

## 분사조건에 따른 LPG 인젝터의 분무특성에 관한 연구

류재덕\* · 윤용원\* · 이기형\*\* · 이창식\*\*

### A Study on the spray characteristics according to injection conditions for LPG injector

Jeaduk Ryu, Yongwon Yoon, Kihyung Lee and Changsik Lee

#### Abstract

Recently LPG engine is developed to fulfill such new requirements as improved fuel efficiency in addition to further reduced exhaust emission. This experimental study is conducted to analyze spray characteristics for pintle type injector used in a LPLi (Liquid Phase LPG injection) engine. Since spray parameters including penetration length and spray angle make a role to design injector and engine intake system, spray visualization experiment is performed under atmosphere ambient and charging condition using Mie scattering method.

From the experimental result under various LPG formation, the increased propane component decreases penetration length because boiling point of propane is lower than butane. To simulate intake charging condition in MPI engine, spray visualization is performed under high pressure condition. As a result, as ambient pressure is increased from atmosphere to 3.0 bar, penetration length is decreased. However, as ambient pressure is increased from atmosphere to 3.0 bar, spray angle is increased

주요기술용어 : LPLi (액상 LPG 분사), Penetration length (분무 도달 거리),  
Spray angle (분무각), Visualization (가시화)

#### 1. 서 론

최근 지구 온난화 현상과 더불어 자동차의 배기가스가 대기 환경 오염의 주된 원인으로 인식됨에 따라 저공해, 저탄소, 환경친화성 연료를 사용하는 엔진 개발에 관한 관심이 고조되고 있다.

디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비하여 열효율은 유리한 반면 연소방식의 특성상 인체에 유해한

배출가스인 질소산화물(NOx)과 입자상 물질(P.M.) 등의 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 디젤 입자상 물질 필터(DPF) 및 디젤 산화 촉매(DOC) 등과 같은 후처리 방식<sup>(1)</sup> 과 EGR 및 예혼합 압축착화(PCCI)<sup>(2)</sup> 와 같이 연소방식을 개선하는 두가지 방향으로 연구가 현재 활발히 진행 중에 있으나, 그 실용성 여부는 아직 미비한 상태이기 때문에 디젤이 환경 친화성 연료로서 시대적 요구를 만족시키기 위하여는 더욱 연구가 진행되어야 할 것으로 보여진다.

또, 다른 연구방향으로는 LPG, CNG, LNG, DME (dimethyl-ether) 등과 같은 대체연료를 사

\* 한양대학교 대학원  
\*\* 한양대학교 기계공학과

용하는 연구가 수행되고 있다<sup>3)</sup>. CNG, LNG 연료는 주성분이 메탄( $\text{CH}_4$ )으로 저탄소 연료이지만, 액화온도가  $-162^\circ\text{C}$ 이므로, 차량의 연료탱크내에 액상으로 유지시키기 위하여는 약 200bar의 고압으로 저장하여야 하는 어려운 점이 있다. DME는 자발화 온도가  $235^\circ\text{C}$ 로 낮으므로 디젤과 같이 압축착화가 가능한 연료이나, 점도가 낮으므로 노즐분무를 위한 연료공급시스템 제작에 문제점을 가지고 있다.

LPG의 경우는 CNG, LNG와 같은 천연 가스에 비하여 낮은 압력에서 액화가 가능하여 적재성과 항속거리가 우수하며, 가연범위가 넓어서 회박연소가 가능하고, 연료공급을 위한 인프라 구축이 많이 이루어져 있는 실정이다.

LPG를 연료로 사용하는 엔진은 정속하며 진동이 거의 없기 때문에 승합차와 택시등 소형 자동차에 LPG 믹서 타입의 연료공급 장치를 사용하여 이미 오래 전부터 사용되어 왔으나, LPG 믹서 타입 엔진의 경우 연료의 공급이 기체상태로 이루어지므로 각 실린더별로 정확한 공연비 제어가 이루어지기 어렵기 때문에 유해 배기가스 배출 및 흡기관 내에 연료의 잔존에 의하여 발생되는 역화(back fire)와 초킹 현상 및 충전 효율의 저감에 따른 출력 감소와 연비 악화가 단점으로 지적되어왔다.<sup>4)</sup>

