

Atomize법에 의한 용융소재의 고효율 미세화에 관한 연구
(제3보 : 애토마이저의 미립화 기구와 특성)

A STUDY ON HIGH-EFFICIENCY ATOMIZATION OF MOLTEN
MATERIALS

(PART 3: MECHANISM AND CHARACTERISTICS OF ATOMIZATION)

오재건*, 권순익*

J. G. Oh , S. I. Kwon

ABSTRACT

An experimental study of twin-fluid atomization for powder metallurgy has been conducted using a specially designed atomizer in which liquid is first spread into a thin sheet and then exposed on both sides to high-velocity air. Inner air jet worked for supplying liquid and outer air jets disintegrated liquid sheet. The first result of this study were confined to the effect of atomizing quality through experiments with water. The experimental data will be extend to include the influence of atomizing air velocities on mean particle size through experiments with molten material. An experimental equation on the relationship between SMD and the related parameters was taken out;

$$SMD = 0.00302 \frac{(\sigma_L \rho_L D_L)^{0.5}}{\rho_A (V_1 + 1.155 V_2)/2} \left(1 + \frac{W_L}{(W_{A1}/3.33) + W_{A2}} \right) + 0.0148 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma_L \rho_L} \right)^{0.425} D_L^{0.575} \left(1 + \frac{W_L}{(W_{A1}/3.33) + W_{A2}} \right)^2$$

주요기술용어 : Jet(제트), Powder Metallurgy(분말제조), Atomizer(애토마이저), Twin-Fluid Atomization(이류체미립화), Ejector(이젝터)

기호설명

D_L : 액체노즐 출구 직경(m)

ρ_A, ρ_L : 공기, 액체의 밀도(kg/m^3)

W_{A1}, W_{A2} : 1, 2차 공기의 유량(g/s)

W_L : 액체유량(g/s)

P_V : 액체노즐내의 정압(kPa)

V_1, V_2 : 1, 2 차 공기의 속도(m/s)

μ_L : 액체의 동점도(Nsec/m²)

σ_L : 액체의 표면장력(N/m)

d_A : 공기노즐의 출구직경(mm)

L : 액체노즐에서 공기노즐까지 높이(m)

1. 서론

제2보³⁾에서 보고된 액체노즐내부의 흐름장 및 진공특성에 관한 연구 결과에 의하면, 노즐로부터의 분무현상은 액체노즐내부에 있는 공기제트 노즐의 위치, 공기제트의 속도, 액체노즐의 형상 등에 의해 영향을 받고 있는 것을 알 수 있었다.

또한, 중심축의 공기제트와 주위공기의 사이를 흐르는 액막류는 주위공기와와의 상대속도에 의하여 미립화되지만, 주위공기와와의 경계에 있는 큰 액적은 주위공기로 확산, 이탈하여 큰 입자로서 남는다는 것을 알 수 있었다.

제1보²⁾에서 언급한것과 같이 용융체의 미분화에 있어서 (1)분말이 미세할 것, (2)입경이 고를 것 등의 조건을 만족하는 분체의 제조를 위해서는, 이들 액적의 이탈을 막는 미립화방식이 요구된다.

이러한 관점에서 본 연구는, 앞서 보고된 액체공급 및 액막생성기구의 검토를 통하여 미립화용 2차공기를 도입한 애토마이저를 설계·제작하여, 액체의 흡상공급능력과 미립화 실험을 행하였다.

먼저 2차공기를 도입한 경우에 있어서의 액체노즐내부압력 및 분무량을 측정하고 액체의 흡상공급능력을 검토한다음, 미립화실험을 통하여 미립화기구와 특성을 조사하고 평균입경의 실험식을 제안한다.

2. 실험장치 및 방법

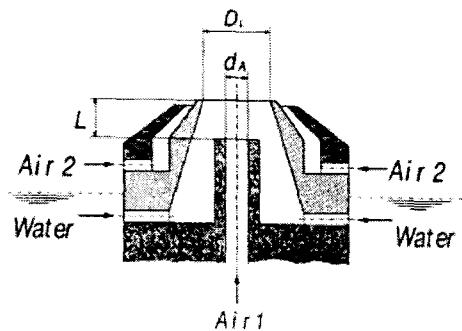


Fig. 1 Atomizer

Fig.1에 실험에 사용한 이류체 애토마이저의 구조를 나타내었다. 이것은 ejector의 원리를 응용한 것으로, 아래쪽에서 유입하는 부압생성용 공기제트 Air1에 의한 액체노즐의 내부의 부압에 의해 흡입된 액체는, 액체노즐의 내벽상에서 액막으로 되어 액체노즐 외부로 분출하고, 외부에서의 환상 미립화용공기 Air2와 내부의 Air1 사이에 끼어 급격히 늘어나서, 미립화 된다.

