

## 엔진 착화 라인의 생산성 향상을 위한 LPI 엔진 가솔린 연료 적용성에 대한 실험적 연구

황 인 구<sup>1)</sup> · 최 성 원<sup>1)</sup> · 명 차 리<sup>2)</sup> · 박 심 수<sup>\*2)</sup> · 이 종 수<sup>3)</sup>

고려대학교 기계공학과 대학원<sup>1)</sup> · 고려대학교 기계공학과<sup>2)</sup> · 기아자동차<sup>3)</sup>

### Experimental Study on Firing Test of LPI Engine Using Gasoline Fuel for Improving the Production Process at End of Line

In Goo Hwang<sup>1)</sup> · Seongwon Choi<sup>1)</sup> · Cha-Lee Myung<sup>2)</sup> · Simsoo Park<sup>\*2)</sup> · Jong-Soo Lee<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Korea University, Seoul 135-701, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 135-701, Korea

<sup>3)</sup>Kia Motors Company, 1714 Ihwa-ri, Ujeong-myeon, Hwaseong-si, Gyeonggi 114-711, Korea

(Received 28 September 2006 / Accepted 29 December 2006)

**Abstract** : The purpose of this study was to evaluate the effects of gasoline fuel to the LPI engine. Firing test bench was used in order to assess the effect on gasoline-injected LPI engine. Gasoline fuel was supplied into the reverse direction(3-4-2-1 cylinder) at 3.0 bar with commercial gasoline fuel pump. Engine test was performed using the firing test mode at end of line. The deviations of excess air ratio of each cylinder and maximum combustion pressure using gasoline fuel were within 0.1 and 1~2 bar. Engine start time was measured with changing coolant temperature at 20°C, 40°C, 80°C, respectively. Residual gasoline volume in the fuel line was measured about 32 cc after firing test and it was less than 2 cc within 10 seconds purging. To simulate the end of line, the residual gasoline in the fuel line was purged during 5 and 10 seconds. Start time of LPI engine with LPG fuel were 0.61 and 0.58 seconds. This work showed that severe problems such as misfiring and liner scuffing were not occurred applying gasoline fuel to LPI engine.

**Key words** : LPI(액상분사), LPG(액화석유가스), Gasoline(휘발유), Firing test mode(착화시험모드), Variable pressure regulator(가변압력조절기), Residual gasoline(잔류휘발유)

#### Nomenclature

LPI : liquid phase injection  
LPG : liquefied petroleum gas  
EMS : engine management system  
ECU : electronic control unit  
IFB : interface box  
IVO : intake valve open  
IVC : intake valve close

EVO : exhaust valve open  
EVC : exhaust valve close  
ppmc : parts per million carbon  
THC : total hydrocarbon

#### 1. 서론

완성엔진의 품질확보 차원으로 엔진조립라인에서 최종품질확인을 위하여 착화 시험을 시행한다. LPG를 연료로 사용하는 엔진의 경우 전수 착화 시험을 수행한 후 연료공급라인을 탈거한다. 이때 연

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

료공급라인과 인젝터 내에 있는 LPG 연료를 추가 포집 장치를 이용하여 회수하지 않을 경우, 직접적으로 생산라인에 누출되어 작업자가 LPG 연료에 노출되어 심리적 불안감을 유발하는 문제점이 발생한다. 또한 LPG 연료는 가솔린 및 경유와 달리 누설 시 눈에 보이지 않고 점화원에 의해 발화되어 폭발할 수 있는 안전문제가 발생할 가능성이 있다. 이러한 안전문제를 사전에 예방하고자 본 연구에서는 LPI 엔진 착화라인에서 가솔린을 연료로 하여 착화 시험을 수행하였을 때 적정 가솔린 연료 공급압력을 결정하고 LPI 엔진의 시동성을 평가하고자 한다.

또한 가솔린 착화 후 연료라인 내 잔류하는 가솔린 양을 측정하고 연료라인을 불어낸 후 LPG 연료로 재시동하였을 때 잔류 가솔린에 의해 발생할 수 있는 문제점을 평가하고자 한다. 본 연구의 목적은 착화라인에서의 생산성 향상과 안전문제를 예방하여 엔진의 품질향상을 확보하는 것이다.

