한국동력기계공학회지 제12권 제4호 pp.12~17 2008년 8월

SI 엔진에서의 가솔린과 액화석유가스 연료의 연소특성 비교 연구
A Study on the Comparison of Fuel Combustion Characteristics between Gasoline and Liquified Petroleum Gas on SI Engine

박성천 · 고영남 · 권영웅
S. C. Park, Y. N. Ko and Y. W. Kwon

(접수일 : 2008년 7월 17일, 수정일 : 2008년 8월 12일, 채택확정 : 2008년 8월 25일)

Key Words : LPG(Liquified Petroleum Gas, 액화석유가스), SI Engine(Spark Ignition Engine, 불꽃점화기관), BMEP(Brake Mean Effective Pressure, 제동평균유효압력), MBT(Minimum advance for Best Torque, 최적점화시기), CA(Crank Angle, 크랭크 각)

Abstract : The purpose of this study is to analyse and compare the fuel combustion characteristics between LPG and gasoline on SI engine. Pressures of combustion chamber were measured on the state that engine speed was 2000rpm and BMEP was 2.0bar. And we measured pressures of combustion chamber regarding variation of the MBT. We could know that the combustion pressure of LPG fuel use engine is appeared lower than that of gasoline fuel use engine. At the lean mixture ratio area we could know that ignition timings are pulled very forward, and ignition timing of LPG fuel is advanced to 5~12° CA than gasoline fuel. We learned that the value of coefficient of variation of LPG fuel is higher than gasoline fuel.

1. 서 론

차량 증가에 따른 대기 오염 문제가 심각하게 대두되고 있으며, 고유가에 따른 가솔린 연료를 대처할 새로운 에너지에 대한 관심이 커지고 있다. 따라서 천연가스, LPG 등 가스연료 사용에 대한 관심이 커지고 있다.

가스 연료 중 LPG연료는 연소에 따른 유해배기가스가 적은 저공해 연료로서 가솔린에 비해 옥탄가가 높기 때문에 압축비 증가에 따른 열효율 향상이 가능하다.[1,2] 또한, 연료공급이 기체 상태에서 이루어지므로 혼합기 형성이 우수하고 균일하다. 그러나 이러한 기체상태의 연료 공급으로 인하여 체적효율 저하에 따른 엔진 출력이 가솔린에 비해 대략 10~15% 정도 감소한다.[3,4]

이러한 단점에도 불구하고 저렴한 연료 가격과 공해 물질을 적게 배출하는 청정 연료의 장점이 더 크므로 LPG 연료를 사용하는 차량이 증가하고 있다.

박성천(책임저자) : 서울산업대학교 철도전문대학원
E-mail : psch@snut.ac.kr, Tel : 02-970-6335
고영남 : 서울산업대학교 산업대학원 자동차공학과
권영웅 : 서일대학 자동차과

본 연구에서는 동일한 SI기관에서 가솔린연료와 LPG연료를 사용하여 실험하였으며, 그 결과에 따른 연소특성을 비교 분석하였다.

2. 연소과정 해석을 위한 이론

2.1 평균 유효압력

기관의 출력을 나타내는 대표적인 값으로서 평균유효압력을 사용하면 기관의 대소나 회전속도에 상관없이 그 기관의 출력성능에 대한 우열을 나타낼 수 있다.

$$IMEP = BMEP + FMEP$$

여기에서

IMEP : Indicated Mean Effective Pressure[bar]
BMEP : Brake Mean Effective Pressure[bar]
FMEP : Friction Mean Effective Pressure[bar]

로 표시되며, IMEP는 연료에 의하여 공급되는 열량에 비례하고 또한 연료는 흡입되는 공기중량에 대하여 기관의 운전조건에 따라 대체로 일정한 비율이 되도록 혼합 공급된다. 따라서 기관의 출력성능을 나타내는 대표적인 값인 IMEP는 얼마나 많은

양의 연료를 연소시킬 수 있는 공기량을 확보하는 가에 의하여 결정된다.

