

터빈방식 연료펌프로 구성된 LPi 연료공급 시스템의 LPG 조성비에 따른 토출성능 및 엔진적용성에 관한 연구

임 무 창¹⁾ · 명 차 리²⁾ · 박 심 수^{*2)} · 박 정 남³⁾ · 김 성 근³⁾

고려대학교 기계공학과 대학원¹⁾ · 고려대학교 기계공학과²⁾ · 현대자동차³⁾

The Study of Flow Rate Performance and Engine Application with LPG Composition Rate for LPi Fuel Supplying System Consisted of Turbine Type Pump

Mu-Chang Lim¹⁾ · Cha-Lee Myung²⁾ · Simsoo Park^{*2)} · Jeong-Nam Park³⁾ · Sung-Kun Kim³⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

³⁾Research & Development for Hyundai-motor Company, 772-1 Jangduck-dong, Hwhaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea

(Received 6 September 2006 / Accepted 15 November 2006)

Abstract : Currently, BLDC fuel pump was applied on LPi vehicle using 3rd fuel supply system as liquified phase LPG injection method had already shown better performance than others. Its cost, however, is rather expensive because of drawbacks such as complicated structure, a fault of localization of system. In this work, demonstration system for a developed turbine type fuel pump to replace BLDC system was setup and investigated. This study results that fuel mass flow rate of turbine type pump and injection performance of injector were better compared to BLDC type. Comparing flow rate of summer LPG with that of winter LPG, the flow rate decreased about 25% using winter LPG. Performance applying turbine type LPi fuel pump to engine is confirmed.

Key words : LPG(액화 석유 가스), LPi(LPG 액상분사), Turbine type(터빈방식), BLDC type(브러시리스 DC 모터방식), Impeller(임펠러), PWM(펄스폭조절기)

1. 서론

자동차 산업의 급속한 발전과 아울러 최근 십 여 년 동안 자동차 배기가스에 대한 규제가 점점 엄격해지고 있다. 사회적으로 환경보호, 특히 대기 보존에 대한 인식이 저변에 확산되면서 여러 가지 환경친화적 대체연료가 모색되고 있다. 이 중에서 LPG(Liquefied Petroleum Gas, 액화 석유 가스) 연료는 전세계적으로 관심이 집중되어 있는 환경문제와 석유 자원의 고갈에 대처할 대체연료로서 부각되고 있

다. 그 이유로는 다른 대체연료에 비해 충전소 및 연료공급의 기반시설이 잘 확보되어 있을 뿐만 아니라 CO₂ 생성율이 가솔린보다 낮기 때문에 차후 강화되는 CO₂ 규제에 유리함을 들 수 있다.

이러한 장점을 지니는 액상의 LPG 연료를 가솔린 엔진에서와 같이 전자식 인젝터를 통해 고압으로 정밀 분사하는 제3세대 연료공급방식인 LPG 액상분사 방식(LP_i, Liquefied Petroleum injection)의 차량에 현재 적용되어 있는 BLDC 방식 연료펌프는 성능은 아주 우수하나 국산화의 미비화로 인하여 상대적으로 고가이다.

*Corresponding author, E-mail: spark@korea.ac.kr

최근 국내 LPi 펌프제조사에서는 이 같은 단점을 극복하고자 터빈방식 펌프를 개발하여 실제 적용중 이나 LPG 연료를 액상으로 유지하기 위한 압력과 유량확보를 위해 펌프2개를 직렬로 연결하여 사용 중이므로 연료공급시스템과 제어방식이 복잡한 문제점이 있다.

이에 따라 본 논문에서는 가격 경쟁력과 기술중 속의 문제점을 극복하기 위하여 단순한 구조이나 뛰어난 토출성능을 지니는 임펠러 2매 방식의 터빈 방식 LPi용 연료펌프를 1개만 사용하여 토출 성능과 분사시의 분사량 및 분사압력, 소음특성을 BLDC 방식 연료펌프와 비교·평가하여 LPi엔진에 적용가능성 여부를 판단하고자 한다. 또한 계절별 LPG 연료의 혼합비를 변화에 따른 토출유량의 변화 정도를 각 LPi용 연료펌프별로 비교토록 한다.