## 2. 시험장치 및 시험방법

### 2.1 시험엔진 및 시험장치

Fig. 1은 LPI 엔진 가솔린 연료 착화시험을 위한 시스템 구성도이다. 시험엔진은 2.0L LPI 엔진으로 그 제원을 Table 1에 나타내었다. 시험 장치는 착화 시험장치, 가솔린 연료를 공급할 수 있는 연료공급 장치, EMS 제어기 및 엔진의 각종 신호와 연소현상을 측정하고 분석하는 신호수집 장치로 구성되어 있다. Fig. 2는 착화시험엔진과 제작한 착화시험장치를 나타낸 것이다.

엔진 냉각수 공급은 별도의 라디에이터 및 냉각

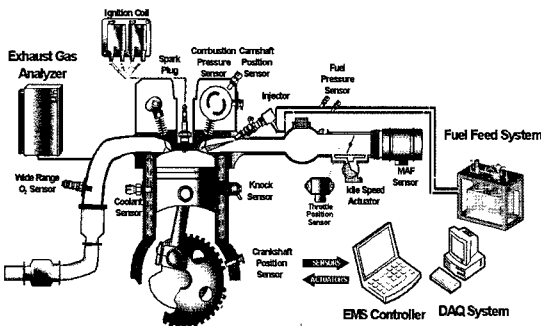


Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	In-Line, DOHC 16V
Bore × Stroke (mm)	86 × 86
Displacement (cc)	1,998
Compression ratio	10.5 : 1
Valve Timing (IVO/IVC EVO/EVC)	BTDC 10 / ABDC 46 BBDC 34 / ATDC 10
Valve Timing (IVO/IVC EVO/EVC)	LPI

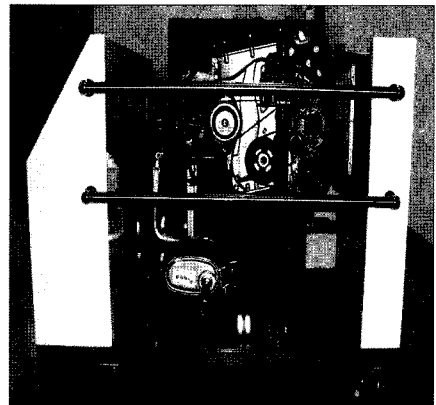


Fig. 2 Simulated firing test bed with LPI engine

팬을 장착하였고 냉각팬은 ECU 제어방식이 아닌 냉각수 온도에 따라 시험자가 제어할 수 있도록 제작하였다. 가솔린 연료의 원활한 공급을 위하여 연료공급장치를 제작하였다. 연료탱크의 용량은 약 15리터이고 연료펌프는 탱크내장형의 양산 가솔린 펌프를 사용하였다. 적정 연료공급압력을 선정하기 위하여 연료라인 및 인젝터에 공급되는 연료압력을 조절할 수 있는 가변 연료압력 조절기를 사용하였다. 연료라인으로 공급되는 압력과 분사 후 연료탱크로 리턴 되는 압력을 압력계를 장착하여 실시간으로 신호수집장치를 통하여 측정하였고 체적유량계를 설치하여 공급유량을 측정하였다. Fig. 3은 가솔린 연료 공급장치를 나타낸 것이다.

또한 가솔린으로 착화 시험을 수행하였을 때 실린더 벽 공기과잉을 편차를 확인하기 위하여 각 배기매니폴드에 광역산소센서를 장착하여 공기과잉률을 측정하였다. 가솔린 연료 시동 후 연료라인의 잔류 THC 수준을 HOBIBA사의 MEXA-8120D 모델

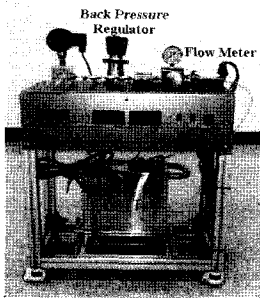


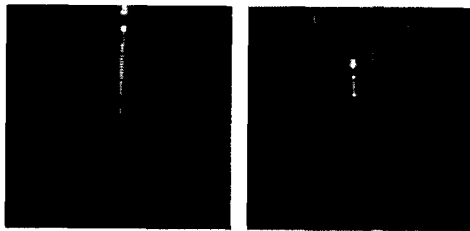
Fig. 3 Fuel supply system

의 배출가스 분석기를 사용하여 측정하였다.

