

## 분무주조(Spray Casting)기술의 원리 및 응용

이연식, 박우진, 정재영, 안상호

포항산업과학연구원 소재부문 구조금속연구팀

### Principle and Applications of Spray Casting Technology

Eon-Sik Lee, Woo-Jin Park, Jae-Young Jung and Sangho Ahn

Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST), Pohang 790-330, KOREA

#### 1. 서 론

산업이 고도화됨에 따라 보다 우수한 강도, 내구성 및 기능성을 지닌 신합금이 요구되고 있으며, 이러한 신소재를 제조하는데 있어 종래의 주단조법으로는 거의 제조가 불가능한 합금 물성을 요구하는 분야가 늘어나고 있다. 일반적으로 재료의 물성은 합금원소 뿐만 아니라 최종 미세조직에 의해서 좌우되기 때문에, 미세조직을 보다 미세하고 균일하게 제어할 수 있는 새로운 제조공정들이 활발히 개발되고 있다. 이러한 방법중에서, 급냉응고법과 분말야금법을 접목시킨 제조공정은 그 대표적인 사례이다. 그러나 이 방법은 제조 원가를 상승시켜 소재의 상업화에 많은 어려움이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로, 값비싼 신분말야금법(가스분무+HIP)에 비해 제조 원가는 저렴하고 물성은 동등한 제조 공정을 개발하기 위한 연구가 1980년 이후에 활발히 진행되었다. 그 결과, 분무주조법(噴霧鑄造法, Spray Casting Process)이 상업적으로 가장 타당한 것으로 보고되고 있다. 분무주조법은 연구자에 따라 분무성형법(噴霧成形法, Spray Forming Process) 및 분무적층법(噴霧積層法, Spray Deposition Process)등의 다양한 용어로 불리워지고 있으며, 본 논문에서는 그 정의가 가장 합당하고 많이 통용되는 분무주조법으로 표기하고자 한다.

분무주조법은 용융 합금을 고속의 불활성 가스 제트(질소, 아르곤, 헬륨 등)의 분사에 의해 가스분무화(Gas Atomization)시킨 후, 분무된 합금 액적이 완전히 응고되기 전에(액상분율 30~40%에서) 하부의 기판에 적층시킴으로써 급냉 응고 효과를 얻는 동시에 고밀도 Near-Net-Shape 제조가 가능한 차세대 소재

제조기술이다. 분무주조 기술은 1970년 초에 처음으로 Singer에 의해 개발되었고, 영국의 Osprey Metal사의 창립과 함께 공업적 응용에 대한 연구가 시작되었다. 80년대 후반에 이르러, Osprey Metal사의 라이선스(License)를 취득한 소수의 회사에서 파이롯트 플랜트를 통한 시제품이 생산되면서 분무주조 기술의 공업적 이용에 대한 관심이 본격적으로 고조되었다. Osprey Metal사가 분무주조 기술의 특허권을 독점하고 있기 때문에, 30여개의 연구기관 및 산업체만이 Osprey Metal사로부터 연구개발 혹은 상업화 라이선스를 취득하여 연구 및 생산을 진행하고 있다. 개발 제품으로는 심레스(Seamless) 스텐인레스 파이프, 선재용 고속도공구강 롤, 고강도 알루미늄 빌렛, 고강도/고전도성 동합금, Ni기 초내열합금 부품, 분산강화 합금, 금속기지 복합재료등이 있다. 현재 특수강, 알루미늄 합금 및 초내열합금등은 상업화 단계에 돌입한 것으로 알려져 있다.

국내의 분무주조 기술은 1990년 이후에 개발연구가 처음으로 시작되었으며, KIST, 서울대 및 울산대 등에서 주로 알루미늄 합금제조에 대한 학문적인 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 삼선 알루미늄(주)은 서울대 및 KIST와 공동 연구를 진행하여 분무주조 소재의 상업화를 추진할 계획을 갖고 있다. 또한 포항산업과학연구원은 축적된 합금분말 제조기술을 바탕으로 1991년부터 고속도공구강 및 고품위 동합금 빌렛 제조를 위한 분무주조 기술개발에 참여하고 있으며, 현재 고속도공구강 빌렛 제조에 있어 세계 최고 수준을 보유하고 있다. 분무주조 기술의 세계화 진입을 위해, 포항산업과학연구원은 1994년에 Osprey Metal사로부터 연구개발 라이선스를 취득하

였고 200 kg급 분무주조 빌렛 제조 장치를 보유하고 있다. 포항산업과학연구원은 향후 2년 이내에 고속도 공구강의 국산화 및 상업화를 완결할 예정이다.

국내의 경우, 분무주조 기술에 대한 인식은 아직 활성화되지 않은 상황이다. 그러므로 본 논문에서는 분무주조의 원리와 제조 방법을 개략적으로 소개함으로써 분무주조 기술의 이해를 돕고자 하는데 그 목적이 있다. 먼저 우리는 분무주조 공정의 원리 및 장점을 소개하고 공정요소 기술에 대하여 개략적으로 설명하고자 한다. 또한 전세계적으로 수행되고 있는 분무주조 공정기술을 이용한 신합금 및 부품 제조에 대한 응용 예를 살펴보고 외국의 연구개발 동향을 소개하고자 한다.