따라서, 본 연구에서는 기존의 LPG믹서 타입 연료공급 시스템의 구조적인 단점을 보완하기 위하여 LPG 연료를 인젝터를 사용하여 흡기포트에 액상분사 시킬 수 있는 LPLi 엔진 개발에 필요한 연료공급시스템을 구축하고, 이 시스템을 이용한 액상분무 가시화 실험을 통하여 분무 패턴의 기초적인 자료를 제공하는 것이 본 연구의 목적이다. LPG 연료의 사용시 엔진 출력의 감소를 보상하기 위하여는 과급 기술이 필요하다. 따라서 과급조건을 고려하여 분위기 압력을 대기압부터 약 3 bar까지 변화시키면서, 분위기 압력의 변화에 따른 분무형상을 가시화 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 연료 공급 시스템 구성

본 연구에서는 LPG 연료를 액상으로 분사하기 위하여 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 연료공급 장치를 구성하였다. 연료탱크는 기존의 LPG 볼베를 사용하였고, 기상밸브를 불활성 가스인 고압의 질소 탱크와 연결하여 LPG 볼베내의 압력은 아래의 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 상온상태에서 LPG 증기압 이상인 20 bar 정도의 고압을 유지하도록 하였다. 또한, 액상밸브를 이용하여 고압의 질소를 사용하여 액상의 LPG가 공급되도록 하였다. LPG 볼베 내부는 LPG 기상과 액상 및 질소가스의 밀도값의 차이에 따라 최상부에 질소가스가 존재하고 최하부에 액상의 LPG가 위치하므로 사이판 밸브를 사용하여 액상의 LPG만을 추출하도록 하였다.

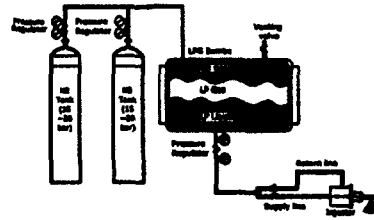


Fig.1 Schematic of LPLi supply system

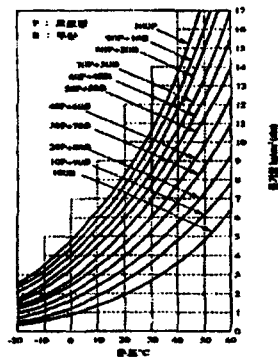


Fig. 2 Lead pressure diagram of LPG

연료관은 LPG가 기화되는 것을 방지되도록 압력손실과 온도변화가 없도록 제작하였으며, LPG 볼베의 액상밸브를 통하여 액상의 LPG를 인젝터로 공급되도록 하였다.

인젝터로 공급되는 LPG 연료의 압력을 일정하게 유지시키기 위하여 고압 레귤레이터를 이용

하여 연료의 압력을 일정압력으로 유지시켰다. 따라서, LPG 연료의 공급압력은 질소탱크 출구의 레귤레이터와 LPG bombe 출구의 레귤레이터로 조절하였다.

2.2 연료 분사량 측정 방법

LPG는 프로판과 부탄의 혼합물로서 조성비율은 계절에 따라 다르다. 또한, 아래 표에 나타낸 바와 같이 두 가지 물질은 대기압 하에서 비등점이 상온 이하이므로, 인젝터에서 분사되면 대기 중에서 바로 기화하는 특성을 가지고 있어서 연료량 측정이 힘들다. 그러므로, 연료량 측정을 위해서 아래의 Fig. 3과 같은 별도의 장치를 구성하였다.

Table. 1 Physical property of LPG

가 스 명	중기압(15℃)	비점(1기압)
프로판(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	7 bar	- 42.1℃
부탄(n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	1 bar	-0.5℃

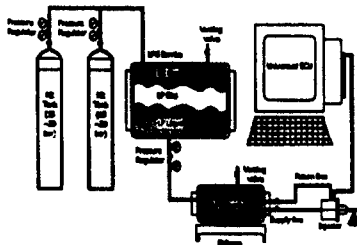


Fig. 3 Experimental apparatus of LPG injection rate measurement

그림에 나타낸 바와 같이 LPG 공급장치의 bombe와는 별도로 용량이 작은 고압 bombe를 준비하여 분사전의 질량과 5000번 분사후의 질량을 측정하여 질량차이의 평균값을 분사량으로 계산하였다. 분사량 측정은 분사기간 및 분사압력을 변화시키면서 수행하였다.

2.2 분무 가시화 시스템

본 연구에서는 LPLi 인젝터의 분무 형상을

가시화하여 LPG 액상 분무거리를 측정함으로써 흡기포트에 인젝터 장착시의 기초 데이터를 구축하고자 한다. 이를 위하여 Fig. 4와 같은 분무 가시화 실험 장치를 구성하였다.