## 2.2 시험방법

LPI엔진의 연료공급 시스템은 연료탱크와 인젝터 사이의 압력차이가 5 bar를 유지한다. 가솔린과 LPG의 성상차이와 LPI 인젝터 팁에 추가적으로 설치된 Icing 팁의 영향으로 인해 LPI 엔진의 분무각도는 기존 가솔린엔진의 분무각도에 비해 상대적으로 적고 연료공급라인의 지름이 기존 가솔린 연료공급시스템에 비하여 매우 작으므로 흡기포트 및 흡기밸브에 과도한 Wetting이 발생할 수 있다. Fig. 4는 LPI 인젝터서의 LPG와 가솔린 연료의 분사모습을 나타낸 것이다. 좌측은 LPG 연료를 분사한 모습이고 우측은 LPI 인젝터에서 가솔린연료를 분사한 모습을 나타낸 것이다. 연료의 성상 차이로 인하여 분사되는 분무각도와 분무형태가 상이함을 알 수 있다.

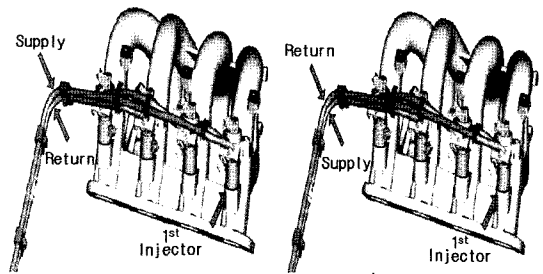
본 연구에서는 연료공급시스템의 가변 연료압력 조절기를 이용하여 연료공급압력을 변화시키면서 시동성을 평가한 결과, 최종적으로 가솔린 연료공급압력을 3.0 bar로 유지하였다. 또한 LPI 연료공급



(a) LPG fuel (b) Gasoline fuel

Fig. 4 Spray pattern of LPG and gasoline fuel using LPI injector

시스템은 가솔린 연료공급 시스템인 연료공급과이프를 사용하는 것이 아니라 인젝터를 통과하는 연료공급의 순서가 정해져 있다. 연료공급은 정방향의 경우, 펌프에서 토출된 연료가 연료공급라인을 거쳐 1-2-4-3번 인젝터를 거치고 이후 연료탱크로 리턴 되는 방식이다. 공기과잉률 편차 수준을 평가하여 인젝터의 연료 분사량을 각각 조절하여 실린더 간 공기과잉률 편차를 최소화하는 방안을 채택하였다. 정방향 공급방식의 경우 공기과잉률 편차가  $\Delta\lambda = \pm 0.2$  수준을 보였고 역방향 공급방식의 경우  $\Delta\lambda = \pm 0.1$  수준을 나타내어 정방향의 경우의 공기과잉률 편차가 상대적으로 크기 때문에 착화시험 수행 시 연료공급을 역방향인 3-4-2-1번 실린더의 순서로 공급하였다. 이때 실린더 간 공기과잉률 편차가 정방향 보다는 작기 때문에 안정적인 엔진운전에 유리하다고 판단된다. Fig. 5는 가솔린 연료의 공급순서를 나타낸 것이다.



(a) Regular direction (b) Reverse direction

Fig. 5 Gasoline fuel supply method

연료 분사를 위한 인젝터는 LPI용 양산 인젝터를 사용하였다. LPI용 연료분사 인젝터는 Peak & hold type으로써 인젝터 니들밸브가 열리면 연료압력 레귤레이터를 통해 공급된 고압의 연료는 연료배관의 압력에 의해 분사된다. 연료 분사량의 조절은 기존 가솔린 및 LPG연료 연료량 대비 시 200% 수준을 유지하였다. 이는 LPG연료의 분사 시 Icing을 방지하기 위한 Icing 팁이 저항으로 작용하기 때문이다. 실린더 간 공기과잉률 편차를 최소화하기 위하여 각 실린더의 연료 분사량을 별도로 제어하였다. 또한 산소센서에 의한 연료량 피드백 제어를 적용하지 않았고 연료 분사 시기는 양산 가솔린 엔진과 동일하게 적용하였다.

