

<論 文>

直接噴射式 디젤機關의 燃燒性 向上에 관한 考察

方 重 哲*

(1983年 10月 21日 接受)

The Study for Improving the Combustion in a Direct-Injection Type Diesel Engine

Joong Cheol Bang

Abstract

The performance of a direct-injection type diesel engine often depends on the shape of combustion chamber, strength of swirl or squish, the number of nozzle holes, etc. This is of course because the process of combustion in the cylinder was affected by the mixture formation process.

In this paper, the relation between the flame progress and the performance of engine was clarified by changing variously the combustion process in cylinder with a special method, and thus the measures for improving the combustion were indirectly examined. Namely it was investigated what effect the flame progress in cylinder, which was varied with the locality of the lean premixture injected by the auxiliary injection method using an auxiliary injection nozzle in advance at the place where main spray was injected later, has on the engine output, the exhaust smoke density and the NO concentration in exhaust gas.

1. 서 론

직접분사식 디젤기관은 연소실 형상이 단순하고 열효율이 높으며 별도의 예열장치가 없이도 始動性이 좋으므로 中·低速用 기관으로 사용되어 왔으나 최근에는 총배기량이 10l 미만인 中·高速 기관에서도 陸·船用 원동기로써 넓게 사용되고 있다. 이와같은 직접분사식 디젤 기관의 성능은 연소실의 형상, 와류 및 스쿼시(squish)의 強度, 분사노즐의 孔數 등에 좌우되는 경우가 많다¹⁾. 그것은 실린더內에서의 연소가 혼합기의 형성과정에서 큰 영향을 받았음을 나타내는 것이다. 또 主噴射에 앞서 主燃料의 10~30%의 보조연료를 실린

더內에 분사하든지 또는 흡입시키면 기관출력의 증가²⁾, 연료소비율의 저하²⁾, 배기농도의 감소²⁾, 연소잡음²⁾³⁾, 기관의 가속성⁴⁾ 등에 효과가 있다고 보고되어 있다.

本 연구에서는 실린더內의 연소 상태를 여러 가지로 변화시켜 火災의 발달상태와 기관성능과의 관계를 밝힘으로써 간접적으로 연소의 개선책을 검토하는데 목적을 두었다. 즉, 별도의 노즐을 사용하는 보조분사법을 채택하여 後에 분사되는 主噴霧의 어려우치에 미리 회박한 예혼합기를 형성시켜서, 실린더內 화염의 발달 상태를 여러 가지로 변화시킴에 따라 기관출력, 배기농도, 배기가스중의 NO 농도 등이 얼마만큼 영향을 받는가를 조사했다. 여기에서 배기연농도의 측정에는 Bosch 式 여과지오염법의 SOKKEN[司測研(株)] GSM-2를, NO 농도의 측정에는 적외선분석식의 HORIBA[堀場(株)] MEXA-82SS를 사용 하였다.

또 실험기관에 사용한 연소실의 형상은 高速度 화염

* 정회원, 영진실업전문대학 기계설계학과
(現) 日本國 大阪府立大學 工學部 機械工學科 博士課程

사진과 성능시험의 결과를 비교하기 위해서 분사력만을 이용하여 혼합기를 형성시키는 plate-type 및 연소성의 향상과 공기이용율을 높이기 위하여 주분무의 혼합기형성에 피스톤 凹面(piston concavity)에 流入되는 squish 를 이용⁵⁾할 수 있도록 설계한 dish-type 의 2 종류를 사용해 실험을 했다.

