

## LPG 액상분사식 인젝터에서 후적에 의한 아이싱 특성 연구

박철웅\* · 김창업 · 최교남 · 강건용

한국기계연구원

### Characteristics of Icing Phenomenon with Droplet of an Injector for Liquid Phase LPG Injection System

Cheolwoong Park\* · Changup Kim · Kyonam Choi · Kernyong Kang

Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

(Received 14 September 2006 / Accepted 2 May 2007)

**Abstract** : Since the liquid phase LPG injection (LPLI) system has an advantage of higher power and lower emission characteristics than the mixer type fuel supply system, many studies and applications have been conducted. However, the heat extraction, due to the evaporation of liquid fuel, causes not only a dropping of LPG fuel but also icing phenomenon that is a frost of moisture in the air around the nozzle tip. Because both lead to a difficulty in the control of accurate air fuel ratio, it can result in poor engine performance and a large amount of HC emissions. The experimental investigation was carried out on the bench test rig in this study. It was found that n-butane, that has a relatively high boiling point (- 0.5°C), was a main species of droplet composition and also found that the droplet problem was improved by the use of a large inner to outer bore ratio nozzle whose surface roughness is smooth. The icing phenomena were decreased when the an engine head temperature was increased, although a large amount of icing deposit was still observed in the case of 87°C. Also, it was observed that the icing phenomenon is improved by using anti-icing bushing.

**Key words** : Liquid phase LPG injection(LPLI, LPG액상분사), Droplet(후적), Icing phenomenon(아이싱현상), Visualization(가시화), Frozen ice deposit(아이싱 덩어리), Nozzle tip(분사팁)

### 1. 서론

전 세계적으로 배출가스 규제가 더욱 엄격해짐에 따라 가솔린 및 디젤 차량과 더불어 LPG 차량도 이러한 배출가스 규제를 대응하기 위해 배출가스 저감 기술 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 규제 강화의 대안으로 LPG 액상분사(Liquid Phase LPG Injection, LPLI) 기술의 적용은 기존의 LPG 차량의 문제점을 해결함과 동시에 향후 배출가스 규제를 대응할 수 있는 필수적인 기술이다.

LPG 액상분사기술은 LPG 연료를 가압하여 액상의 상태로 유지한 후 이를 인젝터를 통해 고압 정밀 분사하는 방식으로서, 액상으로 연료를 분사하기 때문에 연료의 밀도가 증가하여 엔진의 출력이 종래방식인 믹서시스템에 비해서 10~15% 상승하고, 전자식 정밀제어로 인해 배출가스 유해물질이 현저하게 저감되는 장점이 있다. 또한 고압분사로 인해 LPG 연료의 미립화가 촉진되어 추운 곳에서의 냉시동성 문제와 워밍업 전 엔진의 토오크 불안정성 문제가 완전히 해결되는 장점이 있다.<sup>1-3)</sup>

\*Corresponding author, E-mail: cwpark@kimm.re.kr

그러나 낮은 기화온도를 갖는 LPG가 액상으로 분사되면서 기상으로 변할 때 연료의 기화잠열에 의하여, 연료 분사 노즐부가 냉각되어 주위공기 중에 함유되어 있는 수분이 얼어붙는 아이싱 현상 및 연료가 기화되지 못하고 흘러나와서 떨어지는 후적 현상이 발생하는 단점도 있다. 이러한 아이싱 현상은 연료 분사기 출구에 영향을 줌으로써 연료 분사량의 변화를 일으키고, 노즐부에 생성된 얼음이 계속적으로 떨어져 나가므로써 엔진헤드 밸브계의 파손 및 연소실 안의 공연비 변화를 일으키는 등의 엔진 성능에 악영향을 미치게 된다고 알려져 있다.<sup>4,5)</sup> 후적현상은 이러한 아이싱 현상을 악화시키는 요인으로 작용하기도 한다.