Fig. 6은 LPI 엔진의 EMS 개략도를 나타낸 것이다. 가솔린 엔진의 EMS와 달리 별도의 IFB ECU가 구성된다. 이는 연료공급을 위하여 LPG 연료탱크의 압력과 온도 등을 측정하여 운전조건에 따른 연료 분사량과 연료펌프의 회전속도를 제어하는 역할을 한다. 본 연구에서는 가솔린 연료를 사용하였으므로 IFB ECU의 연료탱크의 온도 및 압력에 관련된 변수는 사용하지 않고 시험을 수행하였다.

Fig. 7에 착화시험 모드를 나타내었다. 착화시험 모드는 시동 후 5초 동안 아이들 상태를 유지하고 이후 40초 동안 1500 rpm, 35초 동안 아이들, 5초 동안 2000 rpm 순서로 진행된다. 엔진 회전수의 제어는 수동으로 스로틀 개도율을 변경시키면서 수행하였다.

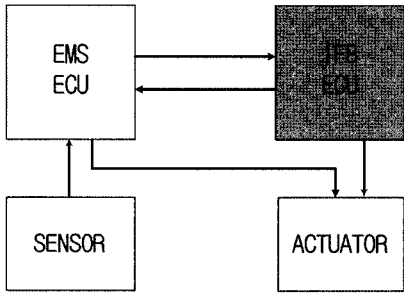


Fig. 6 Schematic diagram of LPI EMS

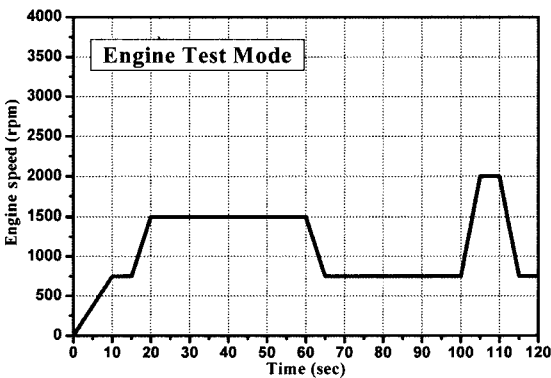


Fig. 7 Engine firing test mode at end of line

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 냉각수온에 따른 시동성

계절에 따른 엔진착화 라인의 적용성을 파악하기 위하여 냉각수온에 따른 엔진의 시동성을 평가하였

다. 하절기와 동절기에 생산라인의 기온이 상이하므로 조립된 엔진에 동일한 온도의 냉각수를 공급하여도 엔진이 냉각되어 있는 상태이므로 열전달에 의하여 시동 시 냉각수온은 달라진다. 따라서 본 연구에서는 동절기 조건으로 냉각수온이 20°C, 하절기 조건으로 냉각수온이 40°C를 적용하였고 엔진이 완전히 워업된 조건으로 냉각수온이 80°C일 때를 적용하였다. 냉각수온은 양산용 냉각수온센서에서 측정하였으며 냉각수온이 20, 40, 80°C일 때 엔진이 시동되는 시간을 측정하였다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10은 냉각수온에 따른 LPI엔진의 시동성을 나타낸 것이다. 일반적으로 시동시간을 결정하는 기준은 다양하나 본 연구에서는 엔진이 크랭킹하기 시작하는 시점부터 엔진회전수가 최고점에 도달하는 시간까지를 시동시간으로 정하였다.

