

LPG를 보조적으로 사용한 직접분사식 디젤기관의 성능에 관한 연구

방 중 철*

금오공과대학교 기계공학부

The Effect of Auxiliary use LPG on the Performance of a D.I. Diesel Engine

Joong Cheol Bang*

School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Gyeongbuk 730-701, Korea,

(Received 6 December 2004 / Accepted 21 February 2005)

Abstract : Recently, the tightening of an available crude oil supplies has resulted in the development of intense consciousness for saving fuels. At the same time, some research programs have been launched to secure substitute energy sources for petroleum-derived fuels, and to reduce unhealthy products, such as CO, HC, NOx and smoke. To keep up with these trends in society, the regulation affecting diesel smoke may be greatly strengthened in a short time. In not too distant future, LPG and LNG are the most hopeful substitute fuels for automobile and truck uses. This paper discusses how to use such gaseous fuels in a diesel engine, and how much methods for introducing these fuels affect the engine performance.

Key words : D.I. diesel engine(직접분사식 디젤엔진), LPG(액화석유가스), Auxiliary use(보조사용), Engine performance(기관성능), Smoke limit(매연한계)

1. 서 론

디젤기관은 열효율이 높고 연료경제성도 우수한 이점으로 인해 선박, 대형차량, 산업용차량, 건설기계 등의 원동기로서 오래전부터 사용되어져 왔다. 최근에는 소형승용차에도 보급되기 시작해 우리나라에서도 디젤승용차가 곧 시판될 예정이다. 종래부터 결점으로 여겨져 왔던 진동이나 소음, 기관의 고속화가 어려웠던 점등은 연료분사시스템의 개량, 연소실형상의 개선, 기관 마운팅 방법의 개선 등으로 가솔린 기관에 비해서도 크게 손색이 없을 정도로 진보되었다.

그러나 배기연농도나 배기가스 중의 유해성분의 저감 기술에 있어서는 DPF나 EGR Cooler와 같은 배

기가스 후처리 장치들이 개발되어져 있으나 가격이 고가이고 개발초기인 관계로 보급면에 있어서 가솔린 기관에 비해 아직 많이 떨어져 있는 실정이다. 또 원유가격이 천정부지로 치솟고 있는 점도 무시할 수 없는 현실이므로 디젤기관의 배기정화대책을 검토함에 있어서는 연비저감이나 출력향상 등의 기관 성능을 고려한 연소개선이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 LPG를 보조적으로 사용하는 보조 분사법¹⁻⁴⁾을 열효율이 높은 직접분사식 디젤기관에 적용시켜 기관성능에 미치는 영향을 고찰하였다.

LPG에 의한 보조 분사법을 사용하면 기관성능의 개선과 더불어 배기연농도도 저감되므로 smoke limit의 향상이 기대되며, 착화지연기간의 단축시간 만큼 주 연료의 분사시기도 늦출 수 있어 연소최고 온도의 저하에 의한 질소산화물의 저감에도 유효하다.

*To whom correspondence should be addressed.
bjc@kumoh.ac.kr

근래들어 천연가스를 연료로 사용하는 시내버스가 대도시에서는 종종 눈에 띄고 있다. 환경적인 측면에서는 환영할 일이지만 압축착화기관의 불꽃점화기관으로의 개조비용이 매우 고가이고, 압축비의 저하에 의한 열효율의 손실도 따른다. 그러나 LPG를 보조적으로 사용하는 경우에는 기존의 디젤기관을 크게 개조하지 않고서도 사용이 가능하며, LPG의 충전소도 많이 있으므로 연료의 가격면이나 보급면 등에 있어서도 유리한 점 등으로 인하여 실용화의 가능성도 매우 높을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 기관성능의 고찰과 더불어 이 방법의 실용화를 위하여 LPG의 공급방법이나 제어방법, LPG의 적정공급량 결정방법, LPG 공급량의 증대방법, LPG 사용시의 문제점 등에 관하여 2회에 걸쳐서 세밀히 소개하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험기관

본 연구에 사용된 실험기관은 연비의 면에서 우수한 직접분사식 디젤기관으로서 주요제원은 Table 1과 같으며 연소실의 형상은 Fig. 1과 같다.

