

디젤기관의 연료 미립화 (1)

Atomization of fuel in Diesel Engines (1)

이 장 식*

Chang Sik Lee

1. 서 언

액체의 미립화(微粒化, atomization)는 액체 연료의 연소, 분무 건조, 분무 도장, 조습(調濕), 분말 제조, 농약 살포 등을 비롯하여 매우 넓은 분야에 응용되고 있다.

액체 미립화에 관한 연구는 자유계면(自由界面)을 갖는 비정상인 유체의 운동을 취급하므로 일반적으로 해석이 곤란하고, 또한 현상이 고속이면서 순간적이므로 미립화 과정의 관찰이나 측정이 어려운 문제점이 있다. 이 뿐만 아니라 미립화 시스템 설계에 적용하기 위하여는 상당한 실험과 경험적 자료를 필요로 하고 있다.

내연 기관과 액체 연료의 미립화는 1886년에 다임러(Daimler)가 기화기(氣化器)를 발명한 이래 급속한 발전을 가져 오게 되었고, 1893년 독일 사람 디젤(R. Diesel)에 의하여 디젤 기관이 발명되면서 액체 연료의 분사는 더욱 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔다. 그 후 각종 버너 장치의 연료 분사나 항공기에 연료 무화 시스템이 적용되면서 급속한 발전을 가져오게 되었다.

연료액적(燃料液滴, fuel droplet)이란 지름이 1mm 이하의 것으로서 단일액적(單一液滴, single droplet)으로 실험할 수 있는 것은 0.1mm 정도까지이고 이것 이하로 되면 실험이 기술적으로 곤란하다.

실제의 분무에서는 연료액적 지름이 수 μm 에서 수백 μm 로 분포되어 그 평균치 또는 최다치는 수십 μm 정도가 많다.

연료액적은 연료 미립화, 연료증기, 혼합기의 형태로 되어 연소하게 되며, 미립화된 연료 분무가 완전 연소하게 될 때까지는 연료 미립화가 가

장 중요한 인자로 되고 있다.

그러므로 디젤 기관의 연소 성능 및 배출물 특성을 파악하기 위하여는 연료의 분무와 혼합, 증발 과정을 잘 이해하고 있어야 한다. 이러한 관점에서 본 해설에서는 액체 연료의 미립화, 분무 특성, 분무 측정 시스템 등의 개요에 대하여 알아보기로 한다.

2. 연료 미립화의 기초

액체 연료의 미립화 목적은 대부분이 체적당 표면적을 크게 하는 것이나 미립화의 적용 분야에 따라서 조금씩 다르다. 이룰때면 농약 살포와 같은 경우에는 너무 미립화하면 분무류는 비산되어 기대 효과를 거둘 수 없게 된다. 내연 기관의 경우에는 요구되는 분무의 특성은 기관의 형식이나 성능에 따라 미립화 정도는 상이하다. 따라서 액체를 미립화하는 데는 그 목적이나 분무에 대한 요구를 충분히 파악하여 알맞은 미립화 정도도하도록 하는 것이 중요하다. 그러므로 기관의 성능을 개선시키기 위하여는 엔진 연소의 기초가 되는 액체 미립화 과정, 분열 기구 등의 기초 사항을 이해하고 기초 지식을 가지고 있어야 한다.

2.1. 액주의 변형과 분열 기구

노즐로부터 액체를 유출시켜서 그 속도를 점차로 증가시키면 액류(液流)의 미립화 모양은 그림 1과 같다.

그림에서 (1)은 적하(滴下, dripping) 또는 액상분열(液狀分裂)로서 액적은 자중과 이것을 지지하는 표면장력(表面張力)과의 평형이 깨어져서 방울(滴)

* 정희원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

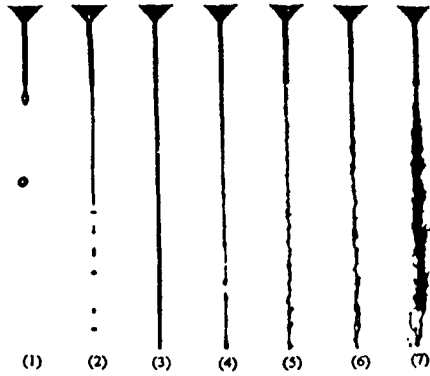


그림 1 유출 속도에 따른 미립화 모양의 변화

이 생기는 것을 말한다.

