

LPLi 인젝터의 누설특성 및 내구평가에 관한 실험적 연구

최 영* · 김창업* · 오승묵* · 강건용*

An Experimental Study on the Leakage Characteristics and Durability Evaluation of an LPLi Injector

Young Choi, Chang-Up Kim, Seung-Mook Oh and Kern-Yong Kang

Key Words: LPLi Injector(LPLi 인젝터), LPG engine(LPG엔진), Liquid injection(액상분사), Leakage characteristics (누설특성), Durability test(내구시험)

Abstract

The worldwide energy problem and global warming cause the need of alternative fuels which feature low carbon-dioxide emission and another energy source. Liquefied Petroleum Gas (LPG) is one of the alternative fuels widely used as domestic and transportation fuel. The third generation LPLi fuel supply system has merits in the increase of engine power and low emissions. The injectors used in LPLi system should overcome a leakage problem and satisfy the durability conditions. Therefore, 1000 hour durability test of the injectors was carried out throughout this research. First, the spray pattern and the penetration length of the selected injectors is graphically shown. Next, the leakage amount with respect to the injection cycle is introduced. Finally, the shapes of nozzle holder and nozzle tip after durability test was investigated by analyzing the microscopic image of the injector tip. The variation in the shape of nozzle tip mainly due to the residue of rubber materials is found to be the reason for leakage.

1. 서 론

세계적인 에너지 수요의 증가는 온실가스에 의한 지구온난화 문제와 긴밀하게 맞물려 있기 때문에 많은 정치적, 경제적, 사회적 관심과 국제적 이슈가 되고 있다. 또한 석유의 지역적 편중과 수요 증가로 인한 국제 원유 가격의 상승은 LPG, CNG/LNG, DME, 바이오디젤, 수소 등의 대체연료에 대한 관심을 증폭시키고 있으며 실제로 많은 연구를 수반하고 있다.

그 중에서도 우리나라는 210만 대에 육박하는 세계에서 제일 많은 LPG 자동차를 보유하고 있으며 약 1,500

여가에 달하는 LPG 충전소를 포함한 공급 인프라가 매우 잘 갖추어져 있다. 따라서 LPG 자동차의 성능 향상을 위한 LPG 엔진의 연구의 필요성이 절실하며 그 중에서도 엔진 성능에 가장 큰 역할을 담당하고 있는 LPG 연료 분사 시스템의 연구가 핵심이라 할 수 있겠다.

LPG 연료분사 시스템은 제1세대인 단순믹서방식과 제2세대인 피드백 또는 전자제어 믹서방식을 지나 현재 제3세대인 전자제어 액상분사기술이 적용되어 지고 있다. LPG 액상분사 (Liquid Phase LPG injection, LPLi) 연료공급방식은 기존의 LPG 믹서시스템이 액상연료를 기화시켜 기계적인 방법으로 기체연료를 엔진에 공급하는데 비해, LPG 연료를 연료펌프로 가압하여 액상상태를 유지하면서 이를 이송하여 전자식 인젝터를 통해 고압정밀 분사하는 연료공급시스템을 의미한다⁽¹⁻³⁾. LPLi 방식은 연료밀도가 증가하여 엔진의 출력이 10~15% 상승하며 연비도 약 7~9% 개선되고 전자식 정밀제어로

(2007년 12월 3일 접수 ~ 2007년 12월 14일 심사완료)

*한국기계연구원, 환경기계연구본부/친환경엔진연구팀

†책임저자, 정희원

E-mail : ychoi@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7962 FAX : (042)868-7305

