Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol.11, No.1, 2003

LPG 액상 분사 시 인젝터 주위의 Icing 현상에 관한 연구 (I)

김 우 석[*1] · 박 정 철[1] · 박 심 수[2] · 유 재 석[3] · 이 종 화[3]

아주대학교 대학원[*1] · 고려대학교 기계공학과[2] · 아주대학교 기계 및 산업 공학부[3]

A Study on the Development of Icing by Injection of LPG in the Liquid Phase around Injector (I)

Wooseok Kim[*1] · Jungcheol Park[1] · Simsoo Park[2] · Jaisuk Yoo[3] · Jonghwa Lee[3]

[1]*Automotive Engineering Lab., Graduate School of Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea*
[2]*Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea*
[3]*School of Mechanical Engineering, Ajou University, Suwon 442-749, Korea*

(Received 20 May 2002 / Accepted 31 October 2002)

Abstract : Recently, LPLi(Liquied-Phase LPG injection) system is studied for the new stringent emission regulations. But , there are some problems to be solved such as injector tip icing and fuel leakage for LPLi system development. In this paper, the icing problem near injector tip which leads to difficulty of accurate A/F control was studied and reported. Icing of injector tip and port wall was observed at all the cases in this study regardless of injection duration and angle, air humidity change. The spray angle of LPLi was observed approximately two times wider than that of Gasoline injection. This makes the LPLi spray collide with intake port around injector tip. Temperature of the wetted area was decreased and icing of water vapor contained in intake air because of evaporation of the fuel film. The ice of the injector tip and port wall is also affected by the materials related to heat transfer.

Key words : LPLi(액화석유가스 액상 분사), Icing(응결현상), Injector tip(인젝터 끝단), Evaporation(기화), Injection angle(분사각), Spray angle(분무각)

Nomenclature

L : penetration
θ : spray angle
t : time(sec)
V : injection momentum velocity(m/s)

1. 서 론

자동차의 배출 가스에 대해서는 북미를 중심으로 매우 강력한 규제를 시행 중에 있어, 세계 각국의 자동차사 및 부품 개발사 등은 이러한 규제에 대응하기 위한 기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

이러한 규제 강화의 대안으로 LPG 연료의 사용은 가솔린과 디젤 연료의 대체 에너지로서 활발히 연구되어지고 있다.

흡기 포트 액상 분사식 LPG 공급시스템은 SI엔진의 연료 공급 장치로 사용되어지고 있는 MPI(Multi Point Injection)방식과 각각의 실린더에 연료를 균일하게 공급하고 인젝션 시그널(signal)을 변화시켜 연료량을 제어한다는 점에서 유사하다 할 수 있다.

MPI의 장점인 흡기관 형상에 따른 실린더별 혼합기 편차 감소로 촉매의 변환 효율을 높이고, 흡기 포

*To whom correspondence should be addressed.
heli7@ajou.ac.kr

트 내에 공급되지 않은 잔량의 혼합기를 최적화 할 수 있으며, 가스 분사식에 비하여 좋은 응답성과 높은 출력을 얻기에 유리하다.[1,2)]

그러나, LPG는 상온에서 포화증기압(약 0.23 MPa)이 높기 때문에 감압 비등이 쉽게 일어난다.[2)] 연료 분사 후 감압비등은 액적 미립화와 체적효율 개선에 도움이 되는 현상으로 볼 수 있으나, 인젝터 팁 부근의 급격한 온도저하로 인해 실린더로 유입되는 공기 중의 수분이 응결되는 현상(icing)은 문제점으로 대두되고 있다.

특히, 엔진의 온도가 낮은 초기 시동의 경우, 혹은 외기 온도가 낮을 때 인젝터 주위에서 결로가 얼어 인젝터 팁이나, 주위 벽면에서 성장하게 되면 연료 분사 시 저항 성분으로 작용하게 되고 결국 정확한 공기연료비 제어가 어렵게 되는 문제점을 야기 시킬 수 있다.