그림에서 (2) 나 (3) 은 표면이 매끈한 투명하고 아름다운 흐름을 형성하면서 흐르는 것으로서 평활류(平滑流, smooth jet)라고 한다. 이 경우 액류의 변형은 축대칭이며 분열은 반드시 선단부에 일어난다. 속도를 더욱 증가시키면 어떤 원인에 의하여 액중에 생긴 미세적 교란이 외기의 작용을 받아 그림의 (4), (5) 와 같이 된다. 이 때 액류는 불규칙한 변형을 일으켜서 급격한 불투명 상태로 된다. 이 상태를 파상류(波狀流, wavy jet)이라고 하고, 분열도 불규칙해져서 액류의 도중에 끊어지도록 되어 있다. 지금까지의 분열은 어느 경우에도 액류가 직접적으로 끊어지므로 1차분열(1次分열, primary disintegration)이라고 한다. 속도가 더욱 증가하여 외기의 작용이 더욱 커지면 입자 입자 외에 실모양 또는 막상 분열에 의하여 생기는 미세한 2차 입자가 가해진다. 따라서 이 단계는 부분 분무류(partially sprayed jet)가 된다.

이와 같은 액적의 유동을 다음 식으로 표시되는 제트수(jet number, J_e)에 의하여 구분한다⁽¹⁾.

$$J_e = (\rho_f w_f^2 / D_n \sigma (\rho_c / \rho_f))^{0.55} \quad (1)$$

여기서 ρ_f , ρ_c 는 액 및 외기의 밀도, w_f 는 유출 속도, D_n 는 노즐 지름, σ 는 표면 장력이다. J_e 수에 따라 분무 흐름을 구분하면 다음과 같다.

$J_e < 0.1$: 적하(滴下)

- $0.1 < J_e < 10$: 평활류(平滑流)
- $100 < J_e < 400$: 파상류(波狀流)
- $400 < J_e$: 분무류(噴霧流)

디젤 기관의 예로서 연소실 내의 압력이 3MPa, 노즐지름이 0.3mm, 경유를 200m/s 의 속도로 분사할 경우에는 $J_e \approx 70,000$ 정도가 되어 분무류가 된다. 그러나 디젤 기관은 간헐 분사를 하므로 분사초와 분사 끝에는 분무 형태가 불규칙하게 된다. 따라서 디젤 기관의 연료 분무 형태는 그림 1의 적하로부터 분무류 사이의 분무 모양을 갖게 된다. 따라서 엔진 내의 연소 상태도 불규칙 해져서 배출 가스 중의 스모크, 입자상 물질, 탄소분의 부착과 같은 유해 물질의 생성 원인이 되고 있다.

2.2. 분무 특성

디젤 기관의 출력과 연료 소비율은 노즐로부터 연소실로 분사된 연료의 연소 상태에 의존한다. 연소 상태를 양호하게 유지하기 위하여는 연료를 다음과 같은 두 가지 조건을 만족하도록 연소실로 공급하여야 한다.

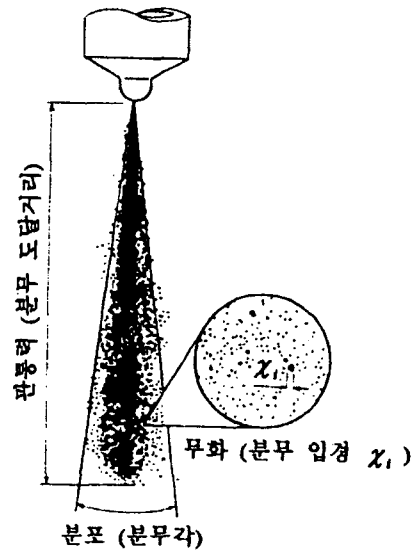


그림 2. 분무의 표시 방법

① 액체 연료의 미립화

액체 연료를 연소시키기 위하여는 연료를 중압

시켜 연료 증기로 만들어야 하며 증발을 촉진시키기 위하여는 표면적을 크게 하여 주위의 기체와 열 및 물질 교환을 활발하게 하여야 한다.

