

急速壓縮裝置에 의한 디젤噴霧・火炎의 研究*

安 秀 吉**

A Study on Diesel Spray and Flame by Rapid Compression Machine*

Soo-kil AHN**

The paper describes an experimental investigation of axisymmetric diesel spray and flame which is held in rapid compression machine (RCM) with electromagnetic single injection nozzle.

The axisymmetric diesel spray and flame are taken with high speed photograph and analysis it with image processor.

The data presented include fuel concentration of spray, flame temperature, soot concentration of flame in axial and radial direction at a moment and compared it with each other.

緒 論

디젤機關은 自動車, 船舶 및 陸上用發電機 등의 原動機로서 넓은 분야에 많이 사용되고 있다. 그 이유는 디젤機關이 다른 原動機 보다 熱效率이 높기 때문이다. 그러나 그음음의 排出과 振動 및 騒音이 큰 결점이 있다. 특히 그음음의 排出은 가솔린機關의 70배 이상이나 되며 이는 시각적으로도 불쾌할뿐 아니라, 突然變異를 일으키는 發癌性물질로 알려져 있다¹⁾. 그러므로 이와 같은 결점을 解消하여 無害의 디젤機關을 개발하기 위해서는 기본적인 디젤噴霧・火炎의 學動과 構造를 잘 이해할 필요가 있다.

디젤噴霧・火炎의 가장 기본적인 형태는 공기의 유동이 없고, 벽면 충돌이 없는 無限의 압축공기중에 噴射되는 單發의 軸對稱 自由噴霧・火炎이다.

본 연구에서는 이와 같은 디젤噴霧・火炎을 大型急速壓縮裝置內에 實現하여, 고속도 사진의 畫像解析에 의한 새로운 方法으로 디젤噴霧・火炎의 瞬時學動과 構造에 對한 情報를 얻고자 한다.

測定原理

1. 噴霧의 測定

平行入射光強度의 噴霧粒子群에 의한 減衰는 다음과 같이 나타난다.

$$E/E_0 = e^{-Q_{ext} \frac{\pi}{4} d^2 NL} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 E_0 는 入射光強度, E 는 透過光強度, d 는 噴霧의 粒子徑, N 은 噴霧粒子의 數密度, L 은 粒子群이 있는 光路方向의 두께이며, Q_{ext} 는 噴霧粒子의 減衰係數이다.

한편, E_0 에 대한 黑白 nega film의 透過濃도를 D_0 , E 에 대한 film의 濃도를 D 라 하면, 다음의 관계식이 성립된다.

$$\frac{1}{\gamma}(D - D_0) = \frac{-Q_{ext} \frac{\pi}{4} d^2 NL}{2.3026} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 γ 는 사용 film의 定數이다. 사용되는 pan-chromatic(汎色性) 黑白 film의 感光波長 λ 는 0.4~0.7 μ m이고, 噴霧의 粒徑은 5~100 μ m로 생각되므로²⁾ 受光波長보다 크며, 粒徑 파라미터, $\frac{\pi d}{\lambda}$ 는 30以上이 된다. 이때 平行入射光을 받는 噴霧를 對向側의 좁은 立體角에서 관찰하면 Q_{ext} 는 2.0이 된다^{3),4),5)}. 따라서 式(2)는 다음과 같이 된다.

$$(D_0 - D) \frac{2.3026}{2\gamma} = \frac{\pi}{4} d^2 NL \dots\dots\dots(3)$$

即 噴霧畫像의 濃度分布에서 噴霧光路中の 等價的인

* 이 논문은 1982년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.
** 釜山水產大學 : National Fisheries University of Busan

液滴面積密度를 求한다.