LPG는 연료 특성상 분사 직전까지 액체 상태를 유지하기 위해서는 포화증기 압력을 높여 주어야 하는데, 분사 압력에 따라 분무형상과 연료의 주위 벽면과의 접촉 정도도 차이가 나타난다. 액상 LPG 분사에 관한 연구를 위해서는 연료 압력 변화에 대한 LPG 분무형상 파악 연구와 icing 형성 가능 영역에 관한 연구가 선행 되어야 한다. 또한, 실제 엔진에서 icing 발생 유무 확인과 액상 LPG 엔진에 대한 인젝터 홀더와 포트 주위의 최적 설계를 위한 제 인자들에 관한 연구가 반드시 병행되어야 하겠다.

따라서, 본 연구에서는 가솔린과 LPG 연료를 공급 압력에 따라 분사 후 각각의 연료에대한 분무형상을 비교하고, 액상 LPG 분사 시 icing 발생 유무와 인젝터 팁 주변의 온도 변화 및 재질 변화에 따른 영향을 가시화 리그 장치를 통해 알아 보고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 슈리렌 가시화 장치

슈리렌 가시화 장치에서는 액상의 LPG와 가솔린을 연료 분사 압력을 변화 시키면서 분사하고, 분사 후 일정 시간 간격으로 분무 형상을 촬영하기 위해 슈리렌(Schulieren) 장치를 이용하여 각각의 연료에 대한 분무 거동을 파악 할 수 있도록 구성하였다.

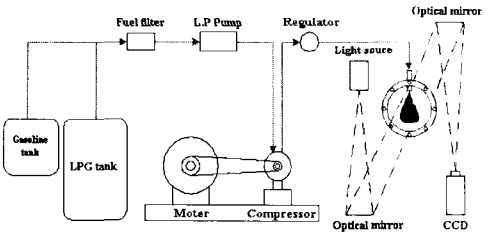

Fig. 1 Schematic diagram of fuel compressing system & schulieren system

슈리렌 실험 장치는 Fig. 1에 나타낸 개략도와 같이 Short duration light source(V-TEK사, Model : LS-202), CCD 카메라(TOSHIBA사, Model: IK-536), 그리고 각종 광학거울을 조합하여 화상을 취득할 수 있다.

또한, 연료 분사 압력 변화를 위해 연료 압축용 고압펌프, 가시화 창이 장착된 정적챔버, LPG 연료 탱크, 2hole 가솔린 인젝터, 그리고 인젝터 드라이버 등으로 구성하였다.

LPG연료를 펌프로 압축하게 되면 온도 상승으로 인해 LPG는 펌프 내부에서 기화가 일어나므로 펌프로 LPG를 유입하기 전에 별도의 열 교환기를 두어 연료 온도를 0~4° C로 유지하였다.

2.1.2 흡기관 모사 장치

실제 엔진에서 인젝터 팁과 홀더 주위의 icing 현상을 관찰하기 위해서는 내시경을 이용하여 흡기관 내부를 관찰하는 실험이 이루어 져야 한다. 그러나 엔진의 진동과 구조적인 어려움으로, 본 연구에서는 인젝터 홀더 주위를 모사한 가시화 RIG를 제작하여 인젝터 팁과 주위 벽면에 대한 가시화를 수행하였다.

Fig. 2는 인젝터 포트 모사 실험장치 개략도를, Fig. 3에는 인젝터 홀더와 열전대 위치를 세부적으로 나타내었다.

Fig. 3과 같이 인젝터 홀더는 공기 유입 통로와의 각도를 실제 엔진에서 인젝터 장착 각도와 동일하게 28° 로 제작하였고, 60W 강제열원 8개를 이용하여 모사장치를 가열함으로서 엔진에서 fully warm up 상태를 재현 가능하도록 하였으며, RIG 장치의 양측면과 아래부분에 가시화가 가능한 창을 설치하여 icing 현상을 관찰할 수 있도록 하였다.

