

가스분무장치에서 열유동 특성에 관한 전산해석

유성연 · 이상윤

충남대학교 기계설계공학과, 급속응고신소재연구소

Numerical Simulation on Flow and Heat Transfer in a Gas Atomizer

S. Y. Yoo and S. Y. Lee

Dept. of Mechanical Design Engineering, Rapidly Solidified Materials Research Center,
Chungnam National University, Taejeon, 305-764, Korea

(Received March 17, 1997)

ABSTRACT Flow and heat transfer characteristics of gas, and trajectories and cooling characteristics of droplets/particles in a gas atomizer were investigated by a numerical simulation using FLUENT code. Among several kinds of solution method, the k- ϵ turbulent model, power-law scheme, SIMPLE algorithm is adopted in this study. Momentum and heat exchange between a continuous phase(gas) and a dispersed phase(particle) were taken into account. Particle trajectories are simulated using the Lagrangian method, and Rosin-Rammler formula is used for the particle size distribution. Streamlines, velocities and pressures of gas, and trajectories, velocities and cooling rates of particles have been investigated for the various gas inlet conditions. Small but very intensive recirculation is found just below the melt orifice, and this recirculation seems to cause the liquid metal to spread radially. Particle trajectory depends on the particle size, the location of particle formation and the turbulent motion of gas. Small particle cools down rapidly, while large diameter particles solidify slowly, and this is mainly due to the differences in thermal inertia.

1. 서 론

급속응고 분말은 성형성이 좋고 기계적성질이 우수하기 때문에 사용범위가 점차 증대해가고 있다. 급속응고 분말을 제조하는 기술은 gas atomization, water atomization, ultrasonic atomization, centrifugal atomization, rotating electrode atomization, melt spinning, laser melting and quenching, plasma deposition 등 여러가지 방법이 있다. 그 중에서 가스분무법(gas atomization)은 분말의 크기를 매우 작게 할 수 있으며, 분말의 대량생산이 가능하고, 장치가 비교적 간단하기 때문에 가장 광범위하게 사용되고 있다.¹⁾ 가스분무장치는 가열로, 가스공급장치, Atomizer, Chamber, 분말수집 및 가스추출장치로 구성되어 있다. 가스분무법은 질소, 아르곤, 헬륨, 공기와 같은 가스를 고압상태에서 가스노즐을 통해 분출시켜 가열로에서 용융금속노즐을 통해 흘러 나오는 용융금속에 충돌

시킨다. 이때 가스와 용융금속의 충돌에너지에 의해 용융금속의 미립화되고 가스와 미립화된 분말 사이의 대류열전달로 급속냉각이 이루어진다.

가스분무법에서 제조된 분말의 크기와 균일성은 가스의 유동특성 의해 좌우되며, 분말의 금속학적 성질과 기계적 성질은 가스와 분말 사이의 열전달 속도에 크게 의존한다. 따라서 성능이 우수하고 생산성이 좋은 가스분무장치를 설계하기 위해서는 가스분무장치에서 가스의 유동특성과 미립화된 분말의 냉각특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 지금까지 이 분야에 대한 연구는 주로 실험적인 방법으로 수행되었으며²⁻⁶⁾ 전산해석 방법을 도입한 연구는 거의 없다.

본 연구자는 가스노즐의 형상과 크기, 가스의 정체 압력, 용융금속노즐과 가스노즐의 상대적 위치 등이 가스분무장치 Chamber에서의 유동특성에 미치는 영향을 고찰한 바 있다.⁷⁾ 선행 연구에서는 가스가 분출되어 압력변화가 심하게 일어나는 노즐 주위의 국부

영역에 대해서 유동해석만을 수행하였으나, 본 연구에서는 충남대학교 금속응고신소재연구소에서 설계·제작한 가스분무장치 Pilot Plant를 해석대상 모델로 선정하여 Chamber 전체에서의 유동해석과 열전달 해석을 병행하여 수행하였다. Chamber에서 가스의 유선, 속도분포, 압력분포, 온도분포 등을 구하고, 액적/분말과 가스사이의 운동량전달과 열전달을 고려하여 분말의 궤적, 분말의 속도, 분말의 냉각속도 등을 구하였다. 또한 선행 연구에서는 자체 개발한 프로그램을 사용하였으나 이 프로그램은 열전달해석과 분말과 가스의 이상유동 해석을 할 수 없기 때문에 본 연구에서는 범용 열유체 전산해석 Code인 FLUENT를 사용하여 해석을 수행하였다. 본 해석결과는 가스 분무장치의 노즐과 Chamber 설계를 위한 기초자료로 사용할 수 있으며, 가스와 분말의 유동특성 및 냉각특성 규명을 위한 데이터베이스로 활용할 수 있다.