2. 실험장치 및 실험방법

실험용 기관은 STD-75形(三菱)水冷 單실린더 4 사이클 기관으로 Fig. 1은 실험기관을, Table 1은 제원을 각각 나타낸다. 이 기관은 원래 예연소실식 이었으나 副室을 빼어내고 주분사 노즐을 예연소실부에 설치하여 Fig. 2처럼 plate-type 의 직접 분사식 기관으로 개조했다. 또 보조분사노즐은 실린더블록(cylinder block)의 spacer에 설치하여 실린더內의 임의의 위치에 보조연료에 의한 희박예혼합기를 형성시킬 수 있도록 했다. 主 및 보조연료는 경유로써 어느 것이나 long-hole 노즐을 사용해 분사했으며 Fig. 4이하의 그림에서 실선은 主噴射방향을, 파선은 補助噴射 방향을, 선의 수는

Table 1 Specification of STD 75type engine

Purpose	Performance testing
Bore/stroke	96/105mm
Stroke volume	760cm ³
Compression ratio	14
Nozzle holes	2 or 3
Spray angle	72° or 2×35°
Nozzle opening pressure	200kg/cm ²

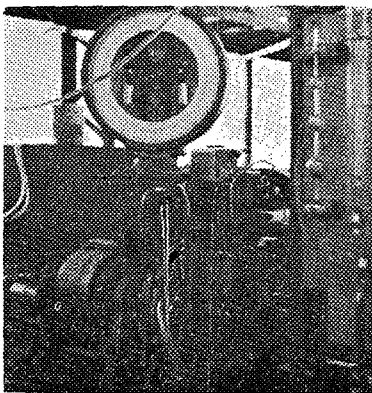


Fig. 1 General view of experimental apparatus

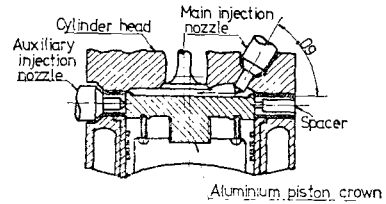


Fig. 2 Shape of combustion chamber of test engine and location of nozzles in it (Plate-type combustion chamber)

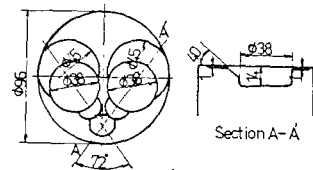


Fig. 3 Shape of dish-type piston

노즐의 孔數를 나타낸다. 또 보조분사에 의해 형성되는 희박예혼합기의 분포위치도 대략 표시 하였다. 負荷의 조정은 보조분사량은 일정(약 15mg/st)하게 하고 주분사량만을 변화 시켰으며 분사시기는 주분사는 23° BTDC, 보조분사는 65° BTDC로 했다. 또 Fig. 3의 dish-type 연소실은 주분사時 2孔 노즐을 사용하면 분무는 凹部의 中心을 통과한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 연소에 미치는 희박예혼합기의 영향

실린더內 연소과정의 고속도 사진은 主 및 보조분사의 방법이 Fig. 2와 유사한 schnürle scavenge-type 2사이클 기관을 사용하여 촬영 했다. Fig. 4는 발화핵의 분포상태를 알 수 있는 화염사진의 一例이다. 공기의 亂流가 거의 없는 plate-type 연소실에 3孔노즐을 사용하여 主噴射만을 하면, 多量의 연료가 노즐 부근에서 농혼합기를 형성시킨다. Fig. 4의 (a)에 의하면 이 경우의 연소화염은 노즐부근에서 圓形에 가깝게 형성된다. 산소와의 접촉면적이 작기 때문에 화염內에는 多量의 遊離炭素가 발생하고 화염은 현저하게 밝다. 圓周部에서의 연소는 급격히 이루어지나 中心部로 갈수록 酸化가 늦어 殘光期間은 길다. (b)는 보조연료에 의해 主噴霧의 근처에 미리 희박예혼합기를 형성시켰을 때의 화염 사진이다. 이 경우, 화염은 圓錐形을 형성하고 화염內에는 주분사만을 했을 때보다 廣範圍에 걸쳐 同時に 매우 많은 발화핵이 발생된다. 그러므로

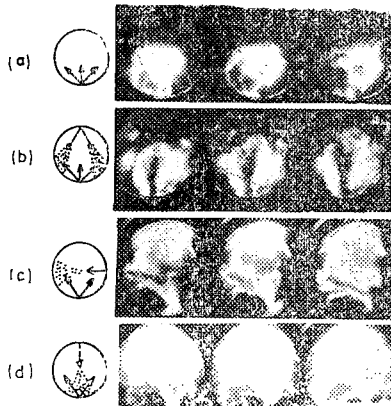


Fig. 4 Photographies of combustion flame for various lean premixture locations in plate-type combustion chamber

Main fuel: 28.0mg/st, Auxiliary fuel: 8.0 mg/st, Engine speed: 1100rpm, Photospeed: 5000frames/sec.