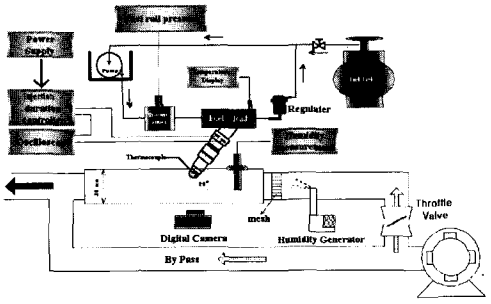

Fig. 2 Schematic diagram of visualization rig on liquid LPG injection

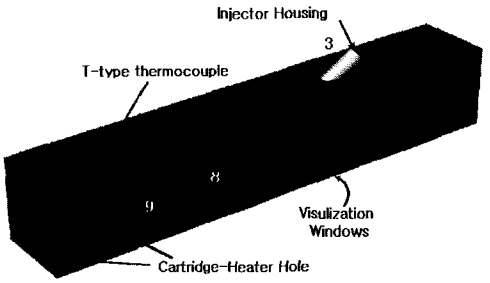

Fig. 3 Thermocouple and heat source installation points on visualization test rig

또한, T-type 열전대를 이용하여 인젝터 팁, 벽면의 온도 그리고 흡기관을 들어오는 공기와 나가는 혼합기 등의 온도를 측정할 수 있도록 하였다.

가시화 장치에는 근접 촬영을 위한 super macro lens(Raynox사), 1/4″ DSP color CCD 카메라(f : 3.6mm, A.O.V : 78°), 그리고 digital camera 등을 이용 하였고, CCD에 입력된 영상은 캡션을 통해 동영상과 정지 화상으로 획득하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1슈리렌 가시화 실험

슈리렌을 이용한 가시화 실험에서는 정적챔버 상단에 분사각도 측정이 용이한 가솔린용 2hole 인젝터를 두어 LPG와 가솔린 연료를 4, 6, 8, 10bar로 각각 압축하여 공급하고, 정적챔버 내부의 분위기 압력은 1bar로 유지 하면서 분사하게 된다.

슈리렌 영상획득은 4ch 컨트롤 보드를 이용하여 인젝터를 구동 시키고 일정기간(Dead time) 지연 후 광원을 공급한다. 광원의 공급과 함께 관찰점의 피사체는 트리거 신호의 조작으로 원하는 시간 간격으로 분할하여 CCD 카메라와 연결된 영상 처리 단으로 분무과정이 저장 된다. 인젝터의 분사기간은 5ms로 일정하게 유지하고, LPG는 분사 초기부터 1ms 간격으로, 가솔린 분사는 0.5ms 간격으로 10회 촬영하였다.

2.2.2 흡기관 모사 실험

흡기관 내부에 LPG를 액상으로 분사 하면 LPG는 감압 비등에 의해 급격한 기화가 일어 나고, 액상의 연료는 주위로부터 증발 잠열을 흡수하게 된다. 이때 인젝터 팁과 주위 벽면의 온도는 강하하고, 온도가 응결 점에 도달하는 부분을 기점으로 흡입관을 통해 유입되는 공기 중의 수분과 연료에 포함된 수분이 응결을 이루기 시작한다. 이러한 현상을 icing 이라 한다.

특히, 인젝터 팁은 흡기관과 재질을 달리하는 재료로 이루어져 있고, O-ring에 의해 주위로의 열전달 또한 분리된 상태이다. 그러므로 인젝터 팁은 LPG 기화와 더불어 온도 강하가 가장 활발히 진행되고, 인젝터 주위 벽면의 온도는 분사 후 미쳐 기화되지 못한 연료의 접촉에 의해 인젝터를 중심으로 온도가 내려가게 된다.

흡기관 모사 실험에서는 액상의 LPG연료 분사 시 팁과 주변에서 생성되는 결로의 생성과 발달을 관찰하고, 인젝터 팁과 주위의 온도 변화를 측정한다.

흡기관을 흐르는 공기량과 연료 분사량은 대상 엔진(2.7L, V6) 단기통에 대한 엔진 회전수 1000, 2000, 3000rpm, WOT의 상황을 재현하였고, LPG의 주 성분은 부탄을 사용하였다.

초기 시동 조건에서는 강제 열원의 공급 없이 벽면의 온도가 대기 온도(~18°C)와 평형을 이룰 때부터 분사를 시작하였다.