## 2. 분무주조 기술의 특징

### 2.1. 분무주조 공정의 장점

분무주조 공정은 용융 합금의 가스 분무화 과정(Gas Atomization Process)과 분사된 분무 액적들이 하단의 기판에 적층되는 성형 과정(Droplet Deposition Process)으로 대별된다(Fig.1). 질소 또는 아르곤 가스에 의해 분사된 분무 액적은 성형 기판에 도달하기 전에 고속의 분사 가스에 의해 일차적인 냉각 과정을

거친다. 이 후에, 반응고 상태의 액적들은 매우 빠른 속도로 가속되어 성형 기판에 충돌과 동시에 액적이 파열되고 고상의 재용융 과정을 거치게 된다. 이러한 분무주조 과정은 보다 미세하고 균일한 등축상의 결정립을 형성시킬 뿐만 아니라 주조조직을 완전히 파괴할 수 있어 소재 물성의 향상을 기대할 수 있다. 또한 분무주조 기술은 성형 기판의 작동만으로도 튜브, 판재, 빌렛등의 Near-Net-Shape 반제품을 제조할 수 있다(Fig.2). 분무주조법은 신분말야금법(Gas Atomization+HIP)과 비교하여 공정 생략이 가능할 뿐만 아니라 신분말야금법에 의해 제조된 소재와 동등한 물성

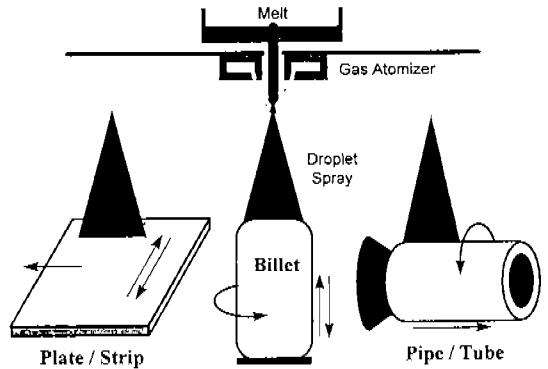


Fig.2. Manufacture of near-net-shape preforms by using the spray casting process.

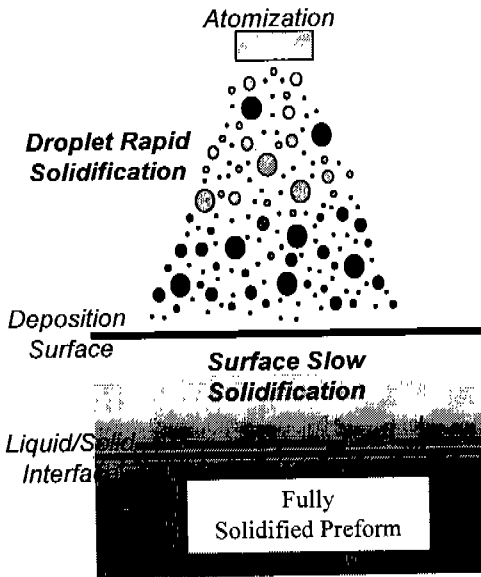
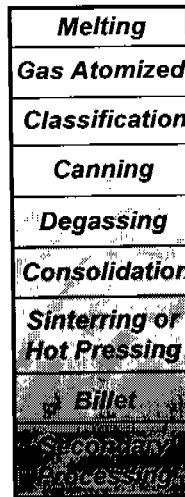


Fig. 1. Principle of spray casting process which consists of the gas atomization and the subsequent deposition of flying droplets upon the substrate.

### Powder Metallurgy Process



### Spray Casting Process

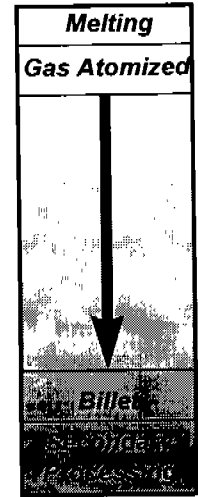


Fig. 3. Comparison between powder metallurgy and spray casting routes.

을 얻을 수 있는 경제적인 신공정 기술이다(Fig.3). 분무주조 공정기술은 급냉응고 효과와 성형과정을 일체화한 공정으로 종래의 주조법에 의한 합금제조 기술에 비하여 다음과 장점을 갖고 있다.

