

# LPG를 보조적으로 사용한 직접분사식 디젤기관의 성능에 관한 연구(II)

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, Gyeongsbuk 730-701, Korea

(Received 9 November 2005 / Accepted 27 March 2006)

**Abstract** : Recently, the tightening of 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 to find out 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 주로 상용차량이나, 산업용 및 대형 차량용 등으로 이용되어져 왔으나 유가상승에 따른 운전 경제성이 큰 부담으로 작용되면서부터 연비의 우수성이 새롭게 주목을 받기 시작해 최근에는 승용차량에 까지 사용범위가 확대되고 있다.

일반적으로, 디젤기관은 가솔린 기관에 비해 CO나 HC의 배출은 적으나 진동이나 연소잡음이 크고 질소 산화물이나 매연 등의 배출이 많아 이것들을 저감시켜야 하는 기술적인 과제를 안고 있다.

진동이나 잡음은 기관의 마운팅 방법의 개선이나 방음재 사용 등에 의해 해결될 수 있으나, 질소산화물 등의 저감은 가솔린 기관처럼 촉매를 사용하는

대책이 불가능하다. 이것은 디젤기관의 연소가 공기과잉 하에서 이루어지기 때문에 촉매에 적당한 고온이 유지되지 않을 뿐만 아니라, 배출가스의 화학적조성 또한 NOx의 환원이 어렵게 되어 있기 때문이다.

한편 매연을 저감시키는 과제에 대해서도 배기후 처리장치 등이 개발되어지고 있으나, 아직은 만족스럽지 못한 수준이므로 기관의 연소성 그 자체를 개선시키는 것이 가장 바람직할 것으로 생각된다.

진보<sup>1)</sup>에서는 디젤기관의 연비향상과 배기정화 대책을 동시에 검토하기 위한 수단으로 LPG에 의한 보조분사법을 직접분사식 디젤기관에 적용시켜 다수의 성과를 얻었으며 LPG의 공급방법이나 제어 방법, LPG의 적정공급량 결정방법, 적정공급시기 등에 관하여 세밀히 소개하였다.

\*Corresponding author. E-mail: bjc@kumoh.ac.kr

본 연구에서는 전보에서 부족했던 부분의 보완에 목적을 두고 주로 배기정화 대책과 LPG 사용시의 문제점 등에 관하여 고찰하였다.

근래에 들어 국외에서는 LPG전용의 중대형상용 차량엔진이 일본등지에서 개발되어지고 있으나,<sup>2)</sup> 국내에서는 아직 이 분야에 대한 연구가 진행 중에 있다. 현재 국내에서 수행되어지고 있는 연구들은 기존의 디젤엔진을 불꽃점화기관으로 개조하여 대체연료로서의 LPG적용성에 대한 고찰이 주류를 이루고 있다. 또한 LPG의 공급방법으로서는 증발기를 사용하여 기체 상태로 공급하는 방법<sup>3-7)</sup>과 인젝터에 의한 액상공급방법<sup>8-11)</sup>의 두 가지로 나눌 수 있다.

어느 방식이든 모두 디젤엔진을 베이스로 하고 있기 때문에 LPG화에 따른 설계변경요소가 너무나 많아 개조하기도 어려울뿐더러, 더욱이 신규개발에 있어서는 개발기간이나 개발비용등이 상당히 필요할 것으로 생각된다, 따라서 우리나라에서도 LPG전용의 상용차량엔진이 보급되기까지는 오랜 기간을 기다려야 할 것이다.

그러나 본 연구에서는 기존의 디젤엔진에 LPG를 보조적으로 사용하는 혼소방식을 채택하였으므로 기존 차량의 큰 개조 없이도 장착이 가능하며 장착비용도 저가이므로 상용차량에의 과도기적 사용을 제안한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

실험장치 및 실험방법은 전보에서 상세히 소개하였으나, 참고로 요약하여 정리한다. Table 1은 본 연구에 사용된 실험기관의 주요제원을 나타내며, Fig. 1은 연소실 형상을 나타낸다.