또한 Fully warm up 실험에서는 인젝터 내부에서의 기화를 막기위해 연료의 압력을 10bar로 가압하였고, 분사초기에 완전한 액상분사를 위해 연료관 위에 위치한 밸브를 통해 일정량의 연료를 유출 시키는 방법을 사용하여 실험을 수행하였다.

인젝터 팁과 주위, 흡기관 내부 벽면, 그리고 유입되는 공기의 온도와 분사 후 혼합기의 실시간 온도 변화는T-type 열전대를 이용하여 획득하였다. 흡기관으로 유입되는 공기 중의 습도는 결로 형성에 중

요한 인자로 작용한다. 실험에서는 공기 중의 습도 조절을 위해 가습기를 이용하여 상대습도 90~100%로 일정하게 유지한 상태에서 흡기관 내부 유동을 모사하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인젝터 분무 특성 파악

슈리렌 실험에서는 가시화 화상을 후처리 하여 Fig. 4에 정의한 분무 도달 거리, 분무각, 그리고 분무운동 속도 등을 계산하였다.

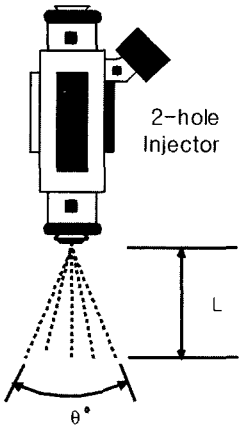

Fig. 4 Definition of injection spray angle(θ) and penetration(L)

3.1.1 분무각

분무의 분산 특성을 나타내는 분무각은 Fig. 14의 가솔린과 LPG 연료를 각각 압력 변화에 따라 나타낸 분무형상을 통해 그 특성을 알 수 있다.

Fig. 5는 가솔린과 LPG 를 연료압력 4bar에서 분무 후 5ms가 되었을 때를 나타낸 것이다. 분무각은 가솔린 연료에서는 초기 인젝터 공을 빠져 나온 연료의 각도가 최종 선단 도달 거리(100mm)까지, 약 37° 로 유사한 분무 각도를 나타내고 있으나, LPG의 경우 감압비등에 의해 발생된 연료의 증발로 인해 인젝터 팁 주변에는 80° 이상의 넓은 분무각이 형성됨을 알 수 있다.

특히, 실제 엔진에서는 실험에 사용된 정적 챔버에 비해 상당히 좁은 관로에 LPG를 분무하게 되므로 급속히 기화가 진행되는 연료는 인젝터 팁 주변

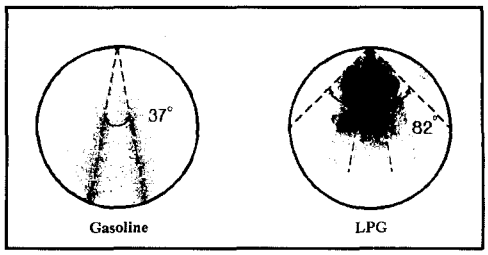

Fig. 5 Comparison of spray angle between LPG and gasoline fuel at the fuel pressure of 4bar

은 물론 주위 벽면까지도 접촉하게되고, 따라서 모두 icing 형성의 발달 가능 범위 내에 노출되어 있음을 알 수 있다.

3.1.2 분무 선단 도달거리

Fig. 6은 2hole 인젝터를 사용하여 인젝터 팁에서의 압력과 연료 압력과의 차압을 3, 5, 7, 9bar로 변화시켜 관찰한 분무 선단 도달거리(L)를 나타낸 그래프이다. LPG는 특성상 인젝터 팁 주위에서의 감압비등에 의해 분무 후 액적의 증발 속도가 빨라지고, 비체적이 증가한 연료는 주위의 공기에 의한 저항성분으로 분무에 작용하여 선단 도달 거리가 일반 가솔린 연료에 비해 모든 압력변화에서 현저하게 저하된다는 것을 알 수 있다.