이에 본 연구에서는 LPG 액상분사 시스템에서의 후적현상 및 아이싱 현상을 여러 가지 주변 조건에 따라서 가시화 리그 장치를 통해 측정하여, 후적 및 아이싱 방지에 도움이 될 수 있는 기초자료를 마련하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험은 LPLi 연료 공급 시스템을 적용한 엔진

에서 연료 분사 노즐 팁 부위의 후적현상 및 아이싱 현상을 관찰하기 위해 실제 연료시스템을 사용하였다.

Fig. 1의 실험장치 개략도와 같이 연료의 분사압력과 유량이 일정하게 유지되는 상태에서 수정된 연료레일로 연료가 공급될 수 있도록 가시화 창이 장착된 정적 연료 탱크와 연료펌프 등으로 연료공급 시스템을 구성하고, 인젝터 드라이버를 이용하여 연료가 분사되도록 하였다.

실제 인젝터 및 엔진헤드 등에서 아이싱이 발생하는 모습을 관찰하기 위하여 엔진헤드를 사용한 실험장치를 제작하였다. 엔진온전조건을 모사하기 위해 엔진헤드의 온도 및 엔진 흡기부를 통해 공급되는 공기의 유량, 온도 및 습도의 조절이 가능하도록 흡기공급제어시스템을 구성한 후, CCD카메라를 이용하여 후적현상 및 아이싱 이미지의 취득이 가능하도록 하였다.

### 2.2 실험방법

실험은 LPG 연료가 지속적으로 분사되는 상태에서 후적되는 연료를 채집하여 그 성분을 가스크로마토그래피(GC)를 이용해 분석하고, LPG용기로부터

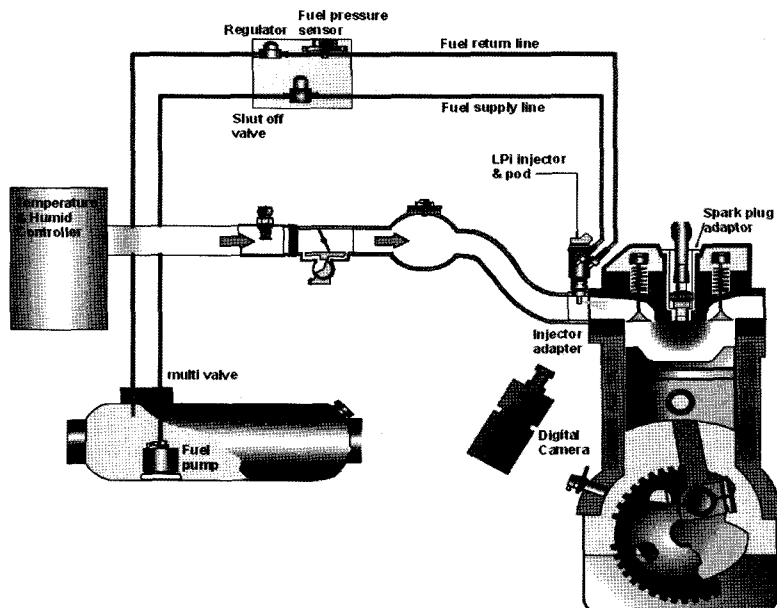


Fig. 1 실험장치 개략도

터 채집된 원래의 LPG연료의 성분과 비교하였다. 후적현상의 특성과약을 위해서 연료분사팁의 표면 거칠기와 각각 다른 크기의 내경과 외경을 갖는 분사팁을 교체하면서 이미지를 취득하였다. 실험에 사용된 다른 내경·외경비의 분사팁의 종류는 Table 1과 같다.