2. 지배방정식과 경계조건

2.1. 가스유동

그림 1과 같은 가스분무장치 Chamber에서 가스유동을 해석하기 위한 지배방정식을 일반형으로 표시하면 다음과 같다.⁸⁾

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right] + S_\phi \quad (1)$$

여기서 좌변 첫번째 항은 검사체적 내의 시간에 따른 물리량의 변화를 나타내고, 두번째 항은 대류항(convection term), 우변 첫번째 항은 확산항(diffusion term), 두번째 항은 생성항(source term)을 나타낸다. 변수 ϕ 에 따라 지배방정식이 달라지며 $\phi=1$ 인 경우 연속방정식, $\phi=U$ 와 V 인 경우는 운동량방정식, $\phi=H$ 인 경우는 에너지방정식, $\phi=k$ 와 ϵ 인 경우는 난류방정식을 나타낸다. 각각의 지배방정식에 대한 확산계수 Γ_ϕ 와 생성항 S_ϕ 는 다른 형태로 표시된다. 본 연구에서는 선행 연구에서와는 다르게 Chamber 내의 가스유동을 난류유동으로 해석하였으며 가장 보편적으로 사용되는 k- ϵ 난류모델을 사용하였다.

경계조건은 가스가 노즐로 부터 나오는 Chamber 입구, 분말과 가스가 빠져나가는 Chamber 출구, 벽, 대칭축에 대해서 각각 다음의 조건을 사용하였다.

$$\text{- 입구 : } U=U_{in}, V=V_{in}, P=P_{in}, T=T_{in}$$

$$\text{- 출구 : } \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\text{- 벽 : } U=V=0, \text{ adiabatic or } T=T_w, \text{ 벽함수}$$

$$\text{- 대칭축 : } \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

2.2. 분말의 유동

고속가스와 용융금속의 충돌에너지에 의해서 미립화된 액적과 액적이 응고된 분말의 유동을 계산하기 위해서는 분말과 가스사이의 운동량전달과 열전달을 고려하여야 한다. 분말의 유동은 Lagrangian방법으로 해석하였으며 분말에 작용하는 힘의 평형으로 부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u_\infty - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho_\infty)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

여기서 좌변은 관성력(inertia force)이고, 우변의 첫번째 항은 항력(drag force), 두번째 항은 부력(buoyancy force), 세번째 항은 기타 외력(external force)이다. 식 (3)을 적분하여 분말의 속도를 계산하고 속도를 적분하여 분말의 궤적을 구한다.

분말의 냉각을 해석하기 위한 열평형방정식은 다음과 같다.

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = hA (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{fg} \quad (4)$$

여기서 좌변은 시간에 따른 분말의 내부에너지 변화이고, 우변의 첫번째 항은 대류열전달량을 두번째 항은 응고에 따른 잠열을 나타낸다. 식 (4)의 해는 Runge-Kutta 방법을 사용하여 구하였으며 분말과 가스 사이의 대류열전달계수는 다음과 같은 Ranz와 Marshall의 실험식을 사용하였다.

$$Nu=2.0+0.6Re^{0.5} Pr^{1/3} \quad (5)$$

가스 중에 분말이 유동하는 동안 분말과 가스 사이에 운동량전달과 열전달이 일어나서 Chamber내의 가스의 유동장과 온도분포가 달라진다. 분말과 가스 사이의 운동량전달은 항력과 같으며 다음과 같이 계산된다.

$$F = \sum \frac{18\mu_g C_D Re}{\rho_p D_p^2 24} (u_p - u_g) m_p \Delta t \quad (6)$$

한편 분말과 가스사이의 열전달량은 분말의 내부에

너지 변화량으로 부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q = \left[\frac{\bar{m}_p}{m_{p,o}} c_p \Delta T_p + \frac{\Delta m_p}{m_{p,o}} (h_{fg} - \int_{T_i}^{T_f} c_{p,i} dT) \right] m_{p,o} \quad (7)$$

분말과 가스사이에서 전달된 운동량과 열량은 가스유동의 운동량방정식과 에너지방정식을 계산할 때 생성항으로 처리한다.