- 결정립이 작은 미세조직 (Fine Scale Microstructure)  
낙하하는 수많은 분무 액적은 반응고 상태로 기관에 적층과 동시에 파열되기 때문에 보다 미세한 등축상의 결정립을 형성시킬 수 있다. 또한 분무주조는 성형체 표면에 얇은 액상막이 형성되어 있는 경우에도 분무 액적 내부의 미세한 고상이 응고의 씨앗(Seeds)으로 작용하기 때문에 미세한 결정립을 얻을 수 있다. 이와 같이 분무주조는 응고조직을 완전히 파괴하므로 열간 가공을 거치지 않고 분무주조재를 열처리만 하여도 사용할 수 있다는 장점이 있다.
- 편석이 없는 미세조직 (Segregation-Free Microstructure)  
분무 액적이 고속의 분사 가스에 의해서  $10^3 \sim 10^4$  °C/s의 냉각속도로 급냉될 뿐만 아니라 60-150  $\mu\text{m}$ 의 미세한 분무 액적이 성형체에 적층됨과 동시에 파열하기 때문에, 성형체의 거시적인 편석은 완전히 제거할 수 있다.
- 고용한도의 확장 (Extended Solid-Solubility)  
분무 액적은 분사 가스에 의해 급냉되므로 고상의 핵생성에 필요한 과냉도가 증가한다. 또한 분무 액적의 고상/액상 계면 이동속도는 주조에 비해 매우 빠라 고용체 내부에 용질원자가 평형농도 이상으로 농축되기 때문에, 합금의 고용한도를 증가시킬 수 있다. 예를 들면, Al-Li 합금의 고용한도 증가는 강성 증가 및 저밀도화에 매우 중요하다.
- 균일한 제2상의 분포(Homogeneous Second-Phase Distribution)  
고속도공구강 주조체의 경우, 조대한 초정 탄화물은 열간 가공시에 균열을 야기하는 주요 인자로 작용한다. 또한 조대한 2차상을 갖는 주조조직을 파괴하기 위해서는 상당한 열간 가공량이 요구된다. 분무주조재의 2차상은 분무 액적이 성형시에 적층과 동시에 파열 및 분산되므로 균일하고 미세하게 분포된다.
- 복합재료 제조 (Metal Matrix Composite)  
분무주조법에 의한 복합재료 제조는 고속의 분사

가스에 의해 형성된 분무 액적 스프레이(Spray)속으로 미세한 세라믹 입자를 함께 분사시킴으로써 가능하다. 분무주조법에 의해 제조된 복합재료는 낙하하는 액적과 세라믹 입자가 서로 충돌하기 때문에 상호간의 접합성이 우수해질 뿐만 아니라 균일한 입자 분포를 갖는다. 예를 들면, 주조에 의한 Al-SiC 복합재료는 용융 알루미늄과 실리콘 카바이드의 반응 시간이 길기 때문에 내식성이 열악한 알루미늄 카바이드가 생성된다. 반면에 분무주조법은 급냉응고 과정을 거치므로 용융체와의 접촉 시간이 짧아서 알루미늄 카바이드의 석출을 충분히 억제할 수 있다.

- Near-Net-Shape 제조  
분무주조법은 기관의 작동 패턴을 조절함으로써 다양한 형상의 성형체를 제조할 수 있다. 빌렛은 스프레이 축과 기관을 30-40°로 경사지게 하고 기관을 회전시킨면서 하부로 이동시켜 제조할 수 있다. 튜브(파이프 혹은 링)는 회전하는 실린더 기관을 이용함으로써 제조가능하고 판재는 평판 기관을 전후좌우로 이동시켜 제조할 수 있다. 이와 같이, 분무주조에 의한 Near-Net-Shape 제조는 성형과정을 생략할 수 있을 뿐만 아니라 최종 기계 가공을 절감할 수 있다는 장점이 있다.
- 공정 응용의 다양성 (Process Application Flexibility)  
분무주조 공정에 의한 합금제조는 합금 종류에 거의 무관하게 적용할 수 있어서, 그 응용 범위는 매우 다양하다. 예를 들면, 동합금, 스테인레스강, 니켈기 초내열합금, 고속도공구강, 금속간화합물, 복합재료, 분산강화합금 등과 같은 다양한 합금들이 분무주조에 의해 개발되고 있다. 분무주조된 합금에서는 마크로 편석을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 결정립을 현저하게 미세화시킬 수 있다. 또한 분무주조재는 열간 가공 및 성형 과정을 생략할 수 있어 기계 가공만으로도 제품으로 사용할 수 있다. 이러한 잇점외에도, 분무주조 공정은 소량 다품종 소재 생산에 적합하다는 산업적 장점 때문에 고품위 신합금 제조에 유리하다.

## 2.2. 분무주조 공정의 원리

분무주조 기술의 핵심 요소는 공정 제어 기술이다. 공정 제어 기술의 확립은 균일한 미세조직과 우수한 기계적 성질을 갖는 제품을 제조하고 높은 생산성을

얻기 위해서 매우 중요하다. 분무주조 공정은 가스 분무화 과정과 성형 과정이 일체화된 공정이므로 적어도 8개 이상의 독립적인 공정 변수가 존재한다 (Fig.4). 그러므로 우수한 미세조직을 갖는 제품 제조는 공정 변수의 유기적인 관계를 만족한 경우에만 기대할 수 있다. 그러나 일부 공정 변수는 실험적으로도 측정하기가 거의 불가능하다. 최근에는 이러한 공정 변수에 따른 변화를 예측하기 위해, 컴퓨터 시뮬레이션 기술이 한창 연구 중에 있다.

