

액상분사식 LPG 연료공급방식의 아이싱현상에 관한 연구 Investigation of Icing Phenomenon in Liquid Phase LPG Injection System

김 창 업*, 오 승 목*, 강 건 용*
C. U. Kim, S. M. Oh, K. Y. Kang

ABSTRACT

The liquid phase LPG injection (LPLI) system is considered as one of the next generation fuel supply systems for LPG vehicles, since it can accomplish the higher power, higher efficiency, and lower emission characteristics than the existing mixer type fuel supply system. However, during the injection of liquid LPG fuel into the inlet duct of an engine, a large quantity of heat is extracted due to evaporation of fuel. A problem is that the moisture in the air freezes around the outlet of a nozzle, which is called *icing phenomenon*. It may cause damage to the outlet nozzle of an injector. The frozen ice deposit detached from the nozzle also may cause a considerable damage to the inlet valve or valve seat. In this work, the experimental investigation of the icing phenomenon was carried out. The results showed that the icing phenomenon and process were mainly affected by humidity of inlet air instead of the air temperature in the inlet duct. Also, it was observed that the icing occurs first in the inlet of a nozzle, and grows considerably at the upper part of the nozzle inlet and the opposite side of the nozzle entrance. An LPG fuel, mainly consisting of butane, has lower latent heat of vaporization than that of propane, which is an advantage in controlling the icing phenomenon.

주요기술용어 : LPLi(액상분사식 LPG 연료공급), Icing phenomenon(아이싱 현상), Vaporization(기화), nozzle entrance(노즐출구), latent heat of vaporization(기화열)

1. 서론

LPG 액상분사방식(Liquid Phase LPG Injection, LPLi)은 LPG차량의 연료공급방식으로 지금까지 우리나라에서 주로 사용하고 있는 믹서방식에 비해서 높은 출력과 효율 및 적은 배기가스의 배출이 가능하여 차세대 LPG 연료공급방식으로 사용될 예정이다. 특히, LPLi방식의 적은 배출가스특성은 앞으로 적용되는 엄격한 자동차 배기규제인 EURO-IV나 ULEV 규제 등을 만족시키기 위해서는 반드시 적용되어

야 할 기술로 평가되고 있다. 따라서 많은 연구자들이 이러한 LPLi 방식에 대한 연구를 진행 중에 있으며⁽¹⁻⁷⁾ 우리나라에서도 이런 연구의 방향에 따라 이 분야의 연구를 1999년부터 진행 중에 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 또한 자동차 제작사에서도 이러한 기술의 발전에 따라 LPLi차량의 상용화 계획을 마련하는 수순을 따르고 있다.

LPG 액상분사방식은 1994년경에 유럽에서 개발되어 상용화된 기술로서 기존의 LPG연료를 사용하는 기존방식과 달리 액상의 연료를 연료탱크내의 펌프로 연료분사기까지 공급하여 분사하는 방식이다. 아직까지 연료시스템의 구체적인 문제점은 보고되고 있지 않다.

* 한국기계연구원 LP가스엔진연구사업단

아이싱 현상이란 이러한 LPLi 연료공급방식에서 액상 LPG 연료가 분사기에서 분사될 때, 액상의 연료가 기화하면서 주위의 공기로부터 기화열을 뺏어 가는 현상 때문에 발생한다. 우리나라 LPG의 주성분인 프로판의 기화열은 101kcal/kg, i-부탄은 87.6kcal/kg, n-부탄은 92.1kcal/kg이다. 이런 기화열에 의해서 차가워진 연료 분사기 노즐부에 엔진으로 흡입되는 공기 중에 포함되어 있는 수증기가 얼어붙게 되고 이는 최악의 경우, 연료 분사노즐 입구의 일부를 막아버리거나, 얼어붙은 얼음덩어리가 떨어져 나가면서 엔진의 흡기 밸브계에 손상을 일으킬 수 있다.

