

액체 연료의 미립화와 분무 특성

Atomization and Spray Characteristics of Liquid Fuel

이 창 식*
Chang Sik Lee

1. 머리 말

액체의 미립화(微粒化, atomization)는 액체 연료의 연소를 위한 분무, 분무 도장, 농약 살포, 의료 기기, 용융 금속의 금속 분말의 제조 등의 여러 분야에 널리 이용되고 있다.

특히 연소 기관은 액체 연료의 미립화와 증발 특성에 따라 기관의 연소와 성능은 크게 변화하므로 연소실 내의 연료 미립화 특성의 개선은 매우 중요하다.

미립화에 영향을 미치는 인자에는 연료의 물성과 분사 기기 및 분사 밸브 등의 구조와 분사 압력 등은 연료 미립화에 주된 영향을 미치는 요인의 하나가 되고 있다.

여기서는 주로 액체 연료의 미립화에 일반적 인 기초 사항과 분무 특성의 표시 방법, 측정법에 대하여 기술하기로 한다.

2. 액체 연료의 미립화 개요

액체 연료를 미립화하는 목적은 미립화시키므로 인하여 단위 체적당의 표면적을 크게 하기 위한 것이지만 사용 목적에 따라서 액체를 알맞은 크기로 미립화하는 것이 필요하다. 이를테면 농약을 살포하기 위한 경우에 농약을 너무 가는 입자로 뿌리면 농약 입자는 모두 비

산되어서 소기의 효과를 거둘 수 없게 될 것이다. 또한 연소 기관의 경우에는 그 형식이나 구조에 따라 각기 적절한 입자로 무화시켜 주는 것이 필요하다. 따라서 액체 또는 액체 연료를 미립화함에 있어서는 그 사용 목적이나 요구를 충분히 파악하고 이것에 알맞는 미립화 방법을 강구하여야 한다.

2-1 액류(液流)의 변형과 분열

미립화에 가장 기본이 되고 있는 원형 노즐로부터 액류의 미립화 모양을 나타낸 것이 그림 1이다.¹⁾

그림에서 (a)는 액체가 적하(滴下, dripping)하는 경우로서 이 현상은 중력과 표면 장력의 평형이 깨어져서 생긴다. 이 상태에서는 액류를 형성하지 못하며 보통 1개의 주된 주적(主滴)과 1~수개의 여적(餘滴)이라 불리우는 작은 방울(小滴)이 주기적으로 발생한다.

속도가 증가하면 (b), (c)와 같이 표면이 매끈하고 투명한 상태로 되며, (c)의 경우와 같은 흐름을 평활류(平滑流, smooth jet)라 한다. (b)는 적하로부터 평활류로 옮겨지는 전이 상태(遷移狀態)를 나타낸 것이다. 더욱 속도가 증가하여 (d), (e)와 같이 되면 표면에 불규칙한 요철을 갖는 파상류(波狀流, wave jet)가 된다. 이 상태에서는 분열의 규칙성이

* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계공학과

없으며 액류의 중간이 끊어지는 것 같이 된다.

(f), (g)는 과생류가 더욱 발달한 단계로서 외기의 작용이 한층 커져서 표면이 요철에 접한 공기의 상대 속도가 증가하므로 그 부분의 압력이 감소되고 변형이 촉진되어 부분 분류 (partially sprayed jet)로 되며, (g) 이상에서는 분무류(spray jet)로 된다.

이상에서 살펴 본 4가지 미립화 모양의 변화를 타나자와⁽¹⁾는 다음과 같이 제트수(Jet No.) J_e 로 분류하였다.

$$J_e = \frac{\rho_l v_l^2 d_l}{\sigma} \left(\frac{\rho_a}{\rho_l} \right)^{0.65} \dots\dots\dots (1)$$