고온의 용융소재를 공급하는데 있어서 유량조절용의 밸브의 사용이 곤란하고, 또한 액체를 압력으로 밀어내는 등의 방법으로서의 유량을 제어하기 어렵기 때문에, 공기제트의 동반력을 이용하여 재료를 공급하고 생산량을 제어한다고 하는 생각에 기초를 두고 설계된 애토마이저이다.

이 애토마이저는 앞서 보고된 결과로부터, 액면에서 애토마이저 선단까지의 높이가 공기제트에 의한 액체공급량 및 미립화특성에 거의 영향을 받지 않고 있다는 가정 하에서 설계·시작한 것이다.

또한 액체의 분무량 W_L 및 미립화특성은 Air1과 Air2의 유량 W_{A1} , W_{A2} 를 조절함으로써 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다.

실험은 의사유체로서 수돗물을 대상으로 하여 애토마이저 선단에서 Air1의 분출구까지의 거리 L 및 Air1과 Air2의 유량을 변화시켜 애토마이저 내부의 부압의 크기 및 분무량, 평균입경 등의 미립화특성을 조사하였다.

Air1분출구의 지름 d_A 는, 앞서 보고된 액막생성의 실험으로부터 $d_A=1.5, 3.0mm$, 액체노즐의 바닥면의 직경은 $18mm$, 액체노즐의 경사각도는

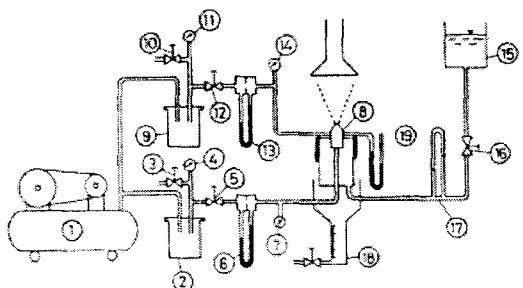


Fig. 2 Experimental Apparatus

$\alpha=10^\circ$, 출구지름 $D_L=10\text{mm}$, Air2의 충돌각은 G. H. Johnston 외^{(9),(10),(11),(12)}의 많은 연구자들의 연구결과를 참고로 하여 60° 로 고정하였으며, Air1은 0~10.0 g/s, Air2는 0~40.0 g/s의 범위에서 실험을 하였다.

Fig.2는 물의 미립화 실험장치의 계통도이다.

ejector 구동용(부압생성용) 공기 Air1과 미립화용공기 Air2는 컴프레서 ①에 의해 가압되어, 각각 서지탱크②, ③, 니들밸브④,⑤,⑥,⑦, 오리피스유량계⑧,⑨, 압력계 ⑩,⑪,⑫등으로 측정, 조절되어 에토마이저 안으로 들어 간다.

물은 항상 overflow되어 액면이 일정하게 유지되고, Air1에 의해 생성된 에토마이저 내부의 부압에 의해 빨려 올라가 미립화 된다.

물의 분무량은 유량계 ⑬로 측정된 공급유량과, 미립화되지 않고 넘쳐 흘러 매스실린더 ⑭로

측정된 물의 유량으로부터 계산하였다.

노즐내부의 부압의 크기는 물의 유로를 차단한 상태에서 마노미터 ⑮로 측정하였다.

분무의 모양은 투과광 및 반사광 사진촬영에 의해 관찰하고, 입경은 액침법으로 채집된 액적을 현미경으로 확대하여, CCD 카메라로 촬영하고 그 화상을 처리하여 입경을 측정, 평균입경등을 구하였다.