殘光의 消滅은 (a) 경우보다 약 30° 빨라진다. (c)처럼 주분사에 2孔노즐을 사용하여 그 한쪽의 주분무에 보조분사를 하는 경우에는 미리 회박에혼합기가 존재하는 주분무의 좌측편이 광범위에 걸쳐 발화핵이 발생한다. 그러나 우측편의 화염은 실린더벽에 부딪혀 화염의 발달은 매우 나쁘다. 따라서 분무의 殘光期間은 분명히 좌측편보다 길어진다. (d)는 비교적 발화핵의 발생이 어려운 主噴霧의 根源에 회박에혼합기가 형성된 경우의 화염사진이다. 이 경우 발화핵의 발생은 (c)보다 1°~2° 늦어지나 발화핵의 분포는 兩噴霧의 넓은 영역에 확대되어 殘光期間은 (c)보다 짧다.

3.2. Plate-type 연소실에 있어서의 회박에혼합기의 위치가 기관성능에 미치는 영향

실험기관에 plate-type 연소실을 장치하여 회박에혼합기가 기관성능에 미치는 영향을 조사했다. 一例로써 제동평균유효압력 (Pe) 곡선과 排氣煙濃度(Sd) 곡선을 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 5에 의하면 연료분사량(주분사량 및 보조분사량의 합)이 40mg/st 이하에서는 보조분사없이 주분사만을 2孔노즐로, 또 25 mg/st 이하에서는 보조분사없이 주분사만을 3孔노즐로 분사했을 경우의 제동평균 유효압력이 보조분사를 실시했을 경우의 제동평균 유효압력보다 높음을 알 수 있다. 이와같이 中·低負荷에서는 연소에 관여치 않은 보조연료가 상당량 있다. 이 연소에 관여하지 않은 연료는 低溫의 실린더벽에 부착되었던 보조연료중 증발이 늦었던 一部가 未燃燒의 상태로 배출 되었다고 생각되

어진다⁶⁾. 이 양은 高 부하 상태에서는 약 10mg/st, 2kg/cm²의 부하에서는 약 8mg/st이다. 따라서 이와 같은 中·低부하영역에 있어서는 보조분사에 의해 얻을 수 있는 효과(예를들어 화염이 연소실丙에서 확산되는 효과, 즉 산소이용도의 개선보다 연소에 관여치 않은 연료의 増量에 의해 제동평균 유효압력은 低下)가 별로 없었다. Fig. 4의 (a)에서 나타낸 바와 같이 주분사에 3孔노즐(噴射角 35°×2)을 사용하면 연소화염의 발달이 극히 나빠진다. Fig. 5의 Pe 곡선에 의하면 주분사노즐을 2孔노즐에서 3孔노즐로 바꿈에 따라서 일어나는 Pe의 저하는 약 1.5kg/cm² 이상이 된다. 또 주분사에 3孔노즐을 사용하여 주분무 방향에 對한 여러 위치에서 회박에혼합기를 공급하여 보았으나 그 효과는 별로 없었다. 一例로써 주분사의 정면방향에서 2孔노즐로써 보조분사한 경우만을 Fig. 5에 나타내었다. 이 방법은 주분사에 3孔노즐을 사용하는 경우에 있어서 가장 효과적이었다. 그러나 Pe의 개선은 많아야 0.5kg/cm²에 불과하다. 주분사에 2孔노즐(噴孔角 72°)을 사용한 경우는 주분사와 같은 방향에서 보조분사하는 방법을 제외하고는 비교적 높은 Pe를 얻을 수 있다. 특히 주분사의 정면방향에서 單孔노즐로 보조분사를 해서 회박에혼합기를 주분무의 根源부분에 형성시키는 경우의 효과가 가장 현저 하였다. 이것은 Fig. 4(d)에서 밝혀진 바와 같이 발화핵이 주분무의 넓은 영역에 걸쳐, 특히 噴孔 근처에서도 발생하기 때문이다.