분말에 대한 경계조건은 분말이 출구를 만나면 탈출(escape)하고 벽을 만나면 반사(reflect)하는 것으로 처리하였다. 분말의 생성위치, 온도, 속도, 질량유량 등을 초기조건으로 줄 수 있으며 분말의 크기 분포는 다음과 같은 Rosin-Rammler 분포식을 사용하였다.

$$M_D = \exp\left(-\left(\frac{D}{D}\right)^n\right) \quad (8)$$

여기서 M_D 는 직경이 D 보다 큰 분말의 질량분율은 나타내고, D 는 분말의 평균직경이고 n 은 분산계수이다.

3. 전산해석 기법

유한체적법(FVM: Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식 (1)의 차분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_i) + S_c \quad (9)$$

범용 열유체해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 (9)의 해를 구하였다. FLUENT는 유동, 열전달, 상변화, 연소 등과 관련된 현상의 수치해석을 위해 개발된 프로그램으로 전처리장치인 preBFC와 Solver와 후처리장치인 FLUENT로 구성되어 있다. FLUENT는 완전내연기법(fully implicit scheme)을 사용한 유한체적법 Code로서 속도 등 벡터량과 압력, 온도 등 스칼라 양을 같은 위치에 저장하는 비교차격자계(non-staggered grid system)를 사용하며, 대류항을 계산하기 위한 격자점 간의 보간은 power-law법, 2차 상류차분법, 고차 상류차분법인 QUICK법을 선택하여 사용할 수 있다. 난류모델은 k-ε 모델을 기본으로 사용하고 RSM(Reynolds Stress Model)과 RNG(Renormalization Group) k-ε 모델을 선택적으로 사용할 수 있다. 수치해법은 SIMPLE과 SSMPLC를 채용하고 있다.⁹⁾ 본 연구에서는 power-law scheme, k-ε 난류모델, SIMPLE algorithm을 사용하여 전산해석

을 수행하였다.

Chamber 내의 유동을 2차원 축대칭으로 가정하여 계산하였으며 길이방향(x방향)으로 230개 반경방향(r방향)으로 65개의 격자를 배치하였으며 속도와 압력변화가 급격하게 일어나는 가스노즐 출구 부근에 격자를 밀집시켰다. 실제로는 더 많은 격자가 필요하나 본 연구에서 사용한 Workstation(HP 730)의 용량(CPU 32 M)한계 때문에 격자수를 더 이상 늘릴 수 없었다. 수렴판정은 다음의 전영역 잔류항의 총합이 10^{-4} 이하가 되는 시점으로 보았다.

$$\bar{R} = \frac{\sum_{nodesP} |[A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P]|}{\sum_{nodesP} |(A_P \phi_P)|} \leq 10^{-4} \quad (10)$$

4. 결과 및 고찰

충남대학교 급속응고신소재연구소에서 설계·제작하여 운전 중에 있는 그림 1과 같은 가스분무장치를 모델로 선정하여 수치해석을 수행하였다. 가스노즐은 그림 2에 보인 바와 같은 환형노즐(annular nozzle)을 사용하였으며 내경이 13.5 mm 외경이 14.3 mm로 간격이 0.8 mm이며 노즐의 경사각은 10도이다. Chamber는 원통형으로 길이가 6700 mm이며 최대직경은 1800 mm이고, Atomizer가 놓이는 상부의 직경은 600 mm, 출구의 직경은 350 mm이다. 가스노즐 출구 부근에 격자를 밀집시켜야 하는데 전체 Chamber의 크기에 비해서 노즐의 크기가 매우 작기 때문에 계산 Cell의 종횡비가 커져서 수렴성이 아주 나쁘다. 실제 크기의 Chamber에 대해서 수치해석을 시도하였으나, HP 730 workstation으로 일주일의 계산해도 만족할 만한 해를 얻을 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 가스 노즐의 크기와 Chamber의 형상은 그대로 유지한채 Chamber의 크기만 1/5로 축소하여 계산을 수행하였으며 이 경우는 2일 정도의 계산으로 수렴된 해를 얻을 수 있었다.