Table 1 Details of diesel engine tested

Item	Specification
Type	4 stroke direct injection
Cylinders	4
Bore × Stroke	∅102 × 110mm(3600cc)
Comp. ratio	17.5
Combustion Chamber	troidal swirl
Max. output	73.5KW / 3400rpm
Max. torque	235.3Nm / 2000rpm
Max. BMEP	0.821MPa
Spray angle	152°

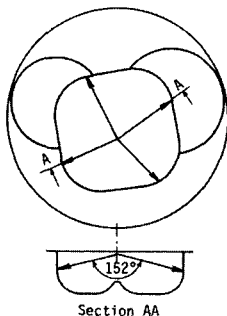


Fig. 1 Shapes of piston crown

2.2 LPG의 공급장치 및 공급방법

기관에 공급하는 LPG는 n-propane을 주성분으로 하는 가정용 LPG를 사용하는 편이 옥탄가도 높고 성능향상에도 유리하나, 차량에서는 공업용(택시용) LPG를 사용하는 편이 가스 보급면에서 쉬울 뿐만 아니라 생산량도 많고 또 가격도 싸기 때문에 본 연구에서는 n-butane을 주성분으로 하는 공업용 LPG를 사용한다. LPG를 기관에 공급하는 방법으로서는 증발기를 사용하여 기화시켜 흡기관에 공급하는 방법과 가솔린 기관용 인젝터를 사용하여 2~3 bar 정도의 비교적 저압으로 흡기관 또는 흡기포트에 액체의 상태로 분사하는 방법이 있다.

먼저 기화시켜 공급하는 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타낸다. 저장용기의 액체주입구 밸브로부터 나온 LPG는 엔진 냉각수의 열을 이용한 증발기에서 기화되고 솔레노이드 밸브를 거쳐 유량조절용 콕에 도달하고, LPG의 정확한 공급량은 가정용 가스메타(DSG-2)에서 계측된다. 이때 LPG의 안정적인 공급을 위하여 Ar bomb를 사용하여 일정한 압력으로 가압하였다. 가압력의 범위는 3.5~5.0 atg로써 0.5 atg의 간격으로 각 가압력에 대한 공급량을 예비실험으로부터 구했다. 기관에 공급시에는 그때의 밀도, 온도, 저발열량 등으로부터 경유량으로 환산하여 주 연료인 경유량과의 합을 총 분사량으로 했다.

LPG를 기화시켜 공급하는 경우에는 LPG와 공기가 균일하게 혼합되나, 액체로 공급하는 경우에는 실린더로 흡입되는 흡기농도가 부분적으로 짙어지던가 아니면 불균일한 상태로 실린더 내에 충전될 우려가 있다. 따라서 전자식 인젝터를 사용하여 흡기관에 직접 액체 상태로 분사하는 장치를 시작하였다. Fig. 3은 그 개략도이다. Fig. 3의 Y자관 내부에는 spiral 형태의 난류발생 기구를 설치하고 엔진 냉각수를 회전시켜 기화열에 의한 동결을 방지하였다.

이 경우, LPG의 공급량은 인젝터의 열림 시간에 비례하여 변화하기 때문에 펄스폭 콘트롤러를 시작하여 분사량과 밸브열림 시간과의 관계를 예비실험으로부터 구했다.

한편, Fig. 4에 나타낸 방법은 실린더 헤드로부터의 복사열에 의해 뜨거워지는 흡기포트에 분사하는 방법이다. 이 방법에서는 4개의 인젝터의 분사시기

