

<論 文>

高温空氣流에 噴射한 噴霧의 自然燃焼에 관한 研究

—第3報: 噴霧의 燃焼期間 測定, 補助燃料의 噴射時期 및
亂流가 噴霧의 着火遲延期間 短縮에 미치는 影響—

方 重 哲* · 太田 幹郎**

(1986年 2月 27日 接受)

A Study on the Spontaneous Ignition of the Fuel Injected into
a Hot Air Stream

—Part III: Measurement of Flaming Duration, Effects of Auxiliary-Fuel Injection-Timing
and Turbulence on Shortening the Ignition Delay Period—

Joong Cheol Bang and Motoo Ohta

Key Words: Flaming Duration(燃焼期間), Turbulence(亂流), Ignition Delay(着火遲延), Injection
Timing of Auxiliary(補助噴射時期), Ignition Nucleus(發火核)

Abstract

On the hypothesis that the unstable and stable intermediates yielded by the pre-reaction of auxiliary fuel become an initiator or an explosive center which promotes the chain reaction of main fuel, various organic compounds below C_{10} are injected as an auxiliary fuel prior to main injection. In the previous papers, the effects of the auxiliary fuel additions on the ignition delay period, the stability of flame, the NO concentrations in their exhaust gases have been investigated.

In the present paper, to confirm where the most suitable location of lean pre-mixture for the combustion of main fuel is, and how the lean pre-mixture is contacted with main fuel, the effects of the injection timing of auxiliary fuel and the turbulence on combustion processes are investigated.

Moreover, from the schlieren and color photographs of flame in the combustion field, it could be found that the ignition nuclei are formed in a wider region of main spray, and that these ignition nuclei promote the development of flame, which results in the reduction of flaming duration.

1. 序 論

디젤기관에 있어서의 착화지연기간은, 실린더 內

의 연소과정에 있어서는 물론이고 기관출력, 연소압
음, 배기가스성분등에 대해서도 큰 영향을 미치는 인
자이다. 더우기 디젤기관을 고속화 할에 있어서도
증대한 장애의 하나이다. 이 때문에 燃料噴霧의 착화
지연기간에 관련된 연구는 지금까지 많은 연구자에 의
해 밝혀져 왔다. 또한 연구의 手法으로서는 實用機關

* 正會員, 日本國 大阪府立大學院 工學研究科

** 日本國 大阪府立大學大學院 工學研究科

을 이용한 연구^(1~4), 衝擊波管을 이용한 연구^(5~7), 急速壓縮機를 이용한 연구^(8~9), 定容燃焼器를 이용한 연구^(10~13) 등을 들 수 있다. 그러나, 이와 같은 연구방법에서는 착화지연시간에 영향을 미치는 인자가 많고, 또 實驗機關이나 實驗條件의 相違등에 따라 반드시 再現性있는 연구성과를 얻었다고 볼 수 없다.

본 연구는, 디젤기관의 실린더 內 燃焼經過를 가능한 한 단순화 시켜 연소과정에 미치는 인자의 영향을 줄일 수 있는 高溫空氣流 덕트(hot air stream duct)를 실험장치로 사용한 것으로, 本報를 實用機關의 실린더 內 燃焼改善에 목적을 둔 한 연구의 결과로서 보고한다.

제 1 보⁽¹⁴⁾와 제 2 보⁽¹⁵⁾에서는 고온공기류 덕트 內에 분사한 噴霧의 착화지연시간 측정방법 및 補助燃料의 종류에 따라 착화지연시간이 어느 정도 단축 되는가에 중점을 두고 보고했다.

본 연구에서는, 主噴霧의 착화지연시간에 미치는 보조연료 분사시의 영향 및 空氣流動을 燃焼場 內에 導入시켜 분부와 공기의 혼합을 적극적으로 촉진시킴에 따라 그 후의 연소과정이 어떤 영향을 받는가에 대해서 검토했다. 또 소형고속 디젤기관에서는 분부의 燃焼期間을 최대한 단축 시키지 않으면 안되므로, 보조연료 분사에 의해 그 단축목적어 어느 정도 달성될 수 있는 가능성을 제 2 보에서 示唆한 바 있으나 본 연구에서 더욱 상세히 검토했다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2.1 高溫空氣流 덕트

고온공기류 덕트는 前報^(14~15)에서 상세히 記述했으므로 구조 및 작동방법에 대해서는 생략한다. 이 장치는 B.P. Mullins⁽¹⁶⁾가 사용했던 가스터빈 연소기用 실험장치에 유사하게 시험제작한 것으로, 본 실험에 있어서는 일차연소기의 後方 4m를 스테인레스鋼으로 교체, 덕트 內의 공기온도가 1000°C 이상의 고온에서도 長時間 데이터 측정이 가능하도록 개량했다.

2.2 亂流 發生裝置

燃焼場 內에 설치한 亂流(turbulence) 발생장치의 概略圖와 설치위치를 Fig. 1에 나타낸다. 이 亂流발생장치는 2次元 流路內에 한개의 圓柱를 고정시킨 단순한 形狀의 것으로, 圓柱後方의 還流영역에 保持되는 화염의 구조를 쉽게 관찰할 수 있다. 또 원주의 고정위치와 원주의 직경을 변화시킴에 따라 亂流의 발생위치

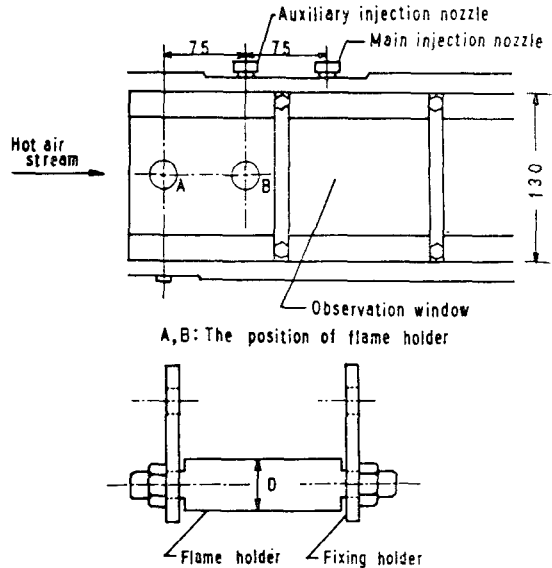


Fig. 1 Side view of rod turbulence device

및 강도를 광범위하게 바꿀 수 있다.