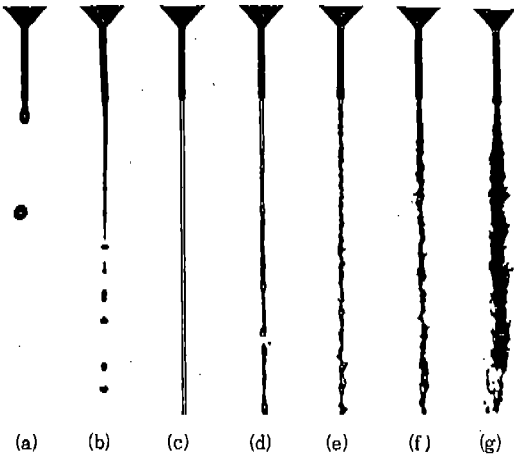


그림 1. 유출속도에 따른 미립화 모양

여기서 d_l 은 액체가 분출되는 구멍의 지름, v_l 은 액체의 유출 속도, ρ_a 는 주위기체의 밀도, ρ_l 은 액체의 밀도, σ 는 표면 장력이다.

즉, $J_e < 0.1$ 에서는 적하, $J_e \approx 0.1 \sim 10$ 에서는 평활류, $J_e \approx 100 \sim 400$ 에서는 과상류, $J_e > 400$ 에서는 분무류로 된다.

하나의 보기로서 30 kg/cm^2 인 정지 공기속에서 $d_l = 0.3 \text{ mm}$ 인 호을 노즐로부터 경유를 200 m/s 의 속도로 분사시켰을 경우의 제트수는 약 7×10^4 이 된다. 따라서 분무류로 됨을 알 수 있다.

2-2 미립화 방법

액체를 미립화하는 방법에는 다음과 같은 방

법이 있다.

(1) 노즐로부터 액체를 고속 분출시키는 방법
액체를 노즐로부터 고속으로 분출시켜서 미립화하는 방법으로 구조가 간단하며, 디젤 기관의 연료 미립화하는 이 방법을 이용한다.

(2) 고속 기체의 분출을 이용하는 방법

고속 기체의 분출을 이용하여 미립화하는 방법을 말한다.

(3) 액체를 충돌시키는 방법

고속으로 분출하는 액과 액 또는 액과 고체의 충돌에 의하여 얇은 액체막을 만들어 미립화하는 방법을 말한다.

(4) 분출부를 고속 회전시키는 방법

회전부(회전 컵, 회전 원판, 회전 분출공 등)로부터 액체를 유출시켜서 미립화하는 방법을 말한다.

(5) 진동에 의하여 미립화하는 방법

액체에 음파나 초음파 진동을 주어 미립화하는 방법을 말한다.

3. 분무 특성의 표시법

분사 밸브로부터 분출되는 연료 유립(油粒)은 사용 목적에 알맞은 크기로 미립화하여야 하며, 연소실의 구조, 기름의 종류, 분사 밸브의 구조, 분사 압력 등에 따라서 미립화 상태는 달라진다.

연료 분무 특성으로 가장 중요하다고 생각할 수 있는 것은 미립화한 입자의 크기, 유립군(油粒群)의 공간적 분포, 분사율 등을 들 수 있다.

3-1 분무 특성의 표시

(1) 입경(粒徑)에 관한 특성

미립화한 입자의 크기를 표시하는데는 평균 입경과 같이 하나의 수치로서 입군 전체의 크기를 표시하는 대표치(representative value)와 분산도(degree of dispersion)가 있다.

분산도는 통계학에서 사용하는 방법을 이용하며, 평균 입경을 \bar{x} , 하나 하나의 입자 지름을 x_i , 그 입자수를 ΔN_i , 총입자수를 N 이라 하면,

$$\text{평균 편차 } \sigma_1 = \frac{1}{N} \sum |x_i - \bar{x}| \Delta N_i \dots\dots (2)$$

$$\text{표준 편차 } \sigma_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}}\right)^2 \Delta N_i} \dots (3)$$

로 표시된다.

또한 입경 x_i 와 그 입자수 ΔN_i 와의 관계를 나타낸 것이 입도 분포(drop size distribution)이다. 여기서 x_i 는 변량, ΔN_i 는 도수에 상당한다.

(2) 공간에 관한 특성

분무의 도달 거리를 표시하는 관통도(貫通度, degree of penetration), 분무 입자가 공간에 분포하는 상황을 나타내는 분포도, 분무가 공간에 어느 정도 분산되고 있는가를 표시하는 분산도 등이 있다. 여기서 분포도는 분무 고유의 특성만은 아니며, 연료 노즐의 위치, 노즐 개수, 기류, 연소실의 모양과 크기 등에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다. 이 밖에도 연료의 분사율(injection rate)이나 입자의 속도 등도 분무 특성과 밀접한 관계를 가지고 있다.

