

액상 LPG 인젝터의 유량 모델 개발

조성우* · 민경덕

서울대학교 기계항공공학부

Development of Flow Rate Model of a Liquid Phase LPG Injector

Sungwoo Cho* · Kyoungdoug Min

School of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
(Received 30 April 2003 / Accepted 23 July 2003)

Abstract : Flash boiling mechanism in the injector interferes with fine fuel metering in a liquid phase LPG injection engine. This study presents a mathematical model to precisely predict an injection quantity. A calibration procedure of injection quantity, which is very prompt and precise in measuring, is developed using a gas analyzer. According to this procedure, injection quantity can be obtained under various fuel compositions, temperatures and injection pressures. The release pressure of liquid phase LPG is estimated based on these experimental data. Although the release pressure is much lower than the saturation pressure, it is linearly proportional to the saturation pressure.

Key words : Liquid phase LPG injection engine(액상 LPG 분사 엔진), Flash boiling(감압 비등), Flow rate(유량), Release pressure(방출 압력)

Nomenclature

A_o : orifice area, m^2
 C_d : discharge coefficient
 C_{HC} : HC concentration, ppm
 c : constant
 m : mass, kg
 \dot{m} : mass flow rate, kg/s
 \bar{m} : normalized mass flow rate
 p : pressure, Pa
 T : temperature, $^{\circ}C$
 t : time, s
 ρ : density, kg/m^3

Subscripts

d : delay
 i : injection
 m : manifold
 o : injector outlet
 s : saturation

1. 서론

LPG는 청정연료로서 자동차의 대체연료로 각광 받고 있다.^{1,2)} 최근에는 액상 LPG를 각 실린더의 흡기포트에 분사하는 기술 개발이 활발히 진행되고 있다.³⁻⁵⁾ 액상 LPG를 각 흡기포트에 분사하면 정밀하게 공연비를 제어할 수 있어 유해배기가스를 저감할 수 있고 최고 출력도 향상할 수 있다. 그러나 LPG는 공급체계에 따라 조성이 수시로 변할 뿐만

*To whom correspondence should be addressed.
swcho@snu.ac.kr

아니라 온도에 따라서 포화 증기압과 밀도가 변하고 분사기 출구에서 감압 비등(flash boiling)이 발생하므로 분사량 계량이 복잡하다. 그러므로 정밀한 공연비 제어를 위해서는 연료 조성, 온도, 분사압력 변화에 따라서 분사량을 정확히 예측할 수 있는 모델이 필요하다.

본 연구에서는 인젝터의 분사량을 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 방법을 고안하고 LPG의 조성, 온도, 분사 압력의 변화에 따른 실험을 수행하였다. 실험 데이터로부터 액상 LPG 분사량 예측 모델을 개발하였다.

2. LPG 연료와 인젝터의 개요

LPG의 주성분은 프로판(propane, C_3H_8)과 부탄(butane, C_4H_{10})이다. LPG에 함유된 부탄은 노말부탄(normal-butane)과 이소부탄(iso-butane)으로 두 종류가 있다. Fig. 1은 액상분사시스템에서 가장 중요한 물성인 포화압력(saturation pressure)과 밀도(density)의 온도에 따른 변화를 나타낸다. 포화압력과 밀도는 성분별로 차이가 클 뿐만 아니라 온도에 따라 서로 큰 변화를 보인다. 프로판은 부탄에 비해 포화압력은 월등히 높고 밀도는 낮다. 노말부탄과 이소부탄 간에도 다소의 차이가 있다. 그러므로 LPG의 포화압력과 밀도는 조성비에 따라 프로판과 노말부탄의 사이 값이 된다. 일반적으로 프로판과 부탄의 비율은 사용 목적에 따른 혼합(blending)으로 결정되고 노말부탄과 이소부탄의 비율은 원산지에 의해 결정된다. 우리나라의 자동차용 LPG 공급체계는 하절기에 부탄 100%, 동절기에는 프로판을 30% 정도 섞는다. 기존의 믹서 시스템은 포화증기압이 너무 낮으면 탱크에서 엔진으로 연료가 공급되지 않기 때문이다.