Table 1 분사팁의 내외경 비

내경	외경		
	3 mm	5 mm	10 mm
1 mm	3	5	10
1.5 mm	2	3.3	6.7
2 mm	1.5	2.5	5



후적현상에 의한 아이싱을 관찰하기 위해 연료분사시간이 5ms인 조건에서 매 100ms마다 1회씩 분사되도록 하였으며, 항온항습기를 이용하여 흡기구를 통해 공급되는 공기는 온도 13°C, 공기유량 200 l/min, 50%의 상대습도조건을 유지하도록 하였다. 엔진헤드의 온도는 30, 50, 70, 87°C로 변화시키며 분사시간이 경과함에 따라 발생하는 아이싱 이미지를 취득하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 후적현상

LPG 액상분사식 벤치실험장치상에서 인젝터를 관찰해 보면 Fig. 2와 같이 액상의 LPG연료가 분사되면서 주위의 기화열을 흡수하면서 급속한 냉각이 일어나며 아이싱현상과 후적현상이 동시에 발생하는 것을 볼 수 있다.

후적현상은 초기에 분사된 액상 LPG연료가 기화되면서 분사팁 주위의 온도가 영하권으로 떨어지게 되면서 발생한다. LPG연료는 주로 프로판과 부탄연료가 주성분이며, 특히 수송용으로는 부탄성분이 대부분이다. Table 2에 실험에 사용된 LPG성분을 분석한 결과를 나타내었다. 부탄성분은 보통 노말부탄과 이소부탄으로 나뉘며 약 6:4에서 7:3의 비율로 존재하며 각각 성질도 약간의 차이가 있어서, 비점의 경우 노말부탄은 영하 0.5°C이며 이소부탄은 약 영하 11.7°C이다. 따라서 영하권으로 떨어진 연

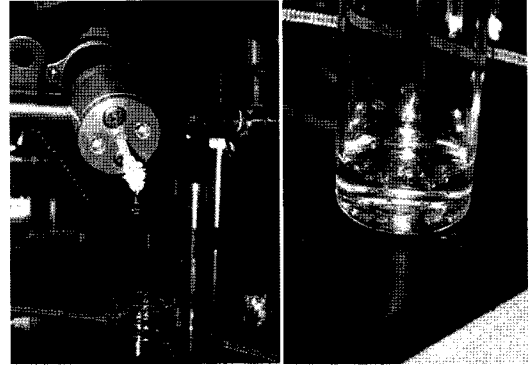
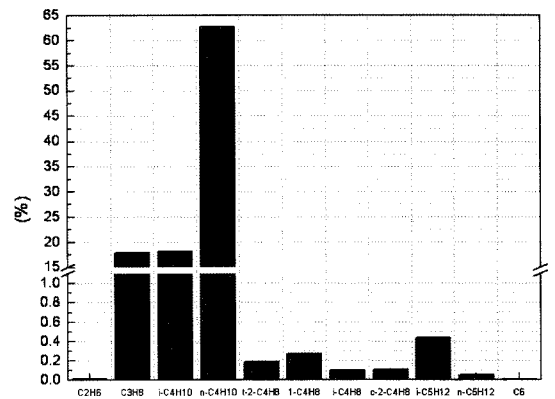


Fig. 2 후적된 연료의 채집모습

Table 2 LPG용기내 성분 분석 (mol %)

	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	기타
LPG 용기	17.99	18.17	62.66	1.18



료팁에서 노말부탄 성분이 기화되지 않고, 분사시 그대로 흘러나와서 떨어지기 때문에 후적현상의 주원인이 되는 것으로 판단된다. 분사된 연료 중에 후적된 연료가 분사팁의 밑으로 떨어지게 되고 이를 Fig. 2와 같이 채집하여 그 성분을 GC로 분석을 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

후적된 LPG연료를 채집하여 LPG용기에서 채집된 원래의 LPG연료의 성분과 비교해 본 결과, Fig. 5의 결과그래프에서도 알 수 있듯이, 용기 내의 노말부탄 성분보다 후적된 LPG연료의 노말부탄 성분의 비율이 약 20% 정도 많은 것을 확인할 수 있다. 또한 쉽게 기화되는 프로판은 평균적으로 약 15% 정도로 크게 감소하였고, 이소부탄성분도 5% 정도 감소하였다.