2. 火炎의 測定

그을음 粒子群의 복사강도에 注目하는 二色法을 nega color film에 적용하여, 火炎의 眞溫度 T 와 KL 因자를 다음과 같이 계산한다⁶⁾.

$$D_\lambda = \tau_\lambda \log \left\{ \beta t \frac{C_1}{\lambda^5} \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda T_{a\lambda}} \right) \right\}$$

$$= \frac{\tau_\lambda}{2.3026} \frac{C_2}{\lambda T_{a\lambda}} \dots \dots \dots (4)$$

여기서 D_λ 는 色濃度, C_1, C_2 는 Plank의 제1, 제2 放射定數, β 는 定數, t 는 露光時間, $T_{a\lambda}$ 는 D_λ 에 대응하는 輝度溫度이다. 또한 輝炎의 眞溫度와 輝度溫度에는 다음의 관계가 있다.

$$\left\{ 1 - \exp \left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha} \right) \right\} \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda T} \right) = \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda T_{a\lambda}} \right) \dots \dots \dots (5)$$

여기서 K 는 吸收係數, L 은 火炎의 檢出光軸方向의 두께, α 는 可視域에서 1.38인 定數이다.

2개의 相異한 波長 λ_1, λ_2 에 대해 式(5)를 세워, KL 因자를 消去하면 다음의 관계식이 얻어진다.

$$\left\{ 1 - \exp \left\{ -\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T_{a\lambda_1}} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right\}^{\lambda_1^\alpha}$$

$$= \left\{ 1 - \exp \left\{ -\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T_{a\lambda_2}} - \frac{1}{T} \right) \right\} \right\}^{\lambda_2^\alpha} \dots \dots \dots (6)$$

式(6)에 測定值 $T_{a\lambda_1}, T_{a\lambda_2}$ 를 代入하여 眞溫度 T 가 얻어지고, 이것을 式(5)에 代入하여 KL 因자를 계산한다.

한편 吸收係數 $K(KL/L)$ 와 그을음 濃度 C_s 는 다음의 關係가 있다.

$$C_s = \frac{\rho_s K}{36\pi f(n, k)}$$

여기서 ρ_s 는 그을음의 密度, $f(n, k)$ 는 그을음의 複素屈折率 $m = n - ik$ 에 의해 결정되는 定數이다. 계산에 사용된 複素屈折率은 Chippet⁷⁾의 값 $m = 1.9 - 0.35i$ 를 使用 했으며, 이 값은 Bard⁸⁾가 사용한 값과 거의 一致한다. 또한 그을음의 密度 ρ_s 는 1.8을 使用했다⁹⁾.

實驗裝置 및 實驗方法

실험에 使用한 急速壓縮裝置(RCM)와 光學系를 Fig.1에 나타낸다. 急速壓縮裝置의 연소실은 압축비 14.7, 직경 196mm, 두께 40mm 이다. 연료의 噴射에는 노즐직경 0.2mm인 單口노즐로 電磁式單發噴射裝置에 의해, 분사압력 25.48MPa, 분사기간은 3.5

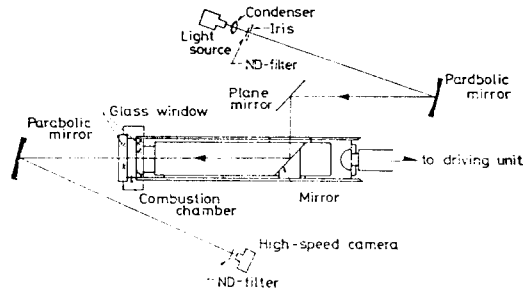


Fig.1 Rapid compression machine (RCM) and optical apparatus.

ms로 하였으며, 연료는 n-Tridecane ($C_{13}H_{28}$)을 使用했다. 噴霧의 촬영에는 연소실 內에 질소를 넣어 저속압축에 의한 밀도 $16.9kg/cm^3$, 압축온도 290K의 분위기 속에 單發噴射된 非蒸發 디젤噴霧의 舉動을 미립자 흑백필름(Kodak 7231)으로 촬영했다. 火炎의 경우 는 디젤噴霧의 촬영시와 거의 等일한 密度($16.8kg/cm^3$)의 急速壓縮空氣(압축온도 690K) 분위기 속에 噴射된 디젤火炎의 舉動을 nega color film(Kodak 7247)으로 촬영했으며, 이때 火炎의 溫度를 檢定하기 위하여 同一 필름에 黑體(T_a)도 촬영 하였다.

고속도 촬영에는 Hycam의 고속도 카메라로 샷터 정수 1/5, 촬영속도 8000f/s로 촬영했으며, 畫像解析 에는 nac.VD510A를 使用했다. Fig.2에 디젤火炎 촬영시의 Timing chart를 나타낸다.

