

액상분사식 LPG 인젝터의 아이싱 생성 특성 및 억제 방법

이선엽* · 김창업* · 최교남* · 강건용*

Icing Characteristics in Liquid-Phase Injection of LPG Fuel

Sunyoup Lee, Changup Kim, Kyonam Choi and Kernyong Kang

Key Words: Liquid-phase LPG injection(LPG 액상분사), Icing(결빙), Droplet after injection(후적)

Abstract

Since a liquid-phase LPG injection system allows accurate control of fuel injection and increase in volumetric efficiency, it has advantages in achieving higher engine power and lower emissions compared to the mixer type LPG supplying system. However, this system also leads to an unexpected event called icing phenomenon which occurs when moisture in the air near the injector freezes and becomes frost around the nozzle hole due to extraction of heat from surrounding caused by instant fuel vaporization. As a result, it becomes difficult to control air/fuel ratio in engine operation, inducing exacerbation of engine performance and HC emission. One effort to mitigate icing phenomenon is to attach anti-icing injection tip in the end of nozzle. Therefore, in this study, the effect of engine operation parameters as well as surrounding conditions on icing phenomenon was investigated in a bench test rig with commercially-used anti-icing injection tips. The test results show that considerable ice was deposited on the surface near the nozzle hole of the anti-icing tip in low rpm and low load operating conditions in ambient air condition. This is because acceleration of detachment of deposited ice from the tip surface was induced in high load, high rpm conditions, resulting in decrease in frost accumulation. The results of the bench testing also demonstrate that little or no ice was formed at surrounding temperature below a freezing point since the absolute amount of moisture contained in the intake air is too small in such a low temperature.

1. 서 론

세계적으로 강화되고 있는 배기가스 규제를 만족시키기 위해 그리고 한정된 자원을 효율적으로 쓰기 위한 노력의 일환으로 다양한 대체연료를 차량용 엔진에 적용하려는 움직임이 계속되고 있다. 이에 발맞추어 고효율 및 저공해성을 목표로 하는 청정가스연료 중 하나인 LPG 연료의 사용 또한 증가하는 추세에 있다. 하지만 LPG 연료를 기존의 가스연료 공급 장치인 Mixer

시스템(제 2세대)을 이용하여 공급하는 경우, 연료량 및 공급 시기 제어 등에 대한 정확성이 떨어지고 그 결과 공연비 제어의 부정확성 및 출력 저하 등의 문제가 발생한다. 따라서 이런 문제점을 해결함과 동시에 향후 배기가스 배출 규제에 능동적으로 대처하기 위해 개발된 방식이 제 3세대 연료공급방식으로 불리는 LPG 액상분사(Liquid Phase LPG Injection, 이하 LPLi) 기술이다.

LPLi 방식은 연료펌프를 이용하여 LPG 연료가 연료공급라인에서도 액상으로 유지될 수 있도록 가압하고 이를 인젝터를 통해 액상으로 정밀 분사하는 방식이다⁽¹⁻³⁾. LPLi 방식은 액상 LPG 연료를 이용하기 때문에 여러 가지 장점이 있는데 1) 연료 밀도의 증가로 엔진출력이 Mixer 방식에 비해 10~15% 증가하고, 2) 주위 온도가 낮은 경우 발생할 수 있는 냉시동성 문제와

(2009년 9월 28일 접수 ~ 2009년 11월 18일 심사완료)

*한국기계연구원

†책임저자, 회원, 한국기계연구원

E-mail : sunylee@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7025 FAX : (042)868-7305

Warm-up 전 토크 불안정성 문제를 완전히 해결할 수 있으며, 3) 연료 분사량 및 분사시기의 전자식 정밀제어를 통해 배기가스 유해물질을 현저하게 저감할 수 있고, 4) 차량 응답성 및 가속성을 크게 증가시킬 수 있다.

이를 위하여 LPG연료를 액상으로 유지하여야 하는데, 연료공급라인 상에서 발생하는 압력 강하 및 엔진으로부터 전달되는 열에 의해 LPG연료가 기화되는 것을 방지할 수 있을 정도로 높아야 한다. 이를 위해 현재 양산 중인 차량에서는 인젝터의 연료후방 공급압력을 탱크압 대비 5 bar 상승조건을 유지하여, 일반적으로 대기압 대비 약 7~8 bar 정도를 유지하는 것으로 알려져 있다.