3. 미립화용 2차공기에 의한 액체노즐 내부의 부압 및 물의 흡상분무량의 측정

미립화용 공기제트 Air2는 액체노즐 출구주위의 환상 슬릿으로부터 중심축을 향하여 분출하여 Air1에 의해 만들어진 액막을 분열시키는데,

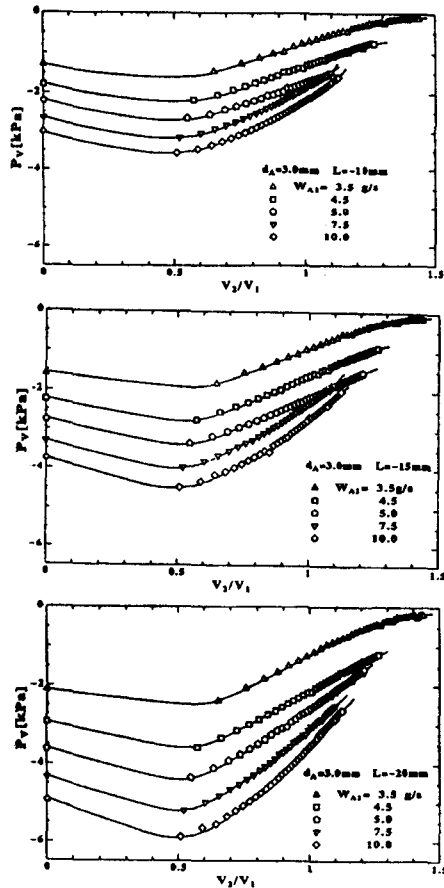


Fig. 3 Relation of P_v and V_2/V_1

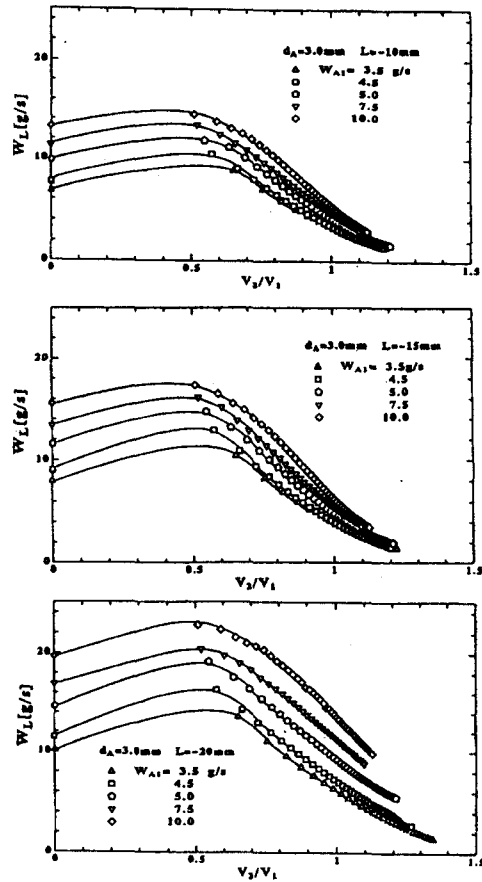


Fig. 4 Relation of V_2/V_1 and W_L

분출방향이 중심축을 향하고 있기 때문에 Air1의 제트속도에 영향을 미친다.

이 때문에 Air1과 Air2의 속도비에 따라 액체노즐 내부의 부압의 크기 및 분무량이 결정된다.

Fig.3은 Air1노즐의 출구직경 $d_A=3.0mm$, Air1노즐의 위치 $L=-10, -15, -20mm$ 의 경우에 있어서 Air1의 분출속도 V_1 과 Air2의 분출속도 V_2 의 비 V_2/V_1 의 변화에 대한 액체노즐 내부정압 P_V 의 변화를 나타낸 것이다.

Air1의 유량 W_{A1} 이 많아짐에 따라 액체노즐 내부의 부압 P_V 가 커진다. 또한 W_{A1} 을 일정하게 하고 W_{A2} 를 늘리면, 즉 V_2/V_1 이 커지면 P_V 는 처음에는 감소하지만 그 후 점차 증가하여 간다. $V_2/V_1 < 0.5$ 에서 Air2는 Air1과 충돌하여 Air1을 가속하기 때문 부압은 커지지만, V_2 가 빨라짐에 따라 중심축을 향하여 60° 로 분출하는 Air2가 Air1의 제트의 유로를 제한하기 때문에 속도가 감소되어 부압은 약해진다.

공기제트 노즐의 위치가 액체노즐의 선단에서 멀어질수록, 즉 L 의 절대치가 클수록 Air1에 의한 액체노즐 내부의 부압이 커진다.