2. LPi용 연료펌프 구조

선행연구에서 사용된 임펠러 1매 방식의 가솔린용 터빈방식 연료펌프로는 2개 직렬연결을 한 이점에도 불구하고 현재 양산 LPi용 자동차에 적용중인 양산 LPi용 연료펌프의 토출수준을 만족시키지 못함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 2매의 임펠러를 장착한 터빈방식 LPi용 연료펌프를 이용하여 실험을 진행하였다.

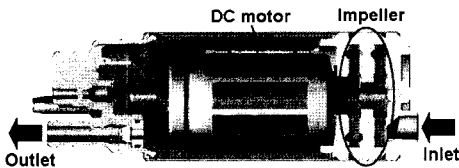


Fig. 1 Fuel pump for LPi

3. 시험장치 및 시험방법

2매의 임펠러가 장착된 터빈방식 LPi용 연료펌프 1개와 이미 안전성이 검증된 멀티플랜지를 결합하여 구성된 LPi용 연료펌프 모듈을 LPG 연료탱크에 장착한 후 다양한 펌프공급전압에 따른 토출특성을 측정하기 위한 시험 장치를 제작하였다.

3.1 연료펌프 토출성능 시험장치

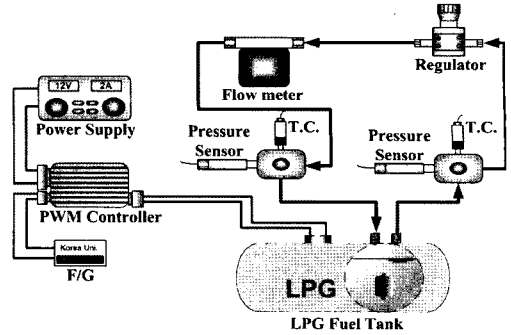


Fig. 2 Schematic diagram of fuel pump test equipment for LPG

Fig. 2는 연료펌프 토출성능 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 이 시험 장치는 LPi용 연료펌프의 토출 압력을 제어할 수 있는 압력조절기, 현재 양산중인 LPG 자동차에 적용된 LPG용 연료탱크의 내부와 토출부의 유량, 온도, 압력을 측정하기 위한 유량·온도·압력 센서로 구성된다. 또한 양산사양의 BLDC방식 연료펌프와 동일하게 다단으로 터빈방식 연료펌프를 구동하기 위하여 PWM(Pulse Width Modulation) 드라이버와 신호발생기를 적용하였다.

3.2 LPG 연료분사 시험장치

Fig. 3은 LPi용 연료펌프의 분사량 및 분사압력을 평가하기 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

BLDC방식 연료펌프와 터빈방식 LPi용 연료펌프의 토출유량을 다단으로 변화시키기 위한 PWM과 양산 LPG 연료탱크, 각 LPi용 연료펌프가 토출하는

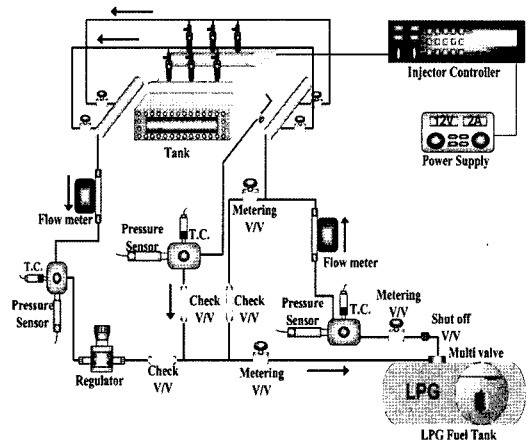


Fig. 3 Injection test equipment for LPG

LPG 연료의 유량, 압력, 온도를 측정하기 위한 각각의 센서류 및 인젝터 리그로 구성되어 있다. 연료분사 모사를 위해 구성된 인젝터 리그에는 Peak & Hold 방식의 인젝터가 6개 장착되어 있고, 그 값은 각각 4.0A, 1.0A이다. 또한 인젝터 리그는 엔진회전수를 상사하여 분사시간 및 인터벌을 임의로 설정할 수 있다.