보조분사의 방향과 smoke meter로 측정된 排氣煙濃度와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 배기연 농도는 어떤 분사법에 의해서도 분명히 개선 되었으나, 이것

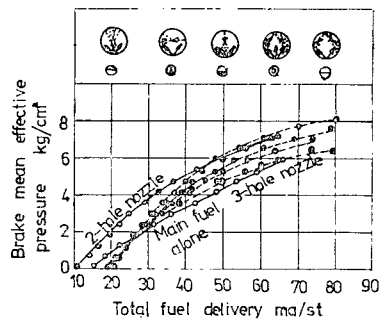


Fig. 5 Effect of total fuel delivery rate on the brake mean effective pressure for various lean premixture locations in plate-type combustion chamber

Auxiliary fuel delivery: 14.4mg/st, Engine speed: 1200rpm, Compression ratio: 15.0

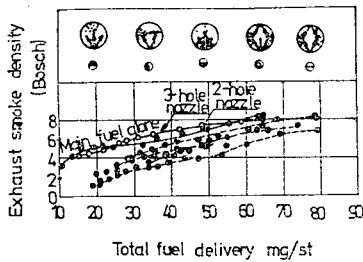


Fig. 6 Effect of total fuel delivery rate on the exhaust smoke density for various lean premixture locations in plate-type combustion chamber

Auxiliary fuel delivery: 14.4mg/st,
 Engine speed: 1200rpm,
 Compression ratio: 15.0

역시 Fig. 4 (d)와 같이 주분무의 정면방향에서 單孔노즐로 주분무의 根源부분에 희박에혼합기를 형성 시켜주는 방법이 가장 효과적이었다. 그러나 逆으로, 처음부터 霧化가 잘 되는 주분무의 先端部에 보조연료에 의한 희박에혼합기를 공급한다면 배기연 농도의 저하는 기대되지 않는다.

또 주분사의 정면방향에서 2孔노즐을 사용해서 보조분사하는 경우에는, 주분사 노즐은 2孔 노즐보다 3孔 노즐을 사용하는 편이 배기연 농도의 저하에 효과적이다.

3. 3. Dish-type 연소실에 있어서의 희박예혼합기의 위치가 기관성능에 미치는 영향

前記의 plate-type 연소실에서는 혼합기형성에 와류 및 스쿼시의 助長작용이 없었기 때문에 最低燃費는 270 g/ps-h 이나 되었다. 그러나 이 章에서는 피스톤 頂部에 凹面을 만들어 제동평균 유효압력과 배기연농도에 미치는 보조분사의 효과에 對하여 조사했다. Figs. 7, 8, 9 는 그 결과의 一例이다. Fig. 9에 의하면 plate-type 연소실에서는 현저하게 燃費가 높았던 3孔노즐 분사도 스쿼시의 효과에 의해 혼합기형성이 助長되어 燃費는 2孔 노즐분사 보다 오히려 약간 낮아졌으며 最低燃費는 4~6kg/cm²의 부하 영역에서 약 220g/ps-h 이었다. 이와같이 主噴霧전체가 凹部로 들어가는 2孔 노즐분사보다도 가운데의 분무가 피스톤면과 충돌해서 微粒化되는 3孔 노즐분사가 예혼합기의 量이 증가하고 6.5 kg/cm²를 넘지 않는 부하에서는 燃費가 개선된다. 한편 Pe가 6.5kg/cm² 이상인 고부하에서는 실린더內的 공기를 가능한한 이용할 수 있도록 분사하는 편이 높