3-2 분무 입경의 표시

분사 밸브로부터 분사되는 액체 연료의 입자군의 크기를 표시하는 방법으로는 평균 입경(平均粒徑, arithmetic mean diameter)과 Sauter 평균 입경(Sauter mean diameter, SMD)가 많이 사용된다.

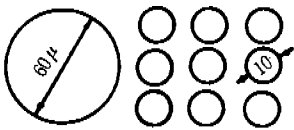


그림 2. 분무 유립군의 보기

하나의 예를 들면 그림 2에서 입경 x_1 인 유립이 ΔN_1 개, 직경 x_2 인 유립이 ΔN_2 , x_3 의 유립이 ΔN_3 개 등이 있다고 하면 평균 입경 \bar{x} 는,

$$\bar{x} = \frac{x_1 \Delta N_1 + x_2 \Delta N_2 + \dots}{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \dots} = \frac{\sum x_i \cdot \Delta N_i}{\sum \Delta N_i} \quad (4)$$

$$N = \sum \Delta N_i \dots\dots\dots (5)$$

로 표시된다. 따라서 $\bar{x} = (60 + 10 \times 9) / 10 = 15 \mu$ 이 된다. 그러나 입자군이 기화하거나 연소할 경우에는 60μ 의 입자 체적은 10μ 의 것의 216배이므로 기화하기 어렵다. 따라서 이와 같은 혼합 입자의 크기를 평균 입경 14μ 으로 다루는 것은 불합리하다.

그림 3은 분무 유립의 실제 입자군 (a)를 평균 입경 \bar{x} 의 지름을 갖는 유립 N 개로 표시한 것이다.

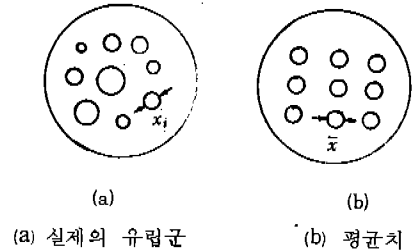


그림 3. 유립군의 평균 직경

그림 3에서 (a)와 (b)를 같게 놓을 수 있는 요소로는 입수(粒數, 0), 직경(1), 표면적(2), 체적(3)의 4가지이므로 입자의 2개의 조합을 구하면 ${}_4C_2 = 6$ 가지의 값이 존재함을 알 수 있다. 하나의 보기로서 (a)와 (b)의 체적과 표면적과의 비로부터 체적-표면적 평균 입경 \bar{x}_{32} 를 구하면,

$$\text{표면적 } \pi \bar{x}_{32}^2 = \pi x_1^2 \cdot \Delta N_1 + \pi x_2^2 \cdot \Delta N_2 + \dots$$

$$\text{체 적 } \frac{\pi}{6} \bar{x}_{32}^3 = \frac{\pi}{6} x_1^3 \cdot \Delta N_1 + \frac{\pi}{6} x_2^3 \cdot \Delta N_2 + \dots$$

$$\bar{x}_{32} = \frac{\sum x_i^3 \Delta N_i}{\sum x_i^2 \Delta N_i} \dots\dots\dots (6)$$

가 된다. 유립의 수 N_{32} 는

$$N_{32} = \frac{(\sum x_i^3 \Delta N_i)^3}{(\sum x_i^2 \Delta N_i)^3} \dots\dots\dots (7)$$

로 표시된다. 식 (6)으로 표시되는 \bar{x}_{32} 는 연료의 증발과 연소와 같이 유립의 표면적에 비례하는 현상에 적용되는 지름으로서, 1926년 독일 사람 J. Sauter 에 의하여 제안되어 Sauter 평균 입경(SMD)이라고 불리운다. 앞에서 다룬 산술 평균 입경 \bar{x} 를 \bar{x}_{10} 로 표시