② 연료 증기와 산화제와의 혼합 촉진

연료 증기와 산화제(공기)를 잘 혼합시켜 양호한 연소를 이루기 위하여는 연료 증기를 연소실 구석까지 도달하여야 한다.

따라서 앞의 ①에 해당하는 것은 분무의 무화, ②에 해당하는 것은 분포 및 관통력이 문제가 된다.

압력차를 이용하여 고속으로 분사시킴에 의하여 분류를 형성하는 경우, 즉 압력 무화 방식에서는 양호한 무화 상태를 유지하기 위하여는 분류(噴流)의 속도를 크게 해야 한다. 속도를 크게 하기 위하여는 연료를 가능한 한 고압으로 분출하여야 한다.

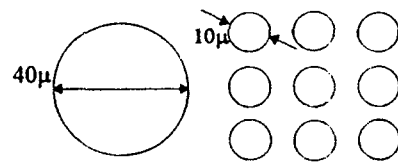


그림 3. 입자군의 보기

2.2.1 무화

연소실로 분사된 연료가 미립화 하여 안개 모양으로 되는 과정을 무화(霧化)라 하고 이 안개 모양의 분사된 연료를 분무(噴霧)라고 한다.

액상의 연료가 분출공으로부터 그 점성과 압력에 의하여 제트류로 되어 분출되면 이 분출 제트류는 분출 구멍으로부터 어느 정도의 거리를 나아가는 사이에 미립화 되어 전체적으로 원뿔 모양의 분무를 형성하게 된다.

연료를 미립화 하는 방법에는 용도에 따라 표 1과 같이 여러 가지 방식이 있다.

하나의 실제 보기를 들면 그림 3과 같은 입자군에서 각입자 지름의 총합은 $(40\mu+10\mu \times 9)/10=13\mu$ 이 된다.

연료를 고압으로 하여 분출공으로부터 그 전후

(1) 무화의 표시 방법

무화의 목적의 하나는 연료의 표면적을 증가시키는 것이다. 하나의 보기로서 1cc의 체적을 갖는 연료의 표면적을 살펴보면 1개의 구(球)의 경우에는 지름이 약 12.407mm에서 표면적이 약 483.59mm² 이 된다. 그러나 지름 40μm의 균일한 연료 방울로 미립화하면 총표면적은 1.5×10⁵mm²인 2.99×10⁷개의 연료 입자군이 되어 표면적은 약 310배가 된다.

실제로 분무 1개 1개의 입자 크기는 균일하지 않고 또 여러 가지 크기의 연료 입자군이 된다. 따라서 무화의 정도는 분무 중의 유립의 평균 분

표 1 무화 방식

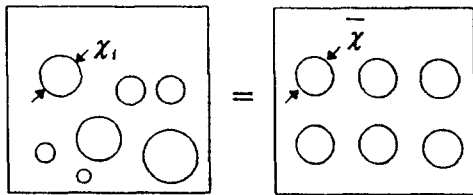
무화 에너지	무 화 방 법	
기계적 에너지	압력 무화	고압 연료의 분류와 공기의 충돌에 의하여 미립화 하는 방법
	2 유체 무화	공기나 증기의 고속류를 충돌시켜 연료를 분쇄하는 방법
	원심력 무화	고체면에서 공급한 연료를 원심력으로서 얇은 막의 모양으로 얇게 늘어나도록 분출시켜 고체면으로부터 방출되면서 미립화 하는 방법
	진동 무화	기계적 진동 또는 초음파 등에 의하여 미립화 하는 방법
전기적 에너지에 의한 무화	정전기 또는 동전기에 의하여 미립화 하는 방법	
열적 에너지에 의한 무화	비등이나 증발, 응결에 의하여 미립화 하는 방법	

무 입경에 따라서 표시 할 수 있다.

그러나 입자군이 기화하거나 연소하는 경우를 생각하면 10 μ 의 액적은 곧 기화하나 40 μ 인 액적은 그 체적이 10 μ 의 것의 4³=64 배가 되어 기화하기 어렵게 된다.

따라서 이와 같은 기화를 다룰 때 이들 평균 입경을 13 μ 이라고 하는 것은 합리적이지 못하다.

지금 그림 4의 (a)와 같이 지름 χ_1 인 액적이 Δn_1 개, 지름 χ_2 인 액적이 Δn_2 개, 지름 χ_3 인 액적이 Δn_3 개 등이 있고, 이들을 평균한 것이 지름 $\bar{\chi}$ 인 n 개라고 하기로 한다.



