

< 論 文 >

디젤機關의 黑煙防止에 관한 考察

方 重 哲*

(1987年 8月 6日 接授)

Some Considerations for Reducing Black Smoke in the Exhaust Gas from a Diesel Engine

Joong Cheol Bang

Key Words: Black Smoke(黑煙), D.I. Diesel Engine(直接噴射式 디젤엔진), LP Gas(液化石油가스), Auxiliary Use(補助使用), Limit of Explosion(爆發限界)

Abstract

It has been a long time that black smoke emitted from buses and trucks powered with diesel engines, especially city-buses, came to be a serious air pollution problems in large cities as Seoul and Pusan. Therefore, proper means to reduce black smoke from diesel engines have to be considered as soon as possible, because it will take quite a long time to replace major passenger transportation system in cities from city-buses to subway. This paper, as a study on the reduction of diesel black smoke, shows how the black smoke of diesel engines can be reduced at various loads and engine speed by supplying small amount of gaseous fuel as LPG into the intake manifold. Thermal efficiency has been also considered for users, and confirmed through the engine test.

1. 序 論

車輛用 디젤機關으로부터 排出되는 大氣汚染物質 中 소위 煤煙으로 불려 지는 粒子狀의 物質, 즉 黑煙에 대해서는 排出實態의 未把握 또는 排出規制의 未定立등으로 인하여 지금까지 그 對策이 부진한 實情이다. 한편 機關을 使用하는 쪽의 立場에서 보아도 이 黑煙의 發生이 機關을 그다지 損傷시키는 것도 아니며, 또한 對策을 세우기도 곤란한 일이므로 크게 關心을 갖지 않는 것이 一般의이다. 그러나 人口가 急増하고 있

는 서울, 부산 등의 大都市에서는 버스로부터 排出되는 黑煙이 重大한 社會的 問題로 등장된지 오래다. 이들 도시에서는 사람을 輸送하는 手段中 버스가 차지하는 比率이 높고, 地下鐵이 主輸送手段으로 전환되기까지는 比較的인 時間이 걸리므로 時急히 다른 對策을 강구할 必要가 있을 것으로 생각된다.

一般的으로 디젤機關으로부터 排出되는 黑煙은 機關에 걸리는 負荷가 높아질수록 粒子끼리 結合하여 커지게 되므로 사람의 눈으로도 充分히 識別할 수 있게 된다. 이 때문에 工場出荷時 排氣煙濃도가 2~3 程度(Bosch smoke density)를 維持할 수 있도록 最大噴射量을 조절하고 있으나, 機關을 長時間 運轉함에 따른

* 正會員, 雙龍重工業(株) 責任研究員

공기필터의 汚染 및 막힘 또는 噴射노즐의 劣化등으로 인해 工場出荷時 조절된 대로 使用할 경우에는 燃料過剩이 되어 실린더內的 燃燒狀態는 空氣不足現象을 빚게 된다. 특히 機關을 低速高負荷로 運轉하는 경우, 예를 들면 정원이상의 乘客을 태우고 運行하거나 또는 積載量以上の 화물을 싣고 언덕을 오를 경우에는 多量の 黑煙이 排出된다.

本 研究는 LPG와 같은 氣體燃料를 디젤機關의 吸氣管에 少量 吸入시키는 方法을 利用해서 比較的 간단히 黑煙을 低減시킬 수 있는 對策을 檢討한 것으로서, 機關使用者에게는 熱效率이 向上되고 燃料消費率이 低下되는 등의 利點이 있다. 또 이 方法을 機關의 負荷나 回轉速度의 變動에 따라 柔軟하게 利用할 수 있는 手法과 問題點에 대해서도 檢討하여 보았다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1 實驗裝置의 概要