분무주조 공정은 다음과 같이 개략적으로 설명할 수 있다. 먼저 대상 합금을 유도 용해로에 장입하여 용해시킨 후, 용융체를 용점보다 약 200 °C 이상으로 승온시킨다. 이러한 과열(superheating)은 가스분무시에 용탕의 응고에 의한 용탕 가이드 노즐(Melt Guide Nozzle)의 막힘현상을 방지하기 위한 것이다. 일정한 과열도에 도달 했을 때, 턴디쉬(Tundish) 하부를 막고 있는 스탱퍼(Stopper)는 위로 제거되고 용탕은 아래로 유출된다. 이때 낙하하는 용융체는 가스분무기를

통해 나온 고속의 불활성 가스(질소, 아르곤 혹은 헬륨)에 의해 미세한 액적으로 분무화된다. 미세하고 균일한 입자 분포를 얻기 위해서는 분사 가스 유출 속도와 용탕 유출 속도를 일정하게 유지하는 것이 중요하다. 입자의 크기는 주로 두 변수의 비에 따라 좌우한다. 낙하하는 액적은 고속의 주위 가스에 의해 냉각 및 응고가 일어나며, 반응고 상태(일반적으로 액상 30%+고상 70%)에서 하부의 기판에 충돌하여 적층되면서 성형체가 형성된다. 이때 분무 노즐과 성형체 상부 표면간의 절대 높이는 성형체가 성장함에 따라 기판을 일정한 속도로 하강시켜 일정하게 유지되어야 균질한 내부 조직을 기대할 수 있다.

또한 분무액적은 완전히 응고되기 전에 기판에 적층되기 때문에, 우수한 최종 미세조직을 얻기 위해서는 스프레이 내부의 고상분율을 제어하는 것이 가장 중요하다. 즉 성형체의 미세조직은 액적들이 적층될 때 성형체로 유입된 엔탈피의 양에 가장 큰 영향을 받는다. 최종 미세조직은 기판에 적층되는 분무액적의 열적 조

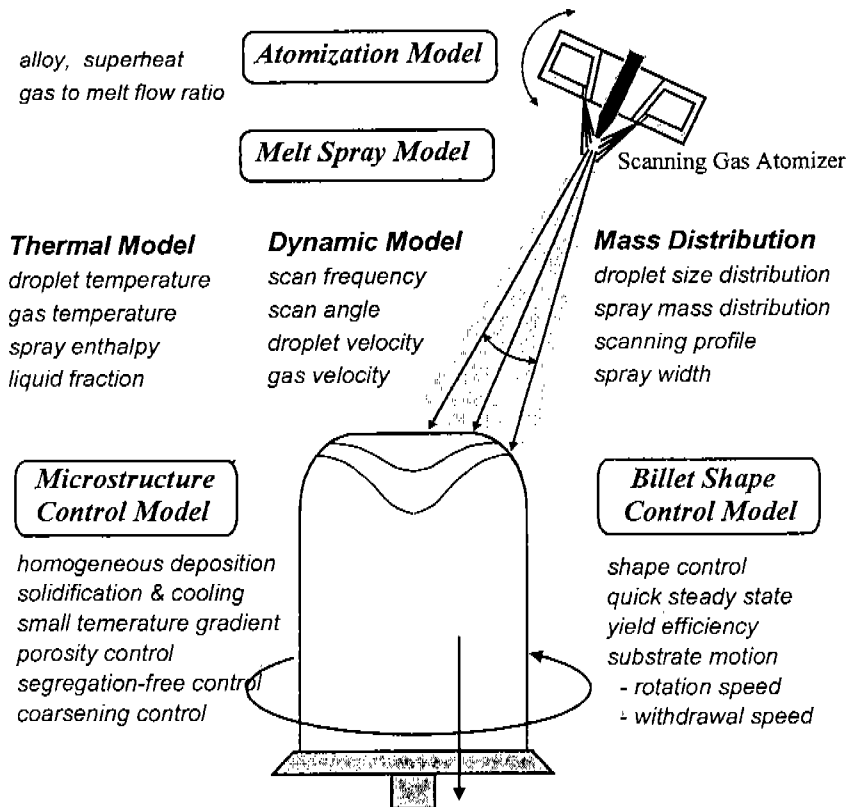


Fig. 4. Independent process factors in the spray casting process.

전에 따라 다음과 같이 세가지로 예측할수 있다.