입경 $\chi_1 \cdots \Delta n_1$ 개
입경 $\chi_2 \cdots \Delta n_2$ 개
(a) 실제의 입자군
입경 $\bar{\chi} \cdots n$ 개
(b) 평균치
그림 4 입자군(粒體群)의 평균 입경

이 평균치를 구할 때 입자수, 직경, 표면적, 체적의 4가지 요소가 있고 그 임의의 2개를 조합하면 $C_2=6$ 개의 값이 존재하게 된다.

즉, 그림 (a)의 직경 및 입자수를 그림 (b)와 같게 하면

$$\text{평균 입경 } \bar{\chi}_{10} = \frac{\chi_1 \Delta n_1 + \chi_2 \Delta n_2 + \cdots}{\Delta n_1 + \Delta n_2 + \cdots} \quad (2)$$

$$\text{입자수 } n_{10} = \sum \Delta n_i \quad (3)$$

그림 (a)의 표면적과 체적의 총합이 그림 (b)와 같아지는 평균치를 $\bar{\chi}_{32}$ 라고 하면

$$\pi \bar{\chi}_{32}^2 = \pi \chi_1^2 \Delta n_1 + \pi \chi_2^2 \Delta n_2 + \cdots$$

$$\frac{1}{6} \pi \bar{\chi}_{32}^3 = \frac{\pi}{6} \chi_1^3 \Delta n_1 + \frac{\pi}{6} \chi_2^3 \Delta n_2 + \cdots$$

가 되므로 평균 입경 $\bar{\chi}_{32}$, 입자수 n_{32} 는 다음 식으로 표시된다.

$$\bar{\chi}_{32} = \frac{\sum \chi_i^3 \Delta n_i}{\sum \chi_i^2 \Delta n_i} \quad (4)$$

$$n_{32} = \frac{(\sum \chi_i^2 \Delta n_i)^3}{(\bar{\chi}_{32}^3 \Delta n_i)^2} \quad (5)$$

가 된다.

식 (4)로 표시된 평균 입경 $\bar{\chi}_{32}$ 는 단위 체적 (V) 당 표면적 (S) 인 S/V의 역수에 상당하며, 표면적에 비례하는 현상, 예를 들면 증발이나 연소를 고려할 경우에 중요한 의미를 가진다. 이것은 1926년 독일 사람 Sauter (J. Sauter)에 의하여 제안되어 Sauter의 평균 입경 (Sauter mean diameter, SMD) 또는 체적-표면적 평균 입경이라고 한다. 이 때 그림 (a)와 그림 (b)의 입수(粒數)는 일치하지 않고 평균 입수 n_{32} 는 총입수 n 보다 작아진다.

□ 평균 분무 입경의 표시 방법

분무는 엔진의 연소 사이클과 일치하는 간헐 분무이고 또 분무 생성각 사이클 내에서도 분사 압력이 시간에 따라서 변화하는 비정상 분무(非常噴霧, unsteady spray)이므로 분무를 구성하는 입자들은 여러 가지 분무 입경을 갖는 연료 입자들의 집합체가 된다.

이들 연료 입자들을 일괄적으로 나타내기가 곤란하나 그 취급하는 목적에 따라서 몇 가지 대표치를 나타내는 방법이 앞에서 설명한 바와 같이 제안되어 있다.

유립군(油粒群)중에 χ_i 란 입경의 유립이 Δn_i 개 함유되어 있으면 평균 분무 입경의 일반형은 다음 식으로 표시된다.

$$\bar{\chi}_{k,l} = \left(\frac{\sum \chi_i^k \cdot \Delta n_i}{\sum \chi_i^l \cdot \Delta n_i} \right)^{1/(k-l)} \quad (6)$$

$$n_{k,l} = \frac{(\sum \chi_i^k \cdot \Delta n_i)^{l(\ell-k)}}{(\sum \chi_i^l \Delta n_i)^{k(\ell-k)}} \quad (7)$$

여기서 k, l 이 1 일 때는 직경, 2 일 때는 면적, 3 일 때는 체적을 의미한다. 하나의 예로 $k=1, l=0$ 일 때 식 (6) 은 다음 식으로 표시된다.

$$\bar{\chi}_{10} = \frac{\sum \chi_i \cdot \Delta n_i}{\sum \Delta n_i} \quad (3)$$

이 식은 직경을 모두 더하고 총 개수로 나눈 산술 평균 직경이 된다. 이 밖에도 대표적인 표시 방법을 표 2 에 나타내었다.