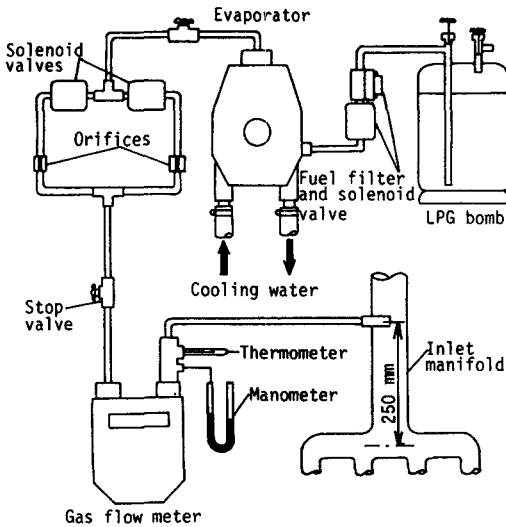


Fig. 2 LPG supply system of vapor state

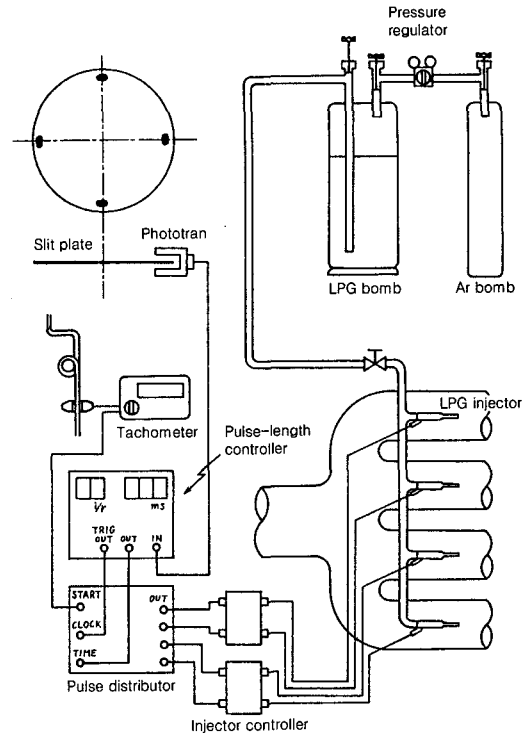


Fig. 4 One of LPG injection systems

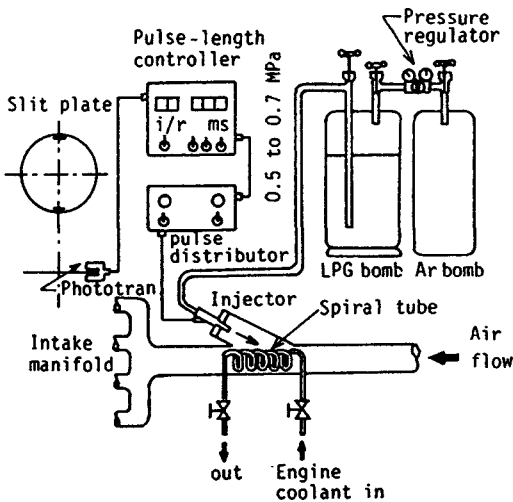


Fig. 3 One of LPG injection systems

가 각 실린더의 흡기시기와 일치될 수 있도록 펄스 분배기를 필요로 한다.

이상 기체 상태로의 공급장치와 액체 상태로의 공급장치에 대하여 소개하였으며, 후자의 경우에는 기관 속도 및 부하의 변동에 대하여 적절한 양을 공급할 수 있는 이점이 있으나, 회전수, 연료펌프의 랙 (rack) 위치, 외기온도, 배기온도 등을 측정할 수 있는 센서가 필요하므로 경제적인 측면에서는 불리하다.

실차에의 적용은 기체로 공급하는 방법도 무난할 것으로 생각된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 LPG를 기체로 공급한 경우의 기관 성능

3.1.1 주 연료 분사시기의 영향

연비의 향상과 배출가스의 정화를 목적으로 한 LPG 보조 분사장치의 실용화에 있어서는 먼저 기관을 크게 개조시키지 않으면서 간단한 장치를 사용해서 LPG를 공급할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

또 LPG의 공급량이 많아지게 되면 당연히 노크의 발생도 일어나게 된다. 이 디젤노크를 피하기 위해서는 주 연료의 분사시기를 늦춰주는 방법이 유효하나 반대로 배기연농도나 연비가 악화될 우려도 있다.

이와 같은 점에 주목하면서 본 절에서는 증발기에 의한 가장 간단한 LPG 공급장치를 사용해서 주 연료 분사의 최적시기를 검토하였다.

측정결과와 일례를 Fig. 5에 나타낸다. 단 실험기관의 정규 분사시기는 BTDC 22°C이며, 이 분사시기보다 5°C 및 10°C 지각시킨 경우의 기관 성능을 측정하였다. 이때의 LPG 공급량은 고부하역에서 노크를 일으키지 않을 정도로 조정하였으며,