하지만 LPLi 방식은 디젤 및 가솔린 연료에 비해 낮은 기화온도를 갖는 LPG 연료 특성으로 인해 아이싱(icing) 현상이라 불리는 단점을 갖는다. 아이싱은 기화온도가 낮은 LPG 액상연료가 분사되면서 급격한 압력 변화로 인해 기상으로 변할 때, 연료의 기화잠열에 의하여 주위의 온도가 영하로 떨어지면서 분사노즐부가 냉각되고 여기에 엔진으로 흡입되는 공기 중에 함유된 수분이 얼어붙어 성장하는 현상을 말한다. 이러한 현상은 연료 인젝터의 출구에 영향을 줌으로써 연료 분사량과 분사특성에 변화를 일으키고 노즐부에 생성된 얼음이 계속적으로 떨어져 나감으로써 엔진헤드 밸브계의 파손 및 연소실 안의 공연비 변화를 일으키는 등 엔진성능에 악영향을 미친다고 알려져 있다⁽³⁻⁵⁾. 따라서 각 자동차 회사에서는 LPG 인젝터 끝단에 아이싱 방지팁을 부착함으로써 아이싱 현상을 억제하는데, 현재 가장 많이 사용되고 있는 아이싱 방지팁은 네덜란드의 Vialle사에서 개발한 제품이다⁽⁶⁾.

현재 국내에서 양산중인 이 아이싱팁은 금속-단열재로 이루어진 이중구조를 갖는 것을 가장 큰 특징으로 한다. 이때 아이싱팁 외부를 형성하고 있는 금속부분은 엔진으로부터의 열전달을 촉진함으로써 아이싱을 억제하는 역할을 하고, 단열재로 이루어진 안쪽의 연료노즐은 LPG연료가 분사 전에 노즐 내에서 기화하는 것을 방지하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 양산 적용중인 기존 아이싱팁에 대해 여러 가지 실험 조건 및 운전조건 하에서 아이싱 생성 패턴을 관찰하여 그 성능 및 특성을 평가하고, 이를 바탕으로 개선방안을 도출하여 차세대 아이싱팁을 개발하는데 이용할 수 있는 기초자료를 마련하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 기존 아이싱 방지팁의 구조

기존 아이싱 방지팁은 Fig. 1(a)와 같이 나일론 재질의 안쪽 연료 이송관과 황동 재질의 바깥쪽 열전도관의 이중구조로 이루어지는 것을 특징으로 한다. 이때 이송관은 LPG 연료가 엔진에서 전달되는 열에 의해 이송 중 기화하는 것을 억제하는 역할을 하며 황동 열전도관은 엔진에서 발생하는 열을 효과적으로 전달하여 아이싱 발생을 방지하는 역할을 한다. 또한 기존 아이싱팁은 열전도관의 분사출구 쪽 끝단면과 나일론 이송관의 연료 분사출구를 동일 평면상에 구성하여, 생성된 아이싱이 두 재질의 경계면에서 성장을 멈추고 작은 조각으로 탈락하도록 하는 효과도 있는 것으로 알려져 있다. Fig. 1(b)는 벤치 실험장치 장착 후 CCD Digital 카메라로 촬영된 기존 아이싱팁의 모습이다.

2.2 실험 장치 및 조건

2.2.1 실험 장치의 구성

아이싱팁에서 생성되는 아이싱은 LPG 연료의 분사가 끝나는 직후부터 바로 녹기 시작하는데, 냉시동 시 주위 온도가 영하인 경우 등의 몇 가지를 제외한 대부분의 운전조건에서 녹는 속도가 매우 빠르기 때문에 그 생성량을 정량적으로 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 이번 연구에서는 아이싱 생성량을 정량적으로 비교하기 보다는 동일한 확대 비율을 갖는 사진촬영을 통한 정성적인 비교로 대상 아이싱팁의 성능을 평가하였다.

