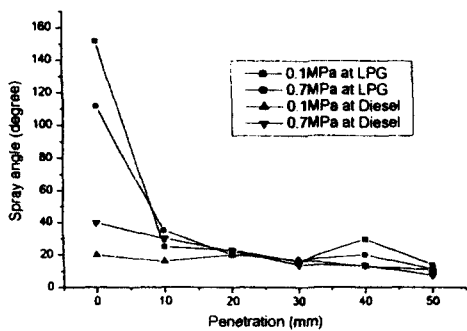


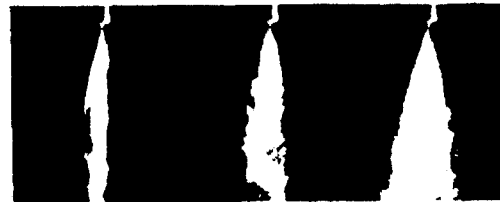
Fig.7 spray angle according to spray penetration at room temperature

3.2.2 고온(500K)에서의 분무형태

Figs. 8, 9는 고온에서의 LPG와 디젤유의 분무형상을 나타낸 그림이다. 상온에서와 같이 LPG분무의 경우에는 분사직후의 급속한 퍼짐을 보여주지만, 하류에서의 분무퍼짐이 줄어들고 분무밀도가 급속하게 낮아진다. 이는 주위 온도가 높아지면서 공기밀도가 낮아지고 액적 증발이 빨라지는 결과이다. 하지만 디젤의 경우 분무형태가 더욱 넓게 분포된다.



0.1MPa 0.4MPa 0.7MPa
Fig. 8 Spray of LPG at 50ms after injection-500K



0.1MPa 0.4MPa 0.7MPa
Fig. 9 Spray of Diesel at 50ms after injection-500K

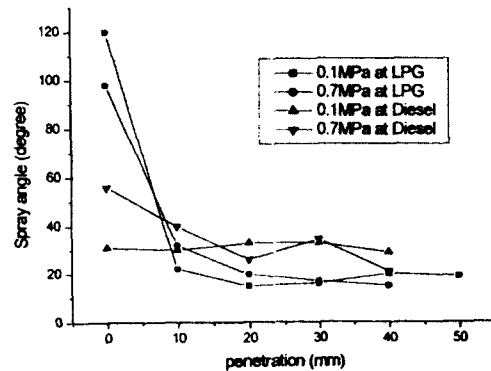


Fig10.spreay angle according to spray penetration at high temperature

Fig. 10은 노즐선단에서부터의 분무각 변화를 보여준다. 상온에서와 같이 LPG의 경우 노즐선단에서 큰 분사각을 갖은 후 작아지며 디젤의 경우는 유사한 분사각을 유지한다. 단 LPG의 경우 노즐선단에서 멀리 떨어진 하류에서 분무각이 매우 작아지는데 이는 고온 분위기에서 급속한 증발의 결과이다.

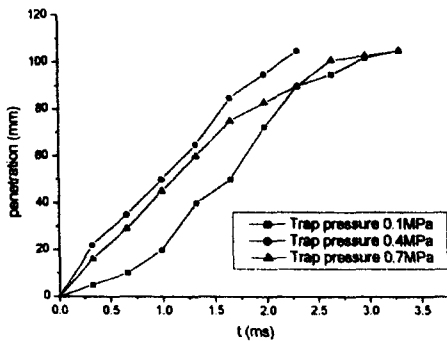


Fig. 11 LPG Spray tip penetration with trap pressure variation

Fig. 11은 분위기 압력에 따른 분무진행거리를 나타낸다. 분위기 압력이 낮은 0.1MPa의 경우 분사된 LPG가 급속한 확산으로 인하여 노즐 근처에서 머무르면서 아래로 진행되지 않는다. 분위기 압력이 0.4MPa 이상이 되면 이러한 현상이 사라지며 분사직후부터 빠른 분무진행을 나타낸다.