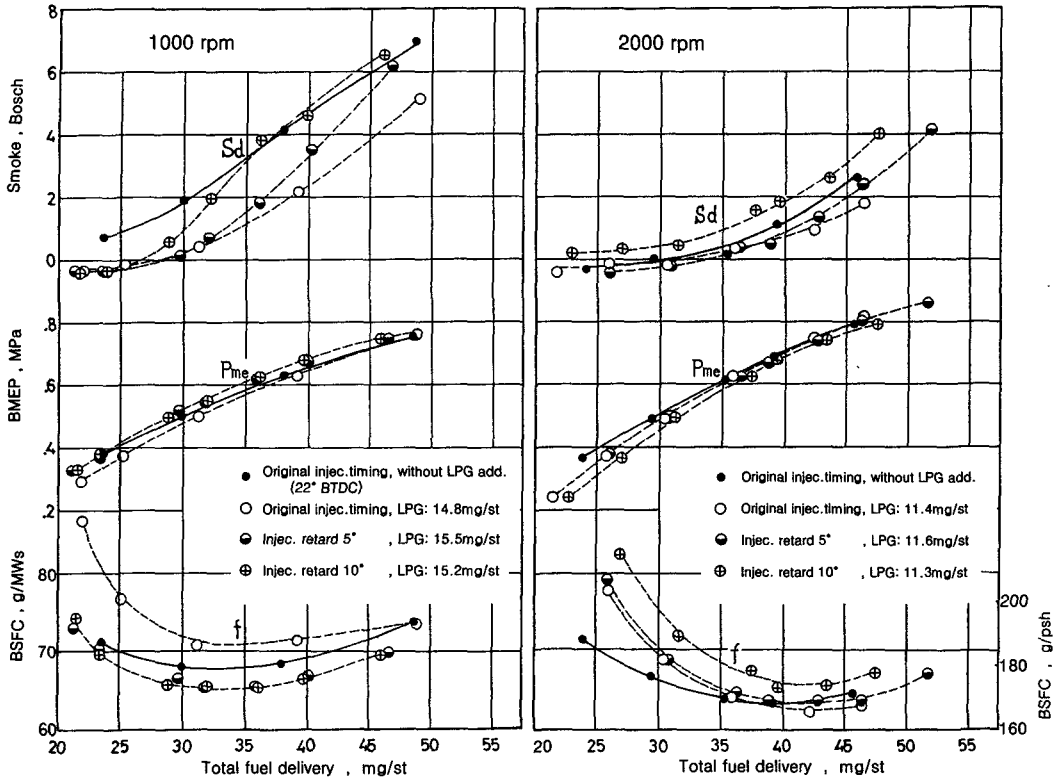


Fig. 5 The engine performance at original and retarded injection timing

LPG의 공급량은 경유의 양으로 환산한 뒤 주 연료인 경유의 분사량과 합쳐서 총 분사량으로 나타내었다. 또 기관속도는 흑색 배기연이 문제가 되는 차량 출발시에 상당하는 1000rpm과 80km/h의 정속주행에 상당하는 2000rpm에 중점을 두고 고찰하였다.

Fig. 5에 의하면 1000rpm의 저속에 있어서는 주 연료의 분사시기를 늦출수록 배기연농도가 악화된다. 그러나 연비의 측면에서 보면 정규의 분사시기는 너무 빠르며, 분사시기를 지연시켜 주는 편이 개선효과를 보이고 있다.

한편 실린더 내의 공기유동이 강화되는 2000rpm에 있어서는 주 분사시기를 과도하게(10°CA) 늦추지 않는 한 배기연농도는 주 연료만을 정규 분사시기에 분사한 경우보다 양호하며, 정규의 분사시기에 있어서 LPG를 보조적으로 공급한 경우에 비해서도 크게 악화되지 않음을 보인다. 그러나 연비는 저부하영역일 수록 주 분사시기가 빠른 편이 양호한 결과를 보이나 중부하영역을 넘어서면서 부터는

과도하게 늦추지 않는 한 정규의 분사시기일 때와 거의 동등한 수준으로 된다.

이것은 주 분사시기를 늦추면 착화지연기간 자체가 짧아지고 화염 속도로 바로 분사되는 연료량이 늘어나기 때문일 것으로 생각된다. 더욱이 분사시기를 10°CA가량 늦추게 되면 분사초기부터 피스톤 캐비티 내로 들어가는 분무의 위치가 너무 깊어져 연소실 바닥면에 과농한 혼합기가 형성되어 공기부족의 상태에서 연소하게 되는 것이 원인으로 생각된다. 따라서 주 분무로부터 다량의 흑연이 발생하게 되고 이런 상태에서는 LPG를 미리 공급하였다 하더라도 배기연은 개선되지 않게 된다.

이상의 결과로부터 증발기에 의한 LPG의 공급방법에서는 주 연료의 분사시기를 정규의 분사시기보다 약 5°CA정도 지연시켜 주는 편이 가장 유효할 것으로 판단된다.