한편, LPG의 공급 장치는 Fig. 2에 나타내는 바와 같으며, 증발기를 사용하여 기화시켜 흡기관에 직접 공급하였다. 이때 LPG의 정확한 공급량은 가스미터에서 계측되며, LPG의 안정적인 공급을 위하여 Ar bomb를 사용하여 일정한 압력으로 가압하였다. 가압력의 범위는 3.5~5.0 atg로서 0.5 atg의 간격으로 각 가압력에 대한 공급량을 예비실험으로부터 구했다. 기관에 공급시에는 그 때의 밀도, 온도, 저발열량 등으로부터 경유량으로 환산하여 주연료인

Table 1 Details of diesel engine tested

Item	Specification
Type	4 stroke direct injection
Cylinders	4
Bore × Stroke	φ102 × 110mm(3600cc)
Comp. ratio	17.5 or 15
Combustion chamber	toroidal swirl
Max. output	73.5KW / 3400rpm
Max. torque	235.3Nm / 2000rpm
Max. BMEP	0.821MPa
Spray angle	152° or 176°
Original injection timing	22°BTDC

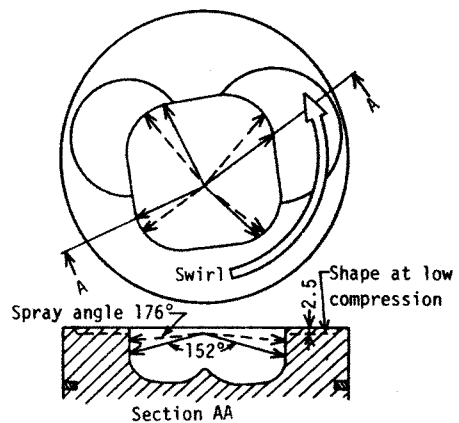


Fig. 1 Shapes of piston crown and bowl

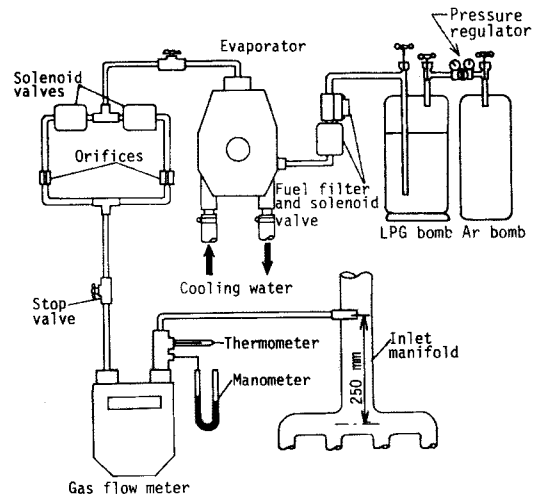


Fig. 2 Schematic diagram of vapour state LPG supply system

경유량과의 합을 총분사량으로 했다. 또 본실험에서 사용한 smoke meter는 검출치의 농도를 -0.6에 맞추도록 되어있다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 광각분사노즐에 의한 기관성능의 향상

LPG와 같은 C<sub>4</sub>이하의 저급탄화수소를 보조연료로 사용할 경우 격렬한 디젤노크를 피하기 위해서는 주연료의 분사시기를 약 5~7°CA정도 지연시켜 줄 필요가 있음을 전보에서 언급하였다. 뿐만 아니라 무연연소영역을 가능한 한 고부하역까지 연장시킴과 동시에 배기가스 중의 NO농도를 낮게 유지시키기 위해서는 주연료의 분사시기를 더욱 늦춰주는 것이 바람직하다.

그러나 Fig. 3에 나타난 것처럼 주연료의 분사시기를 10°CA 늦춘 경우에는 LPG를 공급하였음에도 불구하고 매연 배출 농도는 일반적으로 높게 나타나고 있다. 특히 2000rpm에서는 LPG를 공급한 어느 경우에 있어서도 주연료만을 정규의 분사시기에 분사한 경우보다 매연 배출 농도가 높다. 이것은 주분사 시기를 10°CA정도 늦춤에 따라 피스톤 cavity 내로 들어가는 분무의 위치가 너무 깊어져 주연료는 cavity내의 바닥면에서 과농한 혼합기를 형성하게 되어 공기부족의 상태에서 연소하게 되는 것이 원인으로 생각된다.