實驗機關은 LPG를 補助的으로 利用한 例가 거의 없는 4사이클 小形高速直接噴射式 디젤機關 ISUZU 4BB1을 使用했다. 이 機關의 燃燒室形態는 사각형의 트로이달 燃燒室(troidal chamber)로, 연소실 壁면에 대하여 噴霧를 경사지게 衝突시킴으로써 噴霧微粒化의 增大와 분포성의 改良 등을 目的으로 設計된 機關이다⁽¹⁾. 따라서 별도의 장치를 附着시키지 않는 한, 機關自體만으로서는 더 이상 黑煙을 低減시키기가 比較的 어려운 實驗機關이라고 말할 수 있다. 이 機關의 主要제원을 Table 1에, 實驗裝置의 概略圖와 使用한 測定器機類를 Fig. 1에 나타낸다. 단 本 實驗에서 使用한 스모크 미타는 검출지의 濃度를 -0.6에 맞추도록 되어 있다. 각종 性能試驗에 있어서는 소음기를 빼어 내고 그 대신에 1200 l의 서어지 탱크를 붙여서 實驗했다. 한편 機關에 吸入시키는 LPG는 *n*-propane을 主成分으로 하는 家庭用 LPG를 使用하는 편이 유단價도 높고, 性能向上에도 有利하다. 그러나 車輛에서는 工業用(백시용) LPG를 使用하는 편이 가스普及面에 있어서 有利할 뿐 아니라 生産量도 많고 또 價格도 싸기 때문에 本 研究에서는 Table 2에 나타낸 바와 같이 *n*-butane을 主成分으로 하는 工業用 LPG를 使用했다. LPG를 機關에 供給하는 方法으로서 는 액체 그대로 直接吸氣管에 噴射하는 方法과 蒸發器를 使用해서 氣化시켜 吸入시키는 方法을 생각할 수 있다. 前者는 機關速度 및 負荷의 變動에 對하여 적절한 LPG量을 供給할 수 있는 利點이 있으나 回轉數, 燃料펌프의

Table 1 Details of diesel engine tested

Items	Specifications
Model	ISUZU4BB1
Number of cylinders	4
Bore×Stroke	φ 102×110 mm
Compression ratio	17.5
Maximum output	73.5 kw/3400 rpm(100 PS)
Maximum torque	235.3Nm/2000rpm(24.0kgf-m)
Maximum BMEP	0.821 MPa(8.38 kgf/cm ²)
Injection nozzle	NP-DLLA 152 S 324
Spray angle	152°
Holes-diameter	4-φ 0.32 mm
Automatic timing adv.	9°/1000 rpm to 3400 rpm

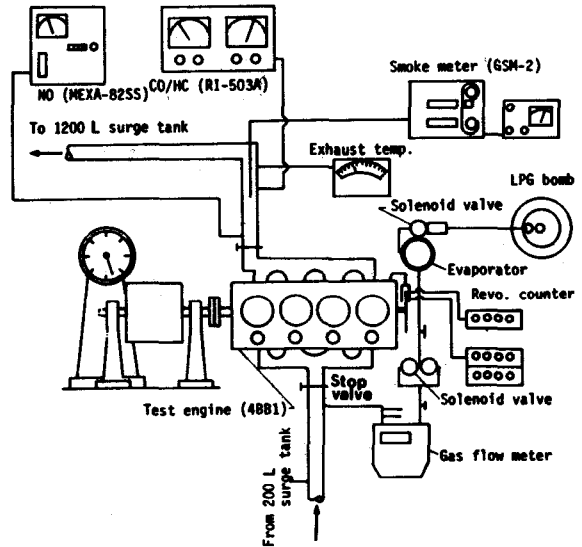


Fig. 1 The arrangement of experimental apparatus

Table 2 Contents of LPG used

Contents	Vol. %
Methane	—
Ethane, Ethylene	0.2
Propane	29.1
<i>i</i> -Butane	20.9
<i>n</i> -Butane	43.8
<i>t</i> -Butene	1.9
<i>cis</i> -Butene	1.4
1-3 Butadiene	2.7

백(rack)위치, 外氣溫度, 排氣溫度 등을 測定할 수 있는 감지기(sensor)가 필요하므로 經濟的인 側面에서 不利하다. 그러므로 本 研究에서는 氣化시켜 機關에 吸

入시키는 方法을 變했다.

또, 性能測定은 1000 rpm 으로부터 回轉數를 500 rpm 씩 올려가면서 實施하였으나, 車輛의 出發時에 相當하는 1000 rpm 과 60 km/h 의 定速走行에 相當하는 2000 rpm 에 重點을 두고 報告한다.

2.2 LPG 의 供給方法

LPG 의 供給方法으로서는 前述한 바와 같이 가솔린 機關용 인젝터(injector)를 使用해서 2~3 bar 의 比較的 低壓으로 吸氣管 또는 吸氣孔 근처에 噴射하는 方法과 排氣熱 또는 冷却水의 熱을 利用하여 蒸發器를 使用하는 方法이 있다. 本 研究에서는 Fig. 2 에 나타 내는 바와 같이 蒸發器를 使用하는 方法에 대해서 記述한다. 容器的 液體注入밸브로부터 나온 LPG 는 필터(filter)를 거쳐 蒸發器(evaporator)에 들어간다. 이 蒸發器는 實驗機關의 난방용 히터(heater)로 들어가는 約 80°C 의 冷却水를 순환시켜 LPG 를 氣化시킨다. 蒸發器에서 氣化된 LPG 는 솔레노이드밸브(solenoid valve)를 거쳐 流量調節용 콕(cock)에 到達하게 되고, LPG 의 精確한 供給量은 家庭用 가스미터로 計測한다. 단 LPG 의 供給量은 供給時의 壓力과 溫度, 構成成分 및 低發熱量등으로부터 輕油量으로 換算하여 主燃料인 輕油量과의 合算 總噴射量으로 했다. Fig. 2 의 方法을 機關에 實用化시킬 경우에는 流量調節용 콕을 使用하지 않고 오리피스(orifice)의 直徑을 달리하여 2 개의 솔레노이드밸브를 低速(A 밸브), 中速(B 밸브), 高速(A+B 밸브)의 3 단계로 開閉시키면 LPG 의 供給量을 調節할 수 있다. 예를 들어 오리피스의 直徑에 따라 機關에 供給되는 LPG 를 輕油量으로 換算하여 보면