1사이클 중의 일 W는 압축 및 팽창과정 중에 연소에 의해 발생되는 일에서 흡입 및 배기과정 동안의 흡배기 일을 뺀 것으로 다음 식으로 표시된다.[3)]

$$W = \oint PdV = \frac{1}{A}\oint dQ = \frac{1}{A}(Q_1 - Q_2)$$

그러나 측정된 압력데이터는 크랭크 각 1° 마다의 디지털 데이터 이므로 이를 다시 나타내면

$$W = \oint P\frac{dV}{d\theta} \approx \sum_{\theta i} P(\theta i)\frac{dV(\theta i)}{d\theta}\Delta\theta$$

로 구해진다.

따라서, 평균유효압력은 이를 행정체적(Vs)으로 나눈 것이다. 즉,

$$IMEP = \frac{W}{V_S}$$

로 정의된다.

2.2 평균유효압력의 변화계수(COVIMEP)

기관에서 연소의 사이클 변화에 의해 나타나는 결과중 평균유효압력의 변화는 기관운전시 안전성에 직접적 영향을 미치는 것으로서 그 변화량을 나타내는 하나의 척도로서 변화계수가 많이 사용되고 있다. 이것은 평균유효압력의 표준편차를 평균유효압력으로 나눈 것으로 다음과 같이 표시한다.[3)]

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{IMEP} \times 100$$

이때, N개의 변화량 x_i 값이 있고 그 표본의 평균유효압력 IMEP 및 표준편차 σ_{IMEP}는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$IMEP = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N}$$

$$\sigma_{IMEP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - IMEP)^2}{N}}$$

따라서 COV는 사이클마다 나타나는 도시일의 사이클 변동으로 정의되고, 그 값이 10%를 초과하게 되면 차량 구동성에 문제를 초래하게 된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 실험에 사용된 장치는 SI 엔진, 엔진 동력계, 동력계 제어장치, 데이터 수집 처리용 컴퓨터, 광역 산소센서(Wide Band O_2 Sensor), 엔진 제어용 ECU(Engine Control Unit)가 사용되었다.

실험장치의 개략도는 Fig. 3-1과 같이 구성하였으며, LPG연료의 양을 직접 제어하여 일정한 공연비 상태를 유지하기 위하여 연료조절밸브(Fuel Control Valve)를 사용하였다.

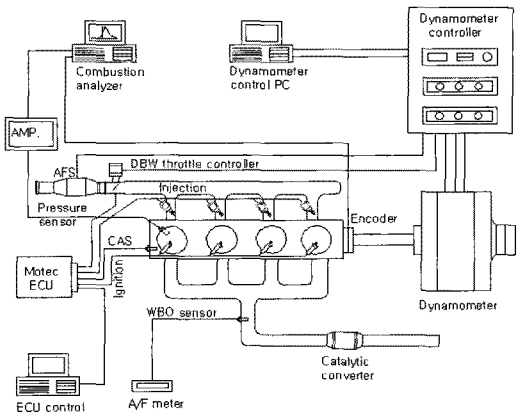

Fig. 3-1 Diagram of the experiment system

연료조절밸브 및 점화시기를 제어할 수 있도록 ECU와 통신이 가능한 컴퓨터가 연결되었으며 엔진의 1번 실린더에 압력센서를 설치하여 압력을 취득할 수 있도록 동력계 제어장치와 연결시켰다. 수집된 데이터를 모니터링과 분석 저장을 위하여 데이터 수집 처리용 컴퓨터를 연결하였다.

일반 LPG엔진에서는 믹서를 이용하여 연료를 공급하고 있는데, 이러한 믹서를 이용하면 공연비에 따른 정확한 연료량 제어가 힘들다. 따라서 본 실험에서는 연료제어밸브를 사용하여 정확한 연료공급을 제어하였다. 공급연료량 제어는 산소센서로부터의 입력 값에 의해 피드백제어가 가능하고 임의의 제어 알고리즘 조작에 의해 구현 가능하도록 구성하였다.