이들 가운데 $k=3, l=2$ 인 경우 $\bar{\chi}_{32}$ 는 SMD(Sauter Mean Diameter)라 하면 디젤 분무를 비롯하여 각종 분무를 취급할 경우에 많이 이용 되는 식이다.

인젝터로부터 분사되는 분무의 입도 분포(粒度分布)를 측정하였더니 다음 표 3 과 같은 데이터를 얻었다.

표 3 의 데이터를 이용하여 $\bar{\chi}_{10}, \bar{\chi}_{32}$ 를 구하여 비교하면 표 4 와 같다.

표 3 분무 입도 측정 예

$\chi(\mu)$	데이터 A (Δn)	데이터 B (Δn)
0~50	2200	2100
50~100	750	840
100~150	130	140
150~200	14	13
200~250	0	1
$\sum \Delta n_i$	3094	3096

표 4 산술 평균 입경과 SMD 의 계산 예

평균 입 경		데이터 A	데이터 B
$\bar{\chi}_{10}(\Delta n)$	산술평균 입경	42.0	43.7
n_0	$\bar{\chi}_{10}$ 의 입수	3094	3096
$\bar{\chi}_{32}(\Delta n)$	SMD	84.4	85.5
n_2	$\bar{\chi}_{32}$ 의 입수	150.9	174.5

표 2 평균 입경의 표시 방법

k	l	$k+l$	기 호	평균 입경 명칭	표 시	응 용
1	0	1	$\bar{\chi}_{10}$	길이	$\frac{\sum \chi_i \cdot \Delta n_i}{\sum \Delta n_i}$	비교
2	0	2	$\bar{\chi}_{20}$	표면적	$\left(\frac{\sum \chi_i^2 \cdot \Delta n_i}{\sum \Delta n_i}\right)^{1/2}$	흡수
3	0	3	$\bar{\chi}_{30}$	체적	$\left(\frac{\sum \chi_i^3 \cdot \Delta n_i}{\sum \Delta n_i}\right)^{1/3}$	수문학
2	1	3	$\bar{\chi}_{21}$	표면적-길이	$\frac{\sum \chi_i^2 \cdot \Delta n_i}{\sum \chi_i \cdot \Delta n_i}$	흡수
3	1	4	$\bar{\chi}_{31}$	체적-길이	$\left(\frac{\sum \chi_i^3 \cdot \Delta n_i}{\sum \chi_i \cdot \Delta n_i}\right)^{1/2}$	증발
3	2	5	$\bar{\chi}_{32}$	SMD	$\frac{\sum \chi_i^3 \cdot \Delta n_i}{\sum \chi_i^2 \cdot \Delta n_i}$	질량 이동, 반응