Fig.4에 V_2/V_1 의 변화에 의한 흡상분무량의 변화를 나타내었다. 물의 흡상분무량은 W_{A1} 이 커질수록, V_2/V_1 이 작을수록, L 의 절대치가 커질수록 많아진다. 즉 Fig.3의 그림과 비교해 보면 액체노즐 내부의 부압이 크면 분무량도 많아진다는 것을 알 수 있다.

4.분무사진

Fig.5는 $d_A=3.0mm$, $L=-10mm$, $W_{A1}=2.0g/s$ 인 경우의 W_{A2} 의 변화에 따른 분무의 형태의 변화를 나타낸 것으로, 액막의 분열변화를 관찰하기 위해 촬영한 투과광사진이다.

$W_{A2}=0g/s$ 의 경우, 액체는 액체노즐 출구에서 깨끗한 액막으로 되어 분출하는 것을 알 수 있다.

W_{A2} 가 증가함에 따라서 액막은 분무의 내부를 흐르는 Air1과 외부에서 충돌하는 Air2 사이의 전단력에 의해 늘어나서 분열하여 환상의 중공의 분무류로 되며, Air2의 충돌점 부근에서의

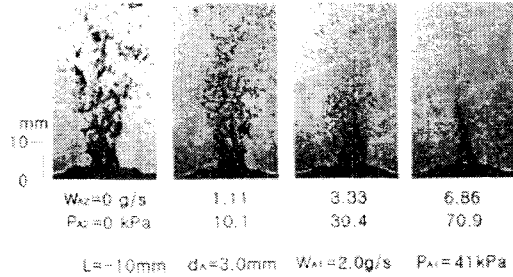


Fig. 5 W_{A2} Effect on Spray

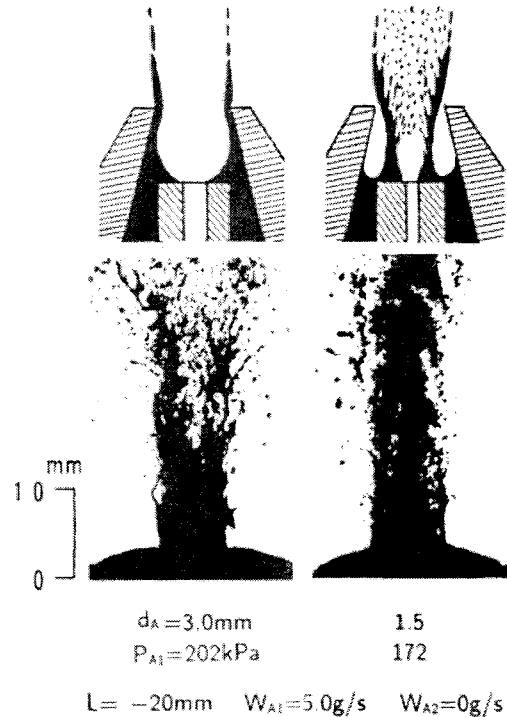


Fig. 6 d_A Effect on Spray

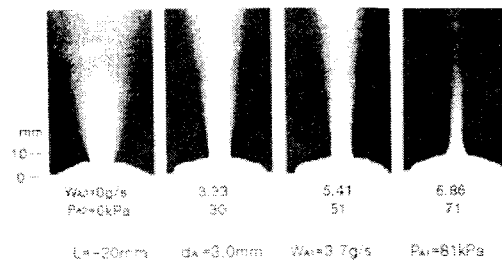


Fig. 7 W_{A2} Effect on Spray

분무의 지름 및 분무각은 좁아지는 것을 알 수 있다.

Fig.6에서 $d_A=1.5, 3.0mm$ 인 경우의 분무사진을 비교하였다.

$d_A=3.0mm$ 의 경우, 공기제트 노즐로부터 분출한 Air1은 액체를 노즐 내벽면에 밀어 붙여 액체는 깨끗한 환상액막류로 되어 애토마이저로부터 분출하지만, $d_A=1.5mm$ 의 경우, 액체는 기류에 동반되어 분출한다.

Fig.7은 $d_A=3.0mm, L=-20mm, W_{A1}=3.7g/s$ 의 경우, W_{A2} 의 증가에 의한 분무의 연속광사진으로 촬영의 노광시간은 30sec로 하였다.