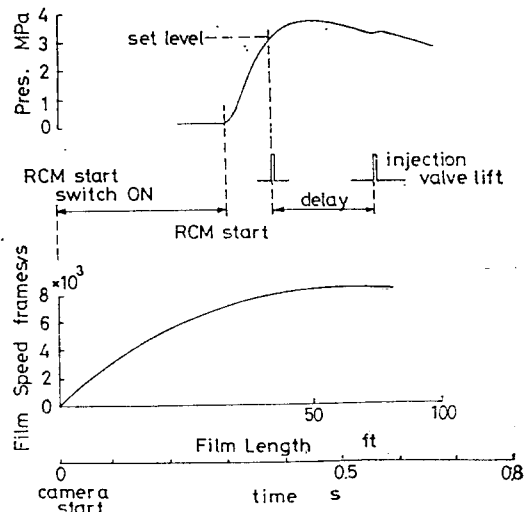


Fig.2 Timing chart of high speed photograph at the rapid compression machine.

結果 및 考察

1. 噴霧의 경우

1-1 噴霧의 中心軸方向의 燃料分布($\int d^2NL$)와 準定常理論과의 비교

Fig.3에 본장치에 의해 촬영된 디젤噴霧와 火炎 사진의 예를 나타낸다. Fig.3과 같은 고속도 사진의 噴霧畫像을 式(3)에 의해, 噴霧中心軸上의 $\int d^2NL$ 分布를 측정하였다. Fig.4는 噴霧中心軸方向의 $\int d^2NL$ 分布의 時間的 變化를 나타낸다. Fig.4에 의

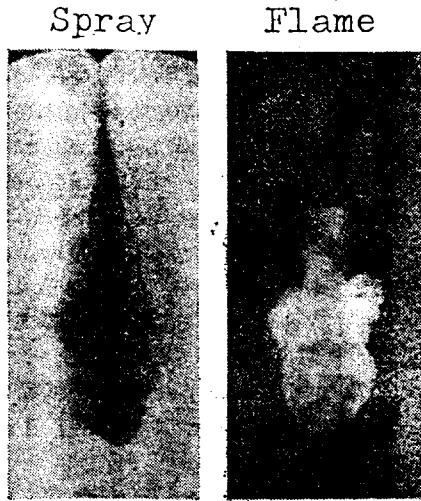


Fig.3 High speed photographs of diesel spray and flame at 4ms.

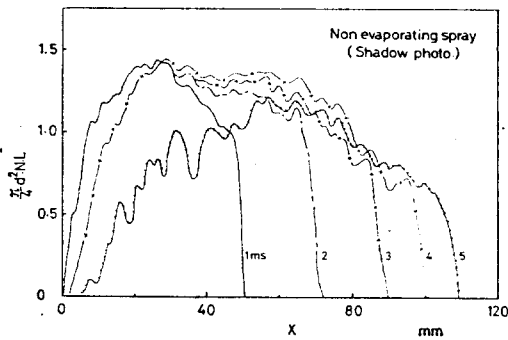


Fig.4 $\int d^2NL$ distribution of spray at axial direction(X=distance from nozzle)

하면 디젤噴霧는 噴射期間中($t < 3.5ms$), 노즐 出口에서의 거리 $X < 30mm$ 까지는 定常상태를 나타내며, 時間경과에 따라 噴霧의 先端부가 길어지며,

噴射가 끝난 후부터는 噴霧후단은 노즐 出口에서 떨어져 噴射方向으로 移動하지만, 그 속도는 噴霧의 선단보다 늦기 때문에 噴霧全體의 길이 가 길어진다. 또한, 燃料가 가장 많이 포함된다고 생각되는 단면의 위치는 噴射期間中은 噴霧도달거리의 1/2 또는 노즐 出口에 가깝지만, 噴射완료후부터는 噴霧의 선단으로 이동한다.