Fig. 3-2에 연료 제어부(Feul Controller ECU)의 회로도를 나타내었다.[5,6)]

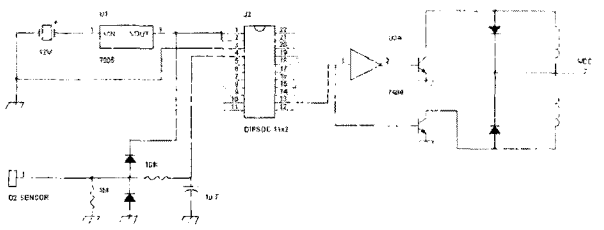

Fig. 3-2 Circuit diagram of controllable ECU

엔진의 배기관에 설치되어 있는 산소센서로부터의 신호를 입력신호로 하여 제어부에서 비교, 판단에 의한 출력 값이 연료조절밸브(Fuel Control Valve)를 구동시키게 된다.

3.2 실험방법

3.2.1 최적점화시기의 결정

엔진 회전수 2000rpm, BMEP 2.0bar의 상태에서 공기과잉률 값을 0.8에서 1.34까지 변화시키면서 일정 공기과잉률(Lamda) 상태에서 가솔린 기관의 일반적인 점화시기가 25°인 점을 고려하여 점화시기를 10°~60°까지 5°씩 변화시키면서 토크를 측정하였다. 측정된 토크값을 그래프로 나타내어 최대의 토크값을 나타내는 크랭크각도를 최적점화시기 값으로 결정하였다.

3.2.2 평균유효압력 측정

엔진 회전수 2000rpm에, BMEP 2.0bar의 상태에서, 공기과잉률 값을 변화시키면서 평균유효압력을 측정하여 변화계수 값을 계산하였다. 또, 최적점화시기를 -15°에서 15°까지 5°씩 변화시키면서 실린더 내의 압력을 측정하여, 점화시기 변화에 따른 변화계수 값을 계산하여 비교하였다. 실린더 내의 크랭크 각도 변화에 따른 압력 값의 변화를 점화시기를 진각, 지각 시키면서 살펴보았다.

3.2.3 연소해석 최소 사이클 수

해석에 필요한 사이클 수는 운전조건이나, 실험조건, 측정인자와 분석하고자 하는 목적에 따라 영향을 받는다. 200사이클의 데이터 취득은 실린더의 연소상황을 분석하는데 별다른 무리가 없다.[2,7,8]

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 연소압력의 비교

Fig. 4-1은 최적점화시기를 기준으로 점화시기변화에 따른 연소압력을 가솔린과 LPG를 비교하여 나타낸 것이다. LPG의 압력이 가솔린에 비하여 12.5% 낮게 나타났다. 이것은 LPG의 연료 공급이 기체 상태에서 이루어지기 때문에 체적효율이 가솔린에 비하여 떨어지기 때문에 연소압력이 낮게 나오는 것으로 판단된다. 최고 압력을 나따내는 크랭크 각은 가솔린의 경우 상사점후 17°정도이고, LPG의 경우는 약 18°에서 최고압력이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 4-2는 최적점화시기 보다 15도 진각된 경우로서 상사점전의 연소비율이 커 출력이 저하된다. 또 가솔린의 연소압력이 LPG보다 15.8% 높게 나오며, 최고압력을 나타내는 크랭크 각도도 최적점화시기일 때 보다 상사점 쪽으로 이동했음을 알 수 있다.