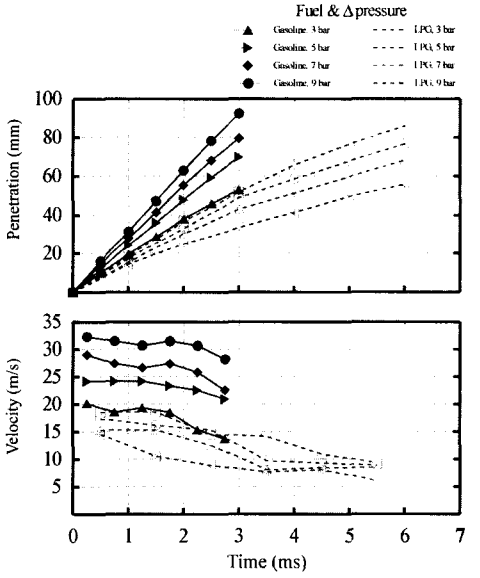

Fig. 6 Comparison of spray penetration and velocity between LPG and gasoline fuel injection

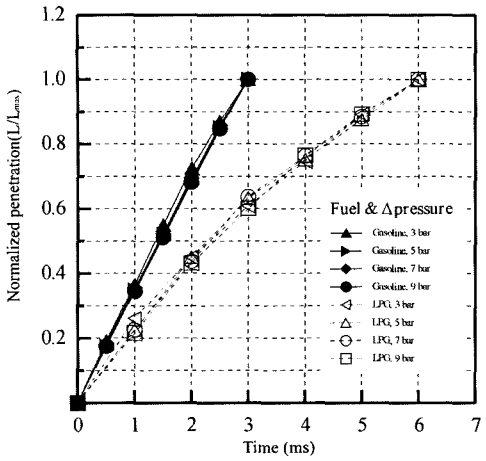

Fig. 7 Comparison of normalized spray tip penetration between LPG and gsoline fuel injection

Fig. 7은 인젝터 출구에서부터 분무 선단 도달거리(L)를 시간별로 측정하여 기준시간(LPG : 8ms, Gasoline : 3.5ms) 경과 후 분무 선단 도달거리(L_{max})로 무차원화 하여 나타낸 것이다. 무차원 분무 선단 거리(L/L_{max})는 분무압에 무관하게 나타남을 알 수 있고, $L/L_{max} = C \cdot (\Delta t)^n$의 형태를 보이고 있다. 실험결과 LPG의 경우 상수 C는 0.2134, 지수 n은 0.774를 나타냈었고, Gasoline의 상수 C는 0.336, 지수 n은 0.844의 값으로 나타났다.

3.1.3 분무 속도

분무 속도는 인젝터 분사 후 선단 거리를 시간으로 나누어 속도로 환산하였다.

Fig. 6의 동일한 시간에서 가솔린과의 비교를 통해 가솔린의 경우 대부분이 액체 상태로 존재하므로 LPG에 비해 비중이 크고 운동에너지가 높아 분사압력을 높일수록 선형적으로 증가하였고, 최고 45%까지 빠르게 나타났다.

따라서, 분무 속도가 느리다는 것은 인젝터 팁 주변에 연료가 머물게 되는 시간이 가솔린에 비해 길다는 것을 알 수 있다.

3.2 흡기관 모사 실험

3.2.1 Icing 형성 가시화

Fig. 8은 포트 벽면에 열원을 공급 하지 않은 상태에서 흡기관 재질을 열전도성이 낮은 아크릴 재질일 경우와 실제 엔진에서의 흡기관 재질과 유사한 알루미늄을 사용하였을 경우를 일정 기간(5min) 후 비교하여 나타낸 것이다.

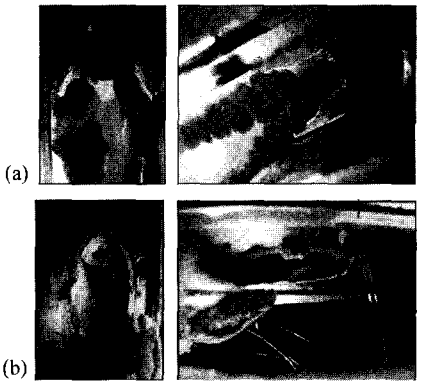

Fig. 8 Photos of the icing development around tip of injector in different material, between (a) Acryl and (b) Aluminum

특히, 주위로의 열전도성이 낮은 아크릴 재질에서 icing은 인젝터 팁에서 보다 분사 후 연료가 연속적으로 접촉 되는 벽면을 중심으로 급격히 성장한다. 즉, 분무각 내에 노출되어 있는 인젝터 전단 부분은 모두 icing이 발생될 수 있다.