3.1.2 LPG 공급량의 영향

주 연료의 분사량을 일정하게 고정시켜 놓고 흡기

에 혼합시키는 LPG의 양을 서서히 증가시켜 가면 어느 한도 이상에서는 노크가 일어난다. 그러나 LPG의 양이 증가한 만큼 주 연료의 분사량을 줄여주면 배기 연농도는 저하된다. 따라서 LPG의 공급에 의한 배기 연농도나 열효율의 개선을 위해서는 무엇보다도 LPG의 공급량을 기관의 운전상태, 특히 부하의 대소에 적합하도록 공급해 주지 않으면 안된다.

Fig. 6은 주연료의 분사시기를 5°C 늦추어 LPG의 공급량을 변화시킨 경우의 기관 성능을 나타낸 것이다. Fig. 6의 연비곡선에 의하면 1000rpm 및 2000rpm에 있어서 분사시기를 5°C 늦춰서 주 연료만을 분사하면 일점쇄선으로 나타낸바와 같이 연료 소비율이 악화된다. 그러나 LPG를 공급하면 약 30mg/st를 넘는 중부하역에서부터 연료소비율이 개선되고, 또 배기연농도의 측면에서 보면 동일한 농도가 되기까지는 총 분사량을 5~7mg/st 정도 증가시킬 수 있으므로 기관출력의 증대는 약 10%에 이

르게 된다.

LPG의 적정공급량은 연소의 하한계조성과 밀접한 관계가 있으므로 Zabetakis 및 Chatelier⁵⁾의 식을 이용해 $t^{\circ}\text{C}$ 에 있어서의 연소의 하한계조성 L_t 를 구해보면

$$\frac{L_t}{L_{25}} = 1 - 0.721 \times 10^{-3} (t - 25^{\circ}) \quad (1)$$

여기에서 L_{25} 는 몇 종류의 가연성 가스가 혼합되어 있을 때 공기 중(1기압, 25°C)에서의 폭발 하한계조성(vol.%)이며 다음 식에 의해 얻어진다.