따라서 LPLi 인젝터의 팁에서 발생하는 후적현

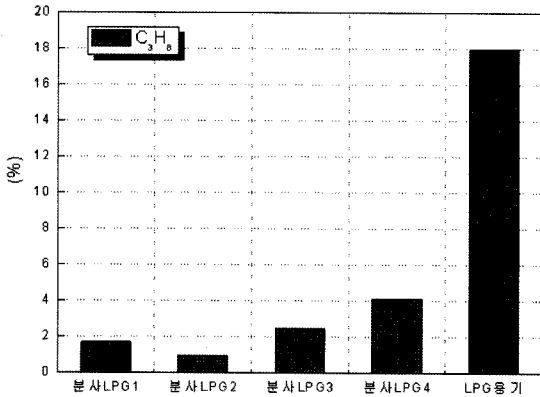


Fig. 3 후적된 연료중의 프로판 성분 비율

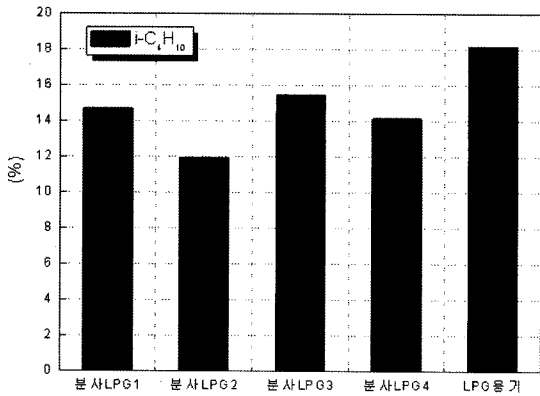


Fig. 4 후적된 연료중의 이소부탄 성분 비율

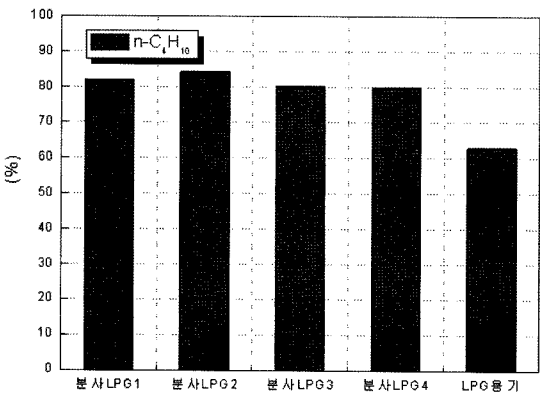


Fig. 5 후적된 연료중의 노말부탄 성분 비율

상은 액상의 LPG연료가 분사되면서 비점이 낮은 프로판과 이소부탄은 쉽게 기화되어 날아가고 기화가 상대적으로 잘 일어나지 않는 노말부탄 성분이 주로 후적된 것으로 확인되었다.

### 3.2 분사팁의 변화에 따른 후적현상

앞선 결과와 같이 후적된 LPG연료는 원하는 시기에 엔진 연소실로 공급되지 못함으로써, 엔진의 공연비 및 배출가스 제어에 문제점이 나타날 것으로 예상된다.<sup>6,7)</sup> 따라서 후적현상을 근본적으로 억제하는 방법이 필요하며, 본 연구에서 후적현상이 분사팁의 표면거칠기와 내외경비에 관계가 있음을 확인하였다.

#### 3.2.1 분사팁의 표면거칠기 변화에 따른 후적현상

분사팁의 표면거칠기를 다르게 하여 연료를 분사하였을 경우 관찰된 후적현상은 Fig. 6과 같이 나타났다. 왼쪽의 분사팁이 오른쪽에 비해 표면의 거칠기가 심한 경우이다.

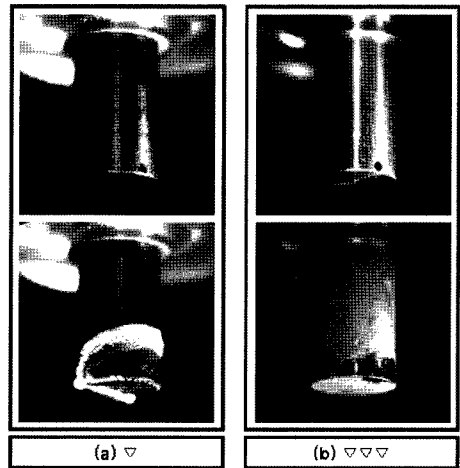


Fig. 6 분사팁의 표면거칠기에 따른 후적현상 비교

후적현상은 분사팁의 표면이 거칠수록 많이 발생하였으며, 연료가 거친 면을 따라 흘러나와 노즐부의 온도감소로 인해 발생하는 아이싱 덩어리와 함께 넓은 면적을 이루며 성장하였다.