따라서 주연료로부터 다량의 흑연이 발생하게 되고, 이런 상태 하에서는 비록 LPG를 미리 공급하였

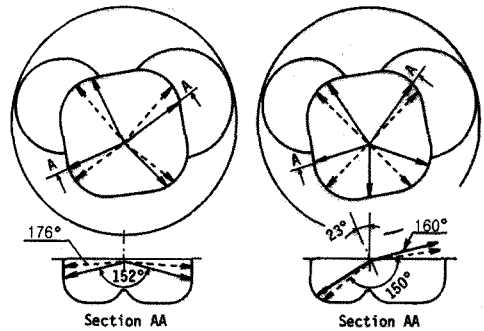


Fig. 4 The shape of piston crown and spray directions of nozzles tested

다하더라도 매연 배출은 개선되지 않게 된다. 여기에서 Fig. 4의 왼쪽그림에 나타난 바와 같이 주연료의 분사에 분사각이 큰 노즐(176°)을 사용함으로써 분사시기를 늦출 수 있는 대응책을 마련하였다.

한편 그림의 오른쪽에서 사용한 분사각 150° 및 160°의 두 노즐은 분공이 수직면에 대하여 23°경사져 있으므로 분무의 1/2인 오른쪽 분무는 실린더 벽면에 충돌하게 되는 반면 왼쪽분무는 cavity 밑 바닥면에 충돌하게 된다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 1000rpm에서 주연료의 분사시기를 10°CA 늦춰도 분사각이 넓은 노즐을 사용하여 cavity의 입구근처, 즉 표준노즐(152°)의 정