4. 시험결과

펌프 공급 전압을 7.0V에서 14.0V까지 인가하며 계절별 LPG 연료의 혼합비율에 따른 LPI용 연료펌프의 토출특성의 변화를 비교·평가하고, LPG 연료탱크 장착시의 소음도를 측정하였다. 또한 터빈방식 펌프의 엔진적용 시 냉시동성과 고온재시동성을 평가하였다.

4.1 계절별 LPG연료의 혼합비율 분석

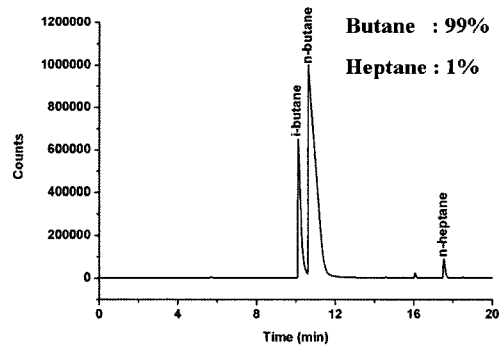
연료펌프의 성능시험에 앞서 시험에 사용할 LPG 연료의 계절별 부탄, 프로판간 혼합비율을 GC(Gas Chromatography)를 이용하여 분석하였다.

Fig. 4의 (a)는 현재 시중에 판매되는 하절기용 LPG연료의 부탄, 프로판간의 혼합비율을 나타낸 것으로 부탄(i-butane + n-butane)이 약 100%수준이고, 프로판은 전혀 혼합되지 않았음을 알 수 있다. (b)는 동절기용 LPG연료의 혼합비율을 GC를 이용하여 분석한 것으로 부탄 약 76%에 프로판이 약 23%정도 혼합되어 있음을 알 수 있다.

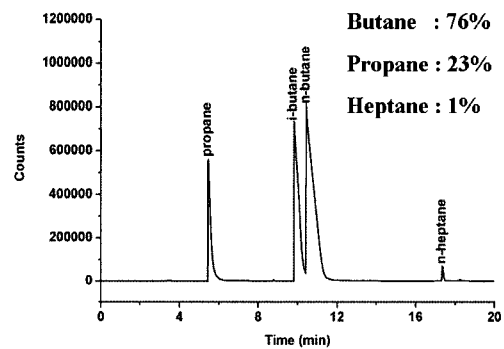
4.2 터빈방식 LPI용 연료펌프 토출특성

Fig. 5는 각 LPI용 연료펌프의 토출유량을 나타낸 것으로 BLDC방식 연료펌프 5단계(500rpm, 1000 rpm, 1500rpm, 2000rpm, 2800rpm)에 해당하는 토출유량은 점선, 터빈방식 LPI용 연료펌프의 토출유량은 실선으로 나타내었다. 터빈방식 LPI용 연료펌프의 토출성능은 하절기 LPG연료에서 최대 113L/h의 수준이고, 이는 BLDC방식 연료펌프 최대 토출유량인 108L/h를 약 5%정도 상회하는 수준이다.

Fig. 6에서 보는바와 같이 터빈방식 연료펌프의 동절기 LPG연료에서 최대 토출유량은 85L/h로 하절기 LPG연료일 경우에 비해 약 25%정도가 감소한