Fig. 2는 액상의 연료가 분사되는 인젝터 노즐부를 간략하게 표현한 것이다. 전기신호에 의해 니들이 올라가고 내려오면서 노즐을 단속한다. 인젝터 내부 유로는 노즐 구멍의 면적에 비해 훨씬 크므로 니들이 열린 동안에는 단순 오리피스 유동으로 고려할 수 있다. 따라서 니들이 열리고 나서 정상상태에 도달하였을 때의 질량 유량 \dot{m} 은 다음 식과 같이 계산되고 인젝터에서는 이를 정적유량(static flow

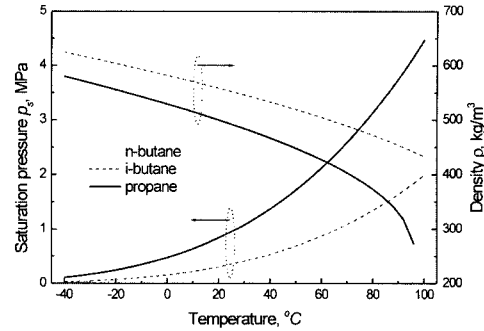


Fig. 1 Saturation pressures and densities of LPG components

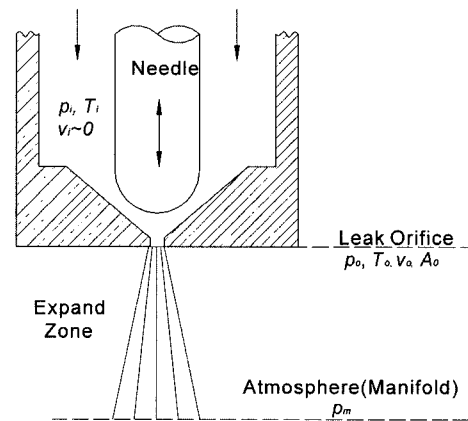


Fig. 2 Discharge through orifice nozzle

rate)이라 부른다.

$$\dot{m} = C_d A_0 \sqrt{2\rho(p_i - p_0)} \quad (1)$$

Fig. 3은 전형적인 가솔린 MPI 인젝터의 분사량 특성이다. 분사신호의 폭(injection signal duration) t_i 에 따른 1회 분사량(injection mass) m_i 을 나타낸다. 분사신호와 니들의 운동 사이에는 응답 지연이 있고 유동장이 정상상태(stead state)에 도달하는 시간이 있어 일정시간 t_{min} 이하의 짧은 분사에서는 분사가 되지 않거나 분사특성이 선형적이지 못하다. 즉, t_{min} 보다 긴 분사신호에 대해서는 분사량은 선형적으로 증가하고 기울기는 식 (1)의 정적유량 \dot{m} 이다. Fig. 3에서 가로축의 절편 t_d 는 실제 분사가 시작되는 분사신호의 폭과 다소 차이가 있을 수 있지만 편의상 지연시간(delay time)으로 명명한다. 분사량 m_i 을 분사신호에 대하여 수식으로 표현하면 다음과 같다.

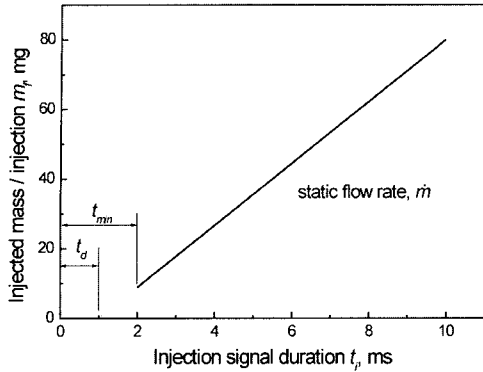


Fig. 3 An example of injector calibration curve for a gasoline MPI inject

$$m_i = \dot{m} \cdot (t_i - t_d) = C_d A_0 \sqrt{2\rho(p_i - p_0)} \cdot (t_i - t_d) \quad (2)$$

가솔린의 경우에는 오리피스에서 방출된 후에도 상변화(phase change)가 거의 없으므로 Fig. 2에서 오리피스의 방출압력 p_0 는 주변압력 p_m 으로 간주할 수 있다. 일반적인 가솔린 MPI 시스템에서는 분사압력 p_i 를 매니폴드압력 p_m 에 대하여 일정압력 Δp (약 300kPa) 만큼 승압시킨다. 즉, 분사압력은 다음과 같이 표현된다.

$$p_i = p_m + \Delta p \quad (3)$$

분사지연시간 t_d 은 니들의 질량, 니들에 작용하는 힘과 같은 동력학적 변수에 의해 결정된다. 니들에 작용하는 힘은 자기력(magnetic force)과 니들 위아래에 작용하는 압력의 차이가 있다. 자기력은 배터리의 전압에 의해 결정되는데 그 변화의 폭은 크지 않다. 니들 위아래에 작용하는 압력차이는 Δp 로써 일정하다. 그러므로 분사지연시간은 일정한 것으로 간주할 수 있다. 따라서 식 (3)은 다음과 같이 간략히 표현된다.