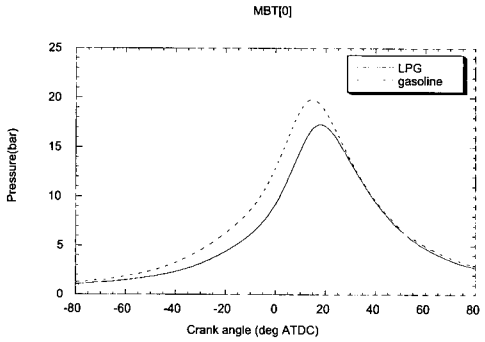

Fig. 4-1 Combustion pressures of gasoline and LPG fuel with crank angle at MBT

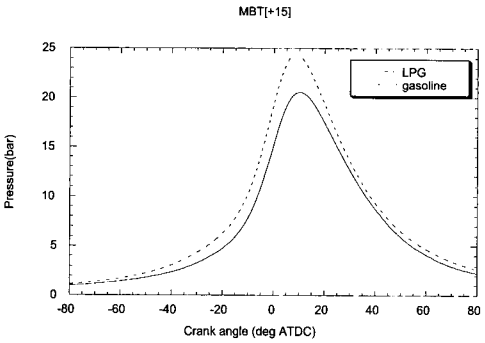

Fig. 4-2 Combustion pressures of gasoline and LPG fuel with crank angle at MBT +15°CA

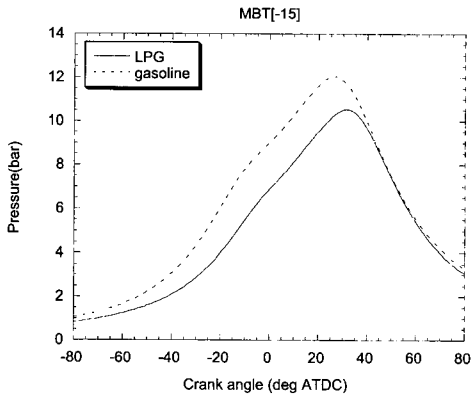

Fig. 4-3 Combustion pressures of gasoline and LPG fuel with crank angle at MBT -15°CA

Fig. 4-3은 최적점화시기 보다 15도 지각된 경우로서 최고압력이 존재하는 크랭크각이 하사점 쪽으로 이동하며 급격한 압력감소가 일어나고 있다. 그

러나 연소말의 압력이 진각되었을 때보다 높은데 이는 팽창과정 중 늦게 점화가 이루어져 연소가 진행중인 것으로 보인다.

두 연료 모두 점화시기가 진각 될수록 최고 압력이 상승하며 그 때의 최고 압력 발생각은 점차 상사점에 가까워지는 경향을 보이고 있다. 또 점화시기가 진각된 최적점화시기[+15]의 경우 상사점전의 연료 소비율이 커져 출력이 저하되었다. 점화시기가 지각된 최적점화시기[-15]의 경우 최고압력이 존재하는 크랭크각이 하사점 쪽으로 이동하며 급격한 압력 감소가 일어나고 있다.

가솔린의 경우보다 LPG의 경우가 최고압력이 12.6% 낮게 나타났으며, 최고압력을 나타내는 크랭크각도 진각된 최적점화시기[+15]를 제외한 최적점화시기[0]와 최적점화시기[-15]에서 약간 늦게 나타남을 알 수 있다.

4.3 P-V 선도 비교

기관의 실린더 내의 압력과 체적의 변화를 나타낸 것이 P-V선도이다. P-V선도는 각 행정에서의 변화를 나타내는데, 흡입행정에서 체적변화가 일어나고 압축행정이 시작되면 체적과 압력이 변화한다. 압축행정의 말기에서 점화를 시키면 일정 체적 하에서 폭발하여 압력상승이 일어나는데, 압력상승이 일어나는 정적연소구간이 연소특성을 이해하는데 중요한 척도가 된다. 특히 정적연소구간의 기울기가 클수록 급속연소(Fast Burn)의 형태를 보여준다. 정적연소 후에 피스톤은 연소가스의 팽창압력을 받아서 아래로 하강하면서 유효 일을 하게 된다.