W_{A2} 가 증가함과 동시에 분무량은 적어지고 제트의 충돌점에서의 분무류의 지름이 작게 되는 것을 알 수 있다. V_2 가 빨라질수록 제트의 충돌점에서의 분무류의 직경은 작아지는 것을 알 수 있다.

5.입경측정

5.1 입경측정 실험장치 및 방법

Fig.8에 입경 측정 및 화상처리장치의 개략도를 나타내었다. 슬라이드글래스에 실리콘 오일을 도포하여 분무의 상부 300mm 위치에서 입경을 채취하여 현미경으로 확대, CCD카메라로 촬영한 후, 화상처리하여 입경을 계측하였다.

실리콘오일은 점도 1000, 10000 c.p.의 것을 일정비율로 혼합하여 사용하였는데, 분무의 액적 입경이 작은 경우는 점도를 낮추어 액적이 실리콘

콘오일 속으로 쉽게 침투하게하고, 입경이 큰 경우에는 액적이 실리콘 오일 내부에서 합체되는 것을 방지하기 위하여 점도를 높여서 사용하였다. 입경의 화상처리장치는 平井⁸⁾의 장치를 개량한 것으로, 현미경의 접안부에 부착된 CCD 카메라에서의 아날로그 신호를 A/D 변환하여 1~16 비트의 디지털신호로 바꾸어, 이 신호를 화상처리하여 입경을 계측하였다.

여기서 대물렌즈의 배율을 바꾸면 1화소의 크기가 변하기 때문에, 1화소의 크기를 교정한 뒤 측정하였다. 이 실험에서의 1화소는 $0.86\mu m$ 이다.

5.2 입경측정결과

Fig.9에 $d_A=3.0mm, L=-10, -15, -20mm$ 의

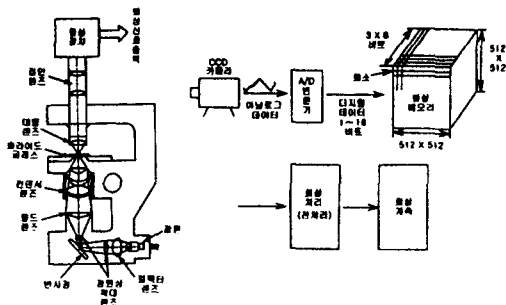


Fig. 8 Droplet Diameter Reader

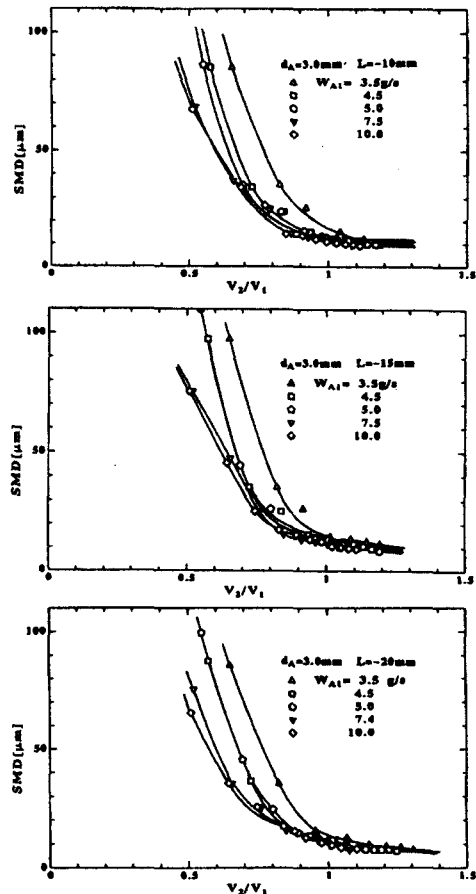


Fig. 9 Relation of W_{A2} and SMD

경우의 V_2/V_1 의 변화에 따른 Sauter's 평균입경 SMD의 변화를 나타내었다.

V_2/V_1 이 증대함에 따라 SMD는 급격히 작아지며 $SMD < 20\mu m$ 에서는 그 변화가 완만하게 되는 것을 알 수 있다.

또한 W_{A1} 이 많아질수록 속도비에 따른 SMD의 변화는 완만하게 된다. 이것은 W_{A1} 이 많아질수록 분무량이 증가하여 기액유량비가 작아져 액체의 단위질량에 가해지는 분열 에너지가 적어져서 평균입경의 변화는 완만하게 된다고 생각된다.