가스는 질소가스로 가정하고, 분말은 Al-7wt%Si으로 가정하였으며 계산에 사용된 주요 물성치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{가스} : \rho &= P/RT, & \mu &= 1.67 \times 10^{-5} \text{ kg/m s} \\ C_p &= 1.04 \text{ kJ/kg K}, & k &= 2.43 \times 10^{-2} \text{ W/m K} \\ \text{분말} : \rho &= 2700 \text{ kg/m}^3, & C_p &= 1.075 \text{ 1.157 kJ/kg K} \\ & & \text{LatentHeat} &= 395 \text{ kJ/kg}, & k &= 0.16 \text{ W/m K} \end{aligned}$$

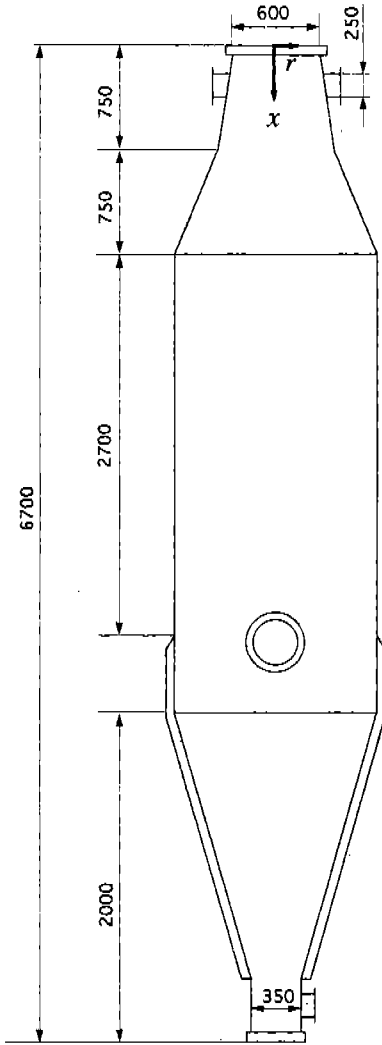


Fig. 1. Schematic diagram of atomization chamber installed in RASOM.

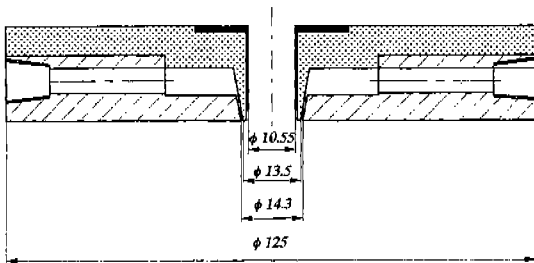


Fig. 2. Schematic diagram of the nozzle in the gas atomizer.

그림 3은 전체 Chamber에서의 가스의 유선(streamline)을 나타내고 있다. Chamber의 반 이상을 차지

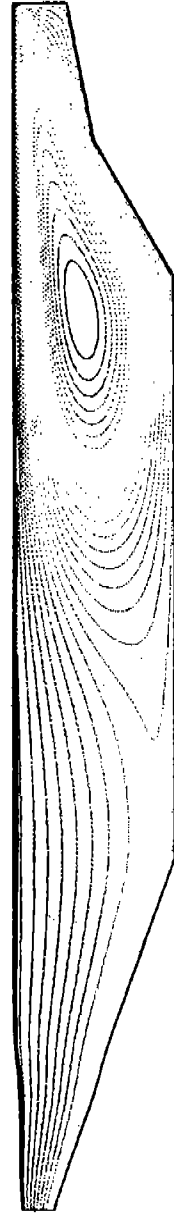


Fig. 3. Streamlines of gas in a chamber.