즉, 표면거칠기가 거칠수록 표면에 굴곡이 많이 존재하게 되고, 이러한 굴곡들 사이에 아이싱 덩어리들이 크게 성장하게 되며, 이로 인해서 열전달량이 낮아지기 때문에 표면거칠기가 거친 경우, 후적현상이 발생하였다.

실험결과, 표면의 거칠기가 ∇∇∇(정밀 다듬질) 이상이면 정량적으로 비교하기는 어렵지만 후적현상이 크게 감소함을 알 수 있었다.

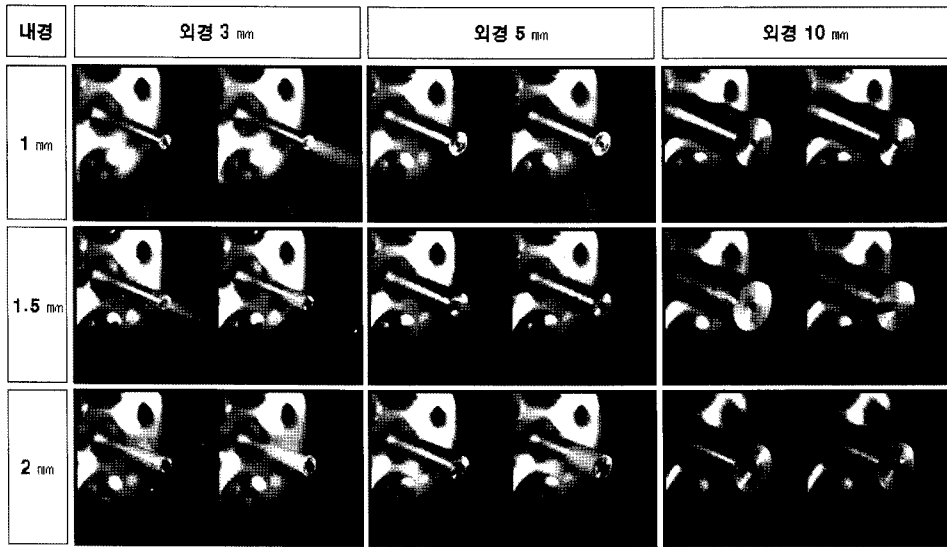


Fig. 7 내경과 외경비에 따른 LPG 연료분사팁의 후적현상 비교

**3.2.2 분사팁의 내외경비 변화에 따른 후적현상**

알루미늄 재질의 분사팁의 내경대 외경의 비율의 변화에 따른 후적현상을 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 분사팁의 최소외경인 3 mm의 경우 내경의 크기가 1.5 mm와 2 mm인 경우 후적 및 아이싱 현상이 발생하였으나 1 mm에서는 발생하지 않았다. 외경의 크기가 5 mm인 경우는 내경의 크기가 2 mm인 경우를 제외 한 나머지에서 후적 및 아이싱 현상이 크게 개선되었다.