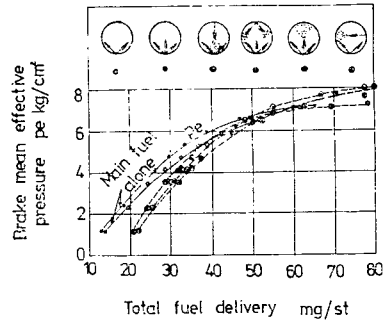


Fig. 7 Effect of total fuel delivery rate on the brake mean effective pressure for various lean premixture locations in dish-type combustion chamber

Auxiliary fuel delivery: 14.3mg/st,
 Engine speed: 1100rpm,
 Compression ratio: 15.7

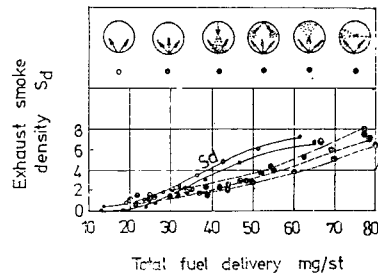


Fig. 8 Effect of total fuel delivery rate on the exhaust smoke density for various lean premixture locations in dish-type combustion chamber

Auxiliary fuel delivery: 14.3mg/st,
 Engine speed: 1100rpm,
 Compression ratio: 15.7

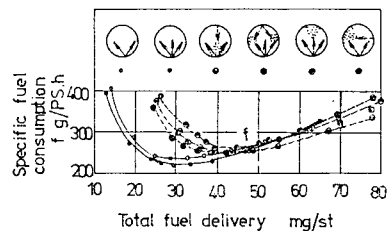


Fig. 9 Effect of total fuel delivery rate on the specific fuel consumption for various lean premixture locations in dish-type combustion chamber

Auxiliary fuel delivery: 14.3mg/st,
 Engine speed: 1100rpm,
 Compression ratio: 15.7

은 제동평균 유효압력을 얻을 수 있다. 예를들면, 주분사를 2孔 노즐로 하고 보조분사를 병행해서 주분사 노즐의 根源부분 및 前方에 연료를 분산 하도록 하는 방법을 이용하면 8kg/cm² 이상의 높은 평균유효압력을 얻을 수 있다. 또 2孔 노즐의 좌측 주분무에만 보조분사하는 방법과 3孔 노즐의 주분무 정면에서 2孔 노즐로 보조분사하는 방법등은 凹部에 있어서의 공기과잉율이 낮아져 제동평균유효압력의 最大值는 0.5kg/cm² 이상 감소한다.

Plate-type 연소실에 있어서는 배기연 농도가 거의 2를 넘었으나 dish-type 연소실에 있어서는 4kg/cm² 정도의 부하까지는 보조분사없이 주분사만을 하여도 배기연 농도를 2 이하에서 억제시킬 수 있다. 여기에는 보조분사를 병행시키면 그 운전범위를 6kg/cm²까지 확대시킬 수 있다. 직접분사식 디젤기관에 보조분사를 병용했을 때의 배기연 농도는 主噴霧로부터 발생하는 排煙에 의해 결정된다. 그러므로 배기연 농도를 개선하는 방법으로는 보조분사법 보다도 와류 및 스퀘시를 이용하여 주분무로부터 排煙을 가능한 한 줄이는 것이 효과적이라고 말할 수 있다.

3. 4. 배기가스중의 NO 농도

CO 나 HC 가스는 불완전 연소에서 연소가스의 온도가 비교적 낮을 때 다량으로 발생되는 것이나, NO는 대기중의 질소와 산소가 연소과정중 고온에 의해 결합되어 발생하고, 이것이 대기중으로 방출되어 서서히 NO₂ 및 다른 질소산화물로 변화한다. 즉 NO의 발생량은 연소온도가 높을수록 증가하므로 CO 나 HC와는 정반대이다. 따라서 그 대책도 대단히 곤란하다.