하는 매우 큰 재순환 유동이 존재하며 이것은 실제 장치의 실험에서도 육안으로 확인할 수 있었다. 중심선을 따라서 흐르는 대부분의 가스는 출구쪽으로 빠져 나가는 것을 알 수 있다. 그림 4는 가스노즐과 용융금속 오리피스 출구 부근에서의 가스의 속도분포를 확대하여 나타낸 것이다. 노즐 출구에서 가스의 속도와 압력은 정체실의 가스 공급 압력으로부터

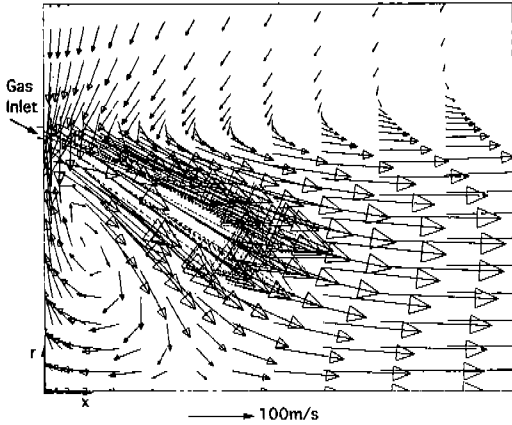


Fig. 4. Velocity vectors around melt orifice and gas nozzle.

1차원 등엔트로피(isentropic) 흐름으로 가정하여 구하였으며, 가스의 정체압력(stagnation pressure)은 그림에 언급된 경우를 제외하고는 9.673 기압을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 노즐은 축소노즐(convergent nozzle)이므로 출구에서의 속도는 음속이나 그림 4에 보인 가스의 최대속도는 476 m/s로 초음속이다. 그 이유는 노즐 출구에서 압력이 Chamber의 배압보다 높아서 과소 팽창(under-expanded)된 제트가 급격하게 팽창하면서 속도가 증가하기 때문이다. 가스노즐 출구와 용융금속 오리피스가 설치될 중심축 사이에 매우 강한 재순환 유동이 형성되는 것을 알 수 있으며, 재순환 유동의 강도에 따라서 용융금속의 유량에 크게 영향을 미치는 흡인압력(aspiration pressure)이 결정된다.¹⁰⁾ 또한 이 재순환 유동에 의해서 오리피스를 빠져 나온 용융금속이 반경방향으로 퍼져 나가 필름을 형성하게 되고, 여기에 가스가 충돌하여 필름이 깨지면서 액적이 생성되는 것으로 여겨진다. 재순환 영역의 크기가 약 5×7 mm 정도로 전체 Chamber 중의 극히 일부분이기 때문에 그림 3의 유선에는 나타나지 않았다. 그림 5는 여러가지 가스 출구조건에서 중심축을 따라 속도변화를 나타낸 것으로 원점으로 부터 축방향의 거리 x를 환형노즐의 평균반경 R=6.95 mm로 무차원화 시켜 표시하였다. 속도가 음인 영역이 재순환 영역이며, 분사조건에 따라 재순환 영역의 크기나 강도는 약간씩 달라지지만 전체 Chamber에서의 속도변화에는 큰 영향을 미치지 않는다. 가스가 서로 충돌하는 x/R=2 부분에서 속

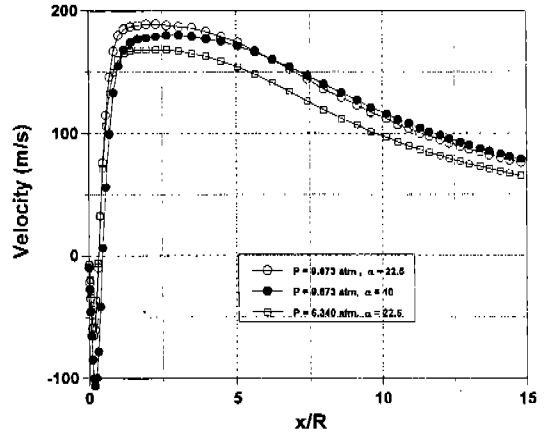


Fig. 5. Variation of gas velocity along the centerline.