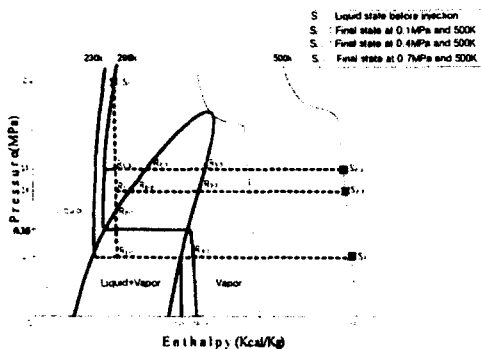


Fig. 12 LPG vaporizing routes in Pressure-Enthalpy diagram for LPG used

Fig. 12는 LPG의 상변화 경로를 나타낸 것이다. 초기 상태의 액체 LPG가 분사되면 비교적 매우 느린 열전달에 의하여 무시할 수 있는 온도 상승과 함께 포화액점($R_{2,1}$)을 지나 등엔탈피팽창점($R_{1,1}$)에 이르게 되고 이 상태는 불안정한 액기 혼합상태이며 등온가열과정을 거쳐 포화증기점($R_{3,1}$)에 이르면 완전 증발되어 최종상태인 주위 조건($S_{2,1}$)에 이르게 된다. 주위공기 압력이 높아지면($S_{2,2}$, $S_{2,3}$) 분사된 액체 LPG에 미치는 압력이 주위공기 압력까지는 급격히 낮아지지만, 이 압력이 포화압력 보다 높은 상태에 있기 때문에 아직 액체 상태($R_{1,2}$, $R_{1,3}$)이다. 고온의 주위 상태에서 열을 받아들여 포화액점($R_{2,2}$, $R_{2,3}$)에 이른 후 포화증기점($R_{3,1}$, $R_{3,2}$, $R_{3,3}$)을 거쳐 증발하여 최종상태($S_{2,2}$, $S_{2,3}$)에 이르게 되는데 가열과 함께 포화압력도 상승하기 때문에 가열된 액체LPG의 포화압력이 분위기압력보다 높아지게 되면 이때부터는 급속증발이 이루어진다. 하지만 분위기 압력이 초기온도에서의 포화증기압보다 높기 때문에 낮은 증발현상을 나타낸다.

4. 결론

상온280K, 고온500K에서의 분사압력 10MPa에서 분위기압력변화에 따른 LPG분무형상의 변화를 정적연소기내에서 분석한 본 논문을 요약하면 다음과 같다

■ 저압분위기에서의 LPG분무는 분사직후 등엔탈피팽창에 의한 급속증발에 의하여 넓게 퍼지며, 고압분위기에서 그 퍼짐이 줄어들지만 디젤 분무와 비교할 때 매우 크다.

■ 고온분위기에서는 LPG의 증발현상이 더욱 증가하여 분사직후에는 넓게 퍼지지만 분무진행과 함께 퍼짐이 급격히 둔화되며 액적밀도가 낮아진다.

■ LPG의 급속증발특성은 저압고온분위기에서 가장 크지만 다른 조건에서도 디젤분무보다 월등함을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. B. Hollemans, Technical Reference Paper, TNO Road Vehicle Research Institute, 1999.
2. Cleaner fuel conversion of leased cars to run on liquid propane, Rushmoor Borough Council, UK, 1998.
3. A proposal to introduce LPG taxis, Planning, Environment and Lands Bureau, HK, 1999.
4. R. Sierens, "An experimental and theoretical study of liquid LPG injection", SAE paper 922363, 1992.
5. R. Brown and J. L. York, "Spray formed by flashing liquid jet", AICHE-Journal, vol. 8(2), pp. 149-153, 1962.
6. H. Fusimoto, Y. Iwami and J. Senda, "Atomization characteristics of liquefied n-Butane spray with flash boiling phenomena", Pro. of ICLASS-'97 Seoul, 1997.