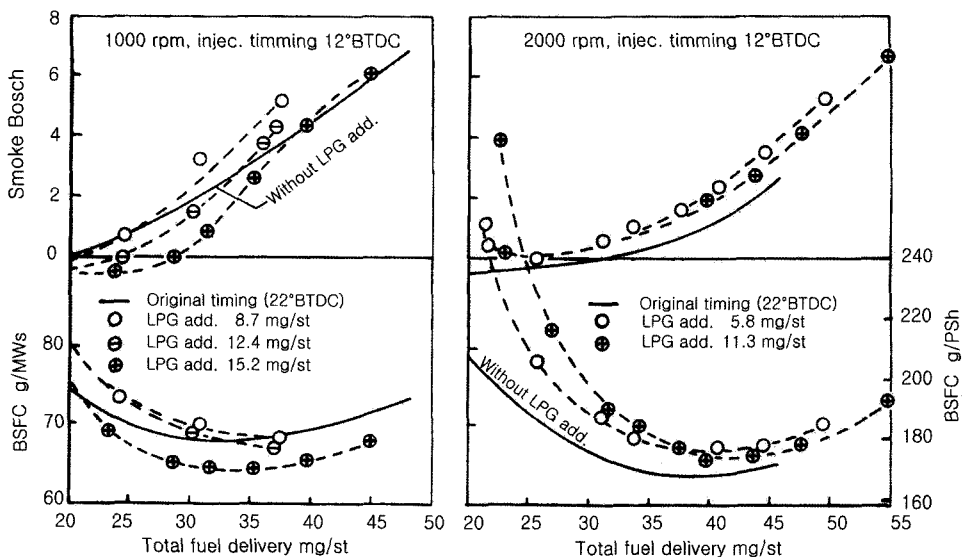


Fig. 3 Engine performance with a retarded injection timing

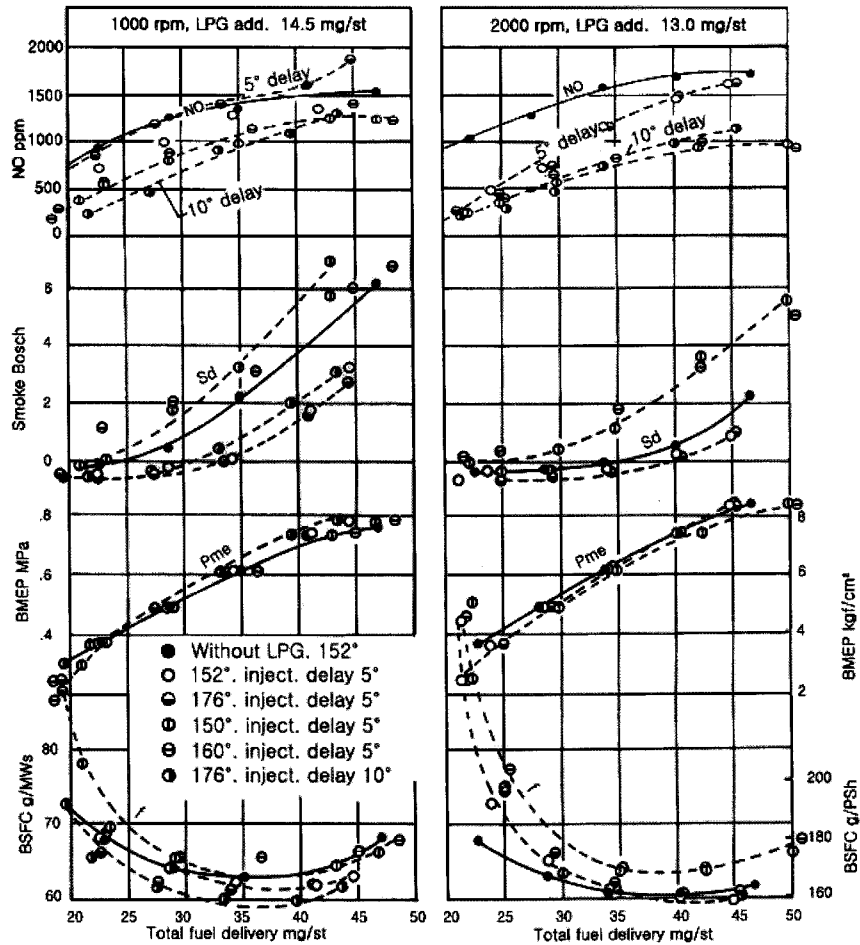


Fig. 5 Improvement of BSFC, smoke and NO with a wide-open nozzle

규분사시기(BTDC 22°CA)에 상당하는 분부위치에 주연료를 분사해 주면 연료소비율과 매연 배출 농도가 동시에 현저히 개선된다. 이와 반대로 cavity의 밑 바닥면에 분부가 도달하는 노즐을 사용한 경우에는 매연 배출 농도가 상당히 높아진다. 이것은 주연료를 cavity의 바닥면에 분사해 주기보다도, LPG의 예혼합기는 cavity 외부의 압축간극에도 분포되어 있으므로 화염이 빨리 압축간극부로부터 분출될 수 있도록 cavity의 입구근처에 분사해 주는 편이 열효율의 개선을 가져옴을 알 수 있다.

또한 Fig. 5에서 보는 바와 같이 분부의 일부를 실린더 벽면에 충돌시켜 예혼합연소량을 줄여 주면 NO농도가 저하됨을 알 수 있으나, 이 경우에는 매연 배출 농도뿐만 아니라 연료소비율도 현저히

악화되기 때문에 NO의 저감책으로서 적절하지 못하다. 그러나 분사각이 넓은 노즐을 사용하여 전술한 바와 같이 주화염의 분출시기를 앞당겨 주면 압축간극부에 유입된 LPG를 효과적이면서도 빨리 연소시킬 수 있다. 따라서 이 방법은 연료소비율과 매연 배출 농도를 악화시키지 않으면서도 주연료의 분사시기를 늦출 수 있어 NO의 저감책으로 유효하다.