Fig.4에 의하면 Air1의 출구위치 L의 절대값이 크게 되면 분무량이 증가하므로 L에 의해 분무량을 제어하는 것이 가능하지만, L에 의한 평균입경의 변화는 거의 보이지 않는다. 이것은 L

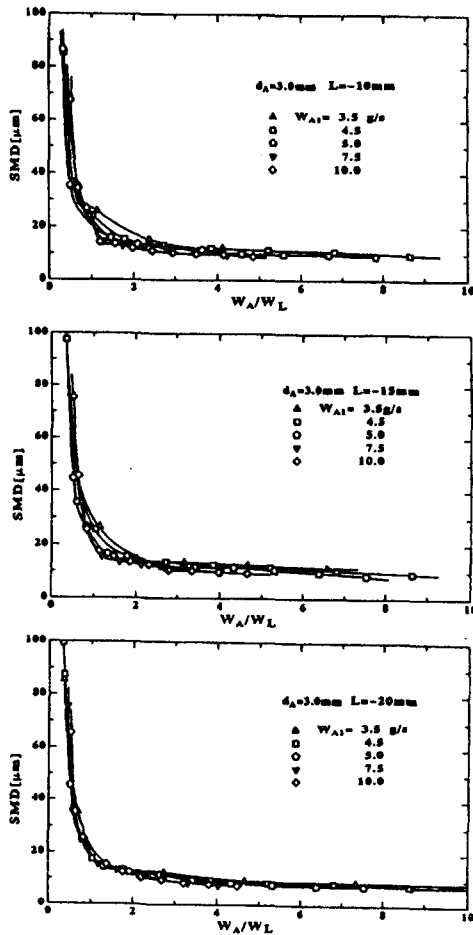


Fig. 10 Relation of W_L/W_A and SMD

의 절대값이 커지면 분무량이 증가하고, 같은 값의 V_2/V_1 에 있어서의 기액유량비가 감소하여 SMD가 커져야한다. 그러나 L이 커짐에 따라 얇은 액막의 생성이 용이하게 되어 이것이 평균입경을 작게하는 요인이 되어 기액유량비의 감소에 의한 평균입경의 커지는 것을 억제하므로 평균입경에 대한 영향은 거의 없다고 생각된다.

Fig.10에 $d_A=3.0mm$, $L=10mm, 15mm, 20mm$ 의 경우 Air1과 Air2의 유량의 합 W_A 와 분무량 W_L 과의 유량비 W_A/W_L 에 대한 SMD의 변화를 나타내었다.

$W_A/W_L < 0.5$ 의 범위에서 평균입경은 급격히 변화하고 있지만, $W_A/W_L > 1$ 의 범위에서는 거의 변화하지 않고 있다.

$L=20mm$ 의 경우, W_{A1} 에 의한 SMD의 변화는 거의 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 Air1은 그다지 미립화에 유효하게 기여하지 않고, Air2가 분무량을 감소시킴과 동시에 미립화에 기여하기 때문이며, 또한 L이 작아질수록 W_{A1} 의 감소에 의해 SMD가 증대하는 것을 알 수 있다. L의 절대치가 작을수록 V_2/V_1 에 의한 분무량의 변화가 작으므로 미립화용 에너지가 적어져서 미립화가 나쁘게 된다.

Fig.11에 $d_A=3.0mm$, $L=20mm$, $W_{A1}=5.0g/s$ 의 경우, W_{A2} 에 의한 분무의 입도분포를 나타내었다. 모드 입경은 약 $5.0\mu m$ 이며, W_{A2} 에 의한 변화는 없으나, 모드입경에 있어서의 입도빈도가 W_{A2} 가 많아질수록 증대한다. 또한 최대입경은 $W_{A2}=3.1g/s$ 에서는 $121\mu m$, $W_{A2}=38.4g/s$ 에서는 $17\mu m$ 이다. 액체노즐로부터 액막상으로 분출하는