- 기판에 충돌하는 스프레이 내부의 액상분율이 너무 작으면, 고상 입자사이의 공간을 완전히 채워줄 액상이 부족하기 때문에 성형체 내부에 미세하고 불균일한 기공이 생긴다.
- 기판에 충돌하는 스프레이 내부에 액상이 과다하게 존재하는 경우, 성형체 상부 표면 위에 액상 풀(Liquid Pool)이 형성된다. 이러한 액상 풀은 분사 가스를 포집하여 비교적 큰 기공을 성형체 내부에 생기게 한다. 또한 기판의 빠른 운동에 의해 액상이 기판에서 튕겨 나갈 우려가 있어 회수율에도 악영향을 미친다. 과다한 액상의 존재는 성형체의 냉각 및 응고속도를 감소시키므로 미세한 최종 조직을 기대하기 어렵다.
- 기판에 도달하는 고상 및 액상의 비율이 적절한 경우(최적 비율은 합금계 및 성형체 형상마다 조금씩 다름), 적층시 잔존하는 액상은 입자간 사이를 효과적으로 메꿔주어 성형체를 치밀화시키며 액상 풀이 생기지 않으므로 균질한 미세조직을 얻을 수 있다.

위에서 살펴본 바와 같이, 액적의 열적 상태를 조절하는 것은 매우 중요하다. 이러한 스프레이 엔탈피는 주로 분사 가스 유출 속도 및 액적의 입도 분포에 의존한다.

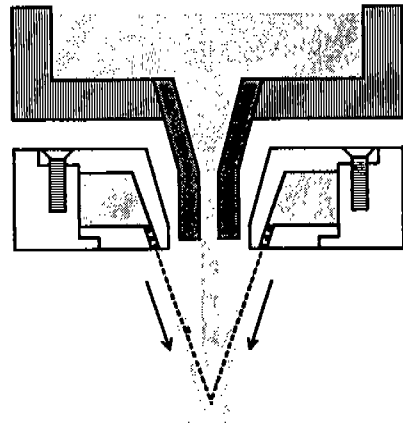
**2.3. 분무주조용 가스분무기(Gas Atomizer)의 특징**

성형체 제조시 성형체의 표면에 유입되는 스프레이 엔탈피의 양은 분무화된 액적들의 열적거동에 따라 결정된다. 각 액적들의 열적거동은 액적의 크기에 가장 큰 영향을 받는다. 가스 분무법(Gas Atomization)으로 금속 분말을 제조하는 경우에는 분말 입도 뿐만 아니라 형상의 제어도 중요한 인자이지만, 분무주조 공정에 있어서는 입도 분포의 조절이 보다 더 중요하다. 분무주조 공정에 있어서, 분무 액적의 입도분포를 미세하고 좁게 제어하는 기술은 적층되는 액적의 입도가 유사할수록 성형시에 각 액적들이 함유하고 있는 열적 엔탈피가 비슷하여 더욱 균일한 조직의 성형체를 얻을 수 있기 때문에 필수적이다.

가스 분무화 기술은 일반적으로 용탕의 흐름의 양상에 따라 자유낙하형(Free-Fall Type)과 구속형(Confined or Close-Coupled Type)으로 대별되며 Fig. 5에 도시하였다. 자유낙하형 분무법의 경우, 용탕은

분사 가스 제트와 충돌하기 전까지 일정한 거리 만큼 자유 낙하 한 후 분사 가스와의 충돌에 의해 액적으로 분무된다. 이 방법에서는 가스 노즐 설계가 용이하고, 용탕 출구가 응고에 의해 막힐 염려가 없어 연속적인 분무조업을 진행할 수 있는 신뢰도가 확보되기 때문에 주로 대량 생산에 이용되고 있다. 가스 노즐의 형상은 환상 제트형(Ring Jet Type) 혹은 판상 제트형(Flat Jet Type)이 있으며 환상 제트형 가스 노즐이 일반적으로 사용되고 있다. 환상 가스노즐은 연속적인 가스 출구를 갖는 환상 링 노즐(Annular Ring Opening)과 가스출구가 환상을 따라 불연속적으로 구멍이 있는 불연속 제트 노즐(Annular Hole Opening)의 두 가지가 이용되고 있다. 분무주조 공정

(a) Free-Fall (Open Type)



(b) Confined (Closed Type)

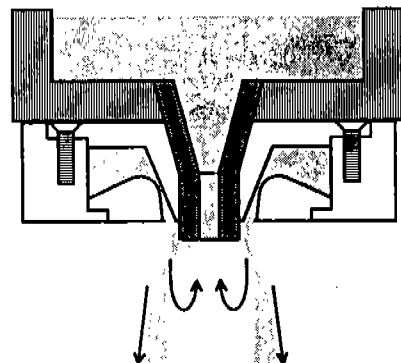


Fig. 5. Two typical gas atomizers for production of metal powder.

의 경우, 가스 소모량의 최소화 및 분무 배압(Back Pressure)의 제거에 유리한 불연속 제트 노즐이 주로 이용하고 있다. 자유 낙하형 가스 분무의 효율은 주로 가스와 용탕의 유출속도 비에 의존하고 용탕 출구의 직경 및 용탕 과열도 중요한 인자로 작용한다.