한편, 기관의 회전속도가 2000rpm으로 상승하게 되면 실린더내의 난류가 강해져 주분부의 예혼합기 형성이 양호해 지므로 공기과잉율  $\lambda=1.6$ 에 상당하는, 즉 총분사량이 약 40mg/st를 넘는 고부하역이 아니면 LPG의 공급에 의한 연료소비율의 개선은 기대되지 않는다.

### 3.2 보조연료의 공급량을 증대시키기 위한 수단으로서의 압축비저하

실린더내로 공급된 보조연료의 양이 임계치 이상 이 되면 노킹현상이 일어난다. 이 임계치는 연소실 내의 온도가 약 1000°C에 도달했을 시의 연소의 하한계조성<sup>12)</sup>과 밀접한 관계가 있으며, LPG의 경우에는 전부하에서 공급된 연료량의 약 30%정도를 대체 가능함을 전보에서 기술한 바 있다.

본절에서는 주연료의 분사시기를 과도하게 늦추 지 않으면서도 보조연료의 공급량을 증대시킬 수 있는 수단에 대하여 검토한다.

자연발화온도가 낮은 LPG를 보조연료로 사용할 경우, 가능한 한 다량의 LPG를 공급하기 위해서는 기관의 압축비를 조금 낮추어 주는 방법이 유효할 것으로 생각된다. 이 방법의 이점으로서는

- i) LPG의 공급량을 증가시키는 만큼 주분사량을 줄 일 수 있어 매연 배출 농도가 저하된다.
- ii) 압축종료온도의 저하는 연소최고 온도의 저하 도 가져오므로 NO 농도의 저하에도 유리하다.

Fig. 6은 기관본래의 압축비인 17.5와 압축비를 15로 낮춘 경우에 있어서 기관성능을 비교한 것이다. 단, 압축비를 15로 낮춘 경우에는 주연료의 분사 시기를 정규의 분사시기보다 7°CA 늦추는 것이 유리함을 예비실험으로부터 확인하였다.

Fig. 6에 의하면, LPG의 공급 없이 주연료만을 분 사하면서 압축비를 낮추면 연비와 배기연농도가 현 저하게 악화되는 반면 NO 농도는 약 400~800ppm 정도까지 떨어지게 된다. 그러나 여기에 LPG를 17 mg/st로 까지 늘려서 공급하면 기관고유의 압축비 로써 통상운전을 할 때와 동등수준으로 연비가 유

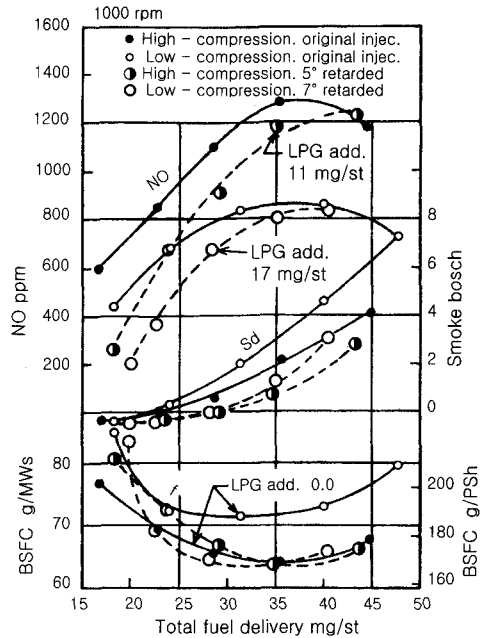
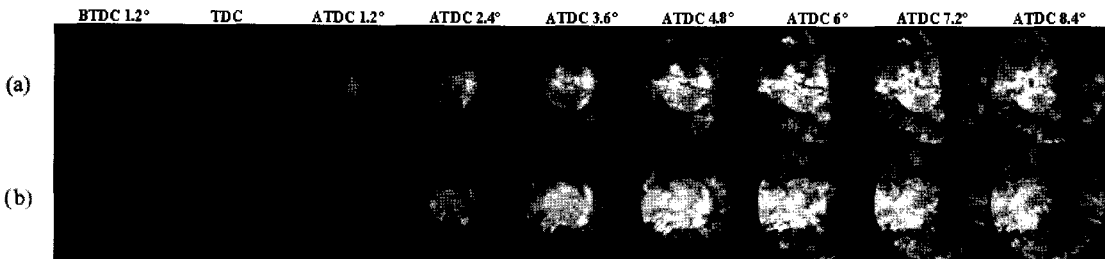


Fig. 6 Effect of compression ratio on engine performance with LPG addition

지되면서 배기연 농도의 저하는 물론이고 특히 NO 의 농도는 더욱 감소되어 거의 절반수준으로 낮아 진다.