동절기 조건인 냉각수온이 20°C일 때 엔진의 시

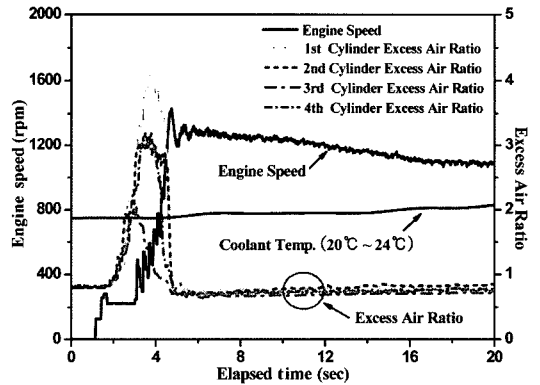


Fig. 8 Startability of engine at coolant temperature 20°C

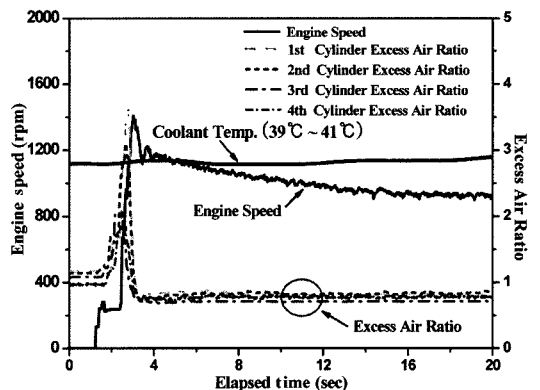


Fig. 9 Startability of engine at coolant temperature 40°C

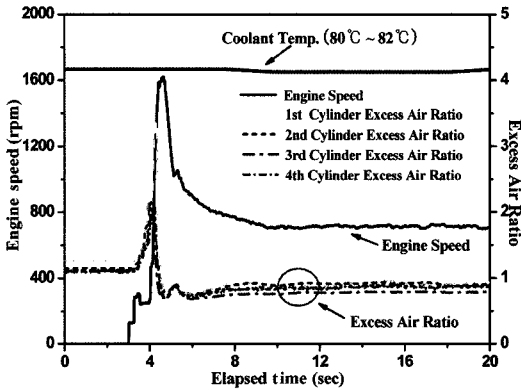


Fig. 10 Startability of engine at coolant temperature 80°C

동시시간은 약 2.63초로 LPG 연료 사용 시 보다 약간의 시동지연이 발생하였다. 그러나 냉각수온이 40°C, 80°C로 상승하게 되면 시동시간은 2.01초, 1.71초로서 시동시간이 감소하였다. 냉각수온이 낮을 때 시동시간이 증가하는 이유는 인젝터에서 분무된 가솔린 연료가 무화되지 못하여 흡기포트에 Wetting 현상이 빈번하게 발생하기 때문이라 판단된다.

### 3.2 엔진 착화모드 운전

Fig. 11은 착화 시험용 엔진의 모드 운전을 나타낸 것이다. 착화시험 모드를 나타내는 엔진 회전수와 냉각수온도를 나타내었다. 냉각수 온도 약 25°C에서 엔진 시동을 하였고 착화시험 모드를 자동으로 운전하기가 어려워 수동으로 착화시험 모드를 구현하여 운전하였다. 착화모드를 수동으로 조절하여 운전하므로 Tip-in과 스로틀 개폐시기에 약간의 차이가 존재하나 착화모드 운전에 따른 엔진운전 조건에는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 1번 실린더와 3번 실린더의 인젝터 분사시간과 공기과잉률을 나타낸 것이다. LPI 엔진은 가솔린 엔진과 달리 연료가 실린더로 순차적으로 공급되어 1번 실린더와 3번 실린더 사이에 연료의 공급압력 차이가 존재하므로 1번 실린더의 연료분사 시간을 3번 실린더의 연료분사 시간보다 28% 정도 길게 하여 1번 실린더의 연료 분사량을 증가하였다. 냉각수온도가 30°C 정도 유지되고 있어 공기과잉률 0.7 ~ 0.8 정도의 다소 농후한 조건에서 시험을 진행하였다. 1번 실린더에 연료가 가장 마지막으로 공급되므로 1번 실린더와 3번 실린더 간 공기과잉