한편, 이 亂流影響下에 있어서의 착화지연시간 측정에서는, 보조분사 노즐을 主분사 노즐의 前方上部에 부착시켜 還流영역 內에서 主燃料과 補助燃料間의 접촉시간이 가능한 한 길어질 수 있도록 하였다.

2.3 Schlieren 寫眞裝置

본 연구에서는 보조연료 분사에 의한 착화지연시간의 단축효과와 反應의 見地로부터 본 보조연료의 役割 및 관련성을 더욱 명확히 하기위해, 主燃料과 補助燃料의 接觸狀態 및 화염의 발달상태등을 Schlieren 사진으로 부터 관찰했다.

Schlieren 사진法은 밀도의 차이에 따라 광선의 굴절율이 달라지는 것을 이용한 방법으로, 流域의 定性的인 특성을 조사하는데 적합하다. Fig. 2에 Schlieren

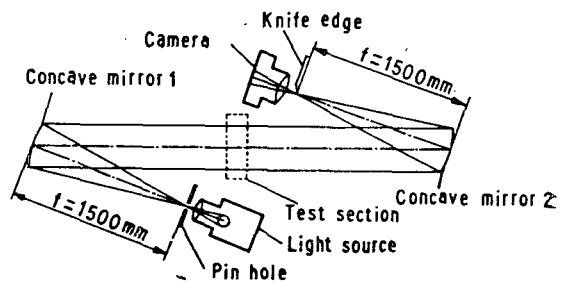
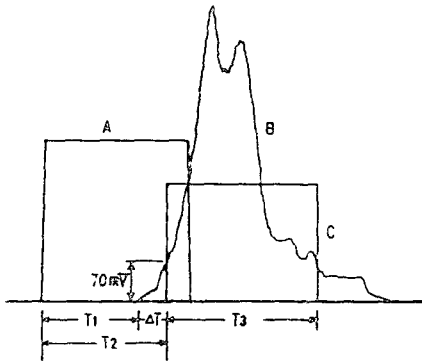


Fig. 2 Optical system of the two-mirror type schlieren photography



A : Proximity switch output
 B : Photo diode output
 C : Schmidt circuit output
 T_1 : Practical ignition delay
 T_2 : Ignition delay period in this experiment
 T_3 : Flaming duration in this experiment

Fig. 3 Example of measurement of ignition delay period and flaming duration

사진 촬영장치의 光學系를 나타낸다. 2 장의 凹面鏡은 유효직경이 150 mm 로, 초점거리는 1500 mm 이다. 사진촬영은 35 mm 카메라에 초점거리 135 mm 의 망원 렌즈를 붙여 사용했다.

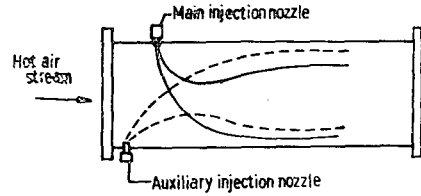
2.4 計測裝置 및 計測方法

착화지연기간의 計測시스템 및 計測방법도 제 2 보에서 소개한 바와 같으므로 本報에서는 생략한다. 그러나, 연소기간의 측정에는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 70 mV 에서 작동하는 슈미트 회로(Schmidt circuit)의 ON-OFF 출력을 時間間隔測定用 출발(start) 및 정지(stop) 신호로서 이용했다. 단, B 출력은 600 nm 이상인 熱炎의 光量변화에 의해 얻어지는 것이므로 엄밀히는 熱炎의 燃焼期間(以下 燃焼期間으로 칭함)을 측정할 것이 된다. Fig. 3에 의하면, 이 방법으로 측정된 착화지연기간은 슈미트 회로에서 방아쇠(trigger) 전압이 걸릴때 까지의 시간차(ΔT)만큼 길게 計測되고, 반면 연소기간은 이 시간차 만큼 짧게 計測됨을 알 수 있다.

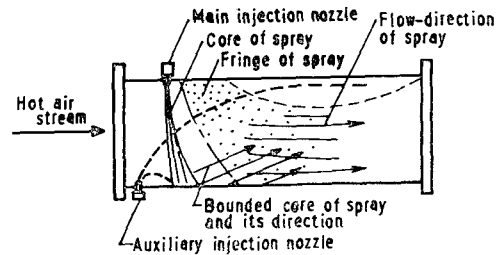
3. 實驗結果 및 考察

3.1 補助燃料을 噴射한 경우의 燃焼反應領域

제 2 보에서는 보조연료에 의해 형성된 稀薄予混合氣의 緩慢酸化 또는 熱分解에 의해 생긴 中間生成物(inte-



(a) The spray flux imaged before



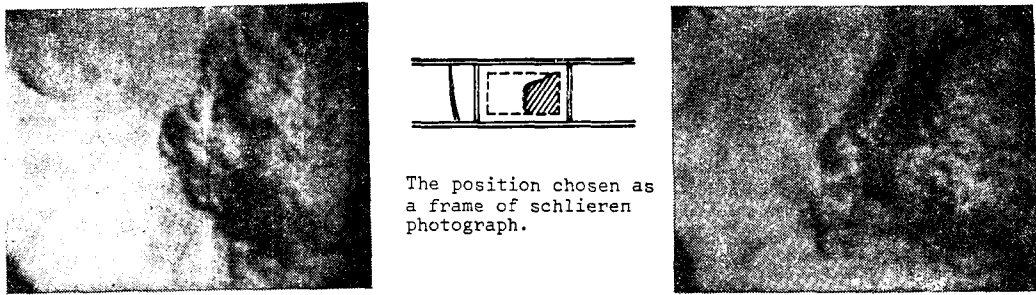
(b) The spray flux confirmed from photographs

Fig. 4 Main spray flux interfered with auxiliary spray in hot air stream duct.