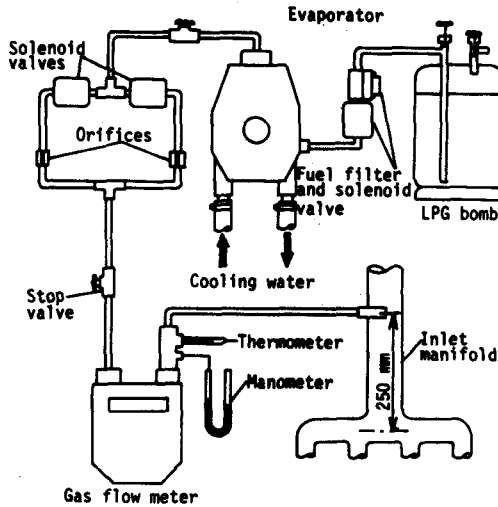


Fig. 2 LPG supply system

Table 3 Amount of flowing LPG through orifice (estimated as wt. of gas oil/cyl.·stroke)

Orifice dia.	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm
2.5 mm	28.38 mg/st	21.28 mg/st	14.19 mg/st
1.8	18.48	13.86	9.24
1.3	10.02	7.50	5.01
0.9	4.46	3.35	2.23

Table 3과 같다. 단, 오리피스의 直徑이 2.5 mm 를 넘으면 流量이 過大해지고 0.9 mm 以下가 되면 LPG 안에 포함되어 있는 누설방지제가 응고되어 구멍이 막히게 되는 수도 있으므로 使用이 곤란해 진다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 LPG 의 適正供給量과 主燃料의 噴射時期

LPG 를 補助的으로 利用해서 熱效率을 改善시키기 위해서는 무엇보다도 LPG 의 供給量을 기관운전상태, 특히 負荷의 大小에 適合하도록 供給해 주지 않으면 안된다.

Fig. 3 은 機關 正規의 噴射時期(22° BTDC)下에서 LPG 를 吸氣管에 吸入시킨 경우의 연료소비율을 나타낸 것으로서, 이 때의 給氣溫度는 23±2°C 이다. 여기에서 橫軸은 1 실린더, 1 행정당의 燃料噴射量으로서,