물론 아직까지 실 엔진상황에서 이러한 아이싱 현상이 발견되어 엔진의 성능변화나 엔진밸브부의 파손, 고장이 보고된 적은 없으나 지금까지 유럽에서 상용화된 LPLi차량이 대부분이 bi-fuel 차량이고 LPG 전소엔진이 전무한 상태이며, 아이싱 현상의 발생은 현실적으로 일어날 수 있는 것이니 만큼 우리나라에서의 본격적인 보급이 거론되고있는 시점에 이를 구체적으로 살펴보고 연구할 필요성이 있는 것이다.

따라서 본 연구에서는 최신의 액상분사식 LPG엔진기술의 연료공급 시스템에서 가장 중요한 문제점의 하나가 될 수 있는 아이싱 현상에 대한 기초연구로서 아이싱이 생성되는 조건과 생성모습을 여러 가지 주위조건에 따라 실험하여 이의 특성을 알아내어 아이싱의 생성 메커니즘 및 기본특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치

액상분사식 LPG 공급시스템은 액상 LPG분사용으로 사용되는 분사기를 이용하여 LPG 연료를 액상으로 자동차의 흡기관 내에 분사하는 시스템이다. 물론, 차량용에 탑재되는 연료공급시스템은 연료탱크, 탱크내의 가압용 연료펌프, 액상유지를 위한 압력조절유닛 등의 부가적인 부품들이 더 첨가되며 이들은 모두 ECU에서 조절되게 된다.

본 연구에서는 액상 LPG연료 분사기로 사용되는 Siemens사의 DEKA-II 분사기를 이용하였고 연료의 순환을 위한 연료탱크, 연료펌프 대신에 질소가스를 이용하여 LPG를 포화증기

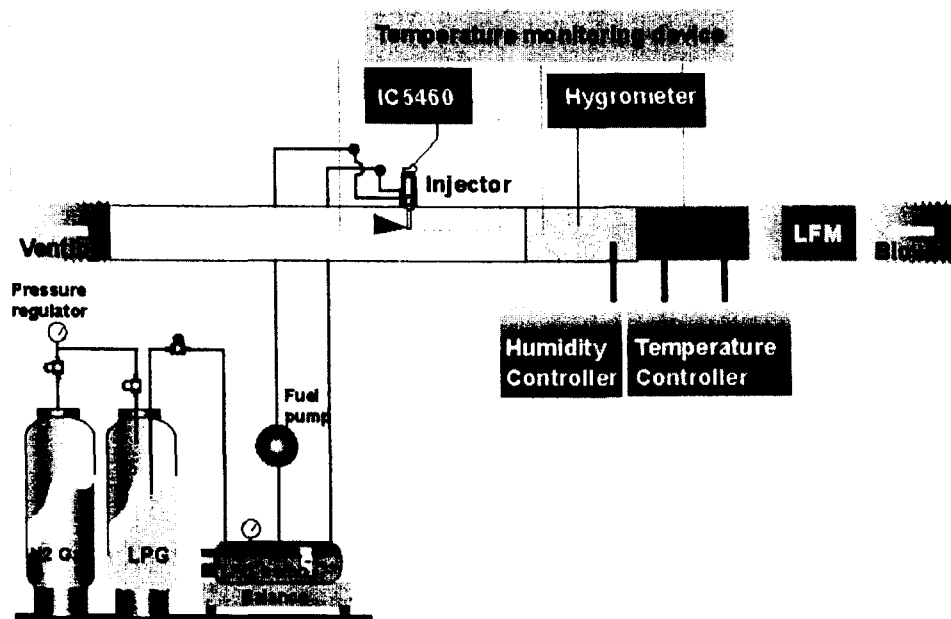


Figure 1. Experimental apparatus

압보다 5bar 정도 높게 가압함으로써 LPG연료를 액상으로 유지하였다. LPG 연료펌프 대신에 일반 가솔린 연료펌프를 이용하여 연료를 순환시켰는데 본 리그실험에는 문제없이 사용할 수 있었다. 분사기의 제어는 IC5460장비를 이용하였고, 흡입공기의 온도, 습도 등을 변화시키는 조절장치를 제작하여 설치하였다. 각 부위의 온도측정을 위하여 열전대를 설치하였다. 엔진에서의 아이싱 현상을 모사하기 위하여 연료분사기는 엔진의 흡기관과 비슷한 직경 5mm의 아크릴관에 설치하였으며 전체의 실험 장치의 모습이 fig. 1에 나타나 있다.