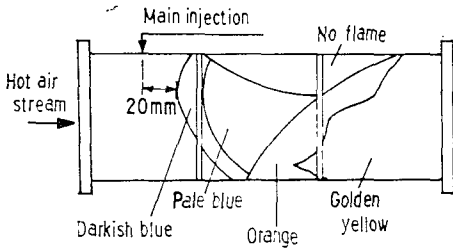
rmediates)이 主燃料의 연소반응을 촉진시키는 起爆劑의인 役割을 할 가능성에 대해서, 熱力學的 安定度^(15,17) 및 C-H 結合의 解離에너지^(15,18)가 다른 C_{10} 이하의 탄화수소를 主噴霧의 前方에 분사해서, 착화지연기간의 측정결과로 부터 고찰했다.

本報에서는, 보조연료를 분사함에 따라 主噴霧의 연소영역이 어떻게 변화하는가를 Schlieren 사진 및 통상의 켈러사진으로부터 상세히 검토한다. Fig. 4(a)는 前報까지 예상했던 덕트内の 主噴霧와 補助噴霧의 접촉상태이다. 여기에서, 主噴霧에 닿는 광선의 入射角을 적절히 조절해서 연소과정을 1/60 초 정도의 섀터속도로 촬영하면 主噴霧의 主流部를 촬영할 수 있다. Fig. 4(b)에 그 개략을 나타낸다. 主噴霧는 분사압이 10 MPa 에 달하기 때문에 예상보다는 고온공기류에 흘러가지 않고, 主流部는 거의 수직으로 분사되어 덕트벽에 충돌한 뒤, 미립화되어 덕트 중앙부로 되돌아옴이 확인되었다. 또 噴霧의 主流로 부터 浮遊된 飛沫部가 노즐의 先端에서 부터 형성되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 5 와 Fig. 6 은 덕트内の 같은 공기온도에 있어서 主噴射만을 한 경우와 보조연료를 噴射한 경우의 Schlieren 사진 및 직접 켈러사진의 개략도이다. 勵起된 포름알데히드 분자의 失活에 의한 發光이라고 생각되는 冷炎 또는 靑炎의 발생域은 포토·다يو우드로 써는 검출할 수 없으나, 켈러사진에서는 충분히 확인된다. Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 主噴射만을 한 경우



(a) Schlieren photograph (shutter speed, 1/1000)



(b) Direct photograph (shutter speed, 1/60)

Fig. 5 Schlieren and color photographs of flame in the combustion field (main fuel alone, at 850°C)

에는, 噴霧 主流部の 後方 約 20 mm 의 위치에 관찰창의 上部로부터 下部에 걸쳐 靑炎이 발생하고 있다. 또 後方 約 80 mm 의 위치에 발생한 오렌지색의 화염은 熱炎이라고 생각할 수 있으므로, 靑炎의 대부분은 噴霧의 飛沫部로부터 발생한 것으로 보아도 좋을 것이다. 한편, Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 低沸點의 탄화수소를 보조분사한 경우는, 보조연료가 고온공기와接觸하는 순간 靑炎을 발생하며 타기 시작해 덕트內에 부채形狀으로 퍼져있고, 이 부채형의 靑炎이 主噴霧의 飛沫部와 接觸해서 熱炎을 발생하고 있다. 따라서, 主噴射만을 한 경우에 있어서는 熱炎이 발생되지 않았던 영역, 예를 들면 두번째 관찰창과 세번째 관찰창의 上部에도 熱炎이 발생되어 있음을 볼 수 있다. 다른 한편, Schlieren 사진의 오른쪽에 발생되어 있는 雲影의 발달상태가 직접사진의 輝炎의 발달상태와 잘 對應하고 있는 점으로부터, 이 雲影은 主燃料의 발열반응에 의해 생긴 溫度勾配에 의한 것으로 생각된다. 또 雲影部에 띠(帶)狀으로 연결된 검은 부분은 연소에 의한 강한 발광 때문에 생긴 것으로 생각된다. 이 熱炎의 발생영역은 보조연료를 분사한 Fig. 6 의 경우가 훨씬 범위가 넓고, 또 발생시기도 명백히 따름을 알 수 있다. 더우기 이 雲影은 보조연료의 稀薄予混合氣가 존

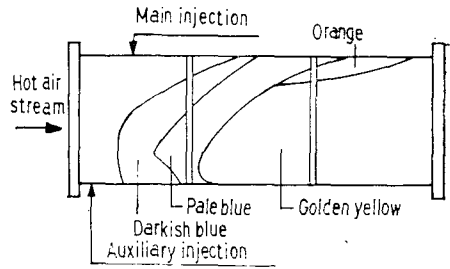
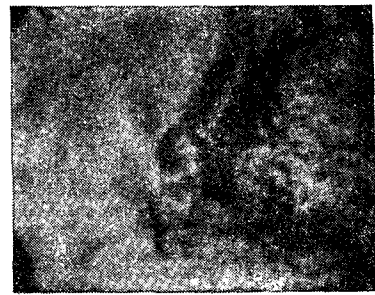


Fig. 6 Schlieren and color photographs of flame in the combustion field (with *n*-heptane as an auxiliary fuel, 850°C)

재하는 편이 잘게 형성되어 있고, 사진 오른쪽의 관찰창 이음매 부근에 그 특색이 잘 나타나 있다.