(a) Summer



(b) Winter

Fig. 4 Composition of LPG fuel

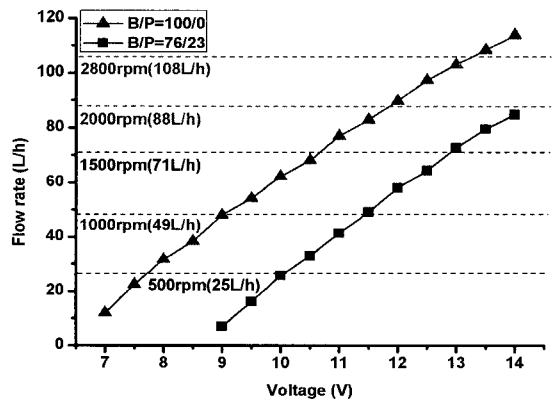


Fig. 5 Max flow rate of turbine type LPI fuel pump

다. 동일한 압력손실 하에서 높은 증기압의 특성을 지닌 연료일수록 기화될 확률이 높아지게 되고 이는 곧 액상의 연료 토출 시기화된 연료의 양만큼 전체적인 유량저하의 결과를 가져온다. 따라서 동절기 LPG연료의 경우 부탄보다 상대적으로 높은 증기압의 특성을 지닌 프로판이 23%혼합되어 있어 결

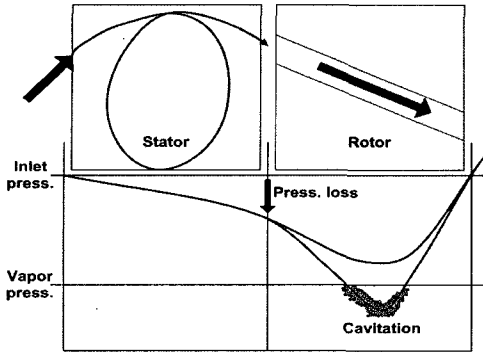


Fig. 6 Flow loss mechanism at the impeller

과적으로 최대토출유량이 감소할 것이라 예상된다.

4.3 엔진회전수 800rpm에서의 연료분사특성

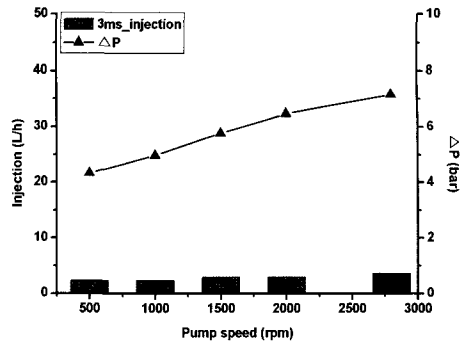
Fig. 7의 (a)는 인젝터 리그를 이용하여 엔진회전수 800rpm의 조건에서 3msec로 분사 시 BLDC 방식 연료펌프의 펌프회전속도별 분사량 및 분사압력을 나타낸 것으로 분사압력은 $\Delta P=4.32\text{bar}$ 에서 $\Delta P=7.15\text{bar}$ 의 수준이고, 분사량은 2.4L/h에서 3.6L/h의 수준을 나타낸다.

(b)는 터빈방식 LPi용 연료펌프의 분사량 및 분사압력을 각 듀티별로 나타낸 것으로 분사압력은 $\Delta P=4.72\text{bar}$ 에서 $\Delta P=5.99\text{bar}$ 의 수준이고, 분사량은 1.2L/h에서 2.4L/h의 수준을 나타낸다. 따라서 분사압력 $\Delta P=5\text{bar}$ 일 때 BLDC와 터빈방식 연료펌프의 분사량은 각각 2.4L/h, 2.0L/h의 수준으로 동등한 연료분사특성을 나타낸다.

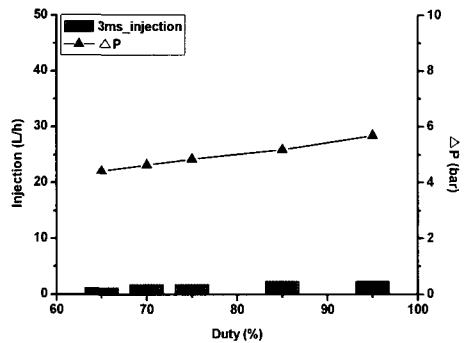
4.4 엔진회전수 5000rpm에서의 연료분사특성

Fig. 8의 (a)는 12msec로 연료분사 시 BLDC 연료펌프의 각 펌프회전속도별 분사량 및 분사압력을 나타낸 것으로 엔진의 고회전·고부하 운전 시 펌프회전속도는 2000rpm수준으로 이때의 분사량과 분사압력은 41.4L/h, $\Delta P=5.4\text{bar}$ 수준이다.