Figure 2은 실험장치 구성도이다. 이 실험에 사용된 연료분사 시스템 및 엔진 헤드는 현재 시판 중인 차량에 장착되는 양산품으로 인젝터와 아이싱팁이 설치되는 흡기 매니폴드를 중심으로 엔진헤드를 가공하여 실험 장치를 구성하였다. 특히, 흡기 매니폴드의 경우 인젝터 위치의 반대편 벽을 가공하여 투명 아크릴 창을

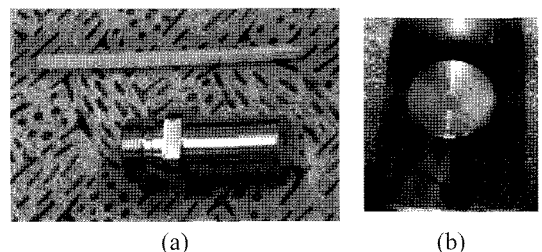


Fig. 1 Photographs of Vialle de-icing tip.

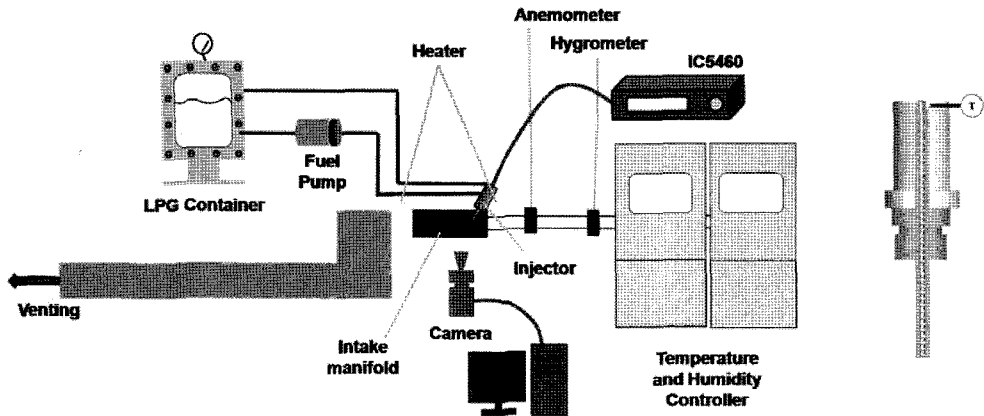


Fig. 2 Schematic of the test rig for icing formation.

설치하고 그 아래쪽에 Kodak Megaplug ES1.0 CCD Digital Camera를 설치하여 아이싱에 대한 영상을 획득했다. 또한 생성된 아이싱의 크기를 비교할 수 있도록 동일한 확대비율 및 상대 위치를 유지하기 위해 흡기 매니폴드를 포함한 엔진 헤드와 카메라를 정반 위에 고정시켜 사용하였다.

LPG 연료 공급시스템은 연료펌프, 연료챔버, 인젝터 및 인젝터 드라이버로 구성하였다. 연료챔버는 인젝터 상류의 압력을 8 bar로 유지하기 위해 질소를 이용하여 가압하였고 인젝터는 Intelligent Controls Inc.사의 IC5460을 사용하여 분사시간 및 간격을 제어하였으며 실 엔진과 유사한 조건을 만들기 위해 엔진헤드 하류에 Blower를 설치하여 공기가 흡기 매니폴드 및 엔진헤드로 흡입되도록 시스템을 구성하였다.

흡입공기 조건을 제어하기 위해 상류에는 가습기와 열교환기를 설치하였고, 엔진헤드의 온도를 제어하기 위해 엔진헤드 양 끝에 히터를 장착하였다. 그리고 흡입공기 조건을 포함한 실험조건은 습도계(Galltec FG80J) 및 유량계(TSI Model 9555) 등의 측정 장치를 통해 제어 및 측정하였다.