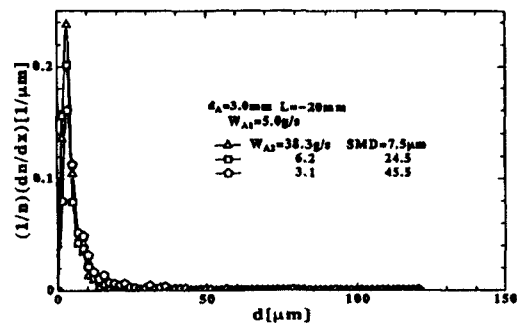


Fig. 11 Drop Size Distribution in Spray

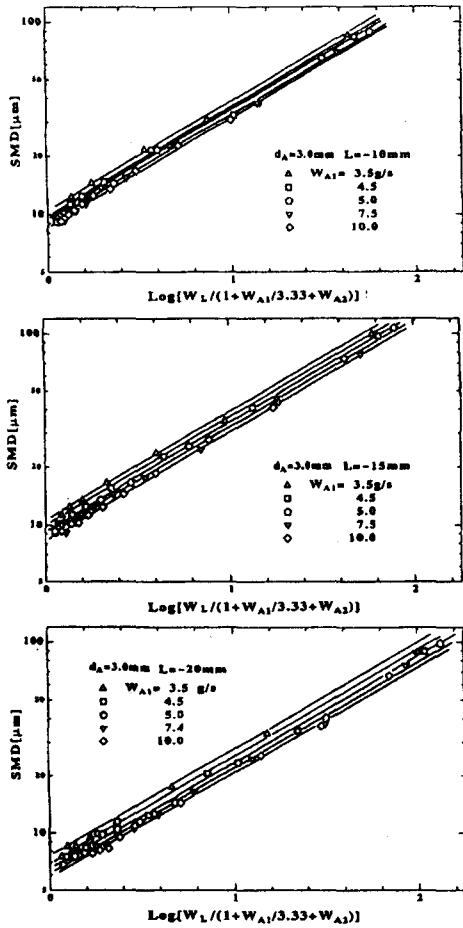


Fig.12 W_L/W_A effect on SMD

액체를 Air1과 Air2 사이에 끼워서 분열시키는 이 방식에서는 W_{A2} 가 많아질수록 제트로부터 이탈하는 입자가 생기기 힘들기 때문에 입도분포가 개선된다고 생각한다.

5.3 평균입径의 실험식 도출

물의 미립화 실험결과를 바탕으로 미립화특성에 관여하고있는 여러가지의 인자를 확인하고, 다른 연구자의 연구^{4),9),11),12)} 및 용융체의 미립화 실험 결과와 비교하기 위해서 평균입径의 실험식을 구하였다.

실험범위는 $d_A=3.0mm$, $L=-6 \sim -20mm$, $V_1=190 \sim 250m/s$, $V_2=123 \sim 273m/s$ 로 하였다.

실험식의 도출에 앞서 Rizkalla &

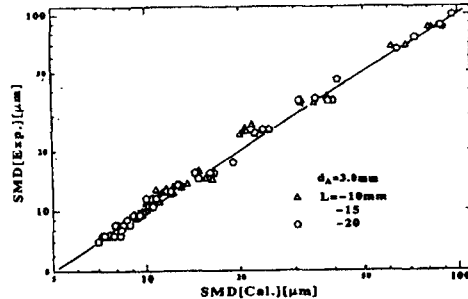


Fig.13 $SMD(Exp.)$ and $SMD(Cal.)$

Lefebvre^{5),6),7)} 에 의한 액막의 내부와 외부에 흐르는 공기로 미립화하는 핀돌 타입 노즐의 실험식을 참고로 하였다.

$$SMD = 0.00302 \frac{(\sigma_L \rho_L D_L)^{0.5}}{\rho_A (V_{A1} + 1.155 V_{A2})/2} \left(1 + \frac{W_L}{(W_{A1}/3.33) + W_{A2}} \right) + 0.0148 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma_L \rho_L} \right)^{0.425} D_L^{0.575} \left(1 + \frac{W_L}{(W_{A1}/3.33) + W_{A2}} \right)^2$$

그러나, 본 실험에 사용된 애트마이저는 액막의 내부와 외부에 흐르는 미립화용 공기의 속도 및 유량이 다르기 때문에, V_A 및 W_A 의 함을 고려하여, 액막 두께와 관계하는 정수를 구할 필요가 있지만, 액막의 두께는 측정할 수 없기 때문에 최소자승법을 사용하여 정수를 도출하였다.

공기의 속도에 대하여서는 V_A 와 $1.155V_A$ 의 평균치를 이용하고, 공기의 유량에 관해서는 미립화에의 Air1의 작용이 적기 때문에 $W_{A1}/3.33$ 와 W_{A2} 의 합을 사용하였다.