하면, 나머지 4가지의 평균 입경을 구할 수 있다. 일반적으로 평균 입경과 유립수를 구하는 식은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\bar{x}_{vu} = \left(\frac{\sum x_i^v \Delta N_i}{\sum x_i^u \Delta N_i} \right)^{1/(v-u)} \dots\dots\dots (8)$$

$$N_{vu} = \frac{(\sum x_i^u \Delta N_i)^{v/(v-u)}}{(\sum x_i^v \Delta N_i)^{u/(v-u)}} \dots\dots\dots (9)$$

한편 체적-직경 평균 입경(volume-diameter mean diameter)를 \bar{x}_{31} 이라 하면,

$$\bar{x}_{31} = \left(\frac{\sum x_i^3 \Delta N_i}{\sum x_i \Delta N_i} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (10)$$

$$N_{31} = \frac{(\sum x_i \Delta N_i)^{3/2}}{(\sum x_i^3 \Delta N_i)^{1/2}} \dots\dots\dots (11)$$

로 표시된다. 이 때 \bar{x}_{31} 을 평균 증발 입경이라고도 부른다.

3-3 입도 분포

분사되는 분무 속에 입경이 x_i 와 $x_i + \Delta x$ 사이에 존재하는 유립이 ΔN 개라고 하였을 때 세로축에 유립수 빈도 $\Delta N_i / \Delta x_i$ 를 가로축에 입경을 취하면 그림 4와 같은 입도 분포 곡선을 구할 수 있다. 이 때 $f(x) = dN/dx$ 를 분포 함수라 한다. $f(x)$ 에 관한 누기야마⁽²⁾의 식을 인용하면 다음 식으로 표시된다.

$$f(x) = N A x^\alpha \exp(-B x^\beta) \dots\dots\dots (12)$$

여기서 N 는 총입수, A, B, α, β 는 정수이며, A, B 는 α, β 및 \bar{x} 에 따라 결정된다. 식 (12)는,

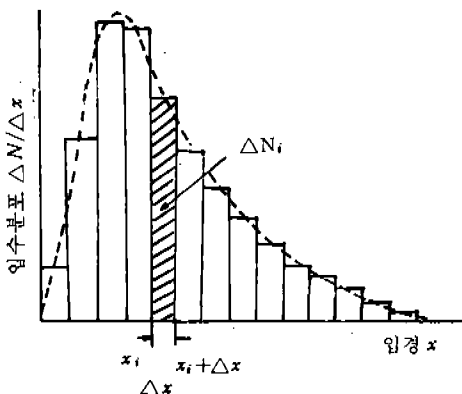


그림 4. 입도 분포 곡선

$$\log_{10} \left(\frac{1}{x^\alpha} \cdot \frac{\Delta N}{\Delta x} \right) = \log_{10}(NA) - \frac{B}{2.3} x^\beta \quad (13)$$

로 표시할 수 있으므로 α, β 가 주어지면 나머지 정수를 구할 수 있다. $f(x)$ 가 식 (12)로 표시되면 세로축에 $\log_{10}(dN/x^\alpha dx)$ 를, 가로축에 x^β 를 취하면 $f(x)$ 는 직선이 된다. 이 때 실험 정수 A 는 $x=0$ 일 때의 $(dN/x^\alpha dx)$ 의 값으로부터

$$A = (dN/x^\alpha dx)_{x=0} \dots\dots\dots (14)$$

구할 수 있고, B 는 식 (13)으로부터 구한다. 분무 입군의 경우 $\alpha = -1 \sim -3, \beta = 1$ 이다.

4. 분포 특성의 측정

4-1 샘플링에 의한 입도 분포 특성

샘플링법은 분무류 내의 여러 곳에서 채취한 시료로부터 분무 전체의 입도 분포를 계산하여 구하는 방법이다.

이 방법은 시료를 바르게 채취하기가 어렵고, 입도 분포 분석에 많은 노력이 필요한 방법이나 측정 장치가 비교적 간단하고, 입경의 위치에 따른 변화를 밝힐 수 있는 특징이 있다.

(1) 액침법(液浸法, immersion liquid method)

유리판에 적당한 유립 반이액을 바르고 이것에 비산하는 유립을 받아서 현미경 촬영하는 방법이다. 이 방법은 유립과 반이액 사이의 밀도를 알맞게 선정하여야 소정의 목적을 달성할 수 있다. 만일 유립의 밀도 ρ_f 가 반이액의 밀도 ρ_i 보다 너무 크면 반이액 속에 잠기게 되고, 너무 작으면 유립은 납작한 모양으로 눌러진 상태로 반이액 결면에 뜨게 되므로 그 모양이 정확하지 못하게 된다.