인해 배기가스 유해물질이 현저히 감소한다. 또한 고압 분사로 인해 LPG 미립화가 촉진되어 겨울철 냉시동성 문제 해결과 겨울철 워밍업 전 엔진의 토크 불안정성이 완전히 해결된다. 고압정밀제어 연료분사로 인해 운전자가 느끼는 가속성 및 차량의 응답성이 현저히 상승하기 때문에 지금까지 LPG차량에서 나타났었던 출력부족과 냉시동성 문제 등이 기술린차량 수준으로 향상되며 LPG 연료가 갖는 청정성을 그대로 구현시킬수 있는 기술로 주목받고 있다^(4,6). 그러나 LPLI 액상분사 시스템은 연료라인에 연료펌프와 인젝터 등이 추가로 설치되고 고압이 유지되기 때문에 기밀성이 보장되어야 하며 인젝터에서 연료 분사시 기화열에 의한 인젝터 노즐부의 아이싱 현상 또한 문제가 되고 있다^(7,9). 일반적으로 인젝터가 구비하여야 할 조건으로는 정확한 연료분사율, 펄스신호에 따른 유량의 선형성, 엔진부하나 스피드 등에 따른 적정 유량 확보, 저비용, 내구신뢰성, 저공급전압 등이 있는데 실제 차량에 적용하기 위해서는 인젝터의 내구성 평가가 필수 불가결하다⁽¹⁰⁾. 따라서 본 연구에서는 LPG 액상분사방식에 적용가능한 인젝터의 내구 실험에 따른 누설량을 조성이 각기 다른 LPG 연료를 통해 실험을 수행하고 그 성능을 평가해 본다. 실험은 자체 제작한 기밀성 평가기와 내구성 평가기를 통해 수행하였으며 내구실험은 1000시간(1억 5천만 사이클) 동안 진행하였다. 내구 전후의 인젝터 상태 변화를 보기 위하여 인젝터 노즐과 인젝터 니들을 전자현미경으로 촬영하여 내구실험후 마모정도 및 변화를 가시화하여 분석하였다.

2. 실험장치

2.1 기본성능 측정 및 누설량 측정장치

인젝터의 내구성 평가를 위해 중소형 차량용 인젝터를 구입하고(Fig. 1) 내구평가를 위해 우선 기본 성능을 측정하기 위해 분무패턴 및 분사량, 누설량을 측정하였다. 정적(Static) 특성의 경우 인젝터의 노즐을 열어 놓은 상태로 유체를 흘려보내면서 측정하였으며 동적(Dynamic) 특성의 경우 2.5-5 msec 의 펄스를 주면서 노즐을 주기적으로 개폐하면서 측정하였다. 이 때 사용된 인젝터의 정적 & 동적(1 pulse=2.5 msec) 분사유량 사양은 Static 1.50 g/sec, Dynamic 3.06 mg/pluse; Static 1.17 g/sec, Dynamic 2.39 mg/pluse; Static 1.71 g/sec, Dynamic 3.51 mg/pluse 의 세가지로 나뉘어 진다.

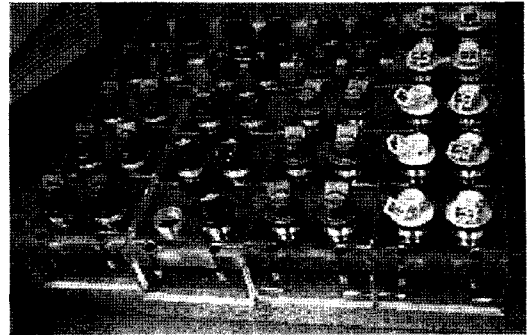
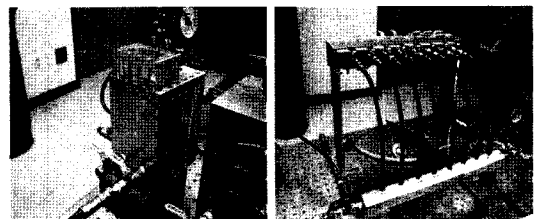


Fig. 1 Three types of test injectors

내구평가를 위한 기초데이터를 확보하기 위하여 사용하지 않은 인젝터의 분무패턴을 관찰하였다. 분무형상을 얻기 위하여 인젝터를 설치하여 분무패턴을 볼 수 있는 가시화 장치를 제작하였고, 할로젠 램프 시스템을 이용한 광원과 디지털 CCD 카메라를 이용하여 Back lighting으로 Mie Scattering하여 분무패턴을 가시화하였다. 인젝터 제어기로부터 신호를 받아 신호지연발생기(delay generator)를 이용하여 분사 후 시간경과에 따른 영상을 얻었으며 이를 이용해서 분사각 및 분무도달거리 등을 분석할 수 있다. 인젝터는 대형 4개, 중형 8개, 소형 4개에 대해서 각각 10번씩 실험하였으며 이는 추후 인젝터 내구실험을 한 후에 동일한 조건에서 평가하였다.