한편, 컬러사진에서는 관찰가능한 靑炎영역이 Schlieren 사진에서는 판정되지 않으므로, 靑炎영역은 비교적 발광이 적기 때문에 온도구배가 거의 생기지 않았던 것으로 사료된다. 단, Schlieren 사진의 중앙부에 나타나 있는 가는 線들은 耐熱유리의 연마흔적이 남은 것이다.

3.2 主噴霧의 燃燒期間에 미치는 補助燃料噴射의 影響

實用 디젤기관을 개조한 실험용 기관에 보조연료를 분사한 결과, 착화지연기간의 단축 이외에 연소기간이 현저하게 단축된 것도 특징이었다⁽¹⁹⁾. 또 이것은 主噴射에 앞서 분사된 보조연료가 연소실의 전역에 얇게 퍼져있어, 보조연료의 量에 해당하는 만큼 主燃料 量을 줄일 수 있으므로 高負荷時, 즉 공기과잉율이 1 에 가까울 때의 後燃燒期間을 단축시킬 수 있는 방법의 하나이기도 하다.

Fig. 7 은 代表的인 탄화수소를 보조연료로 사용해서, 분위기온도에 따라 主燃料의 燃燒期間이 어떻게 변화하는가를 나타낸 것으로, 1000 개 分の 연소기간

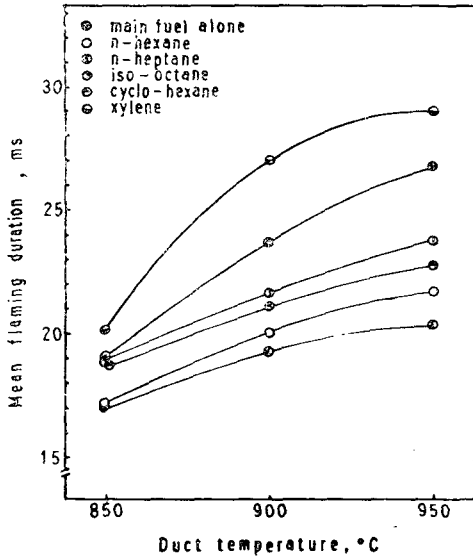


Fig. 7 Comparison of mean flaming duration among various auxiliary fuel additions
Main fuel delivery : 49mm³/st
Auxiliary fuel delivery : 10 mm³/st
Fuel pump speed : 720 rpm
Timing of auxiliary injection : 20°
CA before main injection

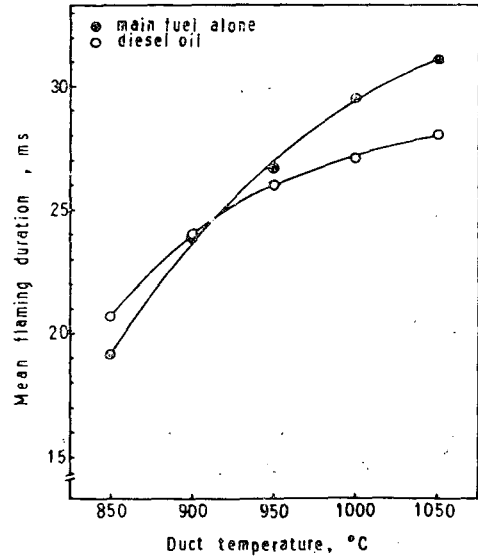


Fig. 8 Comparison of mean flaming duration between main fuel alone and diesel oil as an auxiliary fuel
Main fuel delivery : 49 mm³/st
Auxiliary fuel delivery : 10 mm³/st
Fuel pump speed : 720 rpm
Timing of auxiliary injection : 20°
CA before main injection

을 평균해서 구한 것이다. 또 輕油처럼 沸點이 높고 Fig. 7에서 사용한 보조연료에 비해 기화성이 좋지 않는 연료의 경우는 物理的 착화지연이 길기 때문에 Fig. 8에서 主燃料만을 분사한 경우와 같이 비교했다.

고온공기류 덕트를 사용해서 측정된 噴霧의 연소기간은 일반적으로 덕트內의 온도상승과 더불어 길어진다. 이것은 고온이 될수록 粒徑이 작은 噴霧의 飛沫部가 빨리 着火하고, 噴霧의 主流部와 後에 분사되는 噴霧는 산소농도가 감소된 下流로 흘러가 着火되는 것이 원인 이던지, 아니면 1次燃焼器에서 소비되는 산소량이 고온이 될수록 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 또, 좁은 연소실에 局部的으로 多量の 연료를 분사하는 실제의 디젤기관과는 달라 噴霧의 밀도가 實機에 비해 훨씬 낮고, 더구나 본 실험장치처럼 공기과잉율이 3前後의 과잉공기중에 연료를 분사하였으므로, 噴射量의 多少에 따른 연소기간은 實機에서 처럼 그다지 큰 영향을 받지 않을 것으로 생각된다. 그러나 보조연료별의 연료별의 연소기간을 同一溫度에서 상대적으로 比較함에는 Fig. 7 및 Fig. 8을 이용할 수 있다.

예를 들면,

(1) n-파라핀계의 탄화수소를 보조분사한 경우에는,

연소기간의 단축효과가 현저하다. 또 보조연료가 高分子化合物 일수록 그 효과는 크다.

(2) 시클로헥산이 연소기간의 단축에 미치는 효과는 n-파라핀 보다는 적고 iso-파라핀 보다는 조금 크다.