광원으로는 최대 출력은 200mJ이고, 파장은 532 nm인 ND:YAG 레이저 (Surlite I-10, Continuum)를 사용하였고, 유도된 레이저 쉬트빔의 두께는 2mm 이다. 화상 취득은 Sony 사의 모델명 XC-77RR CCD 카메라를 사용하였으며, 이미지 보드는 Matrox사의 8bit의 640(H)×480(V) 분해능을 갖는 MeteorRGB를 사용하였다.

레이저와 인젝터 분사신호의 동기를 위하여 피코(pico) 단위의 분해능을 가지는 디지털 펄스 발생기 (DG535, stanford사 제품)를 사용하였다.

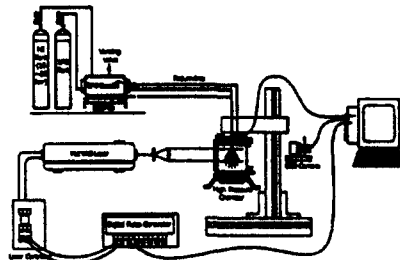


Fig. 4 Spray visualization system of LPLi

엔진의 흡입공기 과급 조건을 모사하기 위하여 챔버내의 압력을 질소가스를 사용하여 변화시키면서 분무 가시화 실험을 수행하였다.

3장 실험결과 및 고찰

3.1 분사량 측정실험 결과

앞 절에서 설명한 방법을 사용하여 인젝터 분사량을 측정된 결과를 아래의 Fig. 5에 나타내었다. 인젝터의 분사시간을 3msec 부터 30msec 까지 변화시켰고, 분사압력은 LPG가 증발하는 것을 방지하기 위하여, 10bar 부터 20bar 까지의 압력 조건에서 실험을 수행하였다. 이 그림으로부터 분사량은 분사기간에 따라 모든 분사압력에서 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 분사압력이 약 5bar 증가함에 따라 분사량이 15% 정도 증가하는 사실을 알 수 있다.

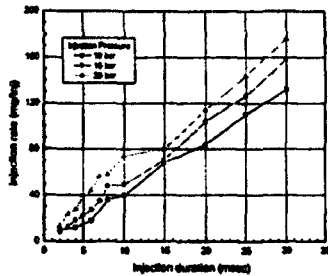


Fig. 5 LPG injection rate according to injection duration

3.2 LPG 조성에 따른 분무 형태

Fig. 6은 LPG 조성에 따른 분무 형상을 거시적으로 가시화한 결과이다. LPG 조성은 부탄 100%, 부탄 70% 와 프로판 30%, 부탄 40% 와 프로판 60%의 세가지 종류를 사용하여 가시화하였다. 연료의 조성은 계절에 따라 대기중의 온도가 변화하므로 LPG가 기화하는 것을 방지하기 위하여 기온이 낮아질수록 프로판의 비율이 증가되면서 공급된다. 분무조건으로 분사압력은 각각 10 bar, 15 bar이고, 분위기 압력은 대기압이며, 분사기간은 5msec 조건에서 실험을 수행하였다.

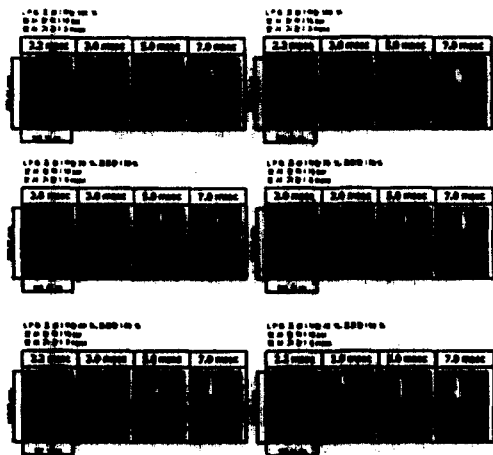
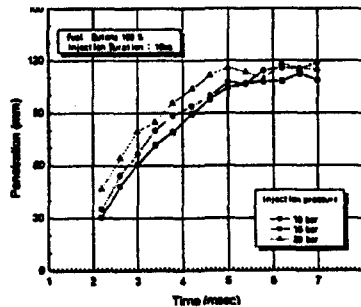


Fig. 6 Spray patterns according to fuel component

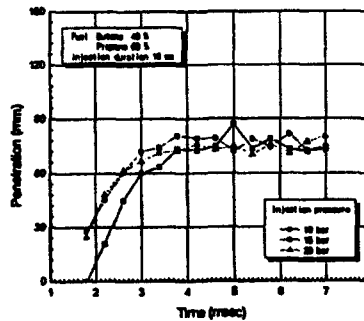
그림에서 보는 바와 같이 부탄의 비율이 증가할수록 분무길이 길게 나타나고 있다. 이와 같