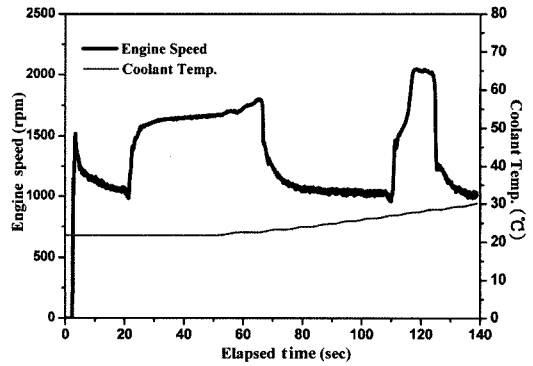


Fig. 11 Engine speed and coolant temperature

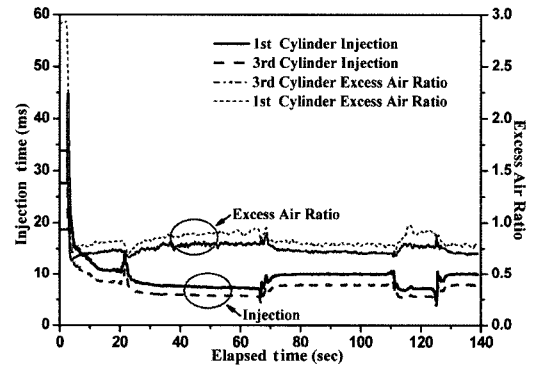


Fig. 12 Comparison of injection duration and excess air ratio

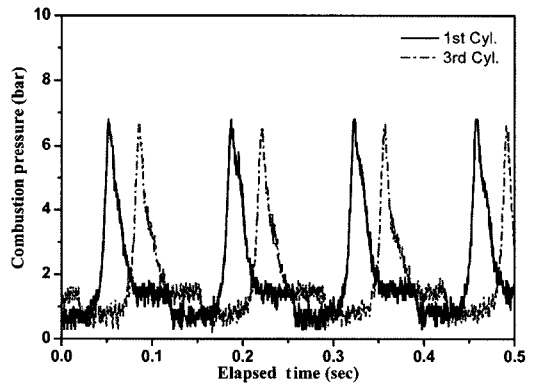


Fig. 13 Behavior of combustion pressure at idle rpm

를 편차는  $\Delta\lambda = 0.1$  수준을 나타내었다.

Fig. 13과 Fig. 14는 착화모드 운전 시 아이들과 1500 rpm에서의 연소압력곡선을 나타낸 것이다. 연료가 처음으로 공급되는 3번 실린더와 가장 마지막으로 공급되는 1번 실린더의 연소압력을 압전형 연소압력 센서와 전하증폭기를 사용하여 엔진 회전수

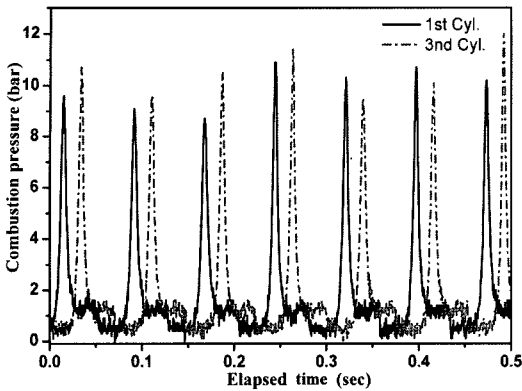


Fig. 14 Behavior of combustion pressure at 1500 rpm

가 안정화 되었을 때 0.5초 동안 측정하였다. 아이들 상태에서 연소압력은 연료의 공급순서에 관계없이 실린더 간 편차가 매우 작으나 1500 rpm 에서의 연소압력은 연료가 가장 먼저 공급되는 3번 실린더가 마지막으로 공급되는 1번 실린더에 비해 다소 증가 된 것으로 나타났다. 이는 연료라인의 지름이 매우 작기 때문에 연료가 먼저 공급되는 3번 실린더와 연료가 가장 마지막에 공급되는 1번 실린더 사이에 실린더 간 연료 공급압력 불균형이 미세하게 존재하기 때문이라 판단된다.

그러나 엔진의 착화 시험은 매우 짧은 시간동안 수행하게 된다. 또한 착화 시험 시 엔진의 부조 및 진동, 소음, 센서류의 이상유무, 윤활유 누유, 냉각수 누수 등이 엔진을 평가하는 기준이다. 실린더 간 연소압력이 다소 차이를 보이고 있으나 엔진의 부조나 진동 소음은 나타나지 않았다. 따라서 LPI 엔진의 착화 시험 시 가솔린 연료를 적용하여도 큰 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

### 3.3 가솔린 잔류수준 및 불어내기

가솔린 연료로의 착화시험 후 연료라인 내 잔류 가솔린 양을 측정하였다. 착화모드 수행 후 연료라인을 탈거하고 압축공기를 이용하여 연료라인을 불어내면서 배출되는 가솔린을 포집한 후 그 양을 측정하였다. 압축공기의 압력은 4 kgf/cm<sup>2</sup>으로 유지하여 2초, 4초, 6초, 10초, 20초, 30초 동안 연료라인을 불어내었다. 20초 이상 불어낸 후 연료라인에서 포집되는 연료가 증가하지 않는 것으로 볼 때 연료라인에 잔류하는 연료의 양은 약 32cc로 추정된다.