(3) 방향족 탄화수소는 C₃H₇(propyl 基)이상의 알킬(alkyl)基를 가지지 않는限 前炎反應은 일어나지 않는 것으로 알려져있다. 따라서 키실렌[C₆H₄(CH₃)₂]처럼 ·CH₃ 만을 가진 방향족 탄화수소를 보조분사 하면 연소기간은 반대로 길어진다. 이것은 보조연료의 蒸發, 氣化 및 熱分解 등에 熱이 빼앗겨 덕트內의 공기온도가 약간 低下된 것이 원인으로 생각된다.

(4) 輕油처럼 沸點이 높은 연료는 約 900°C 이하에서는 연소기간의 단축효과가 없고, 1000°C 를 넘는 고온에 있어서도 約 2~3 ms 의 단축에 지나지 않는다.

3.3 主噴霧의 着火遲延期間에 미치는 補助燃料 噴射時期의 影響

디젤기관에 보조연료를 분사하는 경우, 그 분사시기가 문제로 된다. 파일럿분사(pilot injection) 혹은 더블분사(double injection)의 경우에는, 主噴霧의 부근에

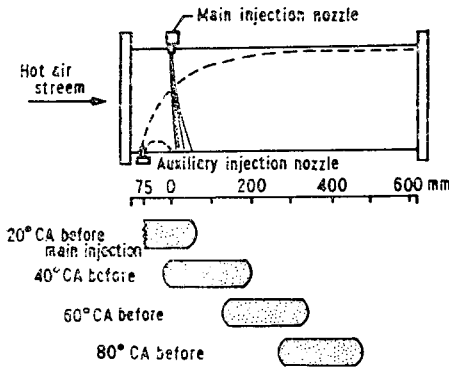


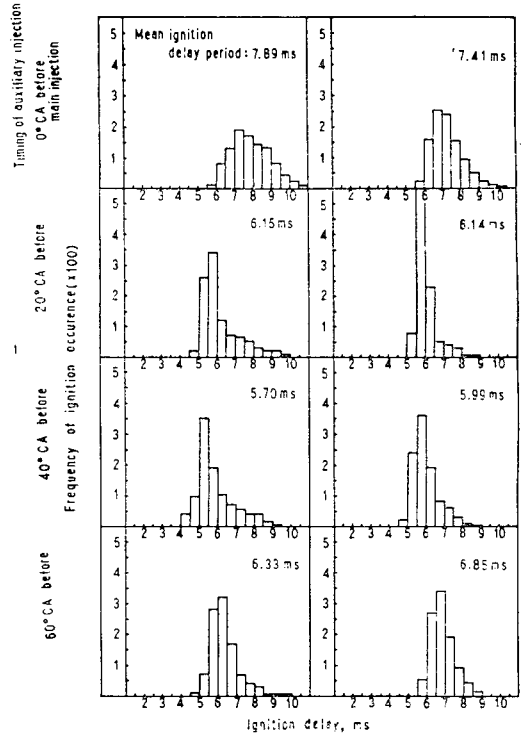
Fig. 9 The relative position of auxiliary spray to main spray with the timing of auxiliary fuel injection

補助燃料를 接觸시키는 의미도 있어 主噴射개시의 $90^\circ \sim 30^\circ \text{CA}$ 前이 적당하다⁽²⁰⁾. 또 Vigom process의 경우는, 배기가스의 열 에너지로 보조연료를 증발시키는 의미도 있어 밸브겹침 (valve over lap) 시기에 상당하는, 즉 330°BTDC 가 적당하다고 말하고 있다⁽²¹⁾.

그러나, 本節에서는 고온공기류 덕트에 의한 보조연료 분사시기의 영향을 조사했기 때문에 분사펌프 캠축의 각도는 특별한 의미를 갖지 못하나, 덕트내의 공기 유속(約 35 m/s)과 캠축의 회전속도(720 rpm)로부터 계산한 主噴霧와 補助噴霧의 상대위치는 대략 Fig. 9에 나타나는 바와 같다. 따라서 20° 前에 보조분사를 한 경우에는 보조연료가 主噴霧의 主流部 근처에 존재하고 있고, 40° 前에 보조분사한 경우에는 主噴霧의 飛沫部에 보조연료의 生成物이 존재하고 있는 것으로 예상된다.

Fig. 10에 보조분사시기를 캠축으로 20° 씩 변화시킨 경우의 착화지연기간 측정결과를 나타낸다. 보조연료로서는 沸點의 영향 및 착화성의 영향에 대해서 비교할 수 있도록 輕油와 n -헵탄을 선택, 덕트 온도를 930°C 로 지속시키면서 측정했다.

보조분사시기가 0° 前의 경우는, 主燃料와 補助燃料가 동시에 분사되어 보조연료로부터 형성된 豫混合氣는 아직 主噴霧의 위치에 도달하지 못한다. 따라서 이 경우의 착화지연기간은 主噴霧自體만의 착화지연기간에 상당하고, 착화시기는 5.5 ms 에서부터 11 ms 의 넓은 범위에 걸쳐 분포되어 있다. 또 Fig. 10에는 나타내지 않았으나 80° 前에 경유를 보조분사했던 결과, 逆으로 主噴霧의 後方에서 보조연료가 연소했다. 즉 主噴霧와 補助噴霧가 각각의 위치에서 착화하게 되어 본 연구의 착화지연기간 측정방법으로서는 그 착화가



(a) With diesel oil as an auxiliary fuel (b) With n -heptane as an auxiliary fuel

Fig. 10 The ignition delay period by the timing of auxiliary injection at duct temperature 930°C ($49 \text{ mm}^2/\text{st} + 10 \text{ mm}^2/\text{st}$)

主燃料로부터 발생한 것인지, 보조연료로부터 발생한 것인지의 구별이 되지 않았다. 한편, n -헵탄을 80° 前에 보조분사했던 결과는 主燃料만을 분사해서 얻은 착화지연기간과 별 차이가 없었다. 이것은 보조연료인 n -헵탄이 포토·다이오우드에는 감지되지 않을 정도의 弱光 아니면 靑炎을 발생하며 연소된 때문이라고 생각된다.