즉, 내경대비 외경의 비가 약 2.5를 초과할 경우 후적이 거의 나타나지 않는데, 이는 후적되는 연료의 노말부탄성분이 상대적으로 넓은 외경면을 통과하면서 기화에 필요한 충분한 시간과 열을 얻기 때문으로 판단된다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 내경의 크기가 동일한 경우에도 내외경비가 1.5인 외경 3 mm의 경우는 많은 양의 후적과 함께 아이싱이 발생하

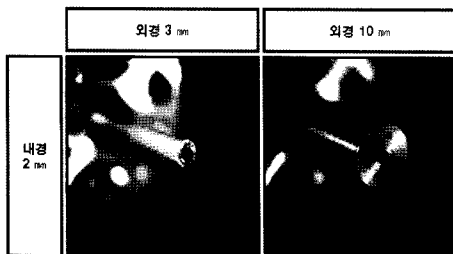


Fig. 8 두가지 외경의 LPG 연료분사팁의 후적현상 비교

였으나 내외경비가 5인 외경 10 mm의 경우는 후적 및 아이싱 현상이 거의 나타나지 않았다. 외경이 10 mm인 경우는 주어진 내경 크기에서 내외경비가 모두 2.5 배 이상이기 때문에 후적이 관찰되지 않았다.

**3.3 후적현상에 의한 아이싱 특성**

**3.3.1 엔진헤드 온도변화에 따른 아이싱 특성**

LPLi 인젝터에서 발생하는 분사특성 중에 가장 중요한 것 중의 하나가 아이싱 현상이다. 연료분사 팁 온도가 영하권으로 떨어지면, 앞서 살펴본 후적 현상과 같이 연료성분이 일부 얼어붙거나 흘러내리는 것은 물론 이로 인해서 아이싱이 크게 성장하기도 한다.<sup>8-10)</sup>

엔진헤드에 장착된 인젝터에서의 후적현상에 의한 아이싱 발생특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

Fig. 9는 기본적인 엔진헤드온도에 따른 아이싱 특성실험 결과를 나타낸 것이다. 엔진헤드의 온도가 증가함에 따라 인젝터 팁에서의 아이싱 생성량이 점차 감소하고 엔진헤드온도가 87°C일 때 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

특히, 엔진헤드의 온도가 낮을 경우에는 앞장에서 설명한 비점이 높은 연료성분이 중력방향으로 성장하다가 떨어져 나가는 후적현상이 관찰되기도

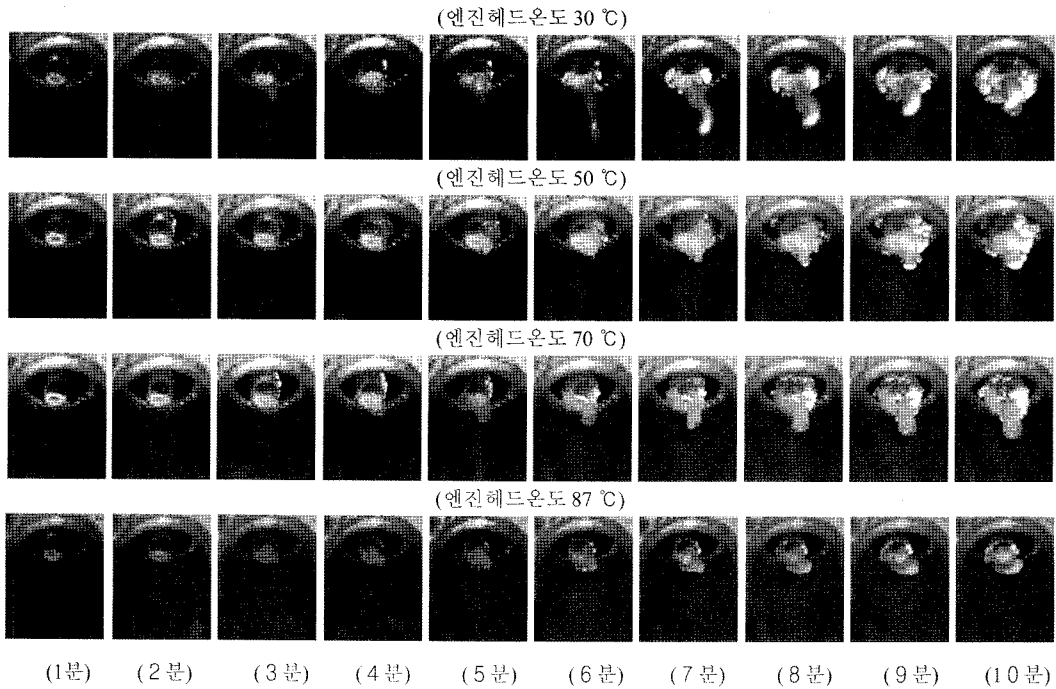


Fig. 9 분사 중 온도 및 시간에 따른 인젝터 팁에서의 아이싱 생성정도  
(분사팁 내경 2 mm, 분사팁 외경 3.5 mm, 흡입공기온도 13°C, 흡입공기유량 200 ℓ/min, 상대습도 50%)