噴霧의 斷面에 포함되는 연료의 량은 $\int d^2NL$ 에 비례한다고 생각하지만, 燃料의 濃度は 粒徑 d 가 一定이라면, $\int d^2N$ 에 비례한다. 그러므로 燃料의 濃도에 비례하는 值, $\int d^2N$ 分布를 噴霧의 中心軸에 따라 時間으로 표시하면 Fig.5와 같고, 노즐 出口에서의 거리에 逆比例함을 나타낸다. 또한 Fig.5를 log scale로 나타내면, Fig.6과 같으며, 노즐 出口에서의

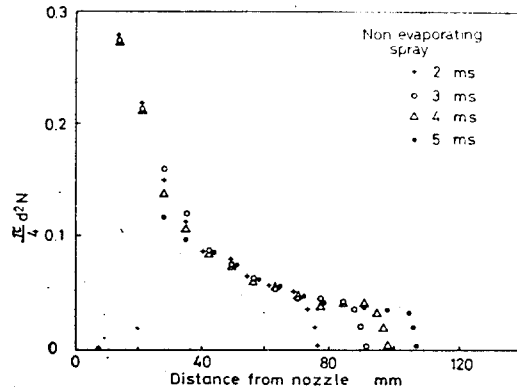


Fig.5 $\int d^2N$ distribution of spray at axial direction.

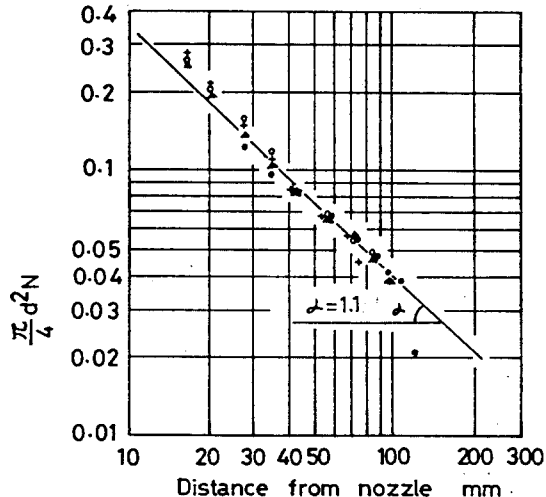


Fig.6 Relation between $\text{Log} \int d^2N$ and $\text{Log} X$. (X=distance from nozzle)

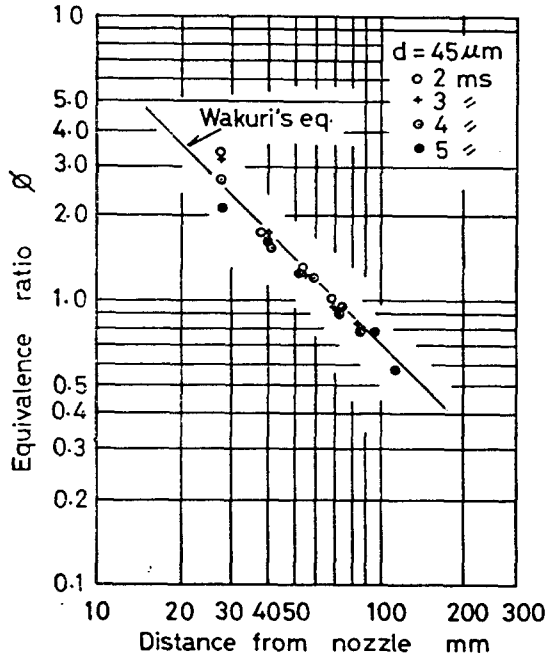


Fig. 7 Relation between Log ϕ and Log X. (X = distance from nozzle)

거리 $X=30\sim 100\text{mm}$ 의 범위내에서는 직선으로 되며 그 기울기는 약 -1.0 이었다. 이것은 和栗¹⁰⁾의 準定常理論의 결과와 잘 일치한다. 그러므로 燃料의 濃度 $(\frac{\pi}{4}d^2N \times \frac{2}{3}\rho_s d)$ 分布가 準定常値와 일치하도록 X軸에 따른 粒徑 d 를 逆算하면 Fig. 7과 같으며 $d=45\mu\text{m}$ 가 된다. 이는 廣安¹¹⁾의 實驗關係式에서 구한 Sauter 平均 直徑인 $d=32\mu\text{m}$ 와 比較的 일치하였다.