한편 구속형 분무조업에서는 용탕이 용탕 출구를 통하여 유출되다가 용탕 출구의 끝부분에서 분사가스와 만난다. 이러한 경우에는 분사가스의 흐름에 의하여 용탕출구의 끝부분에서 얇은 액상막이 형성된 후에 액적으로 분무되므로 자유 낙하형에 비하여 더욱 미세한 분무 액적을 만들 수 있는 장점이 있다. 자유 낙하형 분무법에서는 50~60  $\mu\text{m}$ 의 미세한 철강 분말을 얻는 것이 매우 어렵지만, 구속형의 경우에는 미세하고 입도분포가 좁은 분말을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 구속형의 경우에는 분사 가스의 속도가 초음속으로 용탕에 직접 작용하므로 용탕과 가스 출구와의 거리가 존재하는 자유 낙하형과 비교하여 동일한 가스 소모량에서도 분무 효율이 월등하다. 그러나 이 분무법은 철강과 같은 고용점 합금의 경우 가스노즐 출구와 용탕 오리피스(Orifice) 사이에서 약 1500  $^{\circ}\text{C}$ 의 매우 큰 온도 차이를 야기하여, 용탕 오리피스의 출구에서 용탕이 응고하여 오리피스 출구가 막히게 되는 단점이 있다. 이러한 조업상의 문제점은 구속형 분무법의 상업적 대량 생산에의 응용을 가로막고 있으며, 10~50 kg급의 소량 배치 조업에서 주로 사용되고 있다.

분무주조 공정의 경우에는 조금 변형된 자유낙하형 가스분무기를 주로 사용하고 있으며, 분무주조용 가스분무기는 Fig. 6 에 도시한 바와 같이 분말을 제조하는 일반적인 가스분무기와 다른 형태를 가지고 있다. 분무 스프레이의 엔탈피를 균일하게 하고 성형체의 형상을 제어하기 위해, 분무 주조 공정에서는 가스분무기를 주사(Scanning)시키는 주사식 가스분무기(Scanning Gas Atomizer)를 사용하고 있다. 이러한 분무방식은 현재 Osprey Metal사의 특허에 예속되어 있다. 최근에는 빌렛 제조시 성형체 내부의 온도 구배의 최소화 및 적층 회수율 향상을 위해 Twin Gas Atomizer를 도입하고 있다. 이 장치는 두개의 분무 스프레이를 이용하여 질량 및 열량 유입 속도를 제어하여 양질의 빌렛을 제조할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

### 3. 분무주조 공정의 응용

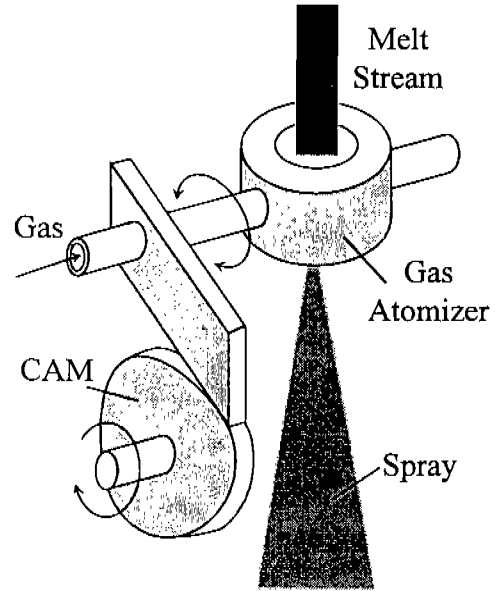


Fig. 6. Scanning gas atomizer for spray casting.

분무주조 공정의 응용분야는 스테인레스 파이프, 선재용 고속도공구강 물, 고강도 알루미늄 빌렛, 고강도/고전도성 동합금, Ni기 초내열합금 부품, 분산강화 합금, 금속기지 복합재료등으로 다양하며, Table 1에 현재 연구 개발 업체 및 상업화 현황을 정리하였다. 이러한 응용 분야에 대해서 대상 합금별로 각 주요 특징을 아래에서 살펴 보자 한다.

#### 3.1. 알루미늄 빌렛 제조

##### ●알루미늄 합금 압출재

유럽과 일본에서는 분무주조법을 이용한 알루미늄 합금 압출재의 시제품이 주로 생산되고 있다. 그 대표적인 예로, 독일의 Peak사에서 생산되는 자동차 부품용 Al-Si합금 빌렛의 규모는 직경 400 mm×길이 1300 mm에 이르고 있다(Fig.7). 분무주조 공정의 특징은 DC Casting과 같이 용탕으로 부터 최종 제품으로 직접 생산할 수 있을 뿐만 아니라 직경 편차도 거의 2 mm이내로 조절될 수 있기 때문에 빌렛의 표면 가공 없이도 바로 압출할 수 있다. 그러므로 저렴한 가격으로 고품위의 소재 생산이 가능하다. 이러한 측면에서, 분무주조 공정은 DC Casting과 같이 저렴하지만 소재 특성은 신분말야금(가스분무+HIP) 제품과 견줄 수 있는 것으로 평가되고 있다. 동시에 분무주조 공정은 분말야금 공정과 비교하여 다음과 같은 제