은 경향이 나타난 이유로는 부탄의 비등점 온도가 프로판의 비등점 온도보다 높으므로, 부탄과 프로판의 비율에 따른 LPG 조성에 따라 프로판이 먼저 기화되므로 부탄 비율이 클수록 역상의 분무거리가 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 7 는 연료 조성에 따른 분무 도달 거리를 비교한 결과이다. 실험조건은 분사압력은 10bar, 15bar, 20bar의 세가지 경우이며, 분사 기간은 10msec 로 고정하였고, 분위기 압력은 대기압이다. 그림에서 보는 바와 같이 분무 도달 거리는 앞의 분무가시화 결과에서 나타나 있듯이 부탄의 비율이 줄어들수록 감소하는 경향을 보여 주고 있다. 부탄 100%는 5msec 이상에서 분무 도달거리가 약 110mm 정도로 일정하게 나타났으며, 부탄 40%와 프로판 60%인 혼합 연료는 3msec 이상에서 분무 도달거리가 약 80mm로 거의 일정하게 나타나고 있다. 이러한 결과로부터 프로판 비율이 증가할수록 빨리 기화하는 현상을 알 수 있다.



(a) Fuel component : Butane 100%



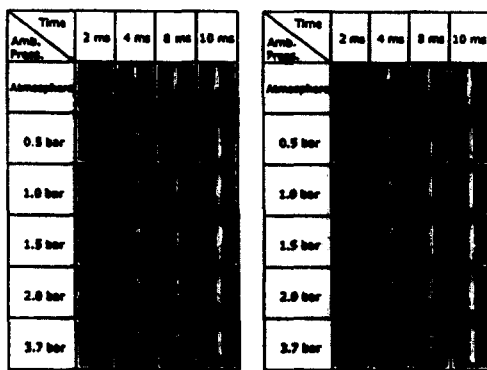
(b) Fuel component : Butane 40%, Propane 60%

Fig. 7 Penetration length according to injection pressure

분사압력에 따라서는 분무도달거리는 분사후 5 msec 까지는 분사압력이 5bar 증가함에 따라 10% 정도 증가되는 경향을 보이고 있으며 LPG 연료의 기화특성은 분사압력 보다는 LPG 조성인 부탄과 프로판의 비율에 더 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

3.3 분위기 압력변화에 따른 분무 형태

엔진의 출력 향상을 위하여 과급을 채택하는 경우에 흡기관의 압력은 과급기의 압력에 따라 변화되게 되므로, MPI 엔진의 경우는 인젝터의 분무 형태도 영향을 받을 것으로 판단된다. 따라서 분위기 압력의 증가에 따른 분무형태의 변화를 파악하기 위하여 분위기 압력을 조정하여 분무가시화 실험을 수행하였다. 과급기 압력을 모사하기 위하여 질소가스를 사용하여 고압 챔버내에서 분위기 압력을 조성한 후 LPG 액상 분사가시화 실험을 수행하였다. Fig. 8은 과급 압력을 고려하여 분위기 압력을 대기압력부터 0.5bar 씩 증가시키면서, 3.7bar 까지 분무 가시화 실험한 결과이다. 분사압력은 10 bar와 15 bar인 두 가지 조건에서 수행하였고, LP 액상 연료의 조성은 부탄 70% 와 프로판 30% 의 혼합물을 사용하였다.

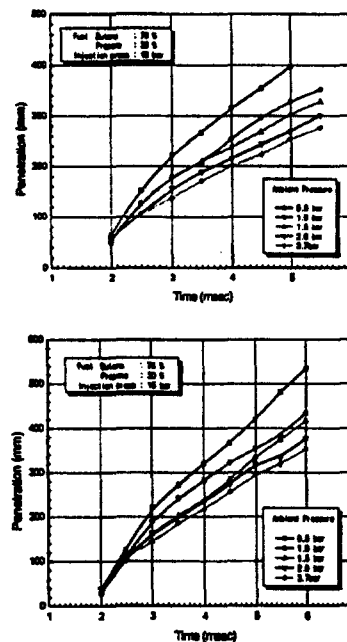


(a) Amb. press.:10 bar (b) Amb. press.:15 bar  
(Fuel component : Butane 70%, propane 30%)

Fig. 8 Spray patterns according to ambient pressure

일반적인, GDI 분무실험 결과에서와 마찬가지로 분위기 압력이 증가됨에 따라서 분무 도달거리는 감소하는 경향을 보이고 있다.<sup>5)</sup> 분사 압력이 10bar에서 15bar로 증가할수록 초기 역적이 나타나는 시간이 늦어지므로, 분무지연시간이 커지는 것으로 판단된다.