연료는 프로판/부탄비가 대략 6/4인 LPG를 사용하였고, 연료압력은 12 bar, 상온조건, 공기의 흐름은 3.5 L/min 상태에서 실험을 진행하였으며 분사 후 6 msec 후의 분무도달 거리 및 분무각을 측정하였다. 내구실험을 진행한 8개의 인젝터에 대해 동시에 누설량을 측정할 수 있는 인젝터 누설량 측정장치를 Fig. 2와 같이 제작하여 인젝터의 누설량을 측정하였다.



[LPG supply chamber] [Equip. for leakage test]

Fig. 2 Equipment for the leakage measurement of the injectors

2.2 LPLi 인젝터의 내구실험장치

인젝터의 기본성능을 측정한 뒤, 인젝터 내구평가를 위해 Fig. 3의 개략도와 같이 평가를 2대 제작하였다 (Fig. 4). 기본적으로 LPLi시스템을 그대로 재현했으며 장기간 분사되는 연료의 내부순환을 위해서 리턴되는 연료와 합해져서 탱크로 순환되도록 구성하였다.

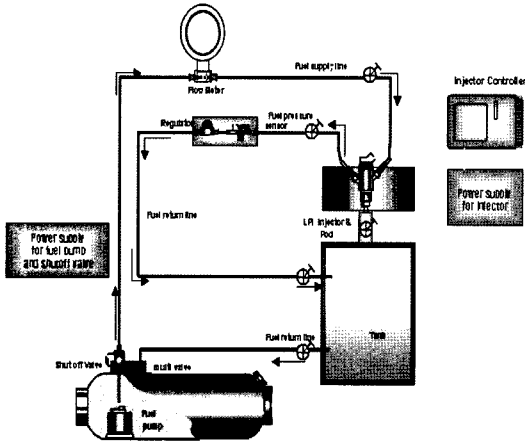
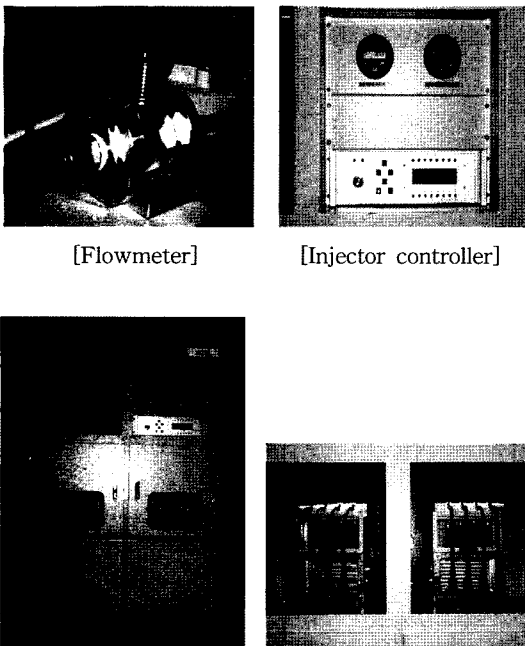


Fig. 3 Schematic on the durability test of the LPLi injectors



[Flowmeter]

[Injector controller]

[Durability tester, Test injector and Visualization tank]

Fig. 4 Injector durability test module

인젝터는 동시에 4개가 작동되도록 공용 인젝터 pod를 제작하였고, 가시화 탱크, 연료탱크와 연결하여 연료가 순환되도록 설계하고, 인젝터를 구동하기 위해 인젝터 컨트롤러를 제작하였는데, Fig. 5와 같은 Peak current가 4A 이상, Hold Current는 1A 이상, Peak duration은 2 ms 이내가 되도록 제작하였으며 한번에 8개의 인젝터를 각각 제어할 수 있도록 제작하였다.