(b)는 동일 조건하에서 터빈방식 연료펌프의 분사량과 분사압력을 각 듀티별로 나타낸 것으로 듀티율 85%에서 분사량과 분사압력이 각각 41.4L/h, $\Delta P=5\text{bar}$ 수준으로 BLDC 연료펌프와 동등한 분사특성을 나타낸다. 최대 분사량은 46.2L/h로 BLDC의 최대 분사량을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

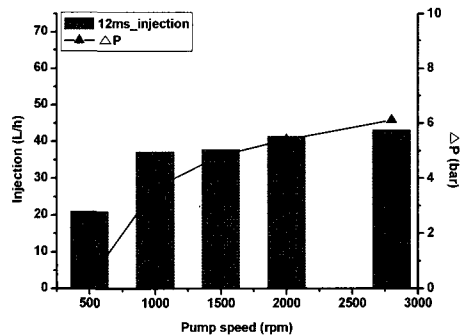


(a) BLDC LPi fuel pump

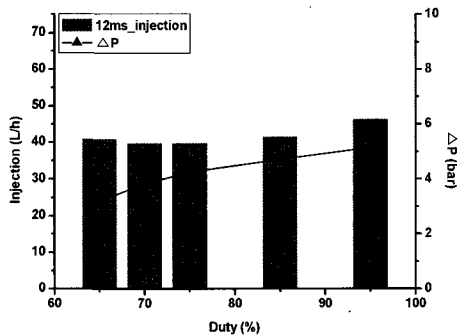


(b) Turbine type LPi fuel pump

Fig. 7 Injection quantity of LPi fuel pumps at 800rpm



(a) BLDC LPi fuel pump



(b) Turbine type LPi fuel pump

Fig. 8 Injection quantity of LPi fuel pumps at 5000rpm

따라서 터빈방식 연료펌프를 적용할 경우 엔진의 저회전·저부하 및 고회전·고부하 운전 시 분사압력과 분사량을 확보할 수 있음을 확인하였다.

4.5 LPG연료 조성별 분사특성

믹서방식 LPG 차량의 시동성 향상을 위해 동절기 LPG 연료에 첨가하는 프로판의 비율이 높아질수록 연료탱크 내부압력이 상승하게 되고 이는 곧 분사압력 상승의 원인이 된다. 따라서 프로판의 함량이 높은 경우 그것이 분사성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 엔진회전수 800rpm, 5000rpm 기준 시 인젝터에서 토출되는 형상을 가시화하였다.

Fig. 9의 (a)는 부탄 100%의 LPG연료에서 엔진회전수 800rpm의 조건에서 3msec로 분사 시 토출되는 모습을 가시화한 것이다. 이때의 분사압력은 7.86bar, 분사량은 1.8L/h이다. (b)는 프로판 100%의 LPG연료에서 엔진회전수 800rpm의 조건에서 3msec로 분사 시 토출되는 모습을 가시화한 것으로 분사압력은 14.56bar, 분사량은 2.4L/h로 부탄100% 대비 분사량 및 분사압력이 각각 6.7bar, 0.6L/h정도 상승하였다.

Fig. 10의 (a)는 엔진회전수 5000rpm의 조건에서 12msec로 부탄 100%의 연료를 분사 시 인젝터에서 토출되는 모습을 가시화한 것이다. 분사압력은 8.05 bar, 분사량은 44.4L/h이다. (b)는 프로판 100%의 연료를 엔진회전수 5000rpm기준, 12msec로 분사 시 토출되는 모습을 가시화한 것으로 분사압력은 14.12bar, 분사량은 45.6L/h로 부탄 100%에 비해