하였고, 이로 인해서 아이싱이 더욱 크게 성장하였다. 엔진헤드의 온도가 낮을수록 아이싱의 성장속도는 빠르고 발생한 성애의 결속력이 강하여 크게 성장하였다.

### 3.3.2 아이싱 방지팁의 장착에 따른 아이싱 특성

엔진헤드에 인젝터를 그대로 장착하였을 경우, 아이싱 특성실험을 수행한 결과에서 알 수 있듯이 많은 양의 아이싱과 후적현상이 발생하는 것으로 확인되었다. 이러한 아이싱의 발생을 억제할 수 있는 방법 중의 하나로, 간단한 부싱을 제작하여 팁에 설치하는 방법을 채택하였다. 인젝터 팁의 끝단과 부싱의 끝단의 길이가 일치하도록 9mm의 알루미늄 재질의 부싱을 제작하여 인젝터 파드의 끝단에 장착하여, 동일한 조건에서 실험을 수행하였다.

Fig. 10에 나타난 실험결과를 살펴보면 부싱을 장착한 결과, 부싱을 장착하지 않을 경우 상당량의 아이싱이 관찰된 조건임에도 부싱과 인젝터 팁 사이의 공간을 제외한 부싱의 끝단과 옆면에서는 아이싱이 발생하지 않았다. 이렇게 인젝터 팁에 아이싱

방지용 부싱을 장착하면 내외경비를 2.5이상으로 크게 되어 후적현상이 발생하지 않으며, 공간상의 습기공급을 차단하여 아이싱 발생을 방지한 것으로 판단된다. 향후 아이싱 방지팁에 대한 연구는 여러 가지 변수조건을 바꾸어 가면서 지속적인 연구를 추진할 예정이다.

## 4. 결론

LPLi 연료 공급 시스템을 적용한 엔진에서 연료 분사 노즐 팁 부위의 후적현상 및 아이싱현상을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) LPLi 인젝터의 팁에서 발생하는 후적현상은 액상의 LPG연료가 분사되면서 비점이 낮은 프로판과 이소부탄은 쉽게 기화되어 용기 내 LPG에 비해 각각 15%와 5% 정도 날아가고, 기화가 상대적으로 잘 일어나지 않는 노말부탄 성분은 대부분 후적되어 그 비율이 용기 내 LPG에 비해 약 20%정도 증가한 것으로 확인되었다.
- 2) 후적현상은 분사팁의 표면이 거칠수록 많이 발

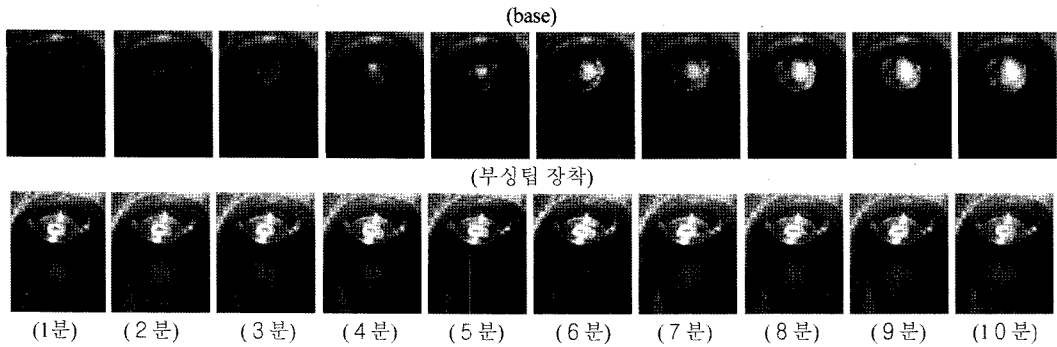


Fig. 10 부싱을 장착한 인젝터 팁에서의 아이싱 생성정도  
(흡입공기온도 13°C, 공기유량 200 ℓ/min, 엔진헤드온도 87°C, 상대습도 70%)