2.2.2 실험 조건

기존 아이싱팁의 아이싱 방지 성능 및 특성을 평가하고 이를 새로 설계, 제작한 아이싱팁과 비교하기 위해 이번 연구에서는 다양한 실험 조건에서 아이싱 발생 여부 및 생성특성에 대해 조사하였다. 일반적으로 아이싱 발생에 영향을 미치는 주요 변수로는 흡입공기 및 엔진헤드 온도와 운전조건 등이 있으며, 실 엔진이 작동하는 운전조건을 대표하기 위해 사용한 실험 조건

은 Table 1과 같다. 참고로 실차에서의 엔진 Warm-up 시간은 약 5~7분이므로 아이싱 생성 측정시간은 모든 실험조건에 대해 10분으로 설정하여 진행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 아이싱팁 기본 성능 시험 결과

Figure 3은 기존 아이싱 방지팁의 기본 성능을 평가하기 위하여 Table 1에 있는 엔진 운전 조건을 기준으로 수행한 성능 시험 결과 중 아이싱이 생기기 가장 쉬운 냉시동, 흡기 상대습도 80%를 중심으로 나타낸 것이다.

먼저 Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 것처럼 상온, 냉시동의 Idling 운전에서는 습도가 높을 때뿐만 아니라 낮은 상대습도(%RH=40)에서도 아이싱이 발생하는 특징을 보인다. 그리고 흡기 온도가 영하로 내려가는 경우 흡기 내의 절대 수증기량이 매우 적기 때문에 아이싱 생성량 또한 크게 감소하여 소량의 아이싱이 발생함을

Table 1 Test conditions

변수	실험 조건		
엔진 회전수	Idling	3000 rpm mid-load	6000 rpm Full load
연료분사시간	4 msec	10 msec	13 msec
연료분사간격	100 msec	40 msec	20 msec
흡입공기유량	8 m ³ /h	35 m ³ /h	81 m ³ /h
흡기온도 (T _a)	-20, 0, 20°C		
엔진헤드온도 (T _h)	흡기온도 (Cold start) 80°C (After warm-up)		

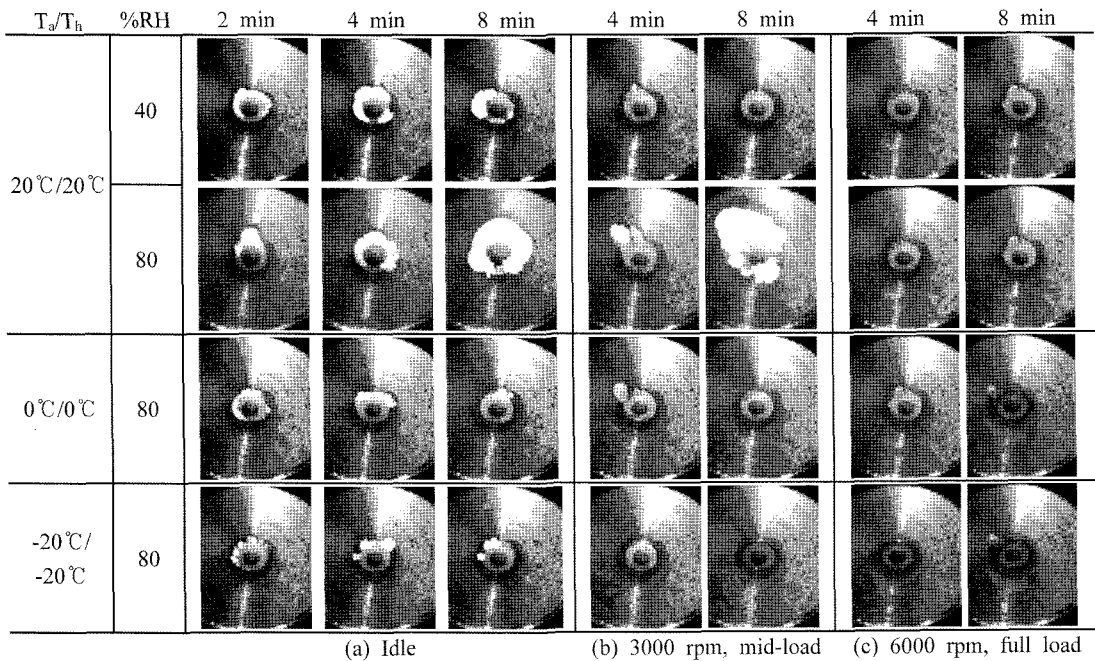


Fig. 3 Icing formation characteristic of Vialle de-icing tip at various test conditions

관찰할 수 있다.