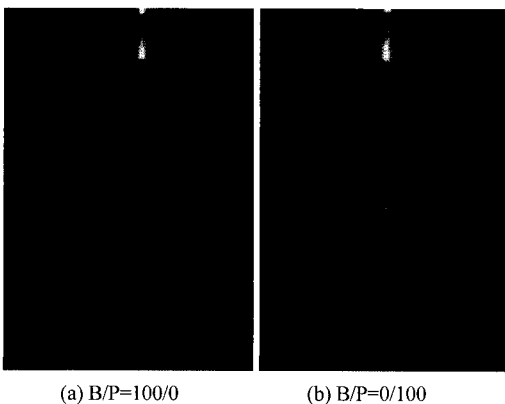


Fig. 9 Injection characteristic at 800rpm, 3msec

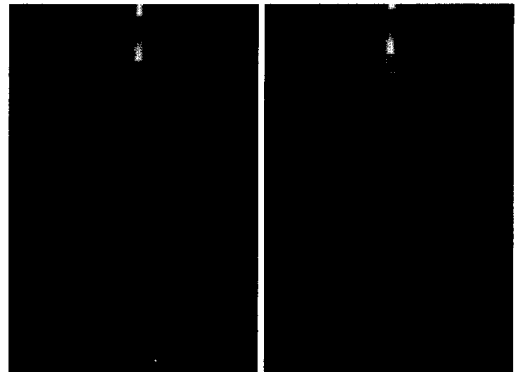


Fig. 10 Injection characteristic at 5000rpm, 12msec

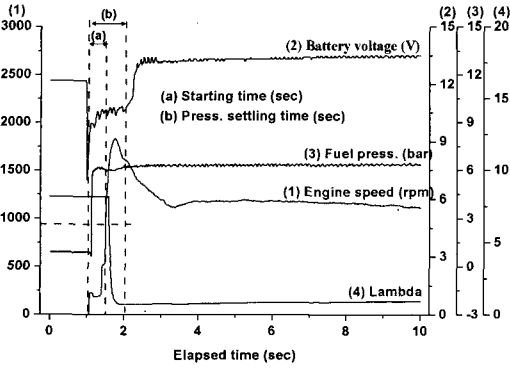
1.2L/h정도 상승하였다.

4.6 터빈방식 연료펌프의 엔진대상운전특성

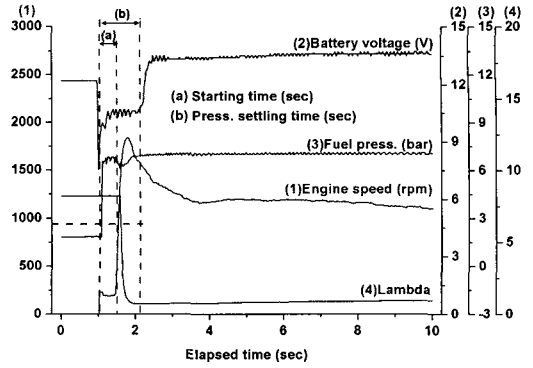
Fig. 11, Fig. 12는 LPI용 엔진에 터빈방식 LPI용 연료펌프로 연료공급시스템을 구성하여 부탄 100%의 하절기용 LPG 연료와 프로판 23%가 함유된 동절기용 LPG 연료를 엔진에 공급을 할 경우 냉시동 및 고온재시동 시 연료라인의 압력 거동과 엔진 운전 성능을 나타낸 것이다. 또한 Table 1, Table 2는 이를 종합하여 양산사양인 BLDC방식 연료펌프 적용시와 비교하여 나타낸 것이다.

시험에 사용된 LPI용 엔진을 충분히 워업한 후 정지시키고, 13시간을 소킹한 후 재시동하여 터빈방식 LPI용 연료펌프에 따른 냉시동성을 평가하였다. 고온재시동의 경우 먼저 엔진 정지 후 연료레일의 온도가 최대로 올라가는 소킹시간을 선정하는 것이 중요하다. 그런데 본 연구가 진행된 시기가 동절기였던 관계로 10분이상 소킹시킬 경우 오히려 연료레일의 온도가 감소하는 경향을 보였다. 따라서 고온 재시동시 소킹시간을 10분으로 선정하여 실험을 진행하였다. 그리하여 고온 재시동 실험은 엔진을 충분히 워업한 후 즉, 냉각수온을 90°C까지 상승시킨 후 엔진을 정지하여 10분 소킹하고, 재시동하여 터빈방식 LPI용 연료펌프 적용시 고온 재시동성을 평가하였다.