이 章에서는 직접분사식 디젤기관에 있어서 배기가스중의 NO 농도가 주분무의 연소과정에 의해 얼마만큼 영향을 받는가를 알아보기 위하여 보조연료의 종류 및 주분무의 방향에 대한 회박예혼합기의 위치를 변화시켜, 배기가스중의 NO 농도를 측정했다. Fig.10은 plate-type 연소실을 사용하여 5 종류의 보조연료를 주분무의 根源부분에 보조분사 시켰을 때의 배기가스중의 NO 농도에 미치는 영향을 조사한 一例이다. P. Eyzat의 보고⁷⁾에서도 밝힌 바와 같이 총분사량이 약 20mg/st를 넘지 않는 저부하 영역에서는 보조분사를 해서 예혼합기량을 증가시키면 일반적으로 NO 농도는 낮아진다. 한편 고부하 영역(Pe 5kg/cm² 이상, 총분사량 40mg/st 이상)에서는 逆으로 보조분사를 실시한 경우가 분명히 NO 농도가 높아진다. 그러나 메틸알코올과 같은 기화열이 큰 연료 또는 경유와 같이 沸點이 높

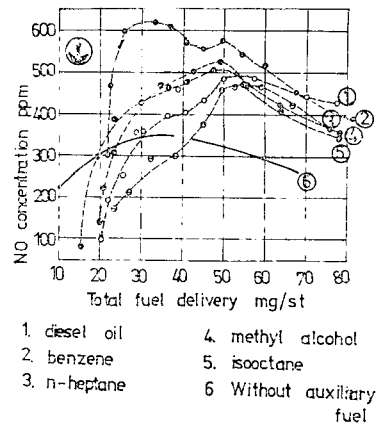


Fig. 10 Effect of total fuel delivery rate on the NO concentration for kinds of auxiliary fuel in plate-type combustion chamber
Auxiliary fuel delivery: 16.8mm³/st,
Engine speed: 1200rpm,
Compression ratio: 15.0

고 기화량이 적은 연료를 보조연료로서 이용하면 이 영역내에서도 비교적 낮은 NO 농도로 운전 가능하다.

또 총분사량이 20~50mg/st의 中負荷 영역에서는 보조연료의 종류에 따라서 NO 농도에 현저한 차가 생긴다. 예를들어 벤젠 및 이소옥탄(isooctane)처럼 열역학적으로 안정된 탄화수소를 예혼합기로 이용하면 예혼합기가 주분무로부터 발생하는 발화핵에 의해 상사점부근에서 일시적으로 전파, 착화되어 最高壓의 상승에 相伴하여 NO 농도는 높아진다. 또 총분사량이 50 mg/st를 넘는 고부하 영역에서는 보조연료의 종류에 의한 영향이 적으며 NO 농도는 일반적으로 저하되는 경향이 있다. 그것은 대부분의 보조연료가 주분무의 연소 이전에 먼저 타버리기 때문인 것으로 예상된다.

Fig. 11은 보조분사노즐의 孔數 및 설치위치를 바꿔서 보조연료에 따른 예혼합기의 분포상태가 NO 농도에 미치는 영향을 조사한 一例이다. 단 보조연료는 경유를 사용하고 그 분사량은 14.6mg/st로 일정하게 했다. 그 결과를 요약하면

i) 보조연료에 의한 예혼합기를 형성시킨 위치가 주분무가 전혀 도달할 수 없는 장소이거나 주분무의 先端部처럼 회박한 예혼합기가 발생되는 지역이면 주분무만을 했을 경우와 거의 같은 정도의 NO 농도로 된다. 그것은 보조연료가 공기과잉상태하에서 연소되어 그 연료로부터는 NO가 거의 배출되지 않는 것으로 생각된다.

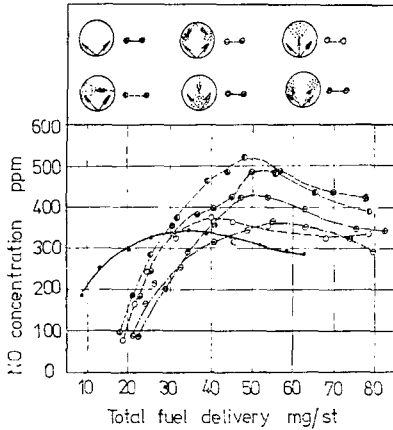


Fig. 11 Effect of total fuel delivery rate on the NO concentration for various lean premixture locations in plate-type combustion chamber