여기에서 기관고유의 압축비로 통상운전하였을 때와 압축비를 낮춘 상태에서 LPG를 공급하였을 때의 연소과정에 어떤 차이점이 있는지를 알아보기 위하여 단기통의 가시화기관을 이용하여 연소과정을 high speed video camera(motion analyzer, Redlake Motion Xtra HG-TH)로 촬영하여 보았다.

Fig. 7은 본 연구에서 사용한 기관의 연소실 형태 와 같은 toroidal type의 연소실을 Al으로 가공한 후



(a) Diesel oil alone, compression ratio : 17.5, injection timing : 22°BTDC, 1000 rpm  
 (b) Diesel oil + LPG(30% of fuel gross), compression ratio : 15, injection timing : 22°BTDC, 1000 rpm

Fig. 7 Comparison of combustion flames for different fuels and compression ratios

그 연소경과를 촬영한 일 예를 나타낸 것이다. Fig. 7에 의하면 착화시기는 기관고유의 압축비로 운전하였을 때가 약 1.2°C 정도 빠르게 나타나고 있다. 그러나 LPG를 공급한 경우에는 압축비의 저하로 인해 발화핵의 형성은 지연되나, 발화 후에는 연소실 내에 미리 형성되어져 있던 LPG의 예혼합기에 의해 cavity로부터 압축간극부로의 화염분출력이 매우 강하고, 화염의 분출범위도 커서 강력한 역스퀴시의 양상을 띤다. 이러한 모습은 ATDC 3.6° 및 ATDC 4.8°에서 비교해 보면 뚜렷이 알 수 있다. 따라서 상사점부근에서의 연소량이 많아 연소형태가 어느 정도 정적 cycle에 가까워지게 되므로 압축비의 저하에 의한 이론열효율의 저하는 어느 정도 보상 받을 수 있을 것으로 생각된다. 뿐만 아니라 전체의 연소기간도 짧아지게 되므로 후연소기간의 단축에 의한 배기온도의 저하도 기대된다.

이와 같이 압축비를 조금 낮추는 대신 LPG의 공급량을 가능한 한 늘이는 방법은 기관의 성능개선에 있어 매우 유용한 수단 중의 하나라고 생각된다.

### 3.3 LPG를 공급할 때 발생하는 문제점

LPG를 보조공급하는 경우에는 가솔린기관과 마찬가지로 blow-by gas 중에 다량의 미연가스가 함유될 것으로 예상된다. 특히 기체상태로 공급하면 LPG의 예혼합기가 매우 균일한 상태로 되어 HC 농도는 더욱 높아질 것이다. 따라서 LPG를 보조적으로 사용하는 경우에는 blow-by gas를 흡기관으로 되돌릴 필요가 있다.

또, LPG의 기화에는 기관냉각수의 열량을 이용하였으나 공급량이 많을 때에는 간혹 돌발적인 노크를 일으켰다. 본 실험기관에서의 공급한계량은 기관고유의 압축비인 17.5에서는 약 15mg/st 이하, 압축비를 15로 낮춘 경우에 있어서는 약 17mg/st 이었으나, 이 공급한계량은 주연료의 분사시기, 압축비, 연소실형상, 주연료 분사노즐의 형상이나 종류 등과도 밀접한 관계를 가지고 있으므로 이 방법의 실용화를 위해서는 적용하는 기관별로 검토가 필요할 것으로 생각된다.