$$L_{25} = \frac{100}{\sum \frac{n_i}{L_i}} \quad (2)$$

단, L_i 는 각 성분의 폭발 하한계조성(vol.%), n_i 는 각 성분의 체적%이다. 따라서 (2)식에 n-butane이

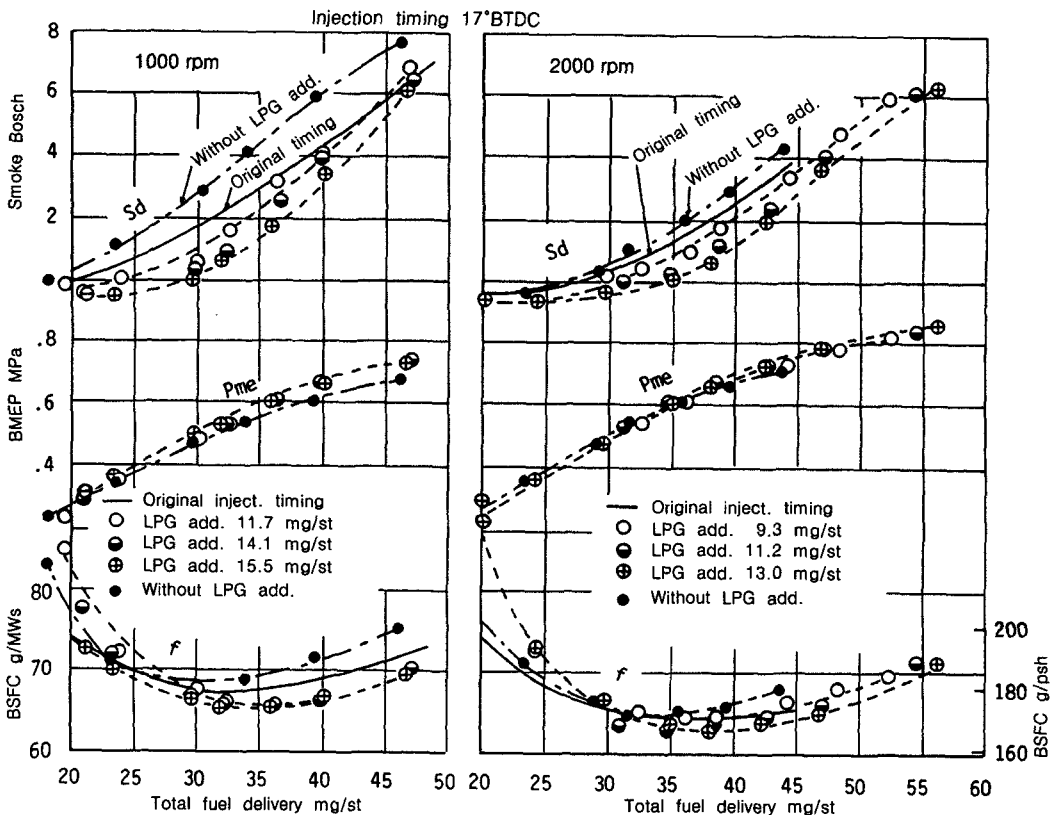


Fig. 6 The engine performance for various LPG deliveries at a proper injection timing

주성분인 공업용 LPG의 각 성분 하한계조성과 체적율을 대입하면 $L_{25}=1.96\text{vol.}\%$ 가 얻어진다. 실험기관의 체적효율을 90%로 가정하고 1실린더 1행정당의 LPG 공급량을 구해보면, 압축말기의 실린더 내 공기온도 약 530°에 있어서는 $L_{530}=1.24 \text{ vol.}\%$ (분사량으로는 23.4mg/st), 1000°C의 상태에서 간신히 연소될 수 있는 하한계조성 $L_{1000}=0.58 \text{ vol.}\%$ (10.98mg/st)로 된다.

Fig. 6의 연비곡선을 살펴보면 LPG의 공급량이 11~15mg/st의 범위에서 양호한 연비가 얻어졌으므로 실린더내의 화염온도가 약 1000°C에 가까워졌을 때 LPG의 회박 예혼합기가 연소될 수 있도록 LPG의 공급량을 결정해 주면 연비와 배기연농도가 동시에 개선됨을 알 수 있다.

3.2 LPG를 액체로 공급한 경우의 기관 성능

LPG를 흡기관이나 흡기공을 통하여 액상으로 공급하는 방법은 전술한 기체 상태로 공급하는 방법보다 비용은 다소 높으나 LPG 공급량의 조절이 간편하고 정확하여 기관에 유입되는 흡기의 관성 과급효과를 이용한 고출력 설계가 가능하다. 뿐만 아니라 LPG의 기화열을 유효하게 이용하면 체적효율의 향상도 기대된다.

3.2.1 흡기관내에 LPG를 액상으로 분사할 시의 적정분사시기

LPG를 액상으로 흡기관 내에 직접 분사하는 경우에는 Fig. 3에서 나타낸바와 같이 LPG의 증발을 촉진시킬 수 있는 열원의 공급과 증발된 LPG 가스와 공기와의 혼합을 촉진시킬 수 있는 흡기관 내의 공기유동을 필요로 한다.

이 경우 LPG의 분사시기로부터 실린더 내에 흡입될 때까지의 시간을 구해보면,

흡기관 내의 평균 유속 $v(\text{cm/s})$ 는

$$v = \frac{\text{1초당 흡입공기량}}{\text{흡기관의 단면적}} = \frac{\frac{n}{60} \cdot \frac{V}{2} \cdot \eta_v}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{n \cdot V \cdot \eta_v}{30\pi \cdot D^2} \quad (3)$$

인젝터로부터 각 실린더까지의 평균거리를

ℓ (cm)로 하면 LPG의 분사로부터 실린더 내에 유입될 때까지의 시간 t 는

$$t = \frac{\ell}{v} = \frac{30\pi \cdot D^2 \cdot \ell}{n \cdot V \cdot \eta_v} \quad (4)$$

여기에서 시간 t 를 크랭크 각도로 고쳐보면

$$\theta = \frac{n}{60} \cdot 360 \cdot t = 6n \cdot t \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하여 θ 를 구해보면

$$\therefore \theta = \frac{180\pi \cdot D^2 \cdot \ell}{\eta_v \cdot V} \quad (6)$$

위 식으로부터 분사개시로부터 실린더 내에 흡입될 때까지의 크랭크 회전각 θ 는 회전수의 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

단, n : 기관 회전속도, rpm

V : 총 행정체적, cm^3

D : 흡기관 내경, cm

η_v : 체적효율

여기에서 $\ell=99.5\text{cm}$, $\eta_v=0.9$ 로부터 θ 를 구해보면 710°가 된다. 즉 710°CA 전에 LPG의 분사를 개시하면 흡기밸브가 열려있는 시기에 LPG의 혼합기가 밸브까지 도달하게 되는 셈이다.