Auxiliary fuel delivery: 14.6mg/st,
Engine speed: 1200rpm,
Compression ratio: 15.0

ii) 역으로, 보조연료에 의한 예혼합기를 형성시키는 위치가 주분무의 根源부분 및 선단부 이외의 장소이면 일반적으로 NO 농도는 높아진다. 특히 한쪽편의 주분무에 수평으로 보조분사를 했을 때와 같이 주분무로부터 농후한 혼합기가 발생하는 지역에 더욱 보조연료를 공급하면 더욱 더 NO 농도가 높아지고 가스가 배출된다.

4. 결 론

이상과 같이 직접분사식 디젤기관의 연소를 개선하기 위하여 실린더內的 연소상태를 여러가지로 변화시켜 火炎의 발달상태와 기관성능과의 관계를 밝힌 본 고찰에서 얻은 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 주噴霧의 燃燒以前에 희박예혼합기가 공급되었을 경우, 발화핵은 주분무의 도처에서 발생하고 그 발생범위도 보조분사를 하지 않은 경우보다 현저히 넓다. 또 火炎의 근처에도多數의 粒狀의 발화핵이 형성되는 일이 많다.

(2) 직접분사식 디젤기관에 있어서는 보조연료에 의한 희박예혼합기와 주분무와의 접촉이 副室式 디젤기관 만큼 밀접하게 되지 않으므로 그 접촉방법에 따라서 기관성능에 현저한 差가 생긴다. 그러나 기본적

으로는 주분무內에서도 연소가 곤란한 부분, 즉 噴孔에 가까운 부분의 연소를 개선시킬 수 있도록 접촉시키는 방법이 기관출력, 배기연농도 등의 개선책으로 유효하다.

(3) 배기연농도의 低減에 있어서는 豫混合 然燒量을 가능한 한 증가시키는 것이 유리하다. 따라서 와류 및 스퀴시의 필요성에 대해서는 말 할것 조차 없다. 또 排煙의 대부분은 분무의 主流部로부터 발생하는 것이므로 이 부분의 연료 밀도를 희박하게 할 필요가 있다.

(4) 보조연료에 의한 예혼합기의 反應性과 주분무에 대한 위치관계를 변화시켜서 배기가스中の NO 농도에 미치는 영향을 조사한 결과

i) 일반적으로 豫混合 燃料量이 증가하는 만큼 배기가스中の NO 농도는 높아진다. 특히 주분무內에서도 연료밀도가 높은 장소에 보조연료를 공급하면 NO 농도는 더욱 높아진다.

ii) 6kg/cm²를 넘지 않는 부하에서는 예혼합기가 열역학적으로 안정되어, 즉 열분해가 일어나기 어려운 만큼 배기中の NO 농도는 높아진다. 그러나 6kg/cm²를 넘는 고부하에서는 예혼합기 반응성의 영향은 거의 없다.

참 고 문 헌

1. 長尾不二夫, "內燃機關講義", 上卷, pp. 278~281, 養賢堂, 1975
2. 內燃機關編集委員會, "內燃機關の燃燒", pp. 277~286(齊藤 孟, 副燃料吸入による燃燒の改善), 山海堂, 1973
3. M. Alperstein, SAE Trans., Vol. 66, pp. 574, 1958.
4. B.S. Murthy, SAE J., Vol. 72, No. 4, pp. 60, 1964
5. 內燃機關編集委員會, "內燃機關の燃燒", pp. 270~276(池上 詢, 直接式噴射機關における燃燒), 山海堂, 1973
6. 平子・太田, "ディーゼル機關に及ぼす吸氣管內補助噴射の效果と燃燒室形狀の關係", 日本機械學會論文集, 36-281號, pp. 94-99, 1970-1
7. P. Eyzat and J.C. Guibet, SAE, Vol. 77, pp. 417, 1968.
8. 平子・太田, "ディーゼル機關における希薄豫混合氣の燃燒に及ぼす影響", 日本機械學會論文集, 39-322號, 1973-6