상온, 냉시동의 중부하 3000 rpm 조건에서는 Idling 조건과는 달리 낮은 상대습도에서 아이싱 생성량이 줄어들 뿐만 아니라 발생한 아이싱도 성장하지 못하고 바로 이탈하는데, 이는 다음 장에서 살펴볼 것처럼 짧은 분사간격과 증가한 분사량이 아이싱의 탈락을 촉진하기 때문이다. 하지만 이때 상대습도가 높은 경우 (%RH=80) 흡기량 증가로 인해 아이싱팁과 접촉하는 수증기량 또한 크게 증가하고 이로 인한 아이싱 생성 효과가 커지면서 Idling 때보다 더 많은 양의 아이싱이 발생하게 된다. 영하의 흡기가 들어오는 3000 rpm 조건에서는 적은 절대 수증기량으로 인해 아이싱이 거의 발생하지 않으며 생성된 경우라도 즉시 이탈함을 관찰할 수 있다(Fig. 3(b)).

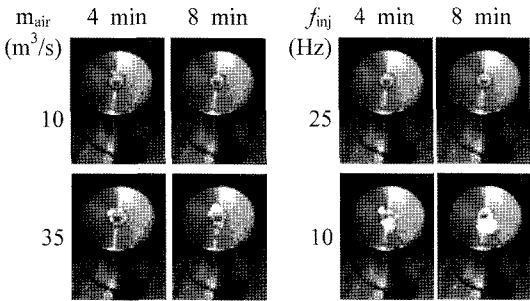
전부하 6000 rpm에서는 Fig. 3(c)에서 보듯이 대부분의 흡기온도 및 상대습도 조건에서 늘어난 공기량에도 불구하고 연료 분사주기 및 분사량 증가로 인한 아이싱 강제 탈락 효과가 커지면서 아이싱 생성이 억제되고, 발생하더라도 크게 성장하지 못함을 알 수 있다.

3.2 아이싱 발생에 대한 각 인자의 영향

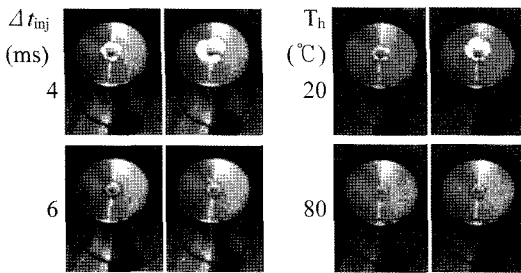
기준에 양산 중인 아이싱 방지팁에서 각 실험 인자가 아이싱 생성에 미치는 영향을 조금 더 상세히 파악

하기 위하여, Table 1에 있는 실험 조건을 기준으로 다른 변수들을 고정하고 나머지 하나를 변경하며 아이싱 발생 실험을 진행하였다.

Figure 4(a)에서 볼 수 있는 것처럼 다른 모든 조건들이 동일한 상태에서 흡입공기량만 증가하는 경우 아이싱 생성량도 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 흡입공기량이 늘어남에 따라 아이싱팁으로 공급되는 수증기의 양이 증가하여 아이싱의 성장을 촉진하기 때문이며, 앞장의 기본 성능 실험에서(Fig. 3) 상온, 냉시동, 높은 상대습도(%RH=80)의 Idle 운전에서보다 동일조건인 3000 rpm 운전에서 아이싱 생성량이 증가하는 이유를 설명해준다. Fig. 4(b)는 분사간격(혹은 분사주기) 변화에 따른 아이싱 생성 특성을 보여주는데, 연료분사간격이 짧아지는 경우 분사되는 연료량이 증가하고 흡기 중의 수증기와의 접촉시간이 줄어들 뿐만 아니라 분사되는 연료와 생성된 아이싱의 접촉으로 인한 아이싱 탈락 현상이 더 자주 일어나기 때문에 아이싱 성장이 억제됨을 알 수 있다. 연료 분사기간이 증가하는 경우 분사간격과 마찬가지로 분사 연료량이 많아지고 수증기와의 접촉시간이 줄어들 뿐만 아니라, 연료분사시 발생하는 팁 주위의 급격한 압력 변화 및 유동 불안정성이 심화되어 아이싱 탈락 확률이 높아지기 때문에 Fig. 4(c)에서 볼 수 있는 것처럼 아이싱 발생량이 감소한다.