그러므로 벽면의 온도가 특정 점에 집중되어 강하하는 현상 완화를 위해서는 인젝터 삽입 깊이와 기울임 각, 분사 압력, 그리고 인젝터 주위의 재질을 고려한 설계가 필요하다.

Fig. 9는 시동 초기 온도 조건에서 인젝터 팁 주위를 1000, 2000, 3000rpm에 대하여 약 4분간 나타낸 것이다. 연료량이 증가할 수록 인젝터와 재질을 달

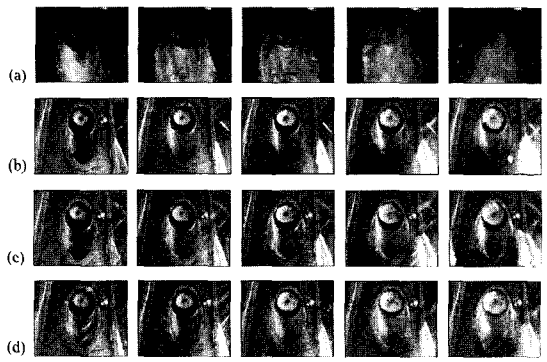

Fig. 9 Photos of icing development around injector tip from start to four minute at WOT condition, (a) 2000rpm in the acryl (b) 1000rpm (c) 2000rpm (d) 3000 rpm

Fig. 10 Photo of icing on injector tip at fully warm up condition, 2000rpm, WOT

리하는 끝단을 중심으로 Icing 현상이 발생되어 주위 벽면으로 까지 확대된다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 10에는 강제 열원을 이용하여 인젝터주변 온도를 평균 80°C로 가열하면서 fully warm up 상태를 재현한 것이다.

인젝터 주위 벽면을 가열할 경우 연료라인의 온도 또한 상승하여 약 60°C에 이르게 된다. 이때 연료의 압력을 10bar로 유지하였으므로 연료라인 내부의 LPG는 액상으로 유지되어질 수 있다.

앞서 강제열원을 공급하지 않았을 때와 유사하게 Fully warm up 상태에서 액상으로 분사된 연료는 감압비등에 의해 인젝터 팁 주변의 온도를 급격히 강하 시키고, 연료분사 시작부터 약 3분 후부터는 열전달률이 취약한 부분을 중심으로 icing 핵이 형성된다.

따라서 가시화 실험 결과로부터 인젝터 팁 주위에서의 icing 현상은 정도의 차이는 있으나, 연료량, 인젝션 주기와 기간, 공기량, 습도, 분사각도, 그리고 강제 열원 공급 유무에 무관하게 발생 됨을 알 수 있다.

3.2.2 인젝터 팁 주변 온도 변화

Fig. 11은 인젝터 팁에서의 온도와 혼합기의 온도 변화를 나타낸 것이고, Fig. 12는 초기 시동 3000rpm 조건에서 인젝터 주위의 벽면 온도변화를 나타낸 것이다.

분사된 연료의 증발로 인해 흡기관 벽면과 인젝터 주변 온도는 서서히 강하 한다. 특히, 인젝터 팁의 온도는 주변의 온도에 비해 다소 빠른 속도로 감소 되다가, icing 핵 발생 이후부터는 약 −15°C까지 급격히 강하 하였다.