실험조건은 입구에서 공기의 유량을 blower로 일정하게 유지하며 분사기의 분사위치 전에 온도 및 습도를 조절하는 장치를 설치하여 원하는 조건을 얻도록 조절하였다. 유량은 3.7L/h로 일정하게 유지시켰으며, 온도는 최대 영하 15도에서 영상 10도까지, 습도는 25% 에서 95% 정도까지 변화시켰다. 분사는 5msec의 분사시간에 100msec간격으로 계속적으로 이루어졌으며 시간경과에 따른 아이싱 현상을 관찰하였다

3. 실험결과 및 해석

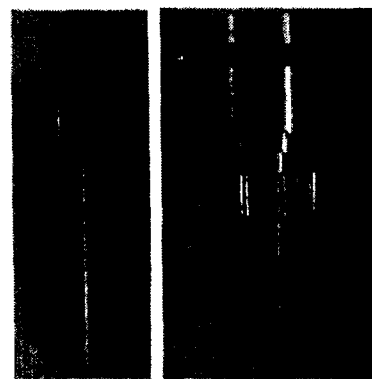
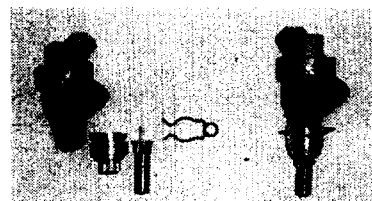
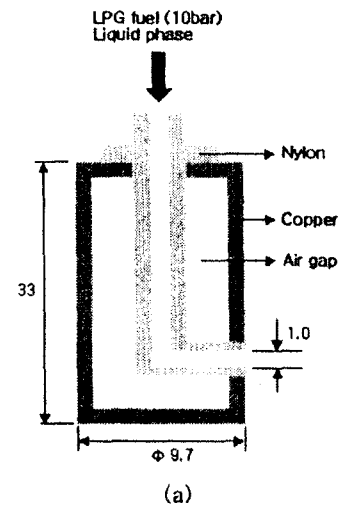
3.1 인젝터

본 연구에서 사용한 연료분사기는 분사기의 본체, 엔진의 흡기포트부에 장착하기 위한 어댑터부 및 포트부 중간지점에서 분사되도록 노즐부로 구성되어 있다. 노즐부는 연료가 지나가는 나이론 재질의 내부와 동재질의 외부구조물로 이루어져 있으며 나이론과 동재질 사이에는 약간의 공간에 공기가 존재하여 외부의 열 유입을 차단하여 액상 LPG 연료의 불필요한 기화를 막는 역할을 한다.⁽¹¹⁾ LPG연료는 인젝터부로 약 10bar 정도의 가압된 상태로 들어가며 노즐을 거쳐 흡기관 내로 분사된다. 노즐부의 대략의 구조를 fig. 2에 나타내었다.

3.2 Icing 현상

아이싱 현상을 조사하기 위하여 흡입공기의

조건을 습도별, 온도별로 바꾸어 가며 LPG 분사기를 작동시켜 실험을 하였다.



(b)

Figure 2. Schematic diagram(a) and photographs(b) of LPLi injector

저습도 (25%)에서는 아이싱 현상이 거의 발생하지 않았으며 이는 주위온도의 변화에도 크게 영향을 받지 않았다. 습도가 증가하여 70% 정도를 넘게 되면 아이싱의 발생이 크게 증가하였는데 fig. 3에 이러한 결과를 나타내었다.