(a) Flowrate of intake air (b) Injection frequency
($T_a=20^\circ C$, $T_h=20^\circ C$, 3000 rpm, %RH=60)



(c) Injection duration, 3000 rpm (d) Engine cylinder head temperature, Idle
($T_a=20^\circ C$, $T_h=20^\circ C$, %RH=60)

Fig. 4 Effect of engine operating parameters on icing formation.

그리고 이는 기존 아이싱팁에서는 분사되는 연료량이 적고 분사간격이 넓은 저부하, 저 rpm 조건에서 아이싱이 더 많이 발생함을 의미하며, 이러한 경향은 Fig. 3(a)의 Idle 운전 시 대부분의 외기조건에서 아이싱이 생성된다는 사실에서 확인할 수 있다.

엔진헤드 온도가 증가하는 경우 엔진으로부터 아이싱팁으로 전달되는 열의 양 또한 증가하기 때문에 전 운전조건에서 아이싱이 발생하지 않음을 알 수 있다 (Fig. 4(d)). 흡입공기 온도 변화가 아이싱 생성에 미치는 영향은 앞에서 살펴본 것처럼(Fig. 3(b)) 같은 상대습도(%RH=80)에서 흡기 온도가 영하로 내려가더라도 흡기에 포함된 절대 습기량이 매우 작기 때문에 아이싱 또한 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 기존 아이싱팁에 대한 상대습도의 영향 역시 앞에서 언급한 것처럼(Fig. 3(a) and (b)) @ $T_a=20^\circ C$ 상대습도가 증가하면 아이싱 발생량도 증가함을 알 수 있다.

3.3 아이싱 발생 특성

Figure 5는 다양한 실험조건에서 기존 아이싱팁의 온도를 Fig. 2에서처럼 아이싱팁의 황동 열전달관의 분사

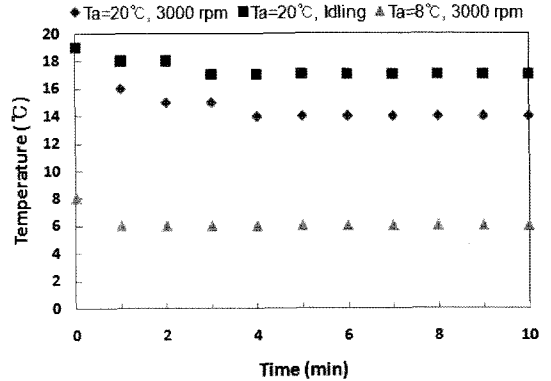


Fig. 5 Temporal temperature distribution of the de-icing tip at various test conditions.

출구 쪽 끝단면에서 1 mm, 나일론 연료이송관에서 0.5 mm 떨어진 위치에 장착한 온도센서(T type, Omega engineering)를 통해 측정한 결과이다. 먼저 냉시동 시 온도 변화를 살펴보면, 연료의 분사 및 기화로 인해 팁 주위온도가 영하로 지속됨에도 불구하고 황동부의 정상상태 온도는 초기온도($T_h=T_a$ at $t=0$ min)보다 단지 $\Delta T=3\sim 5^\circ C$ 정도 낮아진 상태를 유지함을 알 수 있다. 이는 엔진 Warm-up이 아직 이루어지지 않았음에도 황동의 높은 열전달율로 인해 엔진헤드로부터 아이싱팁으로 황동 열전달관을 영상으로 유지할 수 있을 만큼 충분한 열이 전달됨을 의미한다. 뿐만 아니라, 이 결과는 낮은 열전도율 때문에 엔진헤드의 열이 충분히 전달되지 않는 나일론 이송관 위에서만 아이싱의 생성이 이루어지고, 아이싱의 횡방향 성장도 이송관의 바깥 경계면까지로 제한된다는 것을 의미하며, 이는 Fig. 3과 4에서 확인할 수 있다.