인젝터의 내구평가지 연료의 품질에 따른 인젝터의 성능변화를 실험하기 위하여 표준연료 A, B 연료와 표준연료 C연료로 나누어 실험하였다. 표준연료 A는 시중구입 가능한 LPG 연료의 평균조성으로 제작되었고 표준연료 B는 시판되는 연료중 가장 분순물이 많은 조성으로 제작되었으며 C는 LPG 국내품질규격 대비 분순물이 2배 많은 조성으로 제작되었다. 인젝터의 작동 사이클과 주행거리와의 상관관계는 매우 주관적으로 적용되는 결과로서, 본 연구에서는 내구실험의 작동rpm를 6000 rpm이 되도록 세팅하고 이를 160 km/h로 산정한 후, 작동시간을 계산하여 주행거리 16만km에 상당하도록 하였다. 내구실험에 대한 정확한 평가방법은 상용차 메이커와 합의하여 결정하였다. 현재 LPLi 인젝터에 대한 내구스펙이 확정되어 있지 않으므로 일반적인 가솔린 인젝터에 대한 내구실험 조건을 참고로 P&H(Peak and Hold)형의 LPG 인젝터에 맞도록 일부 수정하여 사용하였다. 또한 인젝터의 작동 및 기본성능에 대한 스펙은 제작사인 Siemens사에서 보증하는 것이기 때문에 이러한 내용을 반복적으로 수행할 필요는 없었으며, 본 연구에서는 국내의 여러 가지 LPG품질에 따른 인젝터의 내구성능결과가 중요하므로 내구실험은 1000시간, 1억5천만 사이클에 대해서 수행하였다.

가장 성분이 나쁜 표준연료에 수분, 그리이스, 윤활유, 황 등을 첨가하거나 프로필렌, 부틸렌, 부타디엔의 성분을 20%씩 첨가하여 미세성분의 변화를 가져온 LPG 연료를 제작하여 사용하였다.

3. 실험결과

3.1 분무형상 및 분부패턴

LPLi(액상분사) 연료공급방식은 경유대비 1/10 수준의 저점도(0.3 cSt) 및 고압(약 30 bar 이하) 상태에서 연료를 분사하는 방식이다. 인젝터는 분사량별로 소형, 중형, 대형의 3그룹으로 나누어져 있으며 실제 엔진에 사용할 때에는 10 bar 이상의 고압 LPG연료를 사용하기 때문에

Table 1 Injector leakage measurement data

No.	Test condition : 18°C, 12bar, P/B=6/4, Flow velocity 8.37 m/s, Humidity 50~70%			
	Injection amount (g)	Leak rate (cc/min)	Q Static (g/sec)	Q Dynamic @5 ms (mg/p)
1	16.5	2.86	1.10	5.500
2	15.5	3.75	1.03	5.167
3	16.5	0.06	1.10	5.500
4	15.5	0.70	1.03	5.167
5	15	2.14	1.00	5.000
6	16	0.56	1.07	5.333
7	15.5	0.10	1.03	5.167
8	16.5	0.19	1.10	5.500
9	12.5	1.00	0.83	4.167
10	12.5	0.38	0.83	4.167
11	13	0.21	0.87	4.333
12	12.5	0.53	0.83	4.167
13	18	1.20	1.20	6.000
14	19	1.30	1.27	6.333
15	18.5	1.71	1.23	6.167
16	18	0.71	1.20	6.000

Table 2 Spray penetration length and spray angle after 6 msec of injection

	Penetration length (mm)		Spray angle (degree)	
	Average	S.D.	Average	S.D.
Small	10.58	2.36	11.72	1.57
Medium	12.66	1.99	12.47	1.80
Large	12.62	2.74	10.75	1.29

12 bar에서의 누설량을 측정하여 Table 1에 나타내었다. 연료라인상의 압력이 12 bar 일때의 평균 누설량은 1 cc/min 정도임을 확인할 수 있다. 이는 인젝터 메이커인 Siemens사의 발효자료보다 10배 정도 큰 수치이다.

따라서, 이 결과치는 매우 위험스러운 값이 될 수 있으므로 내구실험을 통해 전체 누설량에 대한 검증과 철저한 인젝터 스펙관리가 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 인젝터의 분무패턴 결과를 살펴보면, 인젝터는 대형 4개, 중형 8개, 소형 4개에 대해서 각각 10번씩 실험하였으며 이는 추후 인젝터 내구실험을 한 후에 동일한 조건에서 평가하였다. 연료는 프로판/부탄비가 6/4인 LPG를 사용하였고, 연료압력은 12 bar, 상온조건, 공기의 흐름은 3.5 L/min 상태에서 실험을 진행하였으며 분사 후 6 msec 후의 분무도달 거리 및 분무각을 측정하였다. Fig. 5는 분무형상을 보여주고 평균한 결과는 Table 2와 같다.