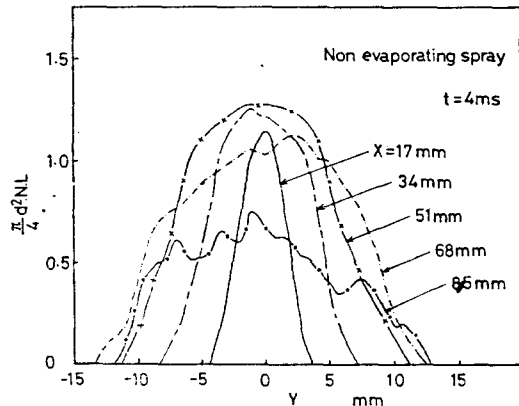


Fig. 8 $\frac{\pi}{4}d^2NL$ distribution of spray at cross direction.

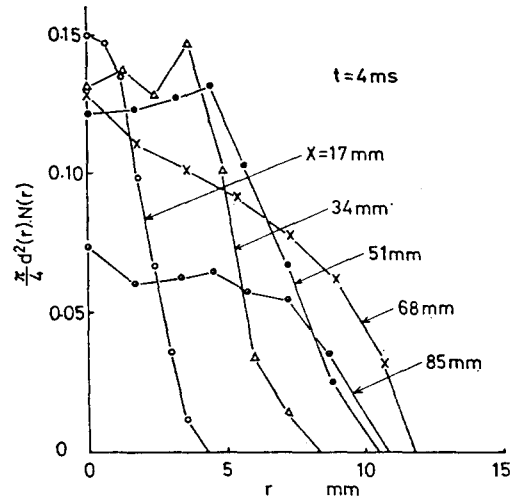


Fig. 9 $\frac{\pi}{4}d^2(r)N(r)$ distribution of spray at radial direction by onion peeling model. (r = distance from center of spray to spray boundary)

1-2 噴霧의 半徑方向의 燃料濃度分布

Fig. 8은 噴射開始後 $t=4\text{ms}$ 의 噴霧의 各 橫斷面에 있어서의 $\frac{\pi}{4}d^2NL$ 分布를 나타내며, 이와 같은 軸對稱의 自由噴霧에 양과모델(onion model)을 적용하여 噴霧內部的 半徑方向의 $\frac{\pi}{4}d^2(r)N(r)$ 을 구해 보면 Fig. 8과 같다. Fig. 9에 의하면 노즐 出口에서의 거리 $X=51\text{mm}$ 以內의 범위에서는 中心軸附近의 $\frac{\pi}{4}d^2(r)N(r)$ 은 거리 X에 의해 거의 變하지 않으나, X가 증가하면, 中心부근 및 半徑方向全般에 걸쳐 低下함을 나타낸다.

2. 火炎의 경우

2-1 火炎의 中心軸方向의 溫度 및 그늘음 分布와의 比較

Fig. 10에 火炎中心軸方向의 溫度分布와 KL 分布를 나타내며, Fig. 11에 重量濃度로 換算한 그늘음의 濃度分布를 나타낸다. Fig. 10에 의하면 火炎의

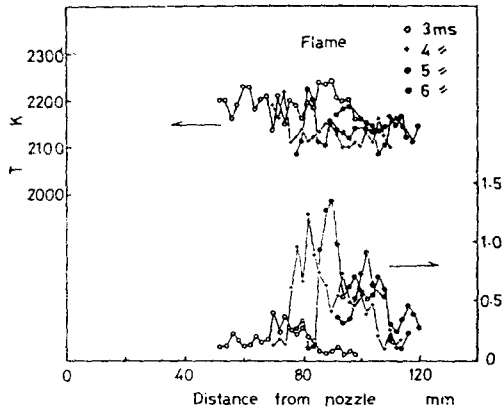


Fig. 10 KL and temperature distribution of flame at axial direction.