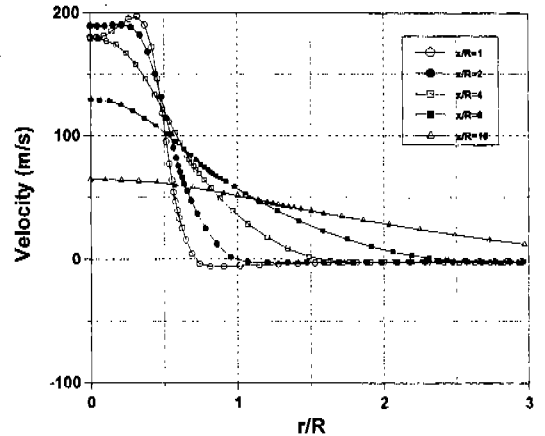


Fig. 6. Variation of gas velocity along the radial direction.

도가 최대가 되고 그 이후는 출구까지 점차 속도가 감소한다. 반경방향의 속도분포가 그림 6에 표시되어 있다. 가스가 충돌하기 전인 x/R=1에서는 중심축에서 약간 벗어난 지점에서 최대값을 갖지만 충돌 후에는 중심축에서 최대값을 가지며, 하류로 갈수록 최대 속도가 감소하면서 유동이 점차 반경방향으로 확산되어 가는 것을 알 수 있다. 이와같은 경향은 Bewlay와 Cantor¹¹⁾의 LDV를 사용하여 측정된 실험결과와 정성적으로 잘 일치하고 있다.

그림 7은 중심축을 따라 압력변화를 나타낸 것으로 압력은 대기압을 뺀 값이다. 재순환 영역에서는 압력이 감소하다 증가하며 속도가 0인 x/R=0.5 부근

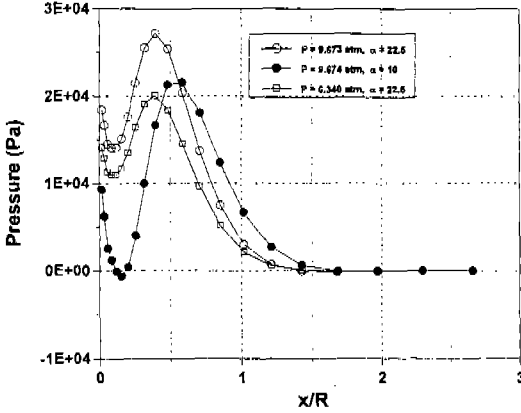


Fig. 7. Variation of gas pressure along the centerline.

에서 압력이 최대가 되고 하류쪽으로 가면서 감소하다가 $x/R=1.5$ 이하에서는 대기압과 같아진다. 압력이 최대인 점이 재부착점으로 생각되며, 재부착점은 분사각이 클수록 하류로 밀려남을 알 수 있다. 용융금속 오리피스 밑 부분의 재순환 영역에서의 압력변화는 가스 출구조건에 따라 상당한 변화를 보이지만 Chamber 대부분의 영역에서는 대기압과 같다. 가스 분출압력이 낮을수록 가스 분사각이 작을수록 오리피스 출구 부분의 압력이 낮아지지만 용융금속 오리피스의 돌출이 없는 경우는 분사조건에 상관없이 항상 양의 흡인압력이 나타남을 알 수 있다.

분말의 궤적은 분말의 생성위치와 크기에 따라 크게 달라진다. 본 연구에서는 고속가스에 의한 용융금속의 미립화 메커니즘을 해석할 수 없으므로 분말의 생성위치와 크기를 임의로 조정하였으며, 초기속도는 용융금속의 유량을 고려하여 계산하였다. 그림 8은 가스와 용융금속 필름이 충돌하는 부근에서 생성된 분말의 궤적을 나타내고 있다. $10\ \mu\text{m}$ 부터 $200\ \mu\text{m}$ 사이의 5개의 분말에 대한 궤적을 그림에 표시하였으며, 작은 분말은 바깥쪽에 큰 분말은 안쪽(중심축 부근)에 생성된 것으로 가정하였다. 이 경우 분말의 평균직경은 $103\ \mu\text{m}$ 이고, Rosin-Rammler 분산계수 $n=2.716$ 을 사용하였다. 그림 8의 오른쪽은 평균유동에 의한 분말의 궤적을 나타낸 것으로 크기가 작은 일부 분말은 재순환 영역에서 몇번 회전하다가 출구로 빠져 나가고, 일부는 Chamber 벽에서 반사된 후 출구로 빠져 나가며, 대부분의 분말은 중심축을 따라서 곧바로 출구로 빠져 나간다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 해석결과에 따르면 생성 위치가 달라지