$$m_i = C_d A_0 \sqrt{2\rho\Delta p} \cdot (t_i - t_d) \quad (4)$$

3. 분사량 측정 실험

3.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서 Table 1과 같이 조성비가 다른 네 가지 LPG를 사용하였다. 우리나라의 차량용 LPG 공

Table 1 Compositions of fuels used in the experiment (mole fraction %)

Component \ Fuel	I	II	III	IV
Propane	10.4	21.6	36.6	49.7
i-Butane	32.5	28.2	23.1	18.3
n-Butane	56.5	49.6	39.6	31.3
etc.	0.6	0.6	0.7	0.7

급체계에 맞춰 프로판을 대략 0~50% 범위에서 혼합한 4가지 연료에 대하여 실험을 하였다. 대략적 비율로 혼합한 후 가스크로마토그래피(gas chromatography)법으로 정확한 조성비를 분석하였다.

일반적으로 인젝터의 1회 분사량은 분사된 연료를 회수하여 질량을 측정하고 분사회수로 나눔으로써 구한다. 분사된 연료의 질량 측정이 어려운 경우에는 분사 전후 탱크의 질량 차이를 측정하거나 분사된 연료의 표준상태 부피를 측정할 수도 있다. 이와 같은 방법들에서는 인젝터 시험을 위한 별도의 분사시스템과 측정장치가 필요하다. 또한 정밀한 측정을 위해서는 분사회수를 매우 크게 설정하여야 하므로 많은 시간이 소요된다. 분사된 연료가 기상(gas phase)인 경우에는 많은 양의 연료를 후처리하는 데에도 어려움이 따른다.

본 연구에서는 잘 갖추어진 엔진 시험셀(engine test cell)에서 별도의 분사 측정 장치를 갖추지 않고 신속하게 인젝터의 분사량을 정성적으로 측정할 수 있는 방법을 고안하고 시험하였다. 잘 갖추어진 엔진 시험셀은 엔진을 모터링(motoring)할 수 있는 동력계(dynamometer), 냉각수와 윤활유 온도조절장치, 흡입공기의 온도와 습도를 조절할 수 있는 공조시설, 배기가스 분석장치 등을 갖추고 있다. 스로틀(throttle)의 개도를 고정하고, 냉각수와 윤활유 온도를 일정하게 유지시키면서 일정속도로 엔진을 모터링 운전하면 엔진은 일정 유량을 송출하는 공기펌프의 기능을 한다. 이때 점화 플러그의 기능을 제거하고 연료를 분사하면 배기가스는 공기와 연료의 혼합물이 된다. 배기가스의 탄화수소(HC, hydrocarbon) 농도는 인젝터의 분사량에 비례한다. 연료 분사를 시작하고 불과 몇 사이클만 지나면 배기가스의 HC농도는 정상상태에 이르므로 신속하게 측정할 수 있고, HC의 농도는 ppm단위로 측정되기 때