Fig. 7은 LPG의 흡입시기를 흡기밸브가 열리는 시점인 BTDC 10°CA와 그것보다 30°CA 늦은 ATDC 20°CA로 조정하여 연비 및 HC 농도 등을 측정한 것이다.

Fig. 7에 의하면 LPG의 흡입개시를 BTDC 10°CA

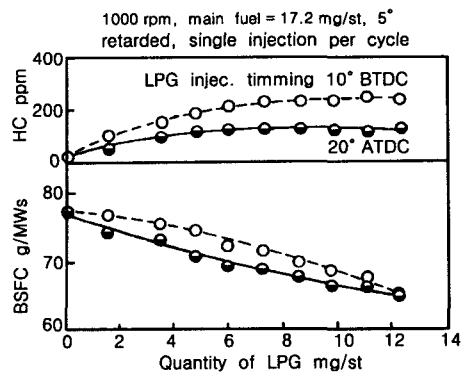


Fig. 7 A LPG injection timing to avoid the short circuit during the valve overlap

로 한 경우가 연비, 평균압력, HC 농도 등의 모든 면에서 불리하다. 실험기관의 valve overlap이 BTDC 10°CA~ATDC 10°CA 이므로 이 기간 중에 실린더 내로 유입된 LPG의 일부는 미연소의 상태로 배출되었음을 알 수 있다.

반면, LPG 혼합기의 도달이 valve overlap 시기보다 늦은 ATDC 20°CA, 50°CA, 140°CA 등에서는 어느 분사시기에서도 거의 영향을 받지 않고 기관 성능이 일정한 값을 나타내었다.

이것은 LPG가 실린더 내로 흡입되어 들어가면 연소 전에 균일농도의 예혼합기로 형성되어짐을 나타내는 것이다.

3.2.2 흡기공 내에 LPG를 액상으로 분사할 시의 기관 성능

흡기관 내에 LPG를 분사하는 방법에서는 LPG의 분무가 닿는 곳에 열면을 필요로 하고, 분사시기를 변화시켜도 LPG의 혼합기가 일정기간 흡기관 내에 체류하기 때문에 기관 성능에 그다지 큰 영향을 미치지 못함을 확인하였다.

본 절에서는 열면의 효과적인 이용과 흡기관 내에서의 체류시간을 단축시키기 위하여 흡기매니폴더의 끝단에 4개의 인젝터를 설치하여 흡기밸브의 열림 시기에 맞추어 LPG가 액상으로 분사되도록 하였다.

먼저, LPG의 미연 혼합기가 배기관을 통하여 배출되는 것을 피하기 위하여 분사시기를 ATDC 30°CA, 90°CA, 150°CA로 하여 각 분사시기별 제동 연료소비율과 배기가스 중의 HC 농도 등을 측정하였다. Fig. 8에 실험결과와 일예를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 분사시기별로 연비나 HC 농도에 약간의 차이는 보이나 우열을 가릴 정도의 큰 차이는 보이지 않음으로 인해 흡기 포트에 분사된 LPG는 거의 순간적으로 증발되어 실린더내로 유입되고, 비교적 균일한 혼합기를 형성하였을 것으로 생각된다.

다음으로, LPG를 사이클 당 2회로 나누어 분사하고 연비 및 NO 농도 등을 측정하였다. 또 그 측정결과를 증발기를 사용하여 LPG를 공급한 경우와 비교하여 Fig. 9에 나타낸다.

Fig. 9의 연비곡선을 주목하여 보면 2회 분할분사나 증발기에서 증발시켜 공급한 경우처럼 보다 균일한 혼합기가 형성되기 쉬운 분사조건에서 연비가

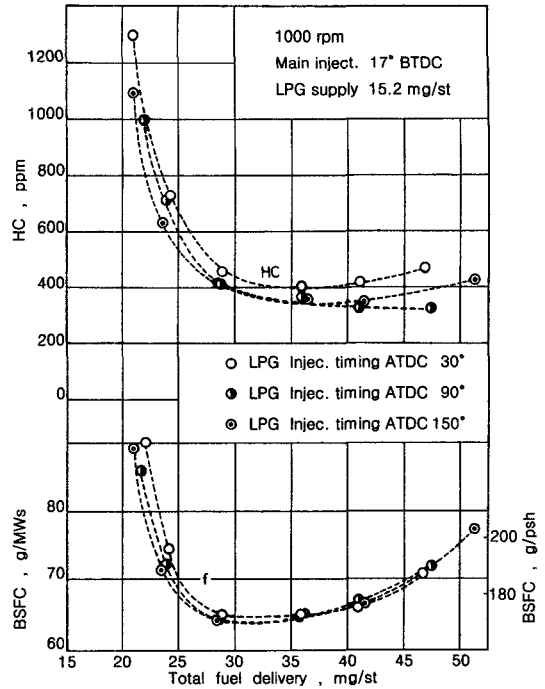


Fig. 8 The engine performance for various injection timing when LPG is injected into each inlet port