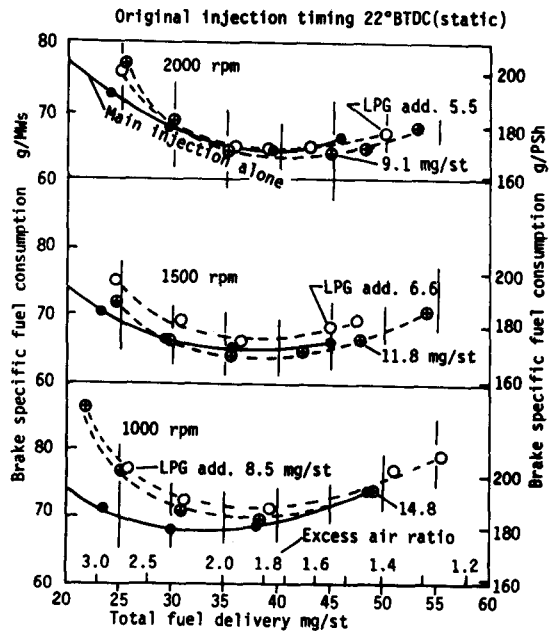


Fig. 3 Effects of engine speed on BSFC at the original injection timing

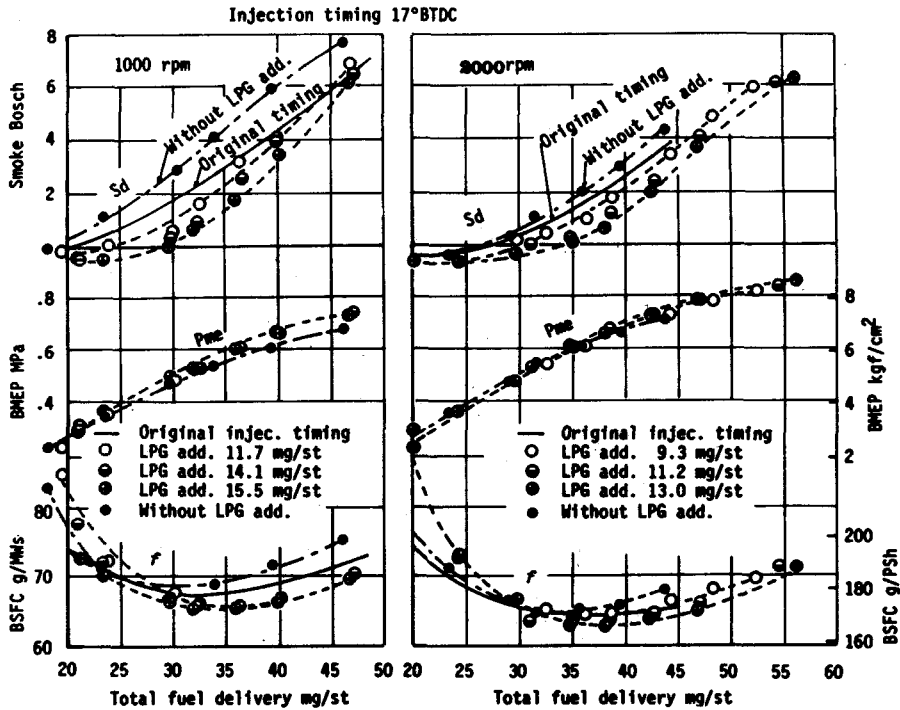


Fig. 4 The engine performance for various LPG deliveries at a proper injection timing

LPG를 補助的으로 利用한 경우에는 LPG의 供給量과 輕油의 噴射量을 합쳐서 總噴射量으로 나타내었다. 따라서 同一噴射量에 있어서 LPG의 供給有無에 따른 燃料消費率을 比較해 보면 熱效率이 改善되었는지 어떤지를 알 수 있다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 機關正規의 噴射時期下에서 LPG를 供給한 경우에는 실린더內의 燃燒狀態가 比較的 安定된다고 생각하는 1500 rpm 以上の 回轉速度에서 燃料消費率이 低下되어 熱效率이 改善된다. 그러나 1행정당의 LPG供給量은 機關速度의 증가와 더불어 감소한다.

Fig. 4는 燃燒騒音의 輕減과 LPG의 供給量을 增加시킬 目的으로 主燃料의 噴射時期를 5° 늦춰서 試驗한 結果를 나타낸 것이다. 一般的으로 燃燒騒音의 發生은 上死點附近에서 燃燒되는 豫混合氣量에 關係된다. 그러므로 LPG를 補助的으로 利用할 경우에는 LPG의 豫混合氣를 點火시키는 主燃料의 發火核發生時期를 늦춰주는, 즉 主燃料의 噴射時期를 늦춰주는 것이 燃燒騒音의 低減과 LPG의 供給量을 增加시키는 것에 結付된다. Fig. 4의 f曲線에 의하면 1000 및 2000 rpm에서 噴射時期를 5° 늦추면 일정체선으로 나타낸 바와 같이 燃料消費率이 惡化된다. 그러나 LPG를 吸入시키면 約 30 mg/st를 넘는 負荷域에서부터 燃料消費率

이 改善되고, 또 排氣煙濃度의 側面에서 보면 同一濃度가 되기까지에는 總噴射量을 5~7 mg/st 程度 增加시킬 수 있으므로 機關出力의 增大는 約 10%에 達하게 된다. 다만, LPG의 供給量만큼 主噴射量이 減少하기 때문에 噴射노즐의 冷却方法을 再檢討하지 않으면 노즐의 니들밸브(needle valve)가 늘어붙을 염려도 있다.

한편, LPG의 適正供給量은 燃料의 下限界組成과 密接한 關係가 있으므로 Zabetakis 및 Chatelier등⁽²⁾의 式을 使用해 t°C에 있어서의 燃燒의 下限界組成 L₂₅를 求해 보면,

$$L_1/L_{25} = 1 - 0.721 \times 10^{-3}(t - 25^\circ) \quad (1)$$

여기서 L₂₅는 몇 종류의 可燃性가스가 混合되어 있을 때 空氣中(1 氣壓, 25°C)에서의 爆發下限界組成 (Vol. %)이며 다음 式에 의해 求해진다.