**Table 1. Worldwide research activities on spray casting**

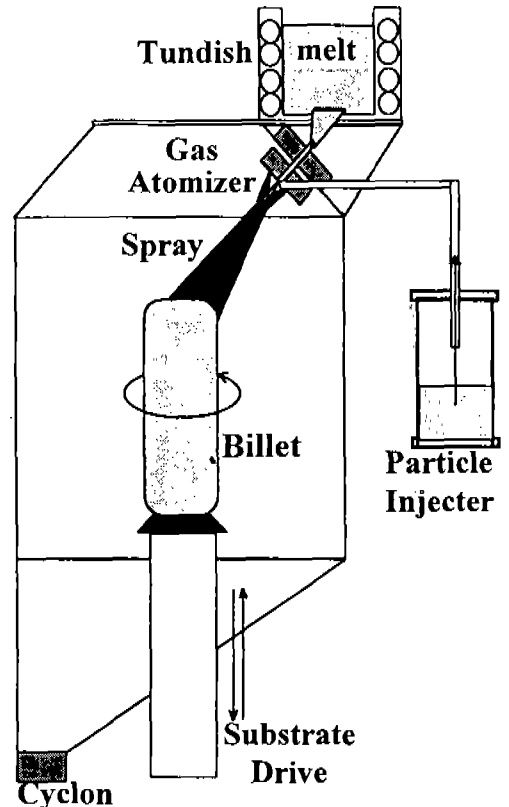
합금계	상업화 단계	연구개발 단계	대표업체
Al alloys	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Al-high Si alloy billets</li> <li>● MMC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Aluminum Plate</li> <li>● Al-Li, Al-Si-Fe-X</li> </ul>	PEAK Sumitomo L.M. Alcoa Pechiney
Cu alloys	<ul style="list-style-type: none"> <li>● High Strength Cu alloys</li> <li>    Cu-Ni-Sn</li> <li>    Cu-Cr-Zr</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Dispersion-Strengthened Cu alloy</li> <li>● MMC</li> </ul>	Wieland Werke Swissmetal Olin Co.
Ni alloys	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Spraycast-X*(Ring)</li> <li>    IN718, Rene41, Waspalloy</li> <li>    Turbine engine component</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Inclusion free alloys</li> <li>    ESR/CIG</li> </ul>	Howment Rolls Royce G.E. US Navy
Fe alloys	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Superalloy Tube</li> <li>● Hi-Cr tool steel Roll</li> <li>● Seamless Stainless Steel Pipe</li> <li>● Multi-layer Tubing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● High Speed Steel Billet</li> <li>● High Speed Steel Roll for hot-rolling</li> </ul>	Sumitomo H.I. Sandvik RIST British Rollmaker Forged Roll Babcock & Wilcox

조공정상의 이점도 겸비하고 있다.

- 가) 산소나 수소에 의한 오염을 줄일 수 있다.
- 나) 복잡한 다단계 생산공정을 간단하게 간소화시킬 수 있다.
- 다) 분말야금 공정에서는 불가능한 대형 제품의 생산이 가능하다.
- 라) 분말야금 제품은 내부에 존재하는 산화물층 때문에 상당한 열간 가공이 요구되지만, 분무주조재는 소량의 열간가공이 요구될 뿐이며 이로 인해 최종 제품의 대형화가 가능하다.
- 마) 폭발성 알루미늄 분말 취급과 관련된 조업 안전상의 문제가 제거된다.

● 고강도 알루미늄 합금

Cospray, Alusuisse 및 Pechiney사 등에서는 Zn와 Mg의 함량이 월등히 증가된 새로운 고강도 알루미늄 합금을 개발한 바 있으며, 이 합금의 인장강도는 대략 700~800 MPa에 이르고 있다. 이 합금의 기계적 특성을 더욱 향상시키고자 하는 연구의 일환으로, Cospray사와 Alusuisse사는 공동연구를 실시하여 T 76조건에서 파괴인성을 2732 MPa·√m로 향상시켰다. 분무주조법으로 개발된 신합금에서 주목할 점은 동일한 파괴인성을 기준으로 평가할 때, 인장강도가 약 30% 이상의 향상되며 이와 더불어 합금의 피로 특성은 월등히 향상되었다. N707이라 명명된 이 합금은



**Fig. 7. Spray casting equipment for production of round billets.**

장차 7075, 7150 압출재 및 7050단조재의 대체 재료로 응용될 것으로 예상되며, 그 응용 분야는 항공기의 랜딩 기어, 헬리콥터용 구조재 등의 주요 부품으로 확대될 전망이다. 이러한 N707합금 외에도, Aluisse/Cospray사에서는 항공기용 구조재로 응용하기 위해 더욱 우수한 고온강도와 고온 피로특성을 갖는 N202 Al-Cu합금을 새로이 개발한 바 있다.