Table 1과 2의 결과와 같이 대형, 중형, 소형에 따라 분사량 자체는 큰 차이를 나타내지만 분무패턴에서는 큰 차이를 보이지 않으며 각각의 편차가 3% 이하로 변



(a) Small-size



(b) Medium-size



(c) Large-size

Fig. 5 Images of the spray patterns from different injectors after 6 msec of injection

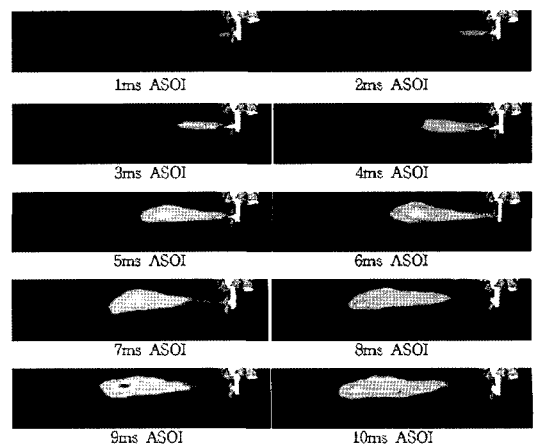


Fig. 6 Time evolution of the spray pattern after injection

Table 3 Spray penetration length and spray angle after 6 msec of injection with respect to injection cycle during the durability test

		0 hour (0 cycle)	200 hour (28mil.cycle)	400 hour (58mil.cycle)	600 hour (86mil.cycle)	1000 hour (150mil. cycle)
Large (LPG A)	Penet. length (mm)	12.62	12.35	12.9	11.5	10.5
	Spray angle (degree)	10.75	10.6	12.52	10.9	10.2
	Injection rate (mg/p @5 ms)	6.1	5.8	5.8	5.9	6.0
Medium (LPG C)	Penet. length (mm)	12.66	12.1	13.9	10.5	10.8
	Spray angle (degree)	12.47	11.7	12.52	12.1	11.1
	Injection rate (mg/p @5 ms)	5.1	5.0	5.0	5.0	5.0

복성은 매우 좋은 것으로 나타났다.

Figure 6은 분사 개시후(After Start-Of-Injection, ASOI) 인젝터의 시간대별 분무패턴을 보여준다. 액상의 연료가 분사된 후 빠른 기화가 발생하는 것을 볼 수 있으며 분사가 끝난 후 연료유량과 운동량의 급격한 감소로 인하여 액적의 적체로 인한 액적군의 성장과 반경방향으로의 확산과 공기와의 혼합이 이루어짐을 확인할 수 있다.

다음으로 1억5천만 사이클의 내구실험결과, Table 3에서와 같이 분무길이가 약간 짧아지는 경향을 보이나 표준편차 이내로서 오차범위 안이고 분무각도 및 분사량은 내구전과 비교하여 큰 차이를 보이고 있지 않아 (분사량 변동에 대한 COV값은 1.43%) 인젝터의 분사특성에 대한 내구성능은 충분한 것으로 검토되었다. 또한 LPG품질에 따라서 분사성능에 대한 특성변화는 없는 것으로 나타났다.

3.2 내구실험 및 평가

내구실험을 진행한 8개의 인젝터에 대해 동시에 누설량을 측정할 수 있는 인젝터 누설량 측정장치를 통해 인젝터의 누설량을 측정한 결과 표준연료 A와 표준연료 B에 해당하는 인젝터는 누설량에 있어서 0.2 cc/min 미만으로 인젝터 분사회수가 1억5천만 사이클에서도 내구실험전과 비교하여 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나 표준연료 C를 이용하여 실험한 인젝터는 Fig. 7과 같이 7만 사이클부터 인젝터들의 누설량이 급증하여 8만4천 사이클 내구시험에서는 모든 인젝터들의 누설량이 3 cc/min에서 9 cc/min 정도로 인젝터의 누설량이 너무 많아 인젝터의 기밀유지 기능을 상실하였다.