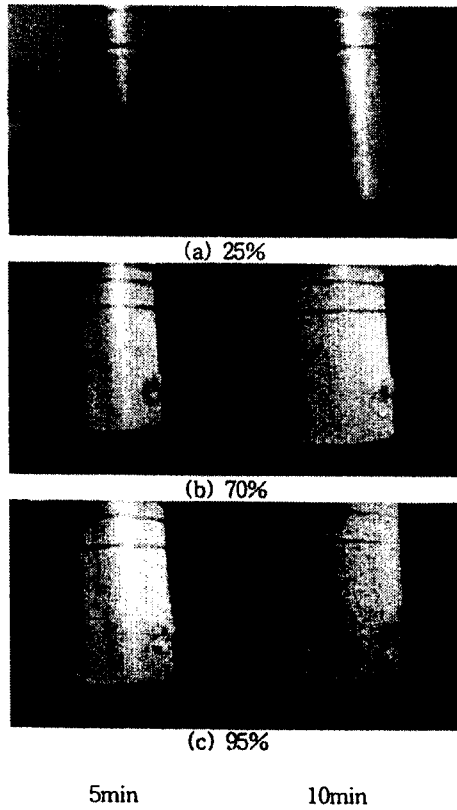


Figure 3. Observed icing phenomena with various humidity and time elapsed after injection (surrounding air temperature was 15°C, flow rate was 3.7L/h)

일반적인 아이싱의 성장은 상대습도 70% 부근에서 급격히 증가하였으며 연료분사 후 시간에 따라 아이싱량은 증가하였다.

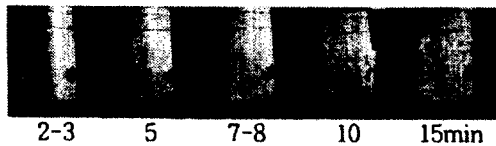


Figure 4. Overview of icing phenomenon under high humidity (85%) and low temperature (-15°C)

Figure 4에는 영하권(주위 공기온도 -15°C) 및 85%의 고습도 상황에서 시간별로 나타나는 아이싱의 형성과정들을 나타내었다. 분사와 함께

온도가 떨어진 노즐 출구부에서 1분 이내에 아이싱 현상이 발생하며 계속적으로 생성과 결정체 이탈이 반복적으로 진행되며 성장하였다. 2-3분에 노즐출구의 상부와 노즐의 뒷부분에서 서서히 아이싱이 일어나며 이렇게 형성된 아이싱은 계속적인 분사로 노즐출구의 상부 및 뒷부분에서 축 대칭형으로 성장하였다. 5분을 넘어가면서 노즐의 옆면에서도 아이싱이 서서히 성장하게 되며 10분 정도 분사시간이 지나면 연료가 분사되는 노즐출구를 제외한 전 영역에서 아이싱의 성장이 매우 크게 발생하였다.

아이싱의 성장은 생성과 이탈이 반복되면서 진행되며 이에 따라 분무 하류부에 떨어져 나간 결정체들도 많아진다. 하지만 그 자체가 매우 단단한 얼음덩어리의 결정체로 성장하여 떨어지지 않는 경우, 아이싱의 발생에 의한 밸브부의 파손 등은 일어날 확률이 매우 적은 것으로 판단된다. 또한 아이싱으로 인한 노즐입구의 막힘 현상은 발생하지 않았으나 부분적으로 막힘 정도는 파악하지 못하였다. 추후에 분사량을 정밀 측정하여 이를 확인해 볼 예정이다. Fig.5에는 하류부근에 떨어져 나간 아이싱 입자들의 모습을 보이고 있다.

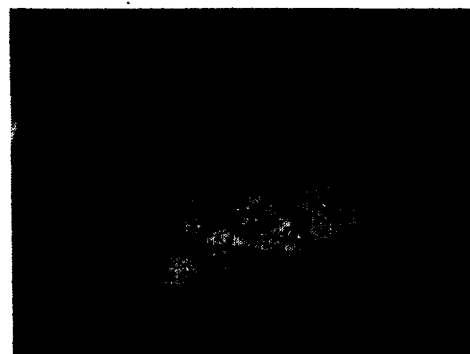


Figure 5. Photograph of icing particles in the downstream (temperature = -15°C, flow rate = 3.7L/h, humidity = 85%)