Fig. 10에 나타낸 결과를 상세히 검토하면,

(1) 輕油를 20° 前에 보조분사한 경우는, 補助燃料의 噴霧가 蒸發過程 初期의 主噴霧와 접촉하게 된다. 평균착화지연기간은 약 2 ms 단축되어 5.5 ms 에서 6.0 ms 의 사이에서 발생하는 빈도가 높아진다.

(2) 20° 前에 沸點이 낮은, 따라서 主噴霧와 접촉하는 시점에서 거의 混合氣의 상태라고 생각되는 n -헵탄의 경우는, 착화지연기간이 5.5 ms 에서 6.0 ms 의 사이에 집중되어 있어 輕油를 보조분사한 경우에 비해서 착화시기가 안정되어 있음을 알 수 있다.

Table 1 Test conditions to apply the turbulence in the stream

No.	1	2	3	4	5	6
Flame holder dia., mm		20	40	40		40
Distance from flame holder to main injection nozzle, mm		75	75	150		150
Auxiliary injection	without	without	without	without	with	with

(3) 40°前에 보조분사를 하면, 主噴霧의 主流部 및 飛沫部가 보조연료에 의해 형성된 혼합기에 둘러싸이는 상태일 것으로 예상된다. 착화시기는 輕油, n-헵탄 양쪽 모두 20°前 분사보다 0.5 ms 씩 빨라진다.

(4) 60°前 분사에서는 主噴射위치의 後方 약 130 mm 에서 약 340 mm 에 걸쳐 보조연료의 혼합기가 존재하게 된다. 따라서 n-헵탄처럼 빨리 증발되는 보조연료는 主噴霧의 下流로 흘러가 主噴霧의 연소에는 거의 영향을 미치지 못한다. Fig. 10에서는 평균착화지연시간이 0°前 분사에 비해 약 0.5 ms 단축되어 있으나, 이것은 管壁 근처의 유속이 낮은 영역에 보조연료의 혼합기가 존재했던 때문인지, 아니면 보조연료의 연소열에 의해 공기온도가 상승했기 때문일 것으로 생각된다.

(5) 沸點이 높고 또한 粘性이 큰 輕油를 60°前에 보조분사한 경우는, 補助噴霧의 粒徑이 크기 때문에 혼합기 형성이 늦어져 고속기류에 흘러가지 않은 부분이 主噴霧의 착화에 役割을 한 것으로 생각된다. 따라서 착화시기 및 평균착화지연시간은 n-헵탄의 경우에 비해 0.5 ms 이상 빠르다.

3.4 着火遲延期間의 短縮에 미치는 空氣亂流의 影響

혼합기 형성기간이 긴 가솔린기관은, 압축행정의 末期에는 거의 균일 혼합기가 형성되어 전체의 공기가 유효하게 연소에 관여한다. 한편 디젤기관처럼 압축행정의 末期에 연료를 분사하는 방식에서는, 油粒이 미치지 못한 장소에 존재한 공기는 연소에 이용되지 못하고 반대로 油粒이 밀집한 영역에서는 산소부족이 되어 불완전연소를 일으키게 된다. 따라서 분무를 燃燒室의 구석 구석까지 분산시키던지, 분무속에 공기가 導入될 수 있도록 해 줄 필요가 있다. 예를 들면, 직접분사식 디젤기관에 있어서의 혼합기 형성은 噴霧束의 분산 단으로서만 만족히 이루어지지 않고 흡입 또는 압축행정때 발생하는 空氣流動이나 연소가스流動에 따르는 연소渦流를 적당히 이용하지 않으면 안된다.

本節에서는, 고온공기류 덕트內에 직경 20 mm 와 40 mm 2 종류의 圓柱를 主噴霧의 前方 75 mm 또는 150 mm 의 지점에 설치, 主噴霧의 어느 위치에 공기의 亂流를 만드는 것이 가장 유효할 것인가를 검토했다. 또 고속기류中에 圓柱를 설치한 경우, 그 後方에 형성되는 還流영역에서는 主噴霧와 補助噴霧의 接觸시간이 길게 유지될 수 있으므로, 補助噴射의 有無에 따라 착화지연시간이 어떤 영향을 받는가에 대해서도 검토했다. Table 1 에 그 실험조건을 나타낸다. 또 보조연료로서는 主噴霧와 충분한 접촉시간을 유지할 수 있도록 輕油를 사용했다.

Fig. 11 은 고속기류中에 설치한 圓柱形保炎器에 의해 安定된 화염과 그 流域의 概念圖⁽²²⁻²³⁾이다. 혼합기의 속도가 연소속도 보다 빠를때는 원주의 바로 뒤에 再循環領域(recirculation zone)이 형성되고, 氣流와는 반대방향으로 발생된 渦流에 의해 上·下部의 新氣가 이 영역에 말려들어와 연소한다. 따라서 이 영역과 主流사이에서 형성되는 點線의 선단층에서는 未燃混合氣와 高溫燃焼가스의 혼합이 촉진된다.