4.3.1 최적점화시기에서 P-V선도 비교

Fig. 4-4는 최적점화시기 상태에서의 가솔린과 LPG연료의 P-V선도를 비교한 것이다.

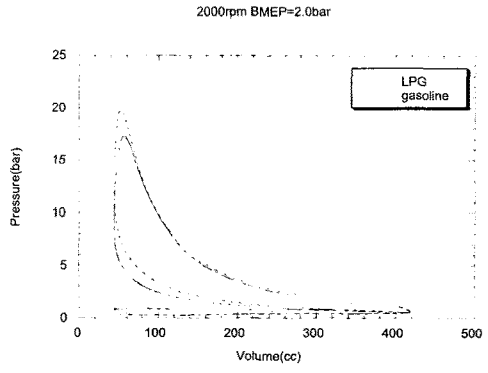

Fig. 4-4 Pressure-volume diagrams of gasoline and LPG fuel at the MBT condition

그림에서 보면 가솔린과 LPG 모두 유사한 형태를 가지나, 가솔린의 폭발압력이 높은 것을 알 수 있다. 또 정적연소구간에서 가솔린의 기울기가 LPG의 기울기보다 커 가솔린 기관이 급격연소가 일어남을 알 수 있다. 이는 가솔린의 체적효율이 좋아 압력이 높게 나오고, 연소속도 또한 빨라 급격연소가 일어나는 것으로 판단된다.[2,8]

4.3.2 점화시기에 따른 압력 비교

Fig. 4-5는 2000rpm에서 점화시기 변화에 따른 LPG연료의 P-V 선도를 나타낸 것이다.

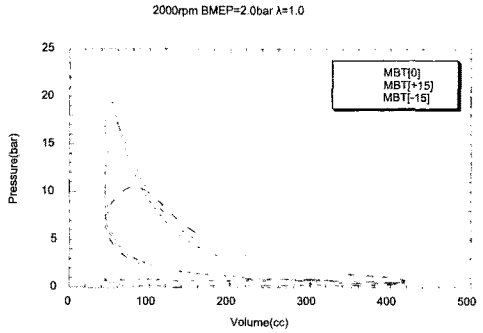

Fig. 4-5 Pressure-volume diagrams of LPG fuel with the variation of the ignition timing at the 2000rpm

점화시기가 지각될수록 최고압력이 크게 낮아지고 최고압력을 발생하는 크랭크 각이 하사점 쪽으로 이동하며 P-V 선도의 형태가 크게 달라짐을 알 수 있다. 점화시기가 진각될수록 P-V 선도는 급격연소가 일어나고 최고압력을 발생하는 크랭크 각이 상사점 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 또한 점화시기가 진각될 수록 정적연소구간에서 급격연소(Fast burn)가 일어남을 알 수 있다.

기관의 유효일은 P-V선도 내부의 면적으로 나타내어 질 수 있다. 점화시기가 최적점화시기로부터 진각되어지면 연소의 최고압력은 상사점으로 가까워진다. 이는 엔진의 일은 압축 후 팽창과정에서 사용되어야 유효일이 증가하는데 최고압력이 상사점 부근으로 이동함으로서 그 때의 연소압력이 압축과정에 사용되어 일의 손실이 발생하게 된다. 반면 최적점화시기로부터 지각될수록 팽창행정 중 후연소가 일어남으로서 발생되는 최고 압력이 낮아지게 된다.

4.4 최적점화시기 비교

Fig. 4-6은 가솔린과 LPG연료의 공기과잉률 값

의 변화에 따라 최대 토크를 발생시키는 최적의 점화시기를 나타낸 것이다. MBT는 동력계에서 점화시기 변화에 따라 토크를 측정하여 최대 토크를 발생하는 점화시기를 MBT로 하였다.