물론 이것은 5에서 10분 동안 외부에서의 열 유입이 없다는 가정 하에서 상대습도가 높고 주위온도가 영하권인 아이싱 발생이 유리한 상

황에서 발생한 것이다. 실 엔진상황에서는 5분이나 10분 등의 긴 시간동안에 노즐부가 영하권의 저온과 고습도 상황을 유지하지 않으며 엔진의 시동과 동시에 열전달에 의한 외부 열원이 동계질의 노즐외부로 유입되게 된다. 따라서 본 실험에서의 아이싱 현상의 관찰은 아이싱 현상이 일어나도록 엔진의 실제보다 좀더 악화시킨 상황에서 이루어진 것으로 실 엔진에서의 아이싱 현상은 다른 결과를 보여 줄 것으로 보인다.

주위온도가 영상권(약 10℃)의 경우에도 아이싱 현상이 발생하며 습도에 매우 민감하게 반응하였다. 분사로 인하여 차가워진 노즐부에 아이싱이 발생하며 분사가 멈춰서 노즐부의 온도강하가 멈추면 영상권의 주위온도에 의하여 아이싱에 의하여 생성된 얼음 등이 바로 녹으며, 다시 분사가 시작되면 다시 얼어버리는 현상을 보인다. Fig. 6에 그 현상을 나타내었다.



Figure 6. Formation of icing at the surrounding temperature above zero (Surrounding air temperature=10℃, flow rate=3.7L/h, humidity=85%)

이와 같은 여러 가지 조건에서의 아이싱 관련 실험을 통하여 외부에서의 열유입이 없는 가정 하에서 다음과 같은 결과를 정리해 낼 수

있다.

아이싱 현상은 주위의 온도보다는 주위 흡입 공기의 상대습도 및 분사시간에 매우 큰 영향을 받는다는 것이다. 특히, 분사로 인한 노즐부의 온도강하는 상대습도가 높을 경우, 즉각적인 아이싱의 형성을 유도하며 이는 주위온도에 거의 무관하였다. Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 분사시작 후 5분 후에 관찰하여 노즐의 몇 %정도에 아이싱이 발생한지를 정성적으로 파악하여 나타내었다.

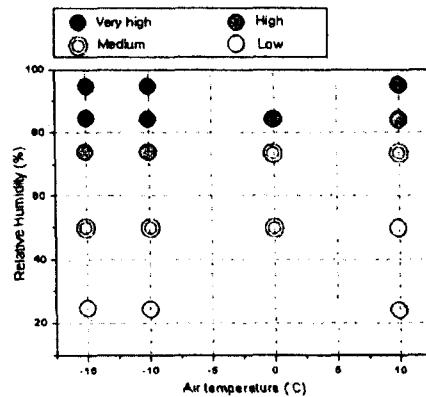
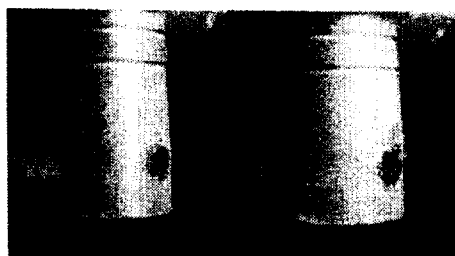


Figure 7. Overall trends of icing phenomenon with various conditions (five minutes after injection start)

3.3 연료의 영향

우리나라에서의 LPG연료는 가정용으로 사용되는 프로판과 운송 차량용인 부탄으로 크게 나누어지며 이들의 물성치는 다음과 같다. 프로판의 기화온도는 -42℃, 기화열은 101.8 kcal/kg인데 비하여 n-부탄의 기화온도는 -0.5℃ 및 기화열은 92.1 kcal/kg, i-부탄의 경우, 기화온도는 11.7℃ 및 기화열은 87.6 kcal/kg이다. 따라서 LPG연료성분 중, 부탄의 성분이 많은 우리나라의 LPG연료는 프로판 성분이 많은 유럽지역보다 분사를 함으로써 발생하는 전체적인 온도강하가 덜 일어나게 된다. 결국, 아이싱에 관련해서도 상대적으로 적은 아이싱이 발생하게 되며 Fig. 8에 이러한 연료별 아이싱 현상의 특성을 나타내었다.