Table 2 Purged and residual gasoline volume at fuel line

Blowing time (sec)	2	4	6	10	20	30
Purged Vol. (cc)	26	28	28	31	32	32
Residual Vol. (cc)	6	4	4	1	≈0	≈0

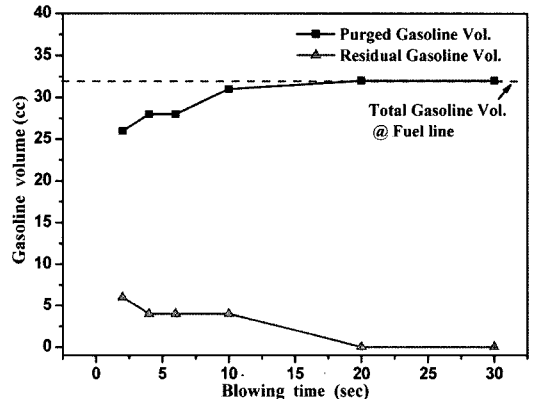


Fig. 15 Purged and residual gasoline volume at fuel line

Table 2에 연료라인에서 불어낸 가솔린 부피를 정리하였고 Fig. 15에 시간에 따른 가솔린 배출량 및 잔류량을 나타내었다. 불어낸 시간이 10초 이상일 때 잔류하는 가솔린 양은 2 cc 미만으로 나타났다.

그러나 양산라인에서는 생산성을 고려하여 불어낸 압력과 시간을 적절히 선정한다면 가솔린 연료로 엔진 착화 시험 후 엔진을 차량에 탑재하였을 때 큰 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

또한 연료라인을 30초, 60초간 불어낸 후 배출가스 분석기를 이용하여 연료라인 내 잔류하는 THC 수준을 측정하였다. 그 결과로 30초 동안 불어낸 후 초기에 측정된 THC 잔류농도는 1200 ppmc 수준을 나타내었고 60초 동안 불어낸 후 초기 THC 잔류농도는 700 ppmc 수준을 나타내었다.

### 3.4 LPG 연료로의 제시동성

생산라인에서 착화 시험 후 엔진이 전수검사를 통과하면 차량에 탑재된다. 이러한 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하기 위하여 잔류 가솔린을 제거한 후 LPG 연료로의 제시동성을 평가하였다. LPI 양산엔진의 EMS Data를 적용하였고 엔진 냉각수온은 30°C ~ 40°C로 유지하였다. 또한 양산 차량의 연료공급시스템을 사용하여 LPG 연료를 공급하였고 연료공급순서는 정방향으로 하여 엔진을

시동하였다.

Fig. 16, Fig. 17은 착화 시험 후 연료라인을 5초, 10초 동안 불어낸 후 LPG 연료로 엔진을 시동한 것이다. LPG 연료로 시동을 하였을 때 크랭킹 시작부터 시동 시 까지 소요되는 시간은 약 0.61초, 0.58 초로서 가솔린 연료로의 시동 시 보다 시동시간이 짧았다. 엔진 시동 후 엔진 회전수는 안정화 되고 1번 실린더와 3번 실린더 간 공기과잉률 편차는  $\Delta\lambda = 0.02$  수준을 나타내었다. 또한 엔진 부조나 실화현상은 나타나지 않았다.

그러나 연료라인을 압축공기로 불어내는 과정에서 완전히 배출 되지 않고 인젝터 내부 유로 및 팁에 미량의 잔류 가솔린이 남아 있어 향후 엔진을 차량에 탑재 시 시동 초기에 공연비가 미세하게 변화할 가능성이 있다.