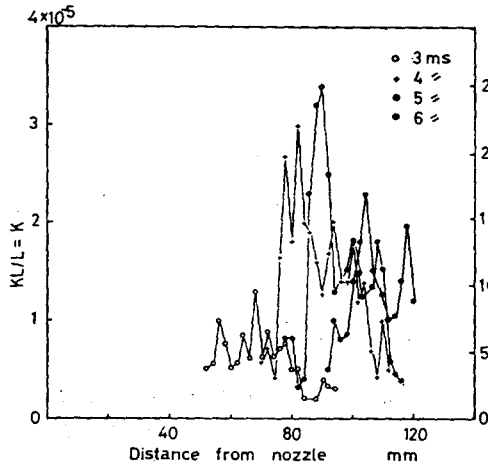


Fig. 11 Soot concentration of flame at axial direction. (complex refractive index of soot $m=1.9-0.35i$, density of soot $\rho_s=1.8g/cm^3$)

溫度分布는 軸方向으로 比軸의 均一한 2100~2200K의 分布를 나타내고, 噴射開始後 6ms가 되어도 거의 低下하지 않으므로 實機의 傾向¹²⁾과 틀리는 本實驗條件下의 特殊한 現象이라 생각된다. 한편 KL因자의 경우, KL因자가 큰 部分은 항상 火炎의 先端部 附近에 있으며 그 部分은 時間경과에 따라 先端으로 이동하나 噴射開始後 4ms~5ms에 最大値를 나타내며, 그 후 6ms에 消滅하므로 實機에 가까운 傾向을 나타내며, Fig. 5의 燃料濃度分布와 比較하면, 그을음의 濃度는 噴射終了 직후 燃料濃度가 比較적 커지 않은 噴霧의 先端附近에서 最大値를 나타내고 있으나 시간경과에 따라 高溫의 火炎에 의해 燃燒되고

나머지가 배출된다고 추측된다.

4-2-2 火炎의 半徑方向의 溫度 및 그을음 濃度 分布와 燃料濃度分布와의 比較

Fig. 12에 노즐 出口에서 火炎先端까지의 1/3되는 火炎斷面의 輝度溫度分布에 양파모형을 적용하여 火炎內部(r方向)의 溫度와 그을음 濃度分布를 나타낸다. Fig. 12에 의하면 그을음의 濃度は 火炎半徑의 2/3半徑위치에 最大値를 나타내고 있다.

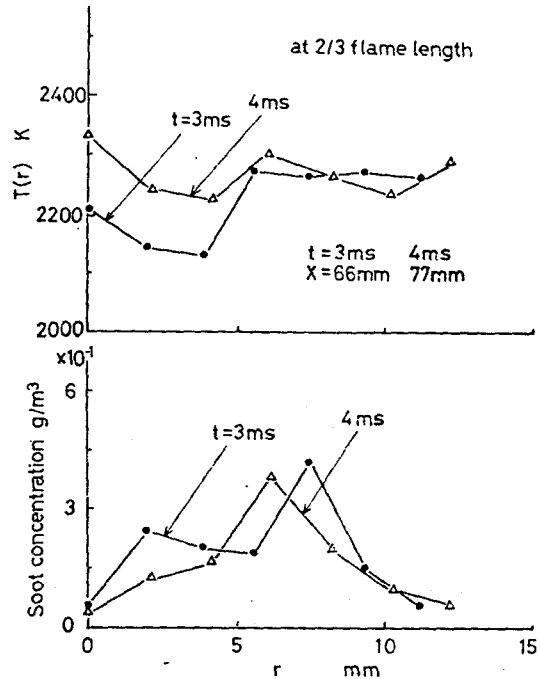


Fig. 12 Soot concentration of flame at radial direction by onion peeling model. (r =distance from center of flame to flame boundary)

이와같은 傾向은 擴散gas火炎의 光學的 測定結果와¹³⁾ 거의 一致했다. 이것을 噴霧의 r方向의 燃料濃度分布(Fig. 9)와 比較해 보면 燃料濃度分布($\frac{1}{4}d^2N$)가 過濃한 中心部가 아니고 比較적 燃料分布가 稀薄한 噴霧의 外側に 가까운 곳에서 最大로 된다. 이는 火炎中心部에는 過濃한 混合氣, 周邊部에는 周圍에서 導入되는 空氣가 각각 單位體積中에 包含되는 비율이 그을음을 갖는 輝炎의 體積보다 相對的으로 많기 때문이라고 생각된다. 또한 溫度는 半徑에 관계없이 거의 $2200 \pm 100K$ 로서 均一한 傾向을 나타낸다. 이것은 二色法으로 測定한 溫度는 火炎中에 不均一하게 分散하는 輝炎뭉치의 溫度를 나타내므로 微視的으

로 불어 輝炎공치와 周邊氣體가 충분히 混合되지 않았을 경우 半徑方向의 溫度 $T(r)$ 은 局所的인 質量平均溫度를 나타내지 않기 때문이라고 생각된다.