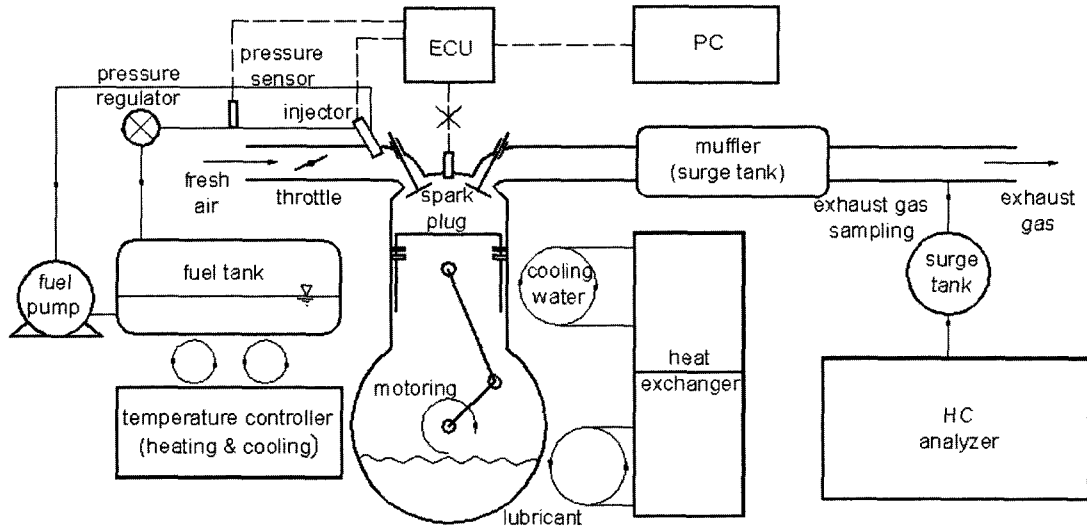


Fig. 4 Layout of an engine system for injector calibration

문에 매우 정밀하다. Fig. 4는 인젝터의 분사량 측정 실험을 위한 엔진 시스템의 개략도를 나타낸다. 이는 기본적으로 액상LPG분사엔진과 동일하다.⁹⁾

위의 방법을 적용하는 데에는 몇 가지 주의 사항이 있다. 일반적으로 엔진 시험셀에 비치된 HC분석기는 배기가스 중 미연탄화수소(unburned hydrocarbon)의 농도를 측정하는 용도이므로 측정 범위가 낮다. 그러므로 모든 기통의 인젝터를 구동할 경우에는 측정범위를 벗어날 수 있다. 또한 분사된 연료는 엔진의 흡기효율(volumetric efficiency)에 영향을 줄 수 있다. 즉, 분사량의 변화에 따른 공기유량의 차이는 미소하나마 오차를 유발할 수 있다. 그러므로 정확한 측정을 위해서는 HC 농도는 가급적 낮고 좁은 범위에 있어야 한다. 이러한 문제는 한 기통의 인젝터만 구동하고 분사 빈도를 조절함으로써 해결될 수 있다. 즉, 짧은 분사의 경우에는 자주 분사하고 긴 분사의 경우에는 간헐적으로 분사한 후 측정된 농도를 전 사이클에서 분사되었을 때의 농도로 환산하는 방법이다. 본 연구에서 냉각수와 윤활유는 80℃, 흡입공기는 20℃로 유지시키고 6기통 중 1번 기통의 인젝터만 구동을 하고 1~7 사이클 마다 분사함으로써 HC농도를 5,000 ppm 근처가 되도록 하였다. 측정된 HC농도는 건너편 사이클 수를 곱하여 모든 사이클에서 분사되었을 때의 농도로 환산

하였다. 그러나 간헐적인 분사에 의해 HC농도가 시간에 따라 변동할 수 있다. 이는 Fig. 4와 같이 배기가스 채집부와 분석기 사이에 서지 탱크(surge tank)를 설치함으로써 평균 농도를 측정할 수 있다. 엔진의 소음기(muffler) 또한 부수적으로 서지 탱크의 역할을 한다. 서지 탱크의 용량이 크면 HC농도의 변동폭은 줄어들지만 정상상태에 도달하는 시간이 늘어나 측정시간이 길어지는 단점이 있다.

분사량 측정 실험은 Table 1에서 언급한 네 가지 연료에 대하여 연료온도는 0~60℃의 범위에서, 분사압력은 포화압력에 대하여 0~900 kPa범위로 승압하여 수행하였다. 분사기간은 ECU를 통하여 2~10 ms범위로 변화시켰다.

본 연구에서 사용된 엔진은 6기통이고 배기량은 2,700 cc이다. 인젝터는 일반 가솔린엔진에서 사용되는 4공 MPI 인젝터이다.

3.2 실험 결과

Fig. 5는 22℃의 Fuel II에 대하여 네 가지 압력 조건에서 HC농도를 측정할 예이다. HC농도는 분사기간에 선형적으로 비례하는 것으로 분사기로서의 좋은 특성을 보인다. 식 (1)로부터 쉽게 예측할 수 있듯이 분사압력이 증가함에 따라 static flow rate m 이 증가함을 볼 수 있다. 각 직선의 가로축 절편은 각

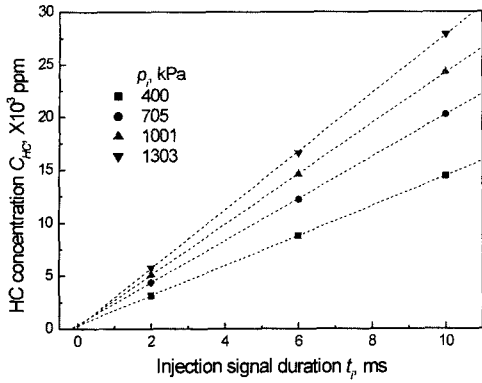


Fig. 5 Injector calibration curves measured with Fuel II under $T_f=22^\circ\text{C}$