Fig. 12 는 고온공기류 덕트內에 설치한 圓柱의 後方에서 亂流의 영향을 받으면서 연소하고 있는 부분의 輪리사진이다. 圓柱의 後方에는 微小한 渦狀의 靑炎이 수 많이 발생되어 이른바 Kármán 渦列(vortex streets)⁽²⁴⁾이 형성되었음을 알 수 있다. Fig. 12(a)에 나타난 바와 같이 원주직경이 가는 20 mm 의 경우에는, 착화지연시간이 긴 噴霧領域이 靑炎의 上·下部에 생기

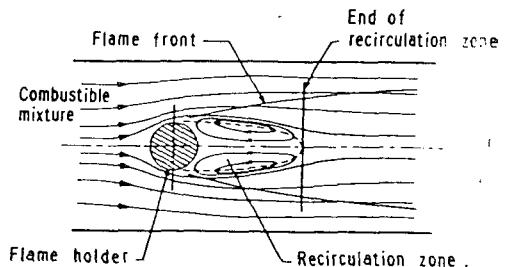


Fig. 11 General conception of rod-stabilized flame in combustible mixture

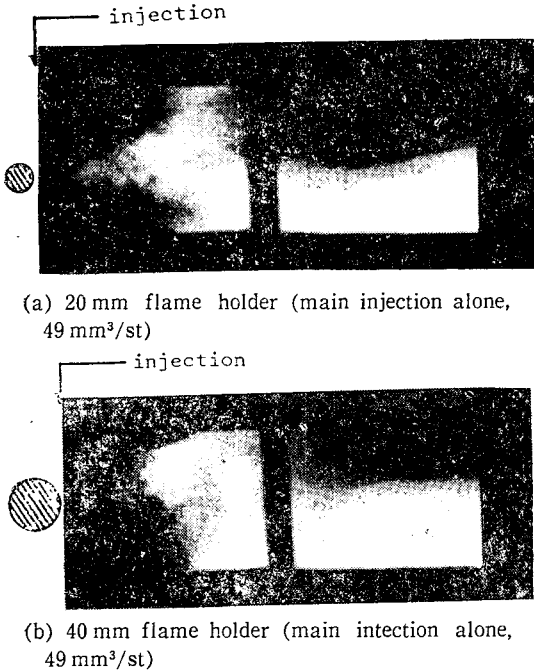


Fig. 12 The color photograph of flame influenced by turbulence

고 이 층에 있는 공기는 연소에 이용되지 않는 것으로 생각된다. 그러나, Fig. 12(b)의 경우처럼 원통직경이 40 mm로 좁아지면 원통後方의 Kármán渦域內에 착화지연기간이 단축된 靑炎이 발생한다. 따라서 연소에 이용되지 않은 空氣層이 감소된 것으로 생각된다. 이것은 원통의 後方에 형성되는 再循環領域이, 원통徑이 커질수록 덕트內의 넓은 영역을 차지해 연료분무와 공기와의 접촉면적 및 접촉시간이 증가된 것을 의미한다. 또 前記한 Fig. 5, Fig. 6과 Fig. 12를 주의깊게 比較해 보면 空氣流中에 亂流가 있는 경우에는 매우 짧은 착화지연기간을 거친 靑炎이 靑炎안에 발생되어 있음을 알 수 있다. 또 이 靑炎은 燃燒場의 亂流가 강할수록 현저하고, 이것은 油粒이 밀집된 곳에 새로운 공기가 導入되었음을 의미한다.

Fig. 13은 Table 1의 실험조건에 의해 측정된 평균 착화지연기간을 나타낸 것이다. Fig. 13에 의하면 착화지연기간은 원통의 직경에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있다. 원통직경이 큰 경우의 착화지연기간은, 亂流를 발생시키지 않은 상태에서 輕油를 보조분사한 경우의 착화지연기간과 거의 같다. 이것은 같은 시기에 분사된 主噴霧라도 還流영역 內에서 液滴群이 滯留하고 있는 동안에 서로가 반응을 촉진시켜 蒸發條件이 좋은 液滴이 마치 보조연료와 같은 役割을 한 때문인 것

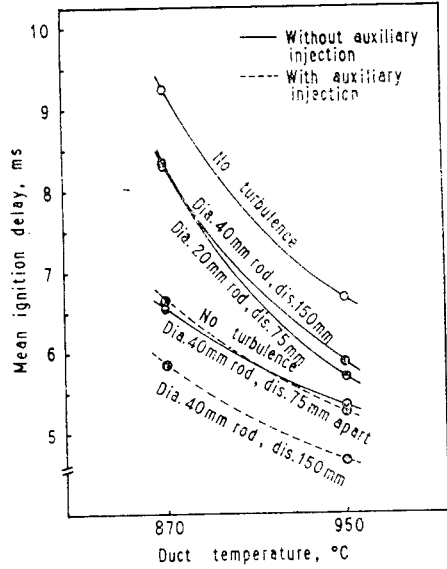


Fig. 13 Comparison of mean ignition delay at different turbulence conditions

로 생각할 수 있다. 또 직경은 같아도 노즐과의 거리가 가까운 편이 착화지연기간의 단축효과가 크다. 한편 輕油를 보조분사하고, 그 위에 병행해서 亂流를 발생시키면 착화지연기간은 상당히 단축된다. 이것은 보조연료로부터 생긴 반응을 촉진시키는 중간생성물과 主噴霧와의 접촉시간이 충분히 保持되고, 더구나 착화반응에 조건이 좋은 領域이 현저히 증가된 때문일 것이다.

4. 結 論

제 1 보, 제 2 보에서는 高溫空氣流 덕트가 디젤기판의 실린더 內 연소과정을 단순화시켜 관찰할 수 있는 장치中의 하나로써, 매우 적합하다는 사실을 示唆했다. 본報에서는 實用機關의 燃燒改善를 목적으로 한 연구에 이 고온공기류 덕트를 사용해서 아래와 같은 성과를 얻었다.