누설증가의 원인분석을 위해서 표준연료 B와 C를 사용하여 내구실험을 수행했던 인젝터를 분해해 본 결과, 표준연료 B의 인젝터와 니들은 실험전과 비교하여 큰

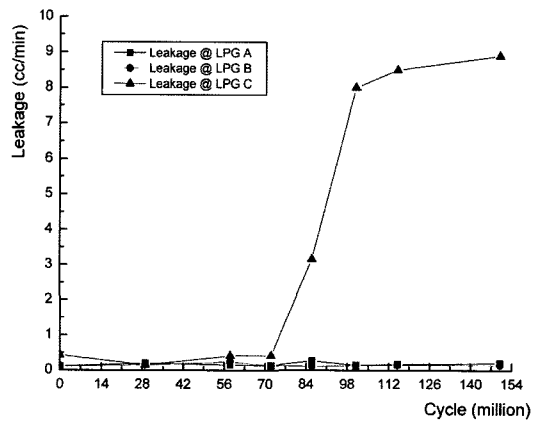
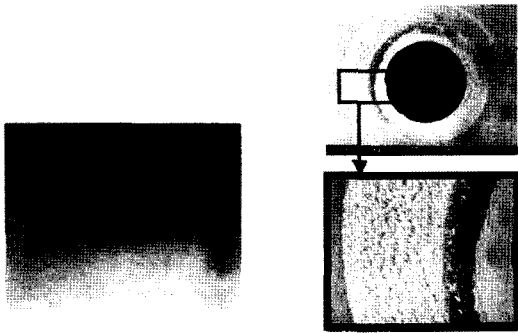


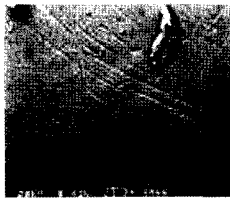
Fig. 7 Leakage amount vs. injection cycle with standard LPG fuel A, B, and C

차이가 없었으나 표준연료 C를 사용한 인젝터는 니들에 불순물이 많이 끼어 있는 것이 확인되었다. 이 불순물은 표준연료 C에 다량 함유되어 있는 올레핀류(부타디엔, 부틸렌, 프로필렌)가 인젝터와 평가기에 사용된 O-링 및 연료라인 등의 고무류 성분을 녹임으로써 생성된 것으로, 이들 이물질은 인젝터의 니들과 노즐의 미세한 틈새에 끼어 인젝터 작동시 니들과 노즐의 선접촉을 방해함으로써 누설량을 증가시키는 것으로 분석된다. 특히 이들 니들과 노즐을 전자현미경으로 촬영하여 내구전후를 비교한 결과 Fig. 8, 9와 같이 표준연료 B로 실험한 인젝터 노즐과 니들은 내구시험 시작 전과 비교하여 별다른 차이점이 나타나지 않았다. 그러나 표준연료 C로 실험한 인젝터의 경우 니들표면에 편마모현상이 발생하였고, 편마모로 인하여 노즐과 니들의 접촉부위가 편심되어 깎여 있는 것을 확인 하였다. 이러한 편마모 현상은 인젝터가 작동을 멈추었을 때 니들과 노즐사이에 많은

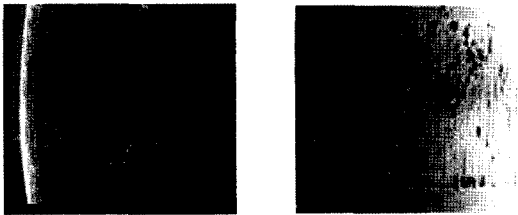


[Before durability test] [After 150 mil. cycle]

Fig. 8 Injector nozzle comparison before and after durability test (Left & Top right: 40X, Bottom: 400X)



[Before durability test]



[After 150 mil. cycle; Left: needle edge, Right: side]

Fig. 9 Injector needle comparison before and after durability test (All: 400X)

틈새를 만들고 결과적으로 많은 양의 누설이 발생하는 원인이 된다. 따라서 LPG의 품질이 저하 될 경우, 고무류와의 반응으로 이물질이 발생하며 이는 인젝터의 니들과 노즐의 편마모를 일으켜 인젝터의 기능을 상실하는 치명적인 결함이 발생될 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었다.