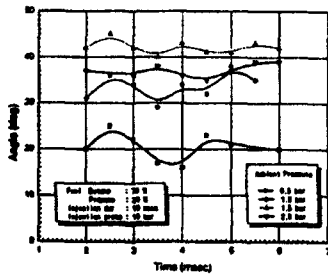
Fig. 9는 분위기 압력의 변화에 따른 분무 도달거리를 나타낸 그림이다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 분위기 압력이 증가됨에 따라 분무 도달거리는 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 3 msec 미만의 분사 초기시는 분사압력에 반비례하여 15 bar인 경우가 분무거리가 짧게 나타났고, 3 msec 이상의 경우는 분사압력에 비례하여 분사 도달거리가 크게 나타났다. 이러한 경향은 분사압력이 높은 경우가 초기에 인젝터의 솔레노이드 밸브를 여는 지연시간이 길기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.



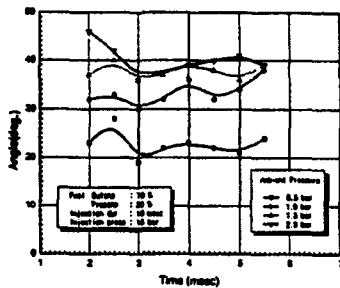
(Fuel component : Butane 70%, propane 30%)

Fig. 9 Penetration length according to ambient pressure

Fig. 10은 분위기 압력변화에 따른 분무각을 나타낸 그림이다. 분무각도는 분사 압력에 따라 큰 변화를 보이지 않으며, 분위기 압력이 0.5bar 인 경우는 분무각이 약 20deg정도로 나타나다가, 1.0bar이상에서는 30~40deg로 증가하는 경향을 보이고 있다.



(a) Injection pressure : 10 bar



(b) Injection pressure : 15 bar

Fig. 10 Spray angle according to ambient pressure

#### 4. 결론

본 연구에서는 LPG 연료의 액상분사시의 연료 거동을 분석하고, MPI 엔진의 과급조건을 모사하여 분위기 압력이 분무특성에 미치는 영향을 평가하였다. 이와 같은 본 연구를 통하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1) LPG의 액상 분사량은 분사압력에 선형적으로 비례하는 경향을 나타내었으며, 분사압력이 5bar 증가함에 따라 분사량은 15% 증가하였다.

2) 연료 조성에 따른 분무 가시화를 수행한

결과, 프로판이 부탄에 비해 비점이 낮으므로 프로판의 비율이 증가함에 따라 분무도달거리가 짧아질 뿐만 아니라, 기화시간도 촉진되는 경향을 보이고 있다.

3) 부탄과 프로판의 비율을 변경하여 분사 시간에 따른 분무도달거리를 측정한 결과 분사압력이 5bar 증가시 분무도달거리는 10%정도 증가하는 경향을 나타내었다.

4) MPI 엔진의 과급 조건을 고려하기 위하여 분위기 압력을 변화시키면서 분무 가시화를 수행한 결과 분무도달거리는 분위기 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였고, 분무각은 분사 압력에는 큰 변화가 없었으며, 분위기 압력이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다.

#### 후기

본 연구는 한국기계연구원(KIMM) LP가스 사업단의 위탁연구에 의해 수행된 것으로 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) 김병수, 나병철, "HSDI 디젤엔진의 배출가스 후처리기술", 한국자동차 공학회지, 제 23권 1호, pp.20 ~ 26, 2001.2
- 2) Rudolf H. Stanglmaier and Charles E. Roberts "Homogeneous charge compression ignition (HCCI) : Benefits, compromises, and future engine applications", SAE 1999-01-3682, 1999.
- 3) Yoshio Sato, Yuichi Goto, "Research Trends in Power Systems using Alternative Fuels", IWPS2000, September 27-30, 2000, Tokyo, Japan.
- 4) 김우석, 이종화, 장창현, "흡기포트 분사식 LPG 엔진의 연료량 제어 및 연소 특성에 관한 연구", 한국자동차 공학회논문집, 제 8권 제 6호, pp. 31~39. 2000.
- 5) 이태환 "직접분사식 고압 인젝터의 분무 및 미립화 특성에 관한 연구" 한양대학교 석사학위논문, 1999