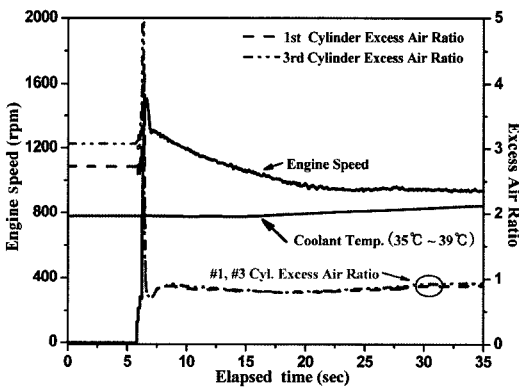


Fig. 16 Restartability test using LPG fuel for 5 second purging

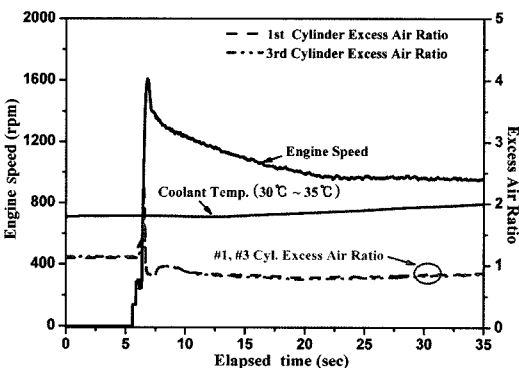


Fig. 17 Restartability test using LPG fuel for 10 second purging

#### 4. 결론

생산라인에서 LPI 엔진의 착화 시험 시 발생할 수 있는 안전문제를 방지하고 생산성 향상을 위하여 가솔린을 연료로 하여 LPI 엔진의 착화 가능성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가변 압력조절기가 장착된 연료공급시스템을 제작하여 LPI엔진이 가솔린으로 착화하는데 적정한 압력을 선정할 결과 연료 공급압력을 3.0 bar를 적용하였고 LPG 연료 공급순서와 반대인 3-4-2-1번 실린더의 순서로 연료를 공급하였다.
- 2) 계절에 따른 생산라인의 기온 조건을 고려하여 냉각수온에 따른 엔진의 시동성을 평가하였다. 동절기 조건의 경우 냉각수온이 낮아 하절기 조건에 비해 시동시간이 증가하였다.
- 3) 연료공급 순서에 따른 실린더 간 공기과잉률 편차는 10% 이내로 나타났다. 연료가 가장 먼저 공급되는 3번 실린더의 공기과잉률이 가장 높았고 가장 마지막으로 공급되는 1번 실린더의 공기과잉률이 가장 희박하게 나타났다.
- 4) 가솔린 연료로 착화 시험 후 연료라인내의 잔류 가솔린 양을 측정할 결과 연료라인 내 잔류하는 가솔린양은 약 32 cc이고 10초 이상 연료라인을 불어내었을 때 잔류하는 가솔린양은 2 cc 미만을 나타내었다. 연료라인을 30초 동안 불어낸 뒤 THC 잔류수준은 1200 ppmc, 60초 동안 불어낸 뒤 THC 수준은 700 ppmc 수준을 나타내었다.
- 5) 착화 시험 후 엔진이 차량에 탑재 시 발생할 수 있는 문제점을 파악하기 위해 가솔린 연료로 착화 시험 후 연료라인을 불어내고 LPG 연료로의 재시동성을 평가하였다. 시동성은 우수하였으며 엔진 안정성은 LPI 양산 엔진과 동등한 수준을 나타내었다.

이상에서 얻은 결론을 토대로 하여 양산라인에서 LPI 엔진에 가솔린 연료 착화 적용 시 LPG를 연료로 한 착화 시험에 비해 연료 누설의 위험성을 저감하고 안전 검사 등에 소요되는 시간 및 비용을 절감하여 착화라인에서의 생산성 및 완성 엔진 품질 향상의 효과를 기대할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 (주)기아자동차에서 지원한 산학연구  
과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### References

- 1) I. G. Hwang, C.-L. Myung, S. S. Park and J.-S. Lee, "A Research of LPI Engine Firing Test and Evaluate Application using Gasoline Fuel," Spring Conference Preceedings, Vol.IV, KSAE, pp.1974-1979, 2006.
- 2) H. M. Lee, S. W. Choi, C.-L. Myung and S. S. Park, "Experimental Investigation on the THC Reduction in Liquid Phase LPG injection (LPLi) Engine with Recirculation System Using Canister," Proceeding of IPC-13, pp.407-412, 2005.
- 3) H. Ono, M. Ishii, S. Tsusaka, B. Takigawa and T. Fukawa, "Research and Development of LPG Liquid Fuel Injection System(1st. Report)-Overview of Liquid Fuel Injection System and Engine Performance," JSAE 20025034, 2002.
- 4) C.-L. Myung, H. C. Kwak and S. S. Park, "Development On Enhanced Leaked Fuel Recirculation Device Of LPLi Engine to Satisfy SULEV Standard," Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.4 pp.407-413, 2006.
- 5) J.-H. Lim, C.-L. Myung, S. S. Park, S.-J. Yang, "LPLi Engine Performance and Vehicle Exhaust Emission Characteristics," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.15-21, 2003.
- 6) 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.