## 4. 결론

전보의 후속연구인 본 연구에서도 직접분사식 디젤기관에 LPG를 보조적으로 공급하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 일반적으로 배기가스 중의 NO 농도를 낮추기 위해서는 주연료의 분사시기를 가능한 한 지연시켜 주는 것이 바람직하나 배기연농도는 반대로 악화된다. 그러나 LPG를 보조 공급하는 경우에는 분사각이 큰 주분사노즐을 사용하게 되면 주분사시기를 약 10°C까지 늦추어도 연료소비율과 매연 배출 농도가 현저히 개선된다.
- 2) toroidal 연소실과 같이 cavity가 깊은 연소실에 있어서 광각분사노즐의 사용은, 연료소비율과 매연 배출 농도를 악화시키지 않으면서도 주연료의 분사시기를 늦출 수 있어 NO의 저감책으로 유효하다.
- 3) 압축비를 조금 희생시키는 대신 LPG의 공급량을 가능한 한 증대시키는 방법은 연료소비율의 손실 없이 매연 배출 농도의 저감은 물론이고, 특히 NO 농도를 낮게 유지시킬 수 있는 유효한 방법이다.
- 4) 노킹을 유발하지 않는 LPG의 최대공급량은 주연료의 분사시기, 기관의 압축비, 연소실의 형상, 주연료분사노즐의 종류 등에 따라서 조금씩 달라지므로 이방법의 실용화시에는 적용기관별로 검토가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 금오공과대학교에서 지원하는 학술연구비에 의해 수행되었습니다. 아울러 Fig. 7의 사진은 원래 컬러이었으나 인쇄과정에서 흑백으로 전환되었음을 양해하여 주시기 바랍니다.

## References

- 1) J. C. Bang, "The Effect of Auxiliary use LPG on the Performance of a D.I. Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.13, No.3, pp.138-145, 2005.
- 2) 이대엽, "일본에서의 LPG 엔진의 연구개발", 자동차공학회지, 제22권 제2호, pp.56-59, 2000.

- 3) J. H. Kim and G. H. Choi, "A Study on Emission Performance in Heavy-duty LPG Single-cylinder Engine," Autumn Conference Proceedings, KSAE, pp.237-243, 2000.
- 4) U. L. Cho and G. H. Choi, "A Study on Reduction of Exhaust Gas Temperature in LPG Engine," Autumn Conference Proceedings, KSAE, pp.262-267, 2000.
- 5) U. L. Cho, Y. J. Chung and G. H. Choi, "A Study on Characteristic of Combustion with Butane and Propane in LPG Conversion Engine from Diesel," Autumn Conference Proceedings, KSAE, pp.342-347, 2001.
- 6) G. H. Choi and U. L. Cho, "A Study on Reduction of Exhaust Gas Temperature in Retrofitted LPG Fueled Engine Based Medium-Duty Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.63-68, 2003.
- 7) G. H. Choi, J. H. Kim, Y. J. Chung and S. B. Han, "Influence of Compression Ratio on Engine Performance in a LPG Engine Converted from a Diesel Engine," Transactions of KSME(B), Vol.28, No.10, pp.1178-1183, 2004.
- 8) C. U. Kim, S. M. Oh and K. Y. Kang, "Optimization of Combustion Chamber and Fuel Composition for Heavy-Duty Engine with Liquid Phase LPG Injection System," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.10-15, 2001.
- 9) 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," Autumn Conference Proceedings, KSAE, pp.336-341, 2001.
- 10) Y. W. Yoon, J. D. Ryu and K. H. Lee, "A Study on the Combustion and Emission Characteristics according to Air-Fuel Ratio for LP Liquid Injection Engine," Autumn Conference Proceedings, KSAE, pp.533-538, 2001.
- 11) C. U. Kim, S. M. Oh and K. Y. Kang, "Fundamental Study on Liquid Phase LPG Injection System for Heavy-Duty Engine(1)," Transactions of KSAE, Vol.9, No.4, pp.85-91, 2001.
- 12) 疋田, 秋田, 燃焼概論, コロナ社, pp.26-31, 1974.