표 5 SMD를 나타내는 실험식

실험식	제안자	특징
$\bar{\chi}_{32} = K_N \cdot \frac{d_s}{v_N} \left(\frac{\sigma_N}{\gamma_N} \right)^{0.25} \left(\frac{\gamma_N}{\gamma_a} \right)^{0.25} \sqrt{g \left(1 + 3.31 \frac{\mu_N \sqrt{g}}{\sqrt{\gamma_N \cdot \sigma_N \cdot d_s}} \right)}$ <p> v_N : 평균 분사 속도, m/s γ_N : 분사 액체의 비중량, kg/m³ γ_a : 주위 공기의 비중량, kg/m³ σ_N : 분사 액체의 표면장력, kg/m μ_N : 분사 액체의 점성계수, kg·s/m² $K_N=70.5$(간헐 분사), $K_N=47$(연속 분사) d_s : 분출공 지름, mm </p>	Tanasawa Toyoda ⁽²⁾	대기압하에 분사된 연속 분무의 식을 변형하여 분사 속도, 분무공을 변화시킨 식으로 많이 사용된다.
$\bar{\chi}_{32} = k_N (\Delta P)^{-0.135} (\rho_a)^{0.121} (Q)^{0.131}, \mu\text{m}$ <p> k_N : 핀틀 노즐(25.1) 스토폴 노즐(22.4) 홀 노즐(23.9) ΔP : 분사압-배압, MPa ρ_a : 공기 밀도, kg/m³ Q : 분사량, mm³/st </p>	Hiroyasu, Kadata ⁽³⁾	노즐 끝으로부터 600mm 하방의 위치에서 액침법으로 측정 한 것
$\bar{\chi}_{32} = 207.6 d_s^{0.418} (\Delta P)^{-0.351}, \mu\text{m}$ <p> d_s : 분출 구멍 지름, mm ΔP : 분사압-배압, MPa </p>	Knight ⁽⁴⁾	주로 홀 노즐에 적용되는 식이다.
$\bar{\chi}_{32} = 3.08 \times 10^6 v^{0.385} \sigma^{0.737} \rho_f^{0.737} \rho_a^{0.06} \Delta P^{-0.54}$ <p> v : 동점성 계수(연료), m²/s σ : 표면 장력, N/m ρ_f, ρ_a : 연료, 공기의 밀도, kg/m³ ΔP : 차압, Pa </p>	Elkoth ⁽⁵⁾	핀틀 노즐에 적용되는 식이다.

SMD에 관한 평균 입경에 관한 실험식 중 주요한 식을 소개하면 표 5와 같다.

㉑ 분무 입경의 분포

디젤 기관의 연소의 입장에서 보면 작게 미립화된 오일 액적의 증발 속도가 빠르고, 분무는 분사 직후 분사 구멍 부근에 다량의 연료 증기가 발생하게 된다. 이와 같이 고농도의 연료 증기를 혼합 시키는 것이 어렵고 또한 연소 시간이 길어져서 연소가 길어진다. 배출물 관점에서 매연도

많아질 수 있게 된다.

만일 혼합이 빠르게 이루어져도 착화 후에는 거의 한번에 연소가 이루어지므로 착화시의 압력 상승이 급격한 최고 치에 달하여 소음이 커지게 된다.

또한 불꽃 점화 기관의 경우에는 연료를 급속하게 증발시키는 것이 좋으므로 작고 균일한 분무를 형성하는 것이 필요하다.

분무 입경 분포를 수학적으로 표시하기 위하여 여러 가지 분포 함수가 제안되어 있다. 분무의 분

포 함수를 나타내는 실험식으로는 다음과 같은 식들이 있다.

① Rosin-Rammler 의 식

$$\frac{dn}{d\chi_N} = w_o \cdot b \cdot \beta \cdot \chi_N^{\beta-1} \exp(-b \cdot \chi_N^\beta)$$

여기서 w_o : 전 중량

b, β : 실험 정수 (분무 ; $\beta = 2 \sim 4$)

② Nukiyama-Tanasawa 의 식

$$\frac{dn}{d\chi_N} = n_o A_N \cdot \chi_N^\alpha \exp(-B_N \cdot \chi_N^\beta)$$

여기서 n_o : 전 입수

A_N, B_N, α, β : 실험 정수

(분무 ; $\alpha = -1 \sim 3, \beta = 1$)

③ 정규 분포

$$\frac{dn}{d\chi_N} = \frac{n_o}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{10}} \cdot \exp\left[-\frac{(\chi_N - \bar{\chi}_{10})^2}{2\sigma_{10}^2}\right]$$

여기서 n_o : 전 입자수

$\bar{\chi}_{10}$: 산술 평균 직경

σ_{10} : $\bar{\chi}_{10}$ 에 대한 표준 편차

(다음 호에 계속)

참 고 문 헌

1. 倉林後雄 : “壓縮點火機關에서의 混合氣生成과 燃燒개설(下)”, 內燃機關 Vol.9, No.6, P.87, 1970
2. Y.Tanasawa, S.Toyoda : “On the Atomizing Characteristics of Injectors for Diesel Engines”, 東北大學報告, Vol.19, No.2, P.135
3. H.Hiroyasu, T.Kadota : “Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber”, SAE paper 740715
4. B.E.Knight : “Communication on the Performance of a Type of Swirl Atomizer”, Proceedings Institution of Mechanical Engineers, P.104, 1955
5. M.M.Elkoth : “Fuel Atomization for Spray Modeling”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.8, PP.61~91, 1982