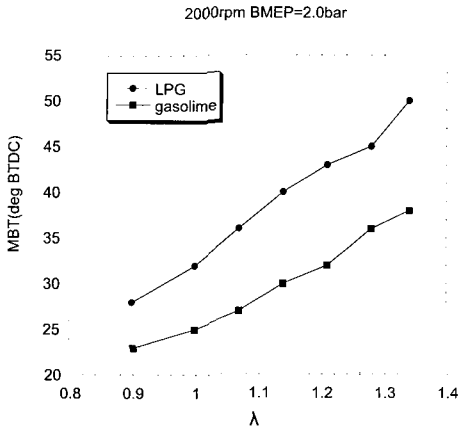

Fig. 4-6 MBT of gasoline and LPG fuel with the variation of the lambda

여기서 살펴보면 두 연료 모두 공기과잉률 값이 커짐에 따라 점화시기는 더욱 진각 되어져야 함을 알 수 있다. 이는 희박한 혼합비 영역에서는 연소속도가 매우 느려 점화시기가 더욱 앞 당겨져야 됨을 알 수 있다.[3,8)]

또, LPG에서의 최대토크를 발생시키는 최적의 점화시기가 가솔린 기관에 비하여 5°에서 12°까지 하사점 쪽으로 진각 되어 있음을 알 수 있다. 이것은 LPG의 화염전파 속도가 가솔린기관 보다 느려서 최대의 토크를 발생시키기 위해서는 점화시기를 진각 시켜야 상사점 이후 16~18°부근에서 최대토크가 발생할 수 있는 것으로 분석된다.

4.5 변화계수(COV_{IMEP}) 비교

기관에서 사이클마다 변화량을 나타내는 척도로서 변화계수가 많이 이용되고 있으며, 평균유효압력의 표준편차를 평균유효압력으로 나눈 것을 백분율로 표시한 것이다. 도시평균유효압력의 경우 변화계수가 약 10% 이상의 값을 가지게 되면 차량의 운전성에 심각한 문제를 야기하게 된다.[3)]

4.5.1 공기과잉률에 따른 변화계수 비교

Fig. 4-7은 공기과잉률 값의 변화에 따라서 변화계수 값을 살펴보면, 두 기관 모두 공기과잉률 값이 작은 이론공연비 부근에서는 안정된 연소를 보이다가 공기과잉률 값이 증가하는 1.21이상에서는 급격한 상승 곡선을 나타냄을 알 수 있다. 이는 희박한 혼합비 영역에서는 연소가 불안정적임을 나타내고 있다.

특히 LPG연료의 변화계수 값이 가솔린의 변화계수 값보다 커서 LPG연료가 희박영역에서는 가솔린에 비하여 매우 불안정한 연소를 하고 있음을 알 수 있다. 가솔린과 LPG연료 모두 희박영역에서는 불안정한 모습을 보이나 LPG의 화염전파속도가 느려 가솔린보다 변화계수 값이 크게 나타난다.[4)]

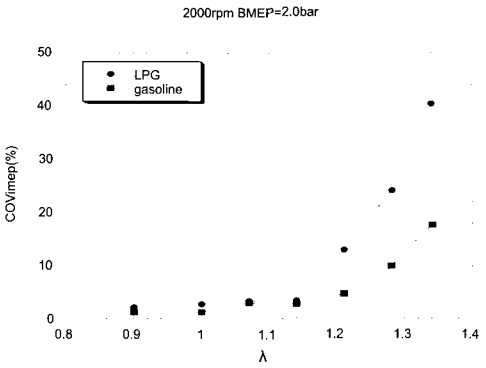

Fig. 4-7 COVIMEP of gasoline and LPG fuel with the variation of the lambda

4.5.2 점화시기에 따른 변화계수 비교

Fig. 4-8은 가솔린과 LPG 연료의 최적점화시기를 기준으로 한 점화시기 변화에 대하여 변화계수를 나타낸 것이다. 두 연료 모두 최적점화시기를 기준으로 하여 진각 또는 지각될수록 변화계수가 커짐을 알 수 있다.[8)]