이것은 연료 분사 직후 노즐을 빠져 나온 LPG 액적은 분열하여 미립화를 시작하고, 급격히 기화되면서 직접적으로 접촉하고 있는 인젝터 팁 주위 뿐만 아니라, 분무각도 80°에서 접촉하는 전부분에 걸쳐 기화열을 흡수 하기 때문이다. 아울러, 인젝터 전 후단의 공기 온도 차가 최고 18°C 이상으로 나타나게 되는데 이 또한, 액상 LPG 분사의 장점인 체적효율 증가효과를 기대할 수 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 13은 fully warm up 상태 재현에서 취득한 인젝터 팁과 혼합기의 온도 변화를 나타낸 것이다. 강제열원을 공급한 경우에도 인젝터 팁의 온도는 급격이 강하하고, icing 핵이 형성되는 약 3분 후부터는 온도가 공기와 연료의 혼합기 온도에 수렴해 간

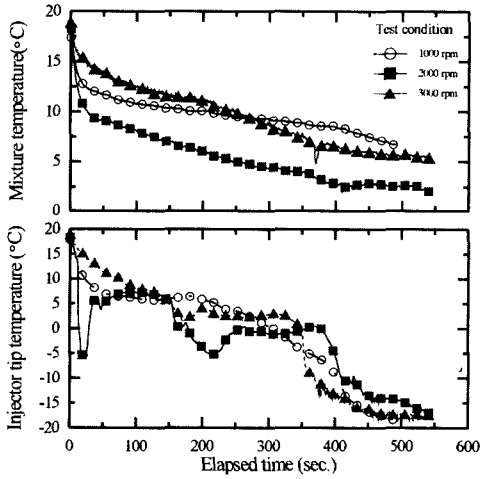

Fig. 11 Effect of injection by liquid phase LPG in injector tip and mixture temperature

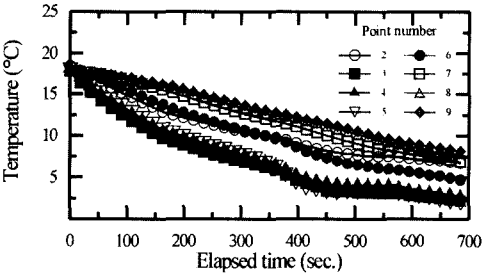

Fig. 12 Comparison of temperature surrounding injector without heating at 3000rpm, WOT

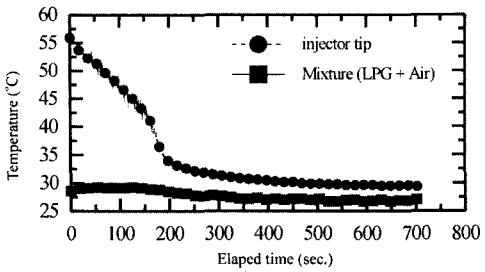

Fig. 13 Temperature of injector tip and mixture at fully warm up condition, 2000rpm, WOT

다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

액상 LPG 분사 시 인젝터 팁 주변의 icing 현상 연구를 위해 슈리렌을 이용한 분무형상 파악과 흡기관 모사 실험을 통한 결론은 다음과 같다.

1) LPG를 액상으로 분사할 경우 분사 후 감압 비등으로 인해 인젝터 팁 주변에서 급격한 증발이 일어나면서 분무각은 연료압력 변화와 무관하게 약 80° 이상을 이루게 된다.

2) LPG 는 가솔린에 비해 분무 선단 도달 거리가 모든 압력 변화에 대하여 1/2 수준이며, 최고 분무 선단 거리로 무차원화한 결과 분사압력에 무관하게 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$L/L_{max} = 0.2134 \cdot (\Delta t)^{0.774}$

3) 분무 형상 관찰로부터 LPG는 분무 선단 도달 거리가 짧고, 분무각이 넓으며, 분사 속도가 낮으므로 인젝터 팁 주변에서의 연료 증발로 인한 온도 감소와 icing 현상 발생 영역이 흡기관 내 인젝터 주변 전반에 걸쳐 형성 될 수 있다.

4) 인젝터 팁 주위에서의 icing 현상은 발생 정도와 기간의 차이는 있지만, 연료량, 연료압력, 인젝션 주기와 기간, 공기량과 습도, 인젝터 분사 각도, 그리고 강제 열원 공급 유무에 무관하게 모든 실험 조건에서 발생된다.

5) 벽면의 온도가 특정 점에 집중되어 강하하는 현상 즉, icing 현상 완화를 위해서는 인젝터 삽입 깊이와 기울임 각도 및 인젝터 홀수, 분사 압력, 그리고 인젝터 주위의 재질을 고려한 설계가 필요하다.