Fig. 5에서 엔진 운전조건에 따른 아이싱팁 온도 변화를 살펴보면 더 많은 연료 분사량으로 인해 Idle 조건보다 중부하 3000 rpm에서 아이싱팁 정상상태 온도가 더 낮아짐을 알 수 있다. 또한 같은 엔진 운전조건에서는 흡입공기 온도 및 엔진헤드 온도가 낮을수록 황동관의 온도차(ΔT)가 감소함을 볼 수 있는데, 이는 상대적으로 낮은 이송관 벽 온도로 인해 이송 중 기화하는 연료량이 감소하기 때문으로 판단된다.

3.4 아이싱팁 개선 방안

앞서 살펴본 기존 아이싱 방지팁의 성능 및 특성 평가 결과로부터 아이싱의 생성 및 성장을 효과적으로 억제하기 위해 사용할 수 있는 방법들을 정리해보면

다음과 같다.

- 1) 엔진으로부터의 열을 아이싱팁으로 효과적으로 전달
- 2) 아이싱이 주로 발생하는 나일론 이송관에 대한 재질 개선 혹은 열전달이 촉진될 수 있도록 설계 변경
- 3) 아이싱팁 표면 코팅 혹은 재질 개선을 통한 표면에서의 수분 흡착력 약화
- 4) 후적 현상의 최소화. 이때 후적이란 LPG 연료 분사 후후에 나일론 분사관을 따라 연료의 일부가 흘러나오는 것인데, 이렇게 흘러나온 연료는 아이싱팁 표면에 머물며 기화하기 때문에 이로 인한 아이싱팁의 냉각효과로 아이싱 생성량을 급격하게 증가시키는 역할을 한다⁽⁵⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 양산 중인 기존 아이싱팁의 아이싱 방지 성능 및 생성 특성을 시험, 평가하고, 아이싱을 방지하기 위한 설계 기준을 제시하였으며, 이에 대한 결론을 다음과 같다.

- 1) 기존 아이싱팁은 냉시동, 중 rpm 이하 운전조건에서 외기조건에 관계없이 아이싱이 생성된다.
- 2) 냉시동, 고 rpm 조건에서는 아이싱이 발생 즉시 이탈하기 때문에 아이싱으로 인한 엔진 성능 변화는 없을 것으로 판단된다.
- 3) 기존 팁에서 엔진회전수가 올라갈수록 아이싱 발생이 더 억제되는 이유는 연료 분사간격이 짧고 분사량이 많을수록 분사된 연료와 아이싱이 접촉하는 시간이 길어지고, 연료분사로 발생하는 아이싱팁 주위의 압력 변화 및 유동 불안정성이 심화되어 아이싱의 탈락이 촉진되기 때문이다.
- 4) 중 rpm 운전 시 대부분의 외기조건에서 아이싱이 탈효과로 인해 저 rpm 운전보다 아이싱 생성량이 감소하지만, 상온에서 상대습도가 높아지는 경우 아이싱팁

과 접촉하는 수분량의 증가로 저 rpm 조건보다 더 많은 아이싱이 생성된다.

- 5) 아이싱은 상대습도가 높고 흡기량이 많은 조건에서 더 많이 발생한다.
- 6) 흡입공기의 온도가 영하인 경우 흡기에 포함된 절대 수증기량이 매우 작기 때문에 아이싱 발생이 크게 억제된다.
- 7) 기존 아이싱팁의 황동 열전달부는 대기온도보다 3~5°C정도 낮은 상태로 유지되며, 이때 아이싱의 생성은 열전도율이 낮은 나일론 이송관의 노출된 단면에서 발생한다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) W. Kim, J. Park, S. Park, J. Yoo, J. Lee, "A Study on the Development of Icing by Injection of LPG in the Liquid Phase around Injector (I)", Transaction of KSAE, Vol. 11, No. 1, 2003, pp. 87~94.
- (3) C. Kim, S. Oh, Y. Lee, and K. Kang, "Characteristics of Icing Phenomenon on Injector in a Liquid Phase LPG Injection SI Engine", 2003, JSAE 2003-01-1919.
- (4) 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.
- (5) C. Park, C. Kim, K. Choi, and K. Kang, "A Study of Droplets and Icing Characteristics on Injector in a Liquid Phase LPG Injection Engine", Journal of Ilass-Korea Vol. 12, No. 1, 2007, pp. 38~44.
- (6) JAASMA, Servatius, Alfons, Maria, Injection device, International Patent Number WO 98/10184, 1998.