그 성과를 요약하면,

(1) 高溫空氣流內에서 연소하는 噴霧의 켈러사진 및 Schlieren 사진을 관찰한 결과

(가) 일반적으로 靑炎은 主噴霧의 飛沫部로부터 발생하고, 그 飛沫部는 노즐의 선단에서부터 존재한다.

(나) 高溫空氣流에 분사한 沸點이 낮은 보조연료는, 高溫空氣와 接觸하면接觸과 거의 동시에 靑炎을 발생한다.

(다) 補助噴霧의 靑炎이 主噴霧의 飛沫部와 接觸하면 熱炎을 발생하고, 이 熱炎의 발생영역은 主噴射만을 한 경우에 비해서 훨씬 범위가 넓다. 또한 발생시기도 명백히 빠르다.

(2) 高溫空氣流內에 분사한 噴霧의 燃焼期間은 분위 기온도의 상승과 더불어 길어진다. 그러나 같은 분위 기온도에 있어서는 보조연료의 분사에 의해 연소기간이 단축된다. 보조연료를 분사하면 燃焼場의 넓은 영역에 수많은 형성되는 發火核에 의해 연소의 初期부터 급격한 연소과정을 밟게 되고, 따라서 연소의 終了도 빨라진다.

(3) 補助噴霧가 主噴霧를 감싸는 상태가 될 수 있도록 보조분사시기를 맞추는 것이 主噴霧의 착화지연기간 단축에 가장 효과적이다. 따라서 沸點이 낮아 혼합기형성이 빠른 보조연료의 경우는 분사시기를 약간 늦추는 것이, 반대로 沸點이 높아 혼합기형성이 늦어지는 보조연료의 경우는 분사시기를 조금 앞당기는 것이 主噴霧를 감싸기 쉬운 상태로 되고, 主噴霧의 연소를 촉진시킨다.

(4) 噴霧가 연소하는 前方에 圓柱를 설치하면 圓柱의 後方에서 再循環領域이 생긴다. 이 경우, 이 영역에는 공기의 導入이 촉진되고, 더구나 연료분부와 공기와의 접촉면적 및 접촉시간이 증가한다. 따라서 噴霧의 착화지연기간은 현저히 단축된다.

(5) (4)에서 記述한 再循環領域內에 보조연료의 豫混合氣가 추가된 경우에는, 반응을 촉진시키는 中間生成物과의 접촉시간이 保持되므로, 착화반응에 조건이 좋은 영역이 더욱 많이 발생하고 착화시기도 그만큼 빨라진다.

參 考 文 獻

(1) W.T. Lyn, E. Valdmanis, An Experimental Investigation into the Effect of Fuel Addition to Intake Air on the Performance of Compression Ignition Engine, Proc. Inst. Mech. Eng., Pt. 2 A, 181-1, 1967
 (2) N.A. Henein, J.A. Bolf, SAE Paper, No. 67007, 1967
 (3) A. Andree, S.G. Pachernegg, SAE Paper, No. 690253, 1969
 (4) E. Valdmanis, D.E. Wulfhorst, SAE Paper, No. 700736, 1970
 (5) G.J. Mullaney, Ind. Eng. Chem., 51, p.779, 1959

(6) 宮阪, 水谷, 衝撃波管による燃焼噴霧の着火現象の研究(第1報), 日本機械學會論文集, 第41卷 第347號, p.2160, 1975
 (7) 宮阪, 水谷, 衝撃波管による燃焼噴霧の着火現象の研究(第2報), 日本機械學會論文集, 第42卷 第363號, p.3590, 1976
 (8) 小笠原, 外2名, 日本機械學會講論, No. 744-4, p.1, 1974
 (9) 三輪, 外2名, 日本機械學會講論, No. 790-6, p.117, 1979
 (10) E. Starkman, Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 42, p.107, 1946
 (11) R.W. Hurn, SAE Trans., 64, p.763, 1956
 (12) 居倉, 外2名, 定容燃焼器における燃料噴霧の着火おくれ, 日本機械學會論文集, 第41卷, 第345號, p.1559, 1975
 (13) 田中, 外2名, 日本機械學會講論, No. 760-16, p.222, 1976
 (14) 方重哲, 太田, 고온공기류에 분사한 분무의 자연 연소에 관한 연구(제1보), 大韓機械學會論文集, 第8卷 第4號, pp.321~327, 1984
 (15) 方重哲, 太田, 고온공기류에 분사한 분무의 자연 연소에 관한 연구(제2보), 대한기계학회논문집, 第9卷 第5號, pp.627~637, 1985
 (16) B.P. Mullins, Spontaneous Ignition of Fuels Injected into a Hot Air Stream, Fuel 32, pp.211~252, 279~309, 327~379 451~490, 1953
 (17) 森田, 吉富, 石油化學とその工業, 沼晃堂, p.42, 1981
 (18) 堤, 酸化の化學とその工業, 南江堂, p.159, 1963
 (19) Y. Hirako, M. Ohta, Effect of Lean Pre-mixture on the Combustion in Diesel Engine (2nd Report), JSME, Vol. 17, No. 104, pp.256~263, 1974
 (20) Y.Hirako, M. Ohta, Effect of Lean Pre-mixture on the Combustion in Diesel Engine (3rd Report), JSME, Vol. 17, No. 109, pp.936~943, 1974
 (21) R. Vichnievsky et al., Possibilité de la double injection dans les moteurs Diesel, CIMAC Colloquium Wiesbaden, p.298, 1959
 (22) E.E. Zukoski, F.E. Marble, Proc. Gas Dynamic Symposium on Aerothermo-chemistry, p.205, Northwestern Uni., 1955
 (23) B. Lewis, G. Elbe, Combustion Flames and Explosions of Gases, Second Edition pp.439~440, Academic Press Inc., New York and London, 1961
 (24) 巽, 亂れ, p.3, p.73, p.137, 眞書店版, 東京, 1975