이러한 불순물을 직접 확인하기 위해 내구실험 후 표준연료의 잔류물질량을 측정해 본 결과, Fig. 10에서 볼 수 있듯이 실험 전의 표준연료 A, B, C는 잔류물질이 0.01%이던 불순물량이 인젝터 내구실험 후 표준연료 A와 B는 0.04%로 늘었지만 잔류물질 국내품질기준인 0.05% 이내로 적합한 상태였고, 표준연료 C의 잔류물질은 0.07%로 LPG연료 내에 많은 불순물이 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. 이런 불순물들은 연료내에 녹아

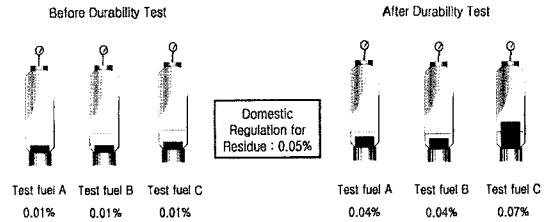


Fig. 10 Residual of standard fuels before and after durability test

있는 상태이기 때문에 연료필터나 인젝터에 부착된 필터로는 걸러지지 않는 것들로서, 이러한 이물질이 인젝터 내부에 쌓여 인젝터 노즐의 왕복운동시 편마모를 일으켜 인젝터 누설의 원인이 되는 것이다.

4. 결 론

LPG 엔진에서 제3세대 연료공급시스템으로 불리는 LPLi 기술에 적용되는 LPG 인젝터의 기밀성 특성분석과 내구평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) LPLi 인젝터의 1000시간 내구실험을 통해 인젝터 분무도달거리와 분무각도 등의 분사패턴이 내구시험동안 분사량 변동에 대한 COV값 1.43% 이내에서 변화가 없음을 실험적으로 검증하였고, LPG품질 변화에 따른 분사능의 특성변화 또한 없는 것으로 나타났다.

2) 올레핀류를 많이 함유한 표준연료의 경우 내구시험시 많은 누설량을 보였고 이는 올레핀류와 연료공급시스템 내부에 있는 고무류의 반응에 의한 불순물이 인젝터 노즐 및 니들에 달라붙어 편마모 현상을 일으키기 때문으로 판단된다.

3) 누설의 다른 요인으로서 인젝터와 연료펌프 등에 사용되는 고무류의 부식 또는 화학반응에 의한 연화 및 경화를 들 수 있으며 이들을 줄이는 기술이 LPLi 인젝터의 내구성능을 향상시키는데 필요한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과기부의 NRL 및 환경부의 ECO-STAR사업의 지원 아래 이루어졌습니다. 이에 저자일동은 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) M. van der Steen, "Gaseous Fuels: Past Experiences and Future Expectations", TNO-Paper VM9608, 1996.
- (2) K. Y. Kang, D. Y. Lee, S. M. Oh and C. U. Kim, "Performance of an Liquid Phase LPG Injection Engine for Heavy Duty Vehicles", SAE 2001-02-1958, 2001.
- (3) S. M. Oh, S. G. Kim, C.S. Bae, C. U. Kim and K. Y. Kang, "Flame Propagation Characteristics in a Heavy-Duty LPG Engine with Liquid Phase Port Injection", SAE 2002-01-1736, 2002.
- (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", The 5th International Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engine, 3-02 COMODIA 2001.
- (5) 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.
- (6) C. U. Kim, D. Y. Lee, S. M. Oh, K. Y. Kang, H. M. Choi and K. D. Min, "Enhancing Performance and Combustion of an LPG MPI Engine for Heavy Duty Vehicles", SAE 2002-01-0449, 2002.
- (7) C. U. Kim, S. M. Oh and K. Y. Kang, "Characteristics of Icing Phenomenon on Injector in a Liquid Phase LPG Injection SI Engine", Proceedings of the KSAE Spring Conference, 2003, pp.419~424.
- (8) 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, 2005, pp.8~15.
- (9) 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)", Transaction of KSAE, Vol. 11, No. 1, 2003, pp.87~94.
- (10) R. L. Barkhimer and H. C. Wong, "Application of Digital, Pulse-Width-Modulated Sonic Flow Injectors for Gaseous Fuels", SAE 951912, 1995.