結 論

電磁式單發噴射노즐로 急速壓縮裝置內에서 實現한 軸對稱 自由噴霧·火炎에 高速度 寫眞의 畫像解析을 適用하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 高速度 寫眞의 畫像解析에 의해 求한 디젤噴霧의 軸方向의 燃料濃度分布는 噴霧의 先端部를 除外하면 準定常理論에 의한 分布와 定性的으로 一致한다.
2. 火炎中心軸方向의 그을음 濃度는 燃料의 濃도가 비교적 낮은 噴霧의 先端部에서 높은 濃도를 나타내며, 그 濃度는 거의 噴射終了時에 最大로 되어, 그 후 時間경과에 따라 低下한다.
3. 양파모델을 軸對稱 噴霧·火炎에 適用하여 噴霧·火炎內部的 半徑方向의 그을음 濃도와 燃料濃度 分布를 비교해 보면 그을음 濃도의 가장높은 부분은 燃料濃도가 가장높은 中心部보다 火炎半徑의 $\frac{2}{3}$ 의 위치에서 最大로 되었다.

文 献

1. Mark, M.R. and Terence, H.R. (1982) : Isosteric heats of adsorption of selected compounds on diesel particulate matter. *Envirm. Sci. Tech.* 16(2), 75-76.
2. 竹內貴一郎, 村山博美, 千田二郎, 山田耕司 (1980) : 定壓容器內의 디젤噴霧의 粒度分布について. 液體의 微粒化에 關する 講演論集 8回, 43-48.
3. Gumprecht, R.O. and Sliepcevich, C.M (1953) : Scattering of light by large spherical

- particles. *J. Phys. Chem.* 57, 90-95.
4. Penndorf, R.B. (1957) : New tables of total Mie scattering coefficient for spherical particles of real refractive indexes. *J. Opt. Soc. Am.* 47(11), 1010-1015.
5. Sinclair, D (1947) : Light scattering by spherical particles. *J. Opt. Soc. Am.* 37(6), 475-480.
6. 安秀吉, 神本武征, 松井幸雄, 松岡信(1981) : 高速度寫眞의 畫像解析による 디젤機關의 火炎溫度分布의 測定. *日本機械學會論文集* 47 (417), 896-903.
7. Chippett, S. and Gray, W.A (1978) : The size and optical properties of soot particles. *Combustion and flame* 31, 149-159.
8. Bard, S. and Pagni, P.J. (1981) : Carbon particulate in small pool fire flames. *Trans. ASME (J. Heat. Trans.)* 103, 357-362.
9. D'alessio, A. and Venitozzi, C (1975) : Soot formation in methane-oxygen flames. 15th Symp. on Comb., 1427-1437.
10. Yutaro Wakuri, Masaru Fujii, Tatsuo Amintani and Reijiro Tsumya (1959) : Studies on penetration of fuel sprays of diesel engine. *JSME Vol 25(156)*, 820-826.
11. H. Hiroyasu and T. Kadota (1974) : Fuel droplet size distribution in diesel combustion chamber. *SAE Trans.* 740715, 2615-2634.
12. 松井幸雄, 神本武征, 松岡信, 小栗彰(1977) : 디젤機關의 火炎溫度의 測定에 關する 研究. *日本機械學會論文集* 44(377), 228-238
13. 吉原福全, 石田耕三, 佐藤昌史, 竹內貴一郎(1981) : 擴散火炎における 煤濃度, 溫度分布의 光學的 測定. 第17回燃燒シンポジウム 講演集(昭和54-12), 165-167.