반이액의 성질로는 액침이 용해되지 않고, 표면 장력이 작아야 하며 반이액의 장력이 너무 크면 액립의 분열이나 합체가 생기기 쉽기 때문이다. 또한 적당한 밀도를 가져야 하며, 색이 투명하고, 물리·화학적으로 안정성이 있어야 한다.

반이액으로는 종류에는 메틸 셀룰로스 3.5% 수용액과 에타놀을 같은 비율로 섞어서 사

용하며, 중유(70%), 경유(30%) 혼합 연료에 대해서는 메틸 셀룰로스 10% 수용액과 메틸알콜을 용적비로 1:5로 섞어서 사용한다.

(2) 흔적법(痕跡法, impression method)

유리판에 등유나 마그네슘 리본 등의 불꽃을 접촉시켜서 그을리게 하면 유리면의 그을음이나 MgO의 얇은 층이 생긴다. 여기에서 액립을 받아서 입자 크기를 측정하는 방법이다.

4-2 분무 전체로부터 입도 분포를 구하는 방법

이 방법에는 분무립의 대표적 지료를 채취하여 계수하는 방법과 분무립 전체를 분급하는 방법이 있다.

(1) 동결법(freezing method)

액체 질소로 냉각한 분무 동결 장치 내에 유립을 분사하여 고화하거나 유립을 저온의 액체에 받아서 고화하는 방법으로서 고화된 액립은 체 또는 현미경 사진 등으로 입도를 분석한다.

(2) 상온 고화법(solidifying method)

상온에서 고화하는 왁스를 용해시키고 이것을 노즐로부터 분사하여 냉각 고화하여 분급하는 방법이다.

(3) 침강법(sedimentation method)

분사된 입자는 그 크기에 따라서 저항이 다르므로 일정 높이로 부터 낙하는 데 요하는 시간이 다르다. 이 방법은 노즐로부터 일정 시간 낙하한 유립이 분무 받이에 낙하하는 시간에 따른 누적 중량을 천칭으로 자동 기록하여 처리하는 방식이다.

(4) 광학적 방법

공간에 부유하고 있는 입자에 광이 접하면 산란을 일으킨다. 분무 전체에 특정 파장을 통과시켜 이 산란광량으로부터 평균 입경을 구

하는 방법으로서 최근 광학 기술의 발달은 분무 입경 및 분포 특성을 구하는데 많은 발전을 가져와서 정도가 높은 측정을 할 수 있게 되었다.

5. 맺 음 말

이상은 주로 액체 연료의 미립화, 미립화 방법, 미립화 특성의 표시 방법 등에 대한 일반적인 사항을 기술하였다. 액체의 미립화는 액체 원료의 분무 연소 이외에도 분말 야금, 분무 건조 및 냉각, 외료 등 각종 산업에 이용되고 있을 뿐만 아니라 학술적으로도 미립화 공학(微粒化工學)이란 학문 분야를 이루고 있다. 특히 연소 기기나 연소 기관의 성능 향상이란 관점에서 분무 특성 및 분무의 증발과 연소에 관한 연구가 더욱 많이 이루어져야 할 것으로 생각한다.

액체의 미립화에 관한 더욱 상세한 사항에 대하여는 액체 연료의 미립화³⁾, 진동에 의한 미립화⁴⁻⁵⁾ 등의 문헌을 참고로 하여 주기 바란다.

참 고 문 헌

1. 棚澤, 豊田: 東北大學工學報告, 22-2, p. 153, 1955.
2. 拔山教授論文集刊行委員會: 熱, p. 163, 1973.
3. 根矢: 內燃機關, 10卷5號, p. 73, 6號, p. 83, 10號, p. 93, 11號, p. 81, 12號, p. 87, 1971.
4. 千葉: 內燃機關, 19卷1號, p. 30, 2號, p. 47, 3號, p. 48, 4號, p. 113, 6號, p. 84, 1980.
5. 千葉: 內燃機關, 11卷2號, p. 11, 1972.