$$L_{25} = 100 / \sum \frac{ni}{Li} \quad (2)$$

단 Li는 各成分의 爆發下限界組成 (Vol. %)⁽²⁾, ni는 各成分의 體積 %이다. 따라서 式 (2)에 Table 2에 나타낸 LPG의 各成分 下限界組成과 體積率을 代入하면 L₂₅=1.96 Vol. %가 얻어진다. 實驗機關의 體積效率을 90%로 가정하고 1 실린더, 1 행정당의 LPG

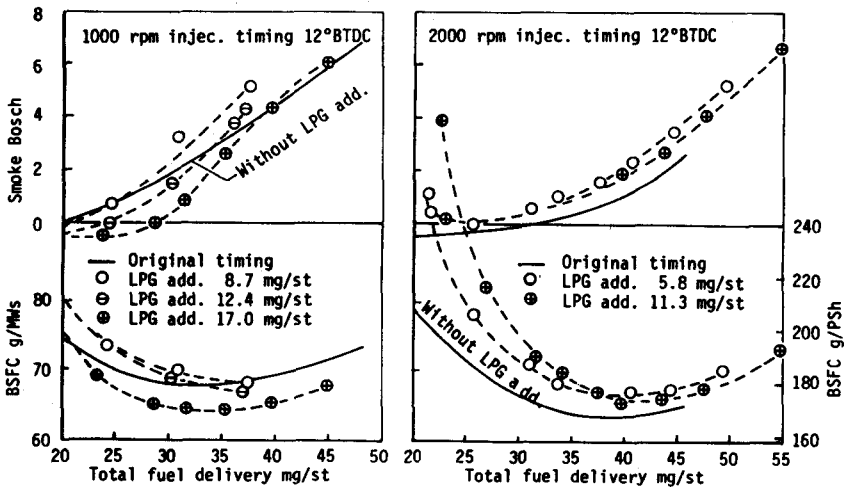


Fig. 5 The engine performance at more retarded injection timing

供給量を 구해 보면, 壓縮末期의 실린더內 空氣溫度 約 533°C에 있어서는 $L_{533}=1.24$ Vol. % (噴射量으로 나타내면 23.4 mg/st), 1000°C의 狀態에서 간신히 燃燒될 수 있는 下限界組成 $L_{1000}=0.58$ Vol. % (10.98 mg/st)로 된다. Fig. 4의 燃料消費率曲線을 參照해 보면 本 實驗機關에서는 LPG의 供給量이 11~15 mg/st의 範圍에서 良好한 燃料消費率이 얻어졌으므로 실린더內的 火炎溫度가 約 1000°C에 가까와 졌을 때 LPG의 稀薄濃混合氣가 燃燒될 수 있도록 LPG의 供給量을 정해주면 燃料消費量과 排氣煙濃度가 改善됨을 알 수 있다. 참고로 예연소실식기관에 이 식을 적용시켜 보면, 예연소실식기관의 경우는 기관의 구조상 예연소실로부터 噴出되는 火炎에 의해 主室內의 LPG 混合氣를 燃燒시키는 방법이 좋을 것이다. 이 방법에서는 예연소실로부터의 火炎噴出이 上死點을 지나서부터 開始되는 점을 감안하여 LPG의 下限界組成을 壓縮末期의 狀態 즉 L_{500} 程度에서 구하여도 LPG 混合氣의 瞬間的인 燃燒에 의한 노킹은 피할 수 있게 된다. 따라서 本 實驗機關과 排氣量이 同一한 예연소실식기관에 대한 適正 LPG 供給量은 20 mg/st로 된다.

3.2 主燃料噴射노즐이 機關性能에 미치는 影響

LPG를 補助的으로 供給해서 無煙燃燒領域을 가능한 한 高負荷域까지 延長시키고 同時에 排氣가스中の NO 濃度를 낮게 維持시키기 위해서는 主燃料의 噴射時期를 더욱 늦춰 주는 것이 바람직하다. 그러나 Fig. 5에 나타낸 것처럼 主燃料의 噴射時期를 10° 늦춘 경

우에는 LPG를 供給하였음에도 불구하고 排氣煙濃度는 一般的으로 높게 나타나고 있다. 특히 2000 rpm에서는 LPG를 供給한 어떤 경우에 있어서는 主燃料만을 正規의 噴射時期에 噴射한 경우보다 排氣煙濃도가 높다. 이것은 噴射時期를 10° 가량 늦춤에 따라 피스톤 오목부내로 들어가는 噴霧의 位置가 너무 깊어져, 主燃料은 오목부의 바닥면에서 過濃한, 즉 空氣不足의 狀態에서 燃燒하게 되는 것이 原因으로 생각된다. 따라서 主燃料로부터 多量의 黑煙이 發生하게 되고, 이런 狀態下에서는 비록 LPG를 미리 供給하였다 하더라도 排氣煙은 改善되지 않게 된다. 여기에서 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 主燃料의 噴射에 噴射角이 큰 노즐(DLLA 176 S 334)을 使用함으로써 噴射時期를 늦출 수 있는 對應策을 마련하였다. 다만, 노즐의 形番은 다음과 같이 構成되어 있다. 예를 들어, DLLA 176 S 334는