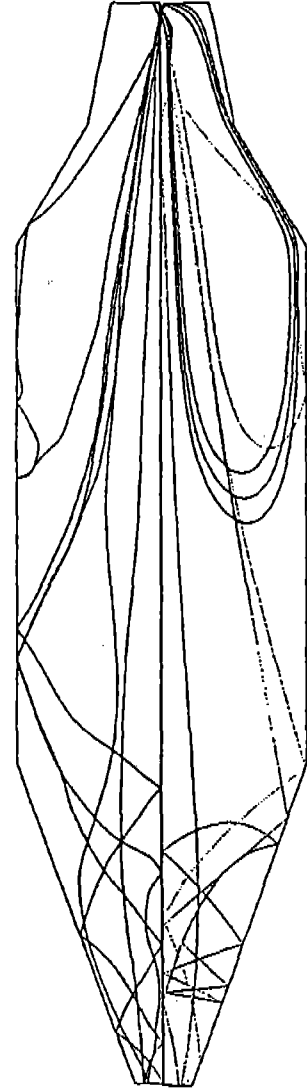


Fig. 8. Trajectories of particles.

면 분말의 궤적도 달라지며 작은 크기의 분말일수록 그 영향이 심하게 나타났다. 그림 8의 왼쪽은 난류가 분말의 궤적에 미치는 영향을 나타낸 것으로 똑같은 위치에서 생성된 같은 크기의 분말이라도 난류유동에 의해 분말의 궤적이 달라지는 것을 알 수 있다. 그림 9는 분말의 크기에 따른 속도변화를 나타낸 것으로, 분말의 속도변화는 분말과 가스 사이의 운동량전달에 의해서 일어난다. 매우 느린 속도로 오리피스를 빠져나온 분말은 처음에는 급격히 가속되다가 하류로 가면서 서서히 감속된다. 분말의 크기가 작을수록

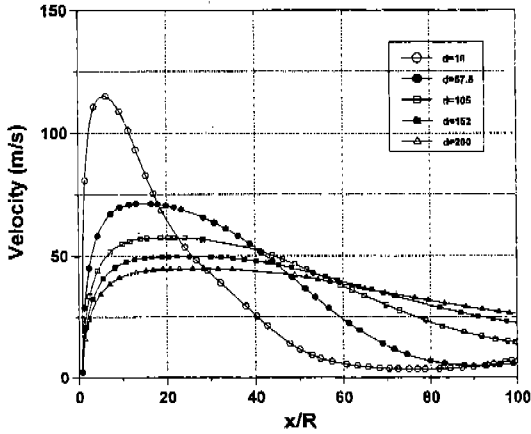


Fig. 9. Variation of particle velocity for various particle size.

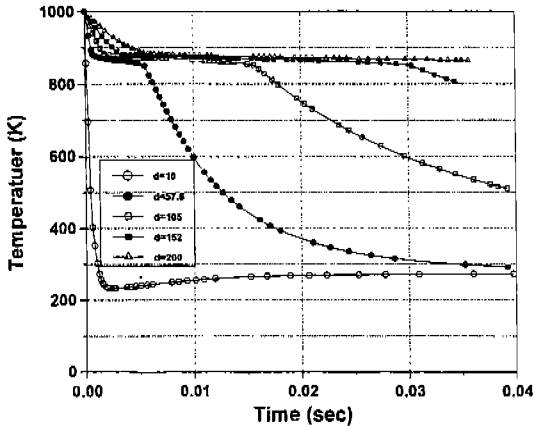


Fig. 10. Variation of particle temperature with time for various particle size.

가스에 의한 가속과 감속이 심하며, 가속되는 동안은 가스보다 분말의 속도가 느리지만 하류에서는 가스보다 빠른 속도로 출구를 빠져 나간다.