속도항 1.155의 정수는 Air2의 충돌각도와, 유량항 3.33의 정수는 Air1의 노즐지름 d_A 와 관계하는 값이다.

여기서, D_L 은 액체노즐 출구직경(m)이다.

이 실험식으로부터 Air1의 미립화에의 기여는 Air2보다도 적다는 것을 알 수 있다.

Fig.12는 실험식의 유량항과 SMD 의 관계를 Log-Log로 나타낸 것이다.

L 및 W_{A1} 에 관계없이 같은 기울기로 직선적

으로 나타나므로, 유량항의 치환이 타당하였음을 확인할 수 있다.

Fig.13은 실험식으로부터 계산된 SMD와 실험으로 얻어진 SMD를 비교한 것으로, 실험치와 계산치가 거의 일치하고있는 것을 알 수 있다.

6. 결론

액면의 변화에 영향을 받지 않고, 용융체를 안정하게 공급함과 동시에 좋은 미립화를 가능하게 하기 위해서, 개량한 애토마이저를 사용하여 액체의 공급기구 및 액막의 생성기구, 미립화 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1)액체노즐 내부의 정압 및 액체의 흡상공급 분무량은 Air1 및 Air2의 속도비에 의해 변화하고, 용융체의 생산량은 이 속도비에 의해서 제어할 수 있다.

(2)액체의 흡상공급 분무량 액체노즐내부의 정압의 변화에 거의 비례하여 변화하지만, Air1의 출구 위치 및 유량에 따라 다르다.

(4)평균입경에는 Air1보다 Air2가 더 큰 영향을 미친다.

(5)본 연구의 결과로부터 평균입경의 실험식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SMD = 0.00302 \frac{(\sigma_L \rho_L D_L)^{0.5}}{\rho_A (V_1 + 1.155 V_2)/2} \left(1 + \frac{W_L}{(W_{A1}/3.33) + W_{A2}}\right) + 0.0148 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma_L \rho_L}\right)^{0.425} D_L^{0.575} \left(1 + \frac{W_L}{(W_{A1}/3.33) + W_{A2}}\right)^2$$

7. 참고문헌

(1) 吳在健, “高效率ガスアトマイズ法による熔融素材の微粒化に関する研究”, 東北大學工學研究科 精密工學專攻 博士學位論文, 1994. 3

(2) 오재건 외, “Atomize 법에 의한 용융소재의 고효율 미세화에 관한 연구(제1보:공기제트에 의한 액체의 공급기구)”, 한국액체미립화학회지, 2권2호, 1997

(3) 오재건 외, “Atomize 법에 의한 용융소재의 고효율 미세화에 관한 연구(제2보:이젝터의 원리를 이용한 액체노즐의 액체공급 및 액막생성)”, 한국액체미립화학회지, 3권3호, 1998

(4) N.Dombrowski and W.R.Johns, “The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets”, Chemical Engineering Science, Vol.18, 203-214, 1963

(5) A.A.Rizkalla and A.H.Lefebvre, “The Influence of Liquid Properties on Airblast Atomizer Spray Characteristics”, J. of Eng. for Power, 173-179, 1975

(6) A.A.Rizkalla and A.H.Lefebvre, “The Influence of Air and Liquid Properties on Airblast Atomization”, J. of Fluid Eng., No.97, 315-320, 1975

(7) A.H.Lefebvre, “Airblast Atomization”, Prog. Energy Combustion. Sci., Vol.6, 1980

(8) 平井 哲郎, 永井 申樹, 日本機械學會論文集 (B備), Vol. 50, No.455, 1776-1784, 1984

(9) G.H.Johnston and J.B. See, “Formation of Liquid Metal Droplets”, Proc. Eng Pyromet. Inst. Min. Met. London, 1974

(10) S.P.Mehrotra, “Mathematical Modelling of Gas Atomization Process for Metal Powder Production(Part1,2)”, Powder Metallurgy International, Vol.13, No.2-3, 80-84, 132-135, 1981

(11) O.S.Nichiporenko, “Investigation of the Process of Bronze Atomization by Air”, Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol.60, No.112, 947-949, 1967

(12) C.C.Miesse, “Correlation of Experimental Data on the Disintegration of Liquid Jets”, Industrial and Engineering Chemistry, Vol.47, No.9, 1690-1701, 1955