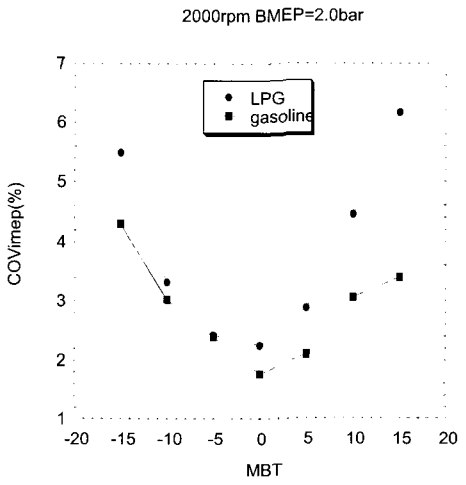

Fig. 4-8 COVIMEP of gasoline and LPG fuel with the variation of the ignition timing

또, LPG가 가솔린에 비하여 진각 되거나 지각됐

을 때 변화계수 값이 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 LPG연료의 연소속도가 느려 점화시기가 진각 또는 지각됨에 따라 연소가 매우 불안정하게 나타냄을 알 수 있다.

5. 결 론

동일한 SI 기관에서 가솔린과 LPG 연료의 연소특성을 비교 분석하였으며 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

1. 연소압력을 비교하였을 경우 LPG 연료가 12% 정도 낮았다.

2. P-V 선도를 비교하여 보면, 가솔린과 LPG 모두 유사한 형태를 가지나, 가솔린의 폭발압력이 높다. 또 정적 연소 구간에서 가솔린의 기울기가 LPG의 기울기보다 커 가솔린이 급격연소가 일어남을 알 수 있다.

3. 최적점화시기를 비교한 결과 두 연료 모두 공기과잉률 값이 커짐에 따라 점화시기가 진각 되어져야 함을 알 수 있으며, 희박한 혼합비 영역에서는 점화시기가 훨씬 더 앞 당겨져야 함을 알 수 있다. 특히 LPG 의 점화시기가 가솔린에 비교하여 5~12°CA 까지 앞당겨졌다.

4. 변화계수를 살펴보면, 두 기관 모두 공기과잉률 값이 증가함에 따라 변화계수 값도 증가하는 모습을 보인다. 공기과잉률값이 1.21 이상에서는 두 연료 모두 변화계수 값이 급격히 증가하고, 특히 LPG의 변화계수 값이 높다. 최적점화시기를 기준으로 진각 또는 지각 시켰을 때에도 변화계수 값이 급격히 증가 하며, LPG의 변화계수 값이 크게 나타났다.

참고 문헌

1. Andra Gerini, Gaetan Monnier and Bobert Bonetto, 1996, "Ultra Low Emissions Vehicle Using LPG Engine Fuel" SAE, Paper 961079.
2. 전중호, 2000, "압축비 변화가 LPG 기관의 성능에 미치는 영향에 관한 연구", 상주대학교 산업대학원 석사학위 논문.
3. John B. Heywood, 1988, "Internal Combustion Engine Fundamental", Mc-Graw Hill, pp. 46~57, 413~437, 830~834.
4. 김목유, 2001, "가솔린 엔진에서 LPG 개조가 엔진 성능에 미치는 영향에 관한 연구", 대구대학교 산업정보대학원 석사학위 논문.
5. 이대영, 1989, "가솔린 기관 공연비의 피드백 제어에 관한 연구", 서울대학교 공과대학 석사학위 논문.
6. 최웅세, 장승관, 2000, "전자회로와 시뮬레이션", 선문당.
7. 이종화, 1989, "전기점화기관에 연소의 사이클 변화특성에 관한 연구", 서울대학교 기계공학 대학원 박사학위 논문.
8. 권병규, 2000, "가솔린 기관에서 공기연료비와 점화시기가 엔진성능에 미치는 영향에 관한 연구", 서울산업대학교 산업대학원 석사학위논문.