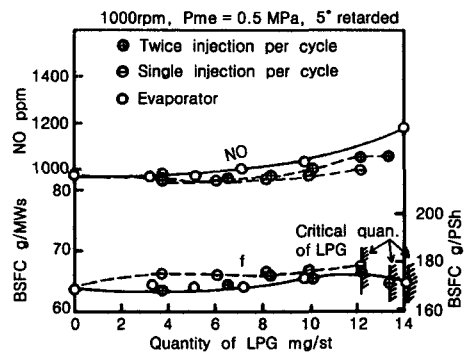


Fig. 9 Comparisons of critical quantities of LPG and NO concentrations among three methods of LPG supply

우수하며 LPG의 최대공급량도 증대시킬 수 있다.

한편 NO 농도는 흡기포트에 직접 분사한 경우가 양호한 모습을 보이고 있으나, 1회 분사와 2회 분할 분사 사이에 있어서는 큰 차이를 보이지 않았다.

이러한 점들로 미루어 볼 때 LPG를 사이클 당 2회로 나누어 흡기포트에 분사하는 경우가 노크한계, 연비, NO 농도 등에 있어서 가장 유리한 방법이라고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 열효율이 높은 고속 직접분사식 디젤엔진에 LPG의 보조분사에 의한 기관 성능개선에 목적을 두고 LPG의 공급 방법별로 개선효과를 고찰하였다. 더불어 이 방법의 실용화를 위한 몇 가지 제안도 기술하였다. 고찰결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실린더 내로 공급된 보조연료의 양이 임계치 이상으로 되면 노킹 현상이 일어난다. 이 임계치는 약 1000°C 정도에서의 연소의 하한계조성과 밀접한 관계를 가진다. LPG의 경우에는 전부하에서 공급된 연료량의 약 30%정도를 대체 가능하다.
- 2) LPG와 같은 C₄이하의 저급탄화수소를 보조연료로 사용하는 경우, 이들 보조연료의 예혼합기는 주 연료로부터의 발화핵이나 화염에 의해 점화된다. 따라서 격렬한 디젤노크를 피하기 위해서는 주 연료의 분사시기를 약 5~7°CA 정도 지연시켜줄 필요가 있다.
- 3) 보조연료를 액상으로 흡기관 내에 공급하는 경우에는 기관의 valve overlap 기간을 피하여 공급할 수 있도록 분사시기를 조절하여야 한다.
- 4) LPG를 보조연료로 공급하기 위한 몇 가지 방법을 제시하였으나, 기존의 디젤엔진에 가장 손쉽게 적용시킬 수 있는 유용한 방법은 증발기를 이용하는 방법이라고 생각된다. 각각의 흡기 포트에 LPG를 분할 분사하는 방법은 비용은 고가이나 연료소비율의 향상과 NO 및 배기연농도 등의 저하에 가장 큰 개선효과를 보였다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원하는 학술연구비에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) M. Ohta and Y. Hirako, "The Study on the Effect of Auxiliary Fuels on the Performance of a Diesel Engine (1st Report. An Experimental Investigation into the Effect of Diesel Fuel and LPG Addition to Intake Air)," Bull. of Uni. of Osaka Prefecture, Vol.16, No.1, pp.1-15, 1967.
- 2) G. A. Karim and I. Wierzba, "Comparative Studies of Methane and Propane as Fuels for Spark Ignition and Compression Ignition Engines," SAE 831196, 1983.
- 3) K. R. Cho, Y. K. Kim, J. I. Dong, "Diesel Smoke Control In-Use Buses by LPG Fumigation," National Institute of Environmental Research, NIER No.86-05-171, 1986.
- 4) J. C. Bang and M. Ohta, "Fundamental Experiments of a Compression Ignition Engine Using Gaseous Fuel," Transactions of KSAE, Vol.4, No.2, pp.147-157, 1996.
- 5) 疋田, 秋田, "燃燒概論," コロナ社, pp.26-31, 1974.