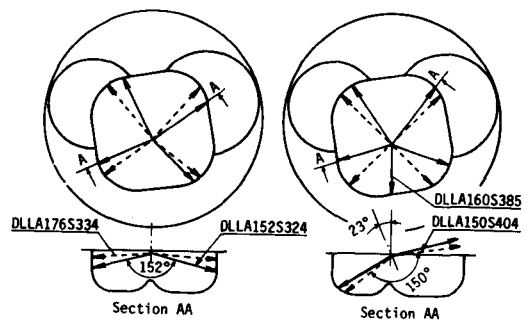


Fig. 6 The shape of piston crown and spray directions of nozzles tested

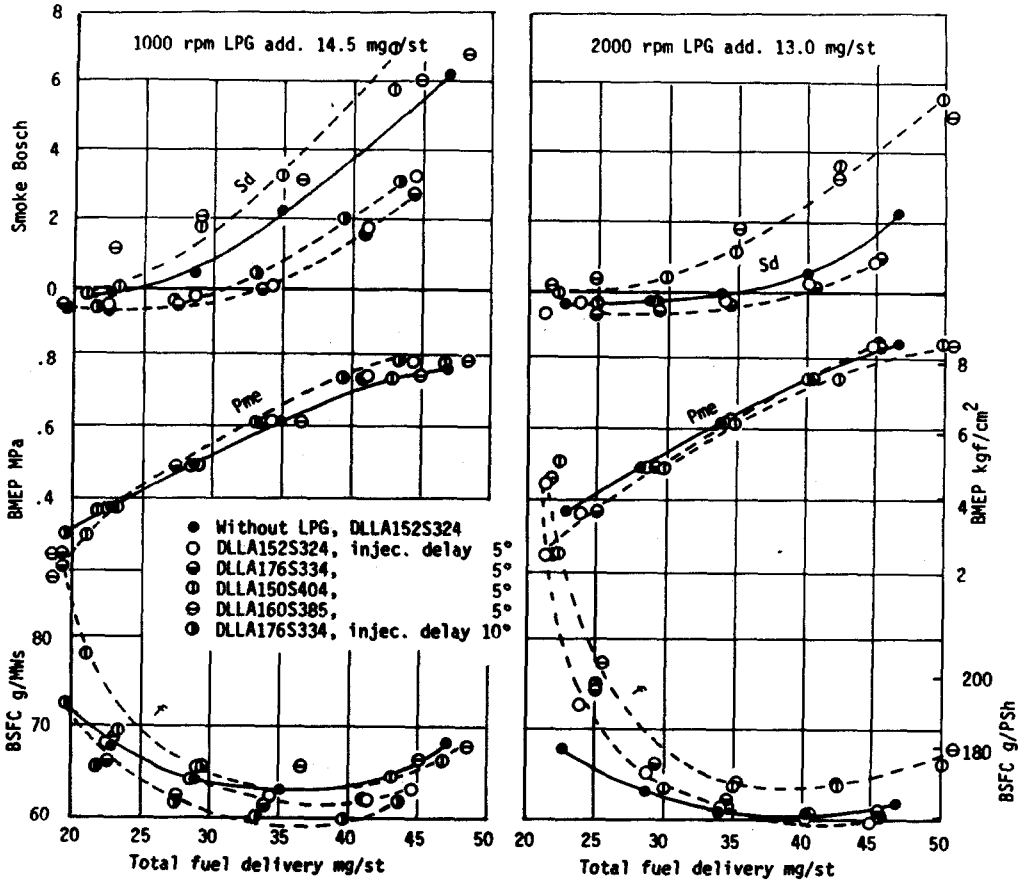


Fig. 7 Improvements of BSFC and smoke with a wide-open nozzle

DLA : long hole nozzle

176 : spray angle(°)

334 : hole dia. $\phi 0.33 \times 4$ holes 이다.