(a) Propane/Butane = 2/8



(b) Propane 100%

Figure 8. Comparison of icing phenomenon with LPG fuel compositions (flow rate = 3.7L/h, humidity=85%, temperature=-15°C)

4. 결론

LPLi 연료공급시스템의 아이싱 현상에 대한 정성적인 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 아이싱 현상은 주위공기의 온도가 영상, 영하에 상관없이 상대습도가 높을 경우(70% 이상)에 크게 발생한다.
- (2) 연료가 분무되는 노즐 출구부에서 가장 먼저 아이싱이 발생하며 이는 연료라인을 따라 인접한 노즐출구의 상부로 성장한다.
- (3) 주위공기의 흐름에 정체점으로 작용하는 노즐의 앞, 뒤 부분에서 아이싱의 발생정도가 매우 크다.
- (4) 아이싱의 발생은 분무 후 2내지 3분 후면 눈에 띄게 증가하며 이는 지속적인 생성, 성장 및 이탈현상을 반복한다. 따라서 분무 하류부에는 이탈된 아이싱 결정체가 많이 쌓이게 된다.
- (5) LPG연료의 프로판과 부탄의 조성비에 따라 아이싱 현상이 달라지며, 기화열이 크고

기화온도가 낮은 프로판의 경우가 더 많은 아이싱을 발생시킨다.

- (6) 아이싱 현상을 일으키도록 고안된 본 실험에서도 이에 따른 얼음결정체의 형성이나 이탈 혹은, 이로 인한 노즐 출구부의 막힘 등의 현상은 관찰되지 않았으며 실제 엔진 상황에서는 엔진연소실의 열유입이 크기 때문에 심각한 아이싱의 피해는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 환경부의 ECO사업과 과기부의 NRL사업의 지원으로 수행되었으며 이에 저자 일동은 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. M. van der Steen "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations", TNO-paper VM9608 1996.
2. World LP Gas Association "Automotive LP gas - Today's Fuel for a Cleaner Tomorrow" 3rd edition, 1998.
3. B. Hollemans, L. Conti and P. de Kok, "Propane the 'Clean' Fuel as the Next Century for Light and Heavy Duty Vehicles" TNO-Paper VM9504, 1995.
4. M. van der Steen, J. de Rijke and J. J. Seppen, "Stoichiometric and Lean Burn Heavy-Duty Gas Engines - A Dilemma between Exhaust Emissions and Fuel Consumption?", TNO-paper VM9605, 1996.
5. B. Hollemans, M. de Roos, L. Conti and G. Margaria, "Regulated and Non Regulated Emissions of a Commercially Attractive LPG Vehicle", TNO-paper VM9502, 1995.
6. B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews, J. Cohen and 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.
7. J. A. Caton, M. McDermott and R. Chona, "Development of a Dedicated LPG-Fueled Spark Ignition Engine and Vehicle for the 1996 Propane Vehicle Challenge", SAE 972692, 1997.
 8. K.Y. Kang, D.Y. Lee, S.M. Oh, C.U. Kim, "Performance of an Liquid Phase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicles", SAE Fuel and Lubricants, 2001-01-1958, 2001.
 9. K.Y. Kang, D.Y. Lee, C.G. Kim, J.W. Lee, N.C. Jung, J.H.Rhee, E.P. Ko, J.W. Kang, "Development of a 11L Heavy Duty Engine for City Bus using LPG MPI System", JSAE Annual Congress Fuel and Lubricants I, No. 37-01, 175, 2001.
 10. K.Y. Kang, D.Y. Lee, S.M. Oh, C.U. Kim, "A Fundamental Study on a MPI LPG Engine for Heavy-Duty Vehicles", The 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 3-02 COMODIA 2001.
 11. JAASMA, Servatius, Alfons., Maria, "Injection device", International Patent Number, WO 98/10184, 1998.