그림 10은 분말의 냉각속도를 나타낸 것으로 분말과 가스 사이의 열전달과 용융금속의 응고잠열을 고려하여 계산하였다. 온도변화가 거의 없는 부분이 응고구간이고, 응고구간 윗부분은 액적의 냉각, 아랫부분은 분말의 냉각구간이다. 응고구간을 자세하게 관찰해 보면 응고가 시작되는 온도와 완료되는 시점의 온도가 다르다. 그 이유는 Al-Si 합금은 고액 공존구간이 큰 합금이어서 한 온도에서 응고가 완료되지 않기 때문이다. 분말의 냉각속도는 $10^4 \sim 10^6$ K/sec 범위이며, 모든 분말이 하류로 갈수록 분말의 속도가 느

려지므로 냉각속도도 느려진다. 분말의 크기가 작을수록 냉각속도가 빠르며, 이것은 열관성(thermal inertia)의 차이에서 기인한 것이다. 200μ 의 분말은 Chamber 끝에 도달할 때까지 응고가 완료되지 않는다. 그 이유는 Chamber 크기를 원래보다 1/5로 축소하여 해석한 때문이며 원래 크기의 Chamber에서는 이러한 현상이 나타나지 않을 것으로 생각된다.

5. 결 론

가스분무장치에서 가스의 유동특성과 분말의 궤적 및 냉각특성을 전산해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Chamber 반 이상을 차지하는 매우 큰 재순환 유동이 존재하며, 가스노즐과 용융금속 오리피스 사이에 크기는 작지만 매우 강한 재순환 유동이 형성된다.
- 2) 충돌 후의 가스는 중심축에서 최대속도를 가지며, 하류로 갈수록 최대속도가 감소하면서 반경방향으로 유동이 점차 확산되어 간다.
- 3) 분말의 궤적은 분말의 생성위치와 크기에 따라서 달라지며, 똑같은 위치에서 생성된 같은 크기의 분말이라도 난류유동의 영향으로 분말의 궤적이 크게 달라진다.
- 4) 분말은 가스와의 운동량전달에 의해서 가속과 감속이 일어난다. 처음에는 급격히 가속되다가 하류로 가면서 서서히 감속되며 출구에서는 분말의 속도가 가스보다 빠르다.
- 5) 분말의 냉각속도는 $10^4 \sim 10^6$ K/sec 범위이며, 모든 분말이 하류로 갈수록 냉각속도가 느려진다. 분말의 크기가 작을수록 냉각속도가 빠르고 이것은 열관성의 차이에서 기인한 것이다.

기 호 설 명

- A : 전열면적
- C_D : 항력계수
- C_p : 정압비열
- h : 대류열전달계수
- k : 열전도계수
- m_p : 분말의 질량
- Nu : Nusselt 수
- P : 압력

Pr : Prandtl 수
 r : 반경방향 거리
 Re : Reynolds 수
 S_0 : 생성항
 T : 온도
 U : 축방향 속도
 V : 반경방향 속도
 x : 축방향 거리
 Γ_0 : 확산계수
 ρ : 밀도
 μ : 점성계수

참 고 문 헌

1. A. Lawley: Int. J. of Powder Metallurgy and Power Technology, **13** (1977) 169.
2. J. R. See and G. H. Johnston: Powder Technology, **21** (1978) 119.
3. G. Jiang, H. Henein and M. W. Siegel: Int. J. Powder Metallurgy, **26** (1990) 253.
4. E. Gutierrez: Metallurgical Transactions A, **20** (1989) 71.
5. A. Unal: Materials Science and Technology, **4** (1988) 909.
6. 이회춘, 나형용, 오규환, 이호인: 대한금속학회지, **29** (1991) 680.
7. 윤병국, 유성연, 정명균: 한국분말야금학회지, **2** (1995) 120.
8. S. V. Patankar: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill (1980).
9. FLUENT Inc.: FLUENT User's Guide (1993).
10. J. C. Baram et al.: J. of Materials Science, **23** (1988) 2457.
11. B. P. Bewlay and B. Cantor: Materials Science and Engineering, **118** (1989) 207.