또 DLLA 160 S 385 와 DLLA 150 S 404 노즐의 噴孔은 수직면에 대해 23° 경사져 있으므로 분무의 1/2 인 오른쪽은 실린더벽면에 衝突하게 된다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 1000 rpm 에서 噴射時期를 10° 늦춰도 噴射角이 넓은 노즐을 사용하여 오목부의 入口 근처 즉 標準노즐(DLLA 152 S 324)의 正規噴射時期에 상당하는 噴霧位置에 主噴霧를 噴射해 주면 燃料消費率과 排氣煙濃度가 동시에 현저히 改善된다. 이것은 主燃料을 오목부의 바닥면에 噴射해 주기보다도, LPG의 豫混合氣는 오목부 이외의 壓縮間隙에도 分布되어 있으므로 火炎이 빨리 壓縮間隙에 噴出될 수 있도록 오목부의 入口 근처에 噴射해 주는 편이 熱效率의 改善를 가져올을 나타낸다. 반대로 噴孔徑이 크고 오목부의 깊숙한 곳까지 噴霧가 到達되는 노즐(DLLA

160 S 385, DLLA 150 S 404)을 사용한 경우에는 排氣煙濃度가 상당히 높아진다. 한편, 機關의 回轉數가 2000 rpm 으로 上昇하게 되면 실린더內의 亂流가 강해져 主噴霧의 混合氣形成이 良好해 지므로 空氣過剩率 $\lambda=1.6$ 에 상당하는, 主總噴射量이 約 40 mg/st 를 넘는 高負荷域이 아니면 LPG 供給에 의한 燃料消費率의 改善는 期待되지 않는다.

3.3 LPG를 補助적으로 利用할 때의 排氣 가스 組成

本 研究에서 使用한 實驗機關의 NO 濃度에 대해서는 伊藤⁽¹⁾, 金原⁽²⁾ 등의 詳細한 報告가 있으나, 補助燃料을 添加시켰을 때의 NO 濃度에 관한 報告⁽⁴⁻⁵⁾는 一貫되어 있지 않다. 일반적으로 直接噴射式 디젤機關의 熱效率을 높이기 위해서는 실린더內의 스월(swirl)이나 스퀴시(squish)의 強度를 높여 定積燃燒量을 增加시켜 줄 필요가 있으나, NO의 低減策과는 상반된다.