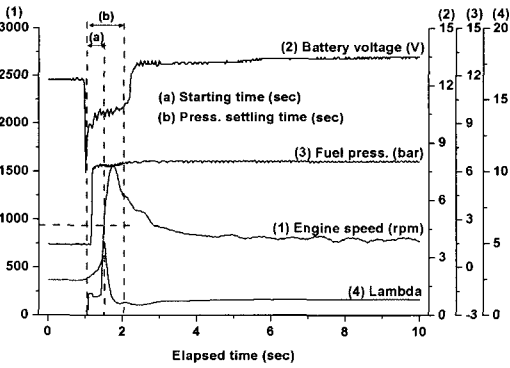
Fig. 11의 (a)는 냉시동 시 펌프 압력 거동과 엔진 운전 성능을 나타낸 것이다. 시동시간은 약 0.42sec 이고, Press. settling time 즉, 압력 안정화까지 걸리는



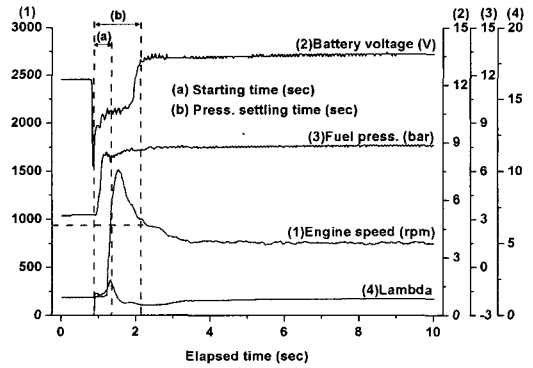
(a) Cold start



(a) Cold start



(b) Hot restart



(b) Hot restart

Fig. 11 Engine operation with turbine type LPi fuel pump (LPG fuel for summer)

Fig. 12 Engine operation with turbine type LPi fuel pump (LPG fuel for winter)

시간은 약 1.08sec로 시동성능이나 안정된 액상 LPG연료 공급을 위한 압력 안정화 측면에서 양호한 성능을 나타낸다고 평가할 수 있다. (b)는 고온 재시동시의 운전특성을 나타낸 것이다. 시동시간은 약 0.44sec이고, 압력 안정화 시간은 약 1.06sec로 냉시동 시와 동등한 수준을 나타내었다.

Fig. 12의 (a)는 동절기용 LPG 연료를 엔진에 공급할 경우 냉시동 시 연료라인의 압력 거동과 엔진 시동 성능을 나타낸 것이다. 시동시간은 약 0.5sec이고, 압력 안정화 시간은 약 1.16sec이었다. (b)는 하절기용 LPG연료 적용 시와 동등한 고온 재시동 조건을 적용하여 고온 재시동시의 엔진 운전특성을 나타낸 것이다. 시동시간은 약 0.48sec이고, 압력 안정화 시간은 약 1.08sec로 하절기 LPG 연료 적용 시의 고온재시동과 비교할 때 시동시간은 0.04sec, 압력 안정화 시간은 0.02sec 정도 지연된다.

Table 1 Engine starting performance for summer LPG

Item	Condition	Starting time	Press. settling time
BLDC type	Cold start	0.42sec	1.12sec
	Hot restart	0.42sec	1.1sec
Turbine type	Cold start	0.42sec	1.08sec
	Hot restart	0.44sec	1.06sec

Table 2 Engine starting performance for winter LPG

Item	Condition	Starting time	Press. settling time
BLDC type	Cold start	0.64sec	1.02sec
	Hot restart	0.5sec	1.64sec
Turbine type	Cold start	0.5sec	1.16sec
	Hot restart	0.48sec	1.08sec

5. 결론

- 1) 터빈방식 연료펌프 1개의 최대 토출유량은 부탄 100%의 하절기용 LPG 연료에서 113L/h로 BLDC 방식 연료펌프의 최대 토출유량인 108L/h

를 약 5%정도 상회하는 수준을 나타내었다.