생하며 표면 거칠기가 ▽▽▽(정밀 다듬질) 이상 인 경우, 분사팁의 내경대 외경의 비가 2.5를 넘어서게 되면 후적현상이 크게 감소하였다.

- 3) 실제 연료시스템과 엔진헤드를 사용하여 아이싱의 발생모습을 관찰한 결과, 엔진헤드의 온도가 낮을수록 후적현상의 성장으로 인해 아이싱의 성장속도도 빠르고 발생한 성애의 결속력이 강하여 크게 성장하였다. 또한 엔진헤드의 온도가 증가함에 따라 인젝터 팁에서의 아이싱 량이 점차 감소하고 엔진헤드온도가 87°C일 때 급격히 감소하였다.
- 4) 아이싱 방지용 부싱을 장착하여 내외경비를 조절한 결과 부싱을 장착하지 않을 경우 상당량의 아이싱이 관찰된 조건임에도 부싱과 인젝터 팁 사이의 공간을 제외한 부싱의 끝단과 옆면에서는 아이싱이 발생하지 않았다.

### 후 기

본 연구는 과기부 NRL 및 환경부 ECO-STAR 사업의 지원 아래 이루어졌으며, 이에 저자일동은 깊은 감사를 드립니다.

### References

- 1) C. U. Kim, S. M. Oh and K. Y. Kang, "Characteristics of Icing Phenomenon on Injector in a Liquid Phase LPG Injection SI Engine," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.419-424, 2003.
- 2) C. U. Kim, C. W. Park, S. M. Oh and K. Y.

- Kang, "Leakage Characteristics of LPG Injector with Low Viscosity LPG Fuel," Journal of ILASS-Korea, Vol.10, No.4, pp.8-15, 2005.
- 3) W. S. Kim, J. C. Park, S. S. Park, J. S. Yoo and J. H. Lee, "A Study on the Development of Icing by Injection of LPG in the Liquid Phase around Injector (I)," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.87-94, 2003.
- 4) K. Y. Kang, D. Y. Lee, S. M. Oh and C. U. Kim, "A Fundamental Study on a MPI LPG Engine for Heavy Duty Vehicles," SAE 2001-02-1958, 2001.
- 5) B. R. Lutz, R. H. Stanglmaier, R. D. Matthews and J. Cohen, "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.
- 6) J. P. Yi, J. H. Lee and J. I. Park, "A Study on Icing Phenomenon on LPLi Injector Tip with Shut-off Valve," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.798-803, 2005.
- 7) J. C. Park, W. S. Kim, J. H. Lee, B. O. Lee and K. S. Park, "Visualization of the Icing at LPLi Engine Injector and the Effect of the Inflow of Ice Particle into Cylinder on the Combustion and the Exhaust Gas," Transactions of KSAE, Vol.12, No.2, pp.39-44, 2004.
- 8) C. U. Kim, S. M. Oh and K. Y. Kang, "Characteristics of Icing Phenomenon on Injector in a Liquid Phase LPG Injection SI Engine," Journal of ILASS-Korea, Vol.8, No.2,

pp.1-6, 2003.

- 9) C. U. Kim, S. M. Oh and K. Y. Kang,  
“Investigation of Icing Phenomenon in Liquid  
Phase LPG Injection System,” Vol.8, No.1,

pp.9-15, 2003.

- 10) R. Cipollone and C. Villante, “A/F and Liquid  
Phase Control in LPG Injected Spark Ignition  
ICE,” SAE 2000-01-2974, 2000.