압력에서의 분사지연시간 t_d 이다. 연료의 온도를 변경한 경우($0\sim 60^\circ\text{C}$)와 나머지 연료(Fuel I, III, IV)에 대해서도 비슷한 경향을 보였다. 비록 Fig. 5의 결과로부터 인젝터의 절대 분사량을 알 수는 없지만 인젝터의 특성을 파악하는 데는 유용하게 이용될 수 있다. 뿐만 아니라 Fig. 5의 결과는 ECU에서 공연비 제어를 위한 정보로서 충분하다.⁶⁾ 만약에 흡입공기량을 측정한다면 분사량의 정량화도 가능하다.

3.2.1 방출 압력

엔진의 흡입공기량은 일정하므로 HC의 농도 C_{HC} 는 분사된 연료량 m_i 에 비례한다. 따라서 이를 수식으로 표현하고 식 (2)를 대입하면 다음과 같다.

$$C_{HC} = c_1 m_i = c_1 \dot{m}(t_i - t_d) \quad (5)$$

식 (5)를 static flow rate \dot{m} 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{m} = c_1 \frac{C_{HC}}{t_i - t_d} \quad (6)$$

식 (6)의 우변에서 상수를 제외한 항 $C_{HC}/(t_i - t_d)$ 는 Fig. 5의 기울기를 의미한다. 식 (6)을 특정한 분사압력 p_i^* 에 대하여 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{m}^* = c_1 \left[\frac{C_{HC}}{t_i - t_d} \right]^* \quad (7)$$

식 (6)의 양변을 식 (7)의 각 변으로 나누면 정적유

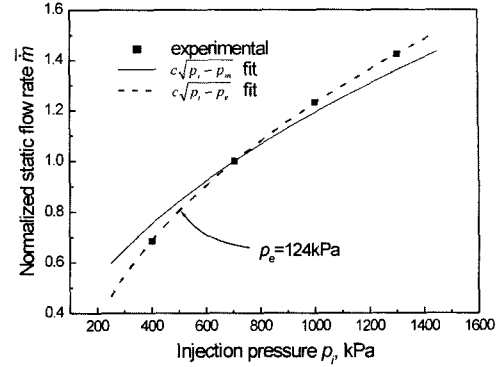


Fig. 6 A relationship between normalized static flow rate and injection pressure (Fuel II, $T_f=22^\circ\text{C}$)

량은 일반화(normalize) 된다.

$$\bar{m} = \frac{\dot{m}}{\dot{m}^*} = \frac{C_{HC} / (t_i - t_d)}{[C_{HC} / (t_i - t_d)]^*} \quad (8)$$

Fig. 5에서 각 분사압력에 대한 기울기를 구하고 705 kPa에 대하여 일반화된 normalized static flow rate \bar{m} 를 분사압력에 대하여 표현하면 Fig. 6과 같다. 인젝터 내의 연료는 완전한 액상이고 압력의 변화 범위는 1 MPa이내로 낮아 압력에 의한 밀도의 변화는 무시할 만하다. 그러므로 조성이 고정된 연료에 대하여 밀도는 온도만의 함수로 간주할 수 있다. 그러므로 식 (1)을 식 (8)에 대입하면 다음과 같다.

$$\bar{m} = \frac{\sqrt{p_i - p_0}}{\sqrt{p_i^* - p_0}} = c_2 \sqrt{p_i - p_0} \quad (9)$$

인젝터 방출압력 p_0 를 가솔린 분사에서와 같이 매니폴드압력 p_m 과 같다고 가정하고 피팅(fitting)하면 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 실험값과 상당한 차이가 있다. 이는 연료가 포화압력 보다 낮은 환경으로 방출됨에 따라 감압 비등(flash boiling)이 일어나면서 증기압과 주변압력 사이의 압력이 형성되기 때문이다. Simplex method를 이용하여 실험 데이터와 가장 근접하는 인젝터 방출압력을 계산하면 124 kPa이다. 실험데이터로부터 계산된 인젝터의 방출