- 2) 프로판 23%가 혼합된 동절기용 LPG 연료에서 터빈방식 연료펌프의 최대 토출유량은 85L/h로부터 100%일 때에 비해 약 25%정도가 감소한다. 이는 임펠러를 지난 LPG연료가 압력손실에 의해 높은 증기압의 특성을 지니는 동절기용 LPG 연료의 기화가 촉진되어 전체적인 액상 LPG 연료의 토출량이 감소하는 것이라 판단된다.
- 3) 임펠러 2매를 장착한 터빈방식 LPi용 연료펌프의 연료분사특성이 엔진회전수 800rpm과 5000rpm 인 영역에서 각각 2.0L/h, 46.2L/h로 실제 엔진운전에 요구되는 최소·최대 분사유량을 확보하였다.
- 4) LPG 연료 중 프로판의 비율이 100%일 경우 부탄 100% 대비 분사압력은 최소 75.4%에서 최대 85.2%상승하고, 분사량은 최소 2.7%에서 최대 33.3%상승한다.
- 5) 터빈방식 LPi용 연료펌프로 하절기 LPG 연료를 시험엔진에 공급하여 냉시동을 할 경우 시동시간은 약 0.42sec, 고온재시동의 경우 약 0.44sec로 BLDC방식 연료펌프 적용시와 동등한 수준을 나타내었다. 압력안정화시간측면에서는 터빈방식 연료펌프가 냉시동시 및 고온재시동시 모두 0.04sec정도 유리하였다.
또한 동절기 LPG 연료를 공급할 경우 터빈방식 LPi용 연료펌프 적용시 냉시동시의 시동시간은 0.5sec, 고온재시동시의 시동시간은 0.48sec로 BLDC방식 연료펌프 대비 냉시동시 0.14sec 정도 유리하였고, 고온재시동시의 시동시간은 동등한 수준을 나타내었다. 압력안정화시간측면에서는 냉시동시는 BLDC 방식이 0.14sec, 고온재시동시는 터빈방식이 0.56sec정도 유리한 결과를 나타내었다.
- 6) 터빈방식 연료펌프를 하나만 사용하였음에도 불구하고 LPi 엔진 적용 시 시동성능이나 안정적인 액상 LPG연료 공급을 위한 압력 안정화 측면에서 양호한 성능을 지님을 확인할 수 있었다.

단, 내구성능에 대한 평가는 현재 진행중에 있어 평가완료시 터빈방식 연료펌프의 LPi 시스템 적용성에 관한 전체적인 평가를 할 예정이다.

References

- 1) M. C. Lim, C. L. Myung, S. S. Park, J. N. Park and S. K. Kim, "Development of a Turbine Type LPi Fuel Pump," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.650-655, 2005.
- 2) T. S. Gang and J. G. Sim, "Development of Fuel Pump for LPLi," Fall Conference Proceedings, Vol.I, pp.525-530, 2004.
- 3) T. S. Gang and J. G. Sim, "Reduction of Impeller Noise of LPLi Pump," Fall Conference Proceedings, Vol.II, pp.1089-1093, 2005.
- 4) 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.
- 5) S. Goto, H. Furutani and R. D. Delic, "Dual-Fuel Diesel Engine Using Butane," SAE 920690, 1992.
- 6) J. H. Kim, Y. J. Chung, G. H. Choi, S. J. Lee and B. H. Lee, "A Study on Combustion and Emission Characteristic in Heavy-duty SCDE with Mixer and LPi system," Fall Conference Proceedings, Vol.I, pp.336-341, 2001.
- 7) B. R. Munson, D. F. Young and T. H. Okiishi, Fundamentals of Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, New Jersey, pp.779-802, 1998.
- 8) C. Lee, H. J. Sung, J. H. Kwon and M. K. Chung, "Study on the Performance Analysis and the Optimization of Regenerative Pump," Transaction of the KSME, Vol.15, No.2, pp.661-667, 1991.
- 9) H. S. Lim and S. H. Kang, "Performance Characteristics of Side Channel Type Regenerative Pumps," Transaction of the KSME (B), Vol.29, No.3, pp.306-313, 2005.