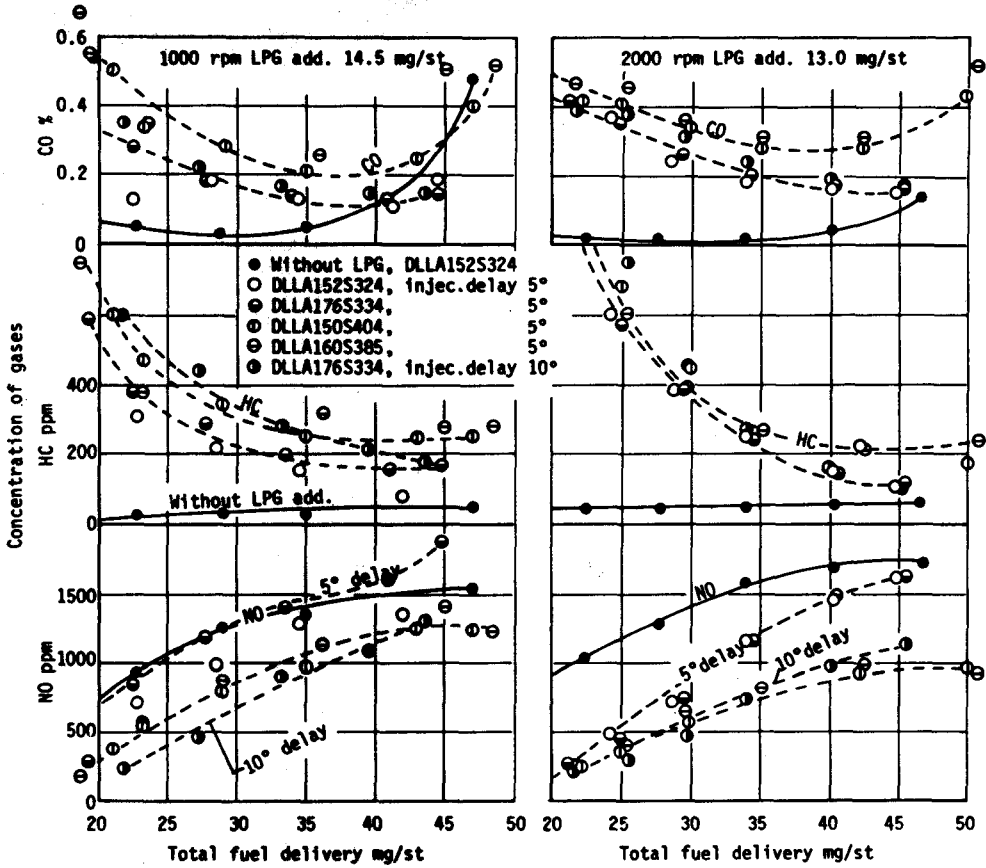


Fig. 8 NO, HC and CO concentrations with the LPG addition

Fig. 8에서 보는 바와 같이 噴霧의 一部를 실린더 헤드면에서 衝突시켜 疎混合燃焼量을 줄여 주면 NO 濃도가 低下됨을 알 수 있다. 그러나 이런 種類의 噴射 노즐을 使用하면 동시에 燃料消費率도 현저히 악화되기 때문에 NO의 低減策으로서 적당하지 못하다. 반면, 噴射角이 넓은 노즐(DLLA 176 S 334)을 使用하여 오목부의 入口부근에 主噴霧를 配置함으로써 前述한 바와 같이 主火炎의 噴出時期를 앞당겨 주면 間隙部에 流入된 LPG를 效果의이면서도 빨리 연소시킬 수 있다. 이 방법은 燃料消費率과 排氣煙濃度를 惡化시키지 않으면서도 主燃料의 噴射時期를 늦출 수 있어 NO의 低減策으로 有效하다.

한편, 디젤기관으로부터 排出되는 HC와 CO에 대해서는 그다지 問題로 삼고 있지 않으나 補助噴射의 實施과 더불어 상당량의 HC, CO가 排出된다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 1000 rpm에서는 總噴射量이 約 30 mg/st 이하(主噴射量은 15 mg/st...이하, 2000 rpm에서는 總噴射量이 約 35 mg/st 이하에서 HC와 CO 濃

도가 상당히 높아진다. 이와 같이 未燃燒가스가 多量으로 排出되는 範圍에서는 燃料消費率도 主燃料만을 噴射한 경우보다 一般적으로 높은 傾向을 보이고 있으므로 LPG를 補助적으로 利用하는 방법은 高負荷領域에서 效果가 있음을 알 수 있다.

4. 結 論

燃焼室形狀이 單純하면서도 熱效率이 높아 陸·舶用 原動機로서의 活用度가 增加되고 있는 直接噴射式 디젤기관에 LPG와 같은 氣體燃料을 補助적으로 利用하여 實用possible한 黑煙防止對策을 檢討하여 보았다. 이 研究에서 얻은 成果를 背景으로 하여 對應策을 세우는 데 必要한 事項을 열거해 보면 다음과 같다.

(1) LPG를 補助적으로 利用하는 방법은 실린더內的 空氣流動이 약할수록 效果가 크므로, 低速高負荷時, 例를 들어 1000 rpm 附近에서 一定量의 LPG가 供給될 수 있는 밸브나 오리피스 開閉裝置 등을 附着시키

는 간단한 方法이라도 有效하다. 또 이 閉閉時期의 調整은 燃料펌프의 배(rack)位置로서 制御시켜 주는 것이 가장 좋을 듯하나, 排氣溫度를 感知할 수 있는 센서(sensor)를 利用해서 LPG의 供給時期를 制御하는 方法도 생각할 수 있다.

(2) LPG의 適正供給量은 LPG의 燃燒下限界組成과 密接한 關係가 있으므로, 直接噴射式 디젤機關에서는 約 1000°C에 있어서의 下限界組成에 相當하는 量을 供給해 주는 것이 熱效率과 排氣煙濃度의 改善에 있어서 效果的이다.

(3) 廣角噴射노즐의 使用은 트로이달 연소실과 같이 오목부가 깊은 연소실에 있어서 燃料消費率과 排氣煙濃度를 惡化시키지 않으면서도 主燃料의 噴射時期를 낮출 수 있어 NO의 低減策으로 有效하다.

後 記

本 研究는 1984~1985년에 걸쳐 大阪府立大學 內燃

機關研究室의 裝置를 빌어 遂行된 것이다. 同 研究室의 太田幹郎教授에게 感謝드리는 바이다.

參 考 文 獻

- (1) 伊藤, 吉田, 1973, “いすゞニューフォワード用 6B B1形ディーゼル機關”, 內燃機關, Vol. 12, No. 133, pp. 55~62.
- (2) 秋田, 疋田, 1974, “燃燒概論”, コロメ社, 東京, pp. 26~31.
- (3) 金原의 2名, 1973, “角形트로이달 燃燒室의 開發”, 日本機械學會講演論文集, 730-5, pp. 25~28.
- (4) P. Eyzat, J.C. Guibet, 1968, “A New Look at Nitrogen Oxides Formation in Internal Combustion Engine”, SAE Trans., Vol. 77, No. 680124, pp. 481~500.
- (5) 田代, 辻村, 1972, “ディーゼル機關의 排氣對策”, 內燃機關, Vol. 11, No. 131, pp. 119~127.