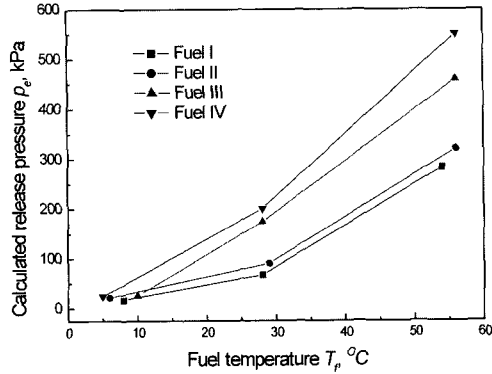


Fig. 7 Calculated release pressure from normalized static flow rate

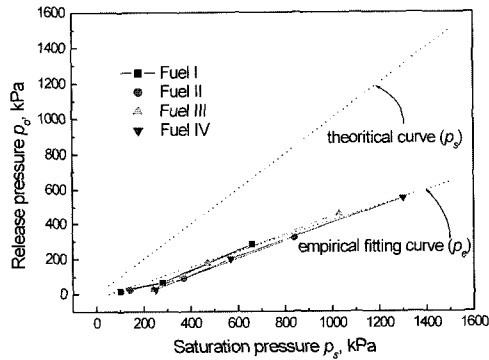


Fig. 8 A relationship between release pressure and saturation pressure

압력은 p_e 로 표기한다. 이와 같은 과정으로 네 가지 연료에 대하여 온도를 변화시키면서 실험한 분사량 실험으로부터 계산한 방출압력은 Fig. 7과 같다. 연료온도가 높거나 프로판의 함유율이 높을수록 방출 압력도 높아짐을 알 수 있다. 이를 다시 연료온도에 해당하는 포화압력에 대하여 나타내면 Fig. 8과 같다. 이론적으로 방출압력은 인젝터 내부의 연료온도에 해당하는 포화압력으로 고려된다.⁷⁾ 그러나 실제 실험으로부터 도출된 방출압력은 포화압력에 훨씬 못 미친다. 이러한 차이를 규명하기 위해서는 보다 깊은 연구가 진행되어야 할 것이다. 그렇지만 출구압력은 연료의 조성과 관계없이 포화압력과 선형적인 관계로서 쉽게 예측할 수 있다. 즉, 방출압력은 다음 식과 같이 포화압력으로 표현된다. 포화압력은 연료의 조성 and 온도의 함수이다.

$$p_e = 0.48 p_s \quad (10)$$

위의 실험은 특정한 인젝터에 관하여 수행된 실험 결과이다. 따라서 일반적인 관계를 규명하기 위해서는 여러 가지 인젝터에 관한 실험이 수행되어야 할 것이다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 새로운 인젝터 분사량 측정법을 고안하고 이를 통한 실험으로 액상LPG인젝터의 유량 예측모델을 개발하였다. 가스분석기를 이용하면 매우 신속하고 정확하게 인젝터의 유량특성을 파악할 수 있다. 이 방법으로 연료의 조성, 온도, 분사압력을 변경하며 분사량 측정실험을 수행하였다. 실험결과로부터 구한 액상LPG인젝터의 방출압력은 이론적으로 감압 비등 분사에서 예측되는 포화압력보다 상당히 낮지만 선형적인 비례관계를 보인다. 본 실험결과는 특정한 인젝터에 관하여 연구된 결과이므로 일반화시키기 위해서는 다양한 인젝터에 대한 실험과 감압 비등에 관한 이론적 고찰이 필요하다.

References

- 1) B. Hollemans, L. Conti, P. Kok, "Propane the 'Clean' Fuel of the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles," Windsor Workshop, TNO-paper VM9504, 1995.
- 2) M. Steen, "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations," The First International Berlin Colloquium : Alternative Automotive Fuels - Alternative Automotive Drivelines A Vision or Reality?, TNO-paper VM9608 1996.
- 3) R. Sierens, "An Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection," SAE 922363, 1992.
- 4) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, J. T. Cohen, R. Wicker, "The Effects of Fuel Composition, System Design, and Operating Conditions on In-System Vaporization and Hot Start of a Liquid-Phase LPG Injection System,"

- SAE 981388, 1998.
- 5) K. Kang, D. Lee, S. Oh, C. Kim, "Performance of an Liquid Phase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicle," SAE 2001-01-1958, 2001.
 - 6) S. Cho, K. Min, "Injector Control Logic for a Liquid Phase LPG Injection Engine," Transactions of KSAE, Submitted.
 - 7) H. M. Witlox, P. J. Bowen, Flashing Liquid Jets and Two-Phase Dispersion: a Review, HSE Books, p.37, 2002.