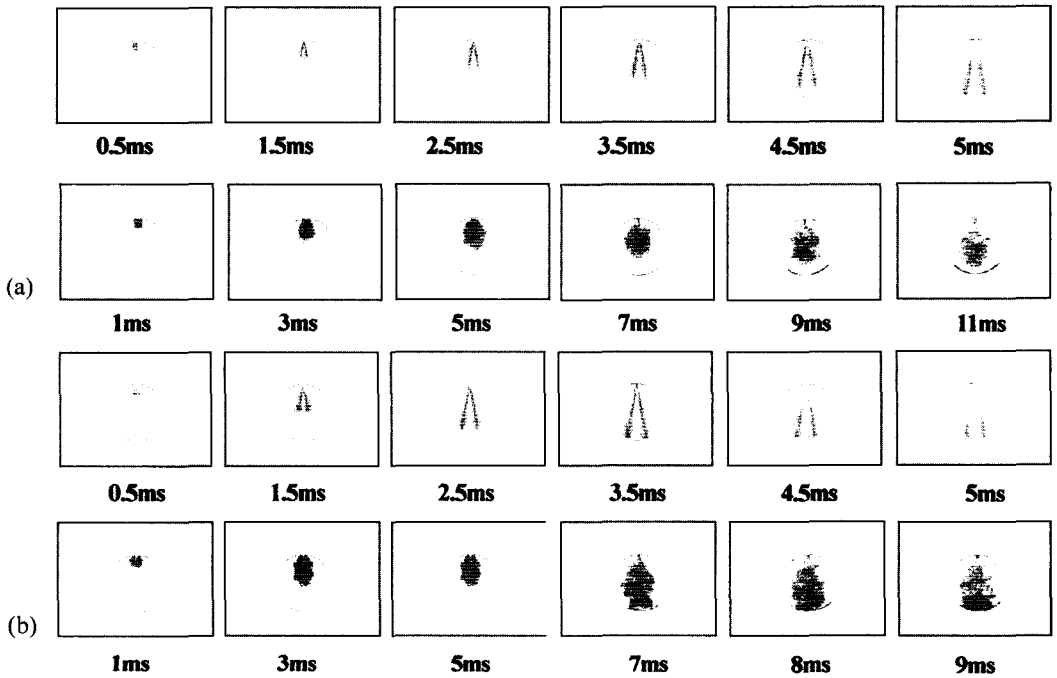

Fig. 14 Photos of spray pattern of various injection pressure between gasoline and LPG fuel with 2hole injector, (a) ΔP = 3bar, (b) ΔP = 9bar, between fuel rail and injector tip(upper : gasoline, below : LPG)

후 기

본 연구는 "LG Caltex 가스/SK 가스/한국 LP 가스 공업협회", 그리고 "국가지정 연구실 사업(NRL)"의 일부로 수행 되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

References

1) W. S. Kim, J. H Lee, C. H. Jang, "A Study on the Combustion Characteristics and the Control on the Fuel Flow Rate of LPG Intake Port Injection Engine," Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.31-39, 2000.

2) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, J. Cohen, R Wicker, "The Effects of Fuel Composi--tion, System Design, and Operating Conditions on In-System Vaporization and Hot Start of a Liquid-Phase LPG Injection System," International Spring Fuels and Lubricants, SAE 981388, 1998.

3) K. H, Lee, C. S. Lee, M. K. Shin, B. K. Kim, "A Study on Spray and Fuel Film Flow Characteristics of MPI Gasoline Engine," KSAE, Autumn Conference Proceeding, Vol.II, pp.307-313, 1995.

4) A. Stodart, "Fuel System Development to Improve Cold Start Performance of a Flexible Fuel Vehicle," SAE 982532, 1998.

5) H. S. Lim, K. H. Park, "Liquid LPG Spray Characteristics with Injection Pressure Variation -Comparison with Diesel Spray-," KOSCO, Vol.4, No.2, pp.43-50, 1999.

6) R. Cipollone, C. Villante, "A/F and Liquid-Phase Control in LPG Injected Spark Ignition ICE," International Fall Fuels and Lubricants, SAE 2000-01-2974, 2000.