#### ●경량 Al-Li 합금

지난 수 십년 동안 경량 Al-Li합금은 DC Casting이나 분말야금법으로 개발되어 왔다. 그러나 최근 Cospray사(Alcan의 자회사)는 Al-Li합금 개발에 있어 분무주조법을 적용하는 연구를 진행하였다. 분무주조재는 DC Casting재에 비해 미세한 결정립과 2차상으로 구성되어 있으며, 알칼리 금속이나 수소함량이 급격히 감소되기 때문에 보다 우수한 기계적 특성을 나타낸다. 예를 들면, 분무주조법으로 제조된 8090Al 합금은 DC Casting으로 제조된 것에 비해 보다 높은 횡단 방향 연신율을 나타내며 보다 우수한 응력 부식 특성을 보여준다. 특히 8090Al 합금의 탁월한 응력 부식 특성은 이 합금의 항공기나 해양구조물에 대한 응용력을 월등히 향상시키는 계기가 된다. Alcan사에서는 이러한 분무주조법을 통해 8091 Al-Li 합금을 개발하였으며, 이 합금은 고강도 7075-T6합금의 응용 분야에 적용될 것으로 전망된다. 또한 Alcan사에서는 기존의 8090 합금에 비해 보다 많은 Li를 함유하고 동시에 내식성도 더욱 우수한 UL40합금을 개발하였으며, 이 합금은 앞으로 항공기, 해양구조물 그리고 정밀기계 부품에 응용될 것으로 전망하고 있다.

### 3.2. 초내열합금 및 부품 제조

#### ●초내열 니켈 합금 빌렛 제조

분무주조 공정을 이용한 초내열 합금의 개발은 GE사에서 처음 시작되었고 초기 평가 결과는 긍정적인 것으로 보고되었다. 현재 초내열합금 제조의 선두주자인 Howmet사는 500 kg급의 진공 용해로를 이용하여 직경 800 mm, 길이 500 mm의 터빈링 블럭과 직경 250 mm의 단조 빌렛을 분무주조하여 상업화에 성공하였다. 현재 분무주조법에 의해 제조된 초합금계는 IN100, IN713, IN718, Rene80, Rene125, Rene41, Rene95, Rene88DT, Merle76, Waspalloy 및 AF2-1DA-6등과 같이 매우 다양하다. 초내열합금 제조에 분무주조 공정의 적용시 기대되는 기대 효과를 정리

하면 다음과 같다.

- 가) 거시 편석, 공정 감마 프라임 및 prior 입자 경계의 효과적인 제거
- 나) 1~2% 이하의 고립 기공
- 다) 분무주조된 상태에서의 미세한 결정립도
- 라) Ar가스를 이용한 가스 분무시에 낮은 O<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub> 함량(<15 ppm)
- 마) HIP 및 단조에 의한 이론 밀도 획득 가능
- 바) 가공열처리에 의한 결정립 미세화로 우수한 단조성 확보
- 사) 분말야금 수준으로 고합금화된 조성을 분말 처리의 문제없이 제조 가능
- 아) 주조/단조 공정 및 분말야금 공정에 비해 적은 공정 단계

#### ●니켈합금 파이프 및 초내열합금 링 제조

미 해군과 Mannesmann Demag은 공동으로 해수에서 사용할 수 있는 고품위 내부식성 파이프를 제조하기 위해 1994년에 4.5톤 규모의 파이프 분무주조 설비를 설치하여 IN625 니켈 합금 파이프를 제조하고 있다. 튜브의 직경은 80cm 규모로 제조가 가능하며, 이외에도 해수에서 사용할 수 있는 특수 니켈 합금 파이프 제조에 관한 연구를 행하고 있다. 한편 Howmet사는 터빈 엔진용 초내열합금 링 부품의 제조에 연구 노력을 집중하여 현재 항공기용 부품으로 상업화에 성공한 것으로 알려져 있다. 분무주조 공정은 Near-Net-Shape의 장점이 있기 때문에 한번에 링 형상으로 제조가 가능하여 가공 비용이 소요되지 않으며, 또한 복잡 형상의 제어 기술을 통해 제조 회수율을 높일 수도 있다.

### 3.3. 고강도/고전도성 동합금 제조

분무주조 공정을 이용하여 새로운 동합금을 개발하기 위한 노력은 Wieland Werke사, Swissmetal사 및 Olin사에서 연구가 진행되고 있으며, Cu-Fe, Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Cr-Zr등의 고강도/고전도성 합금이 개발되어 거의 상업화 수준에 도달했다. 이러한 새로운 합금은 일반 주조시에 나타나는 편석 및 수지상을 억제하여 미세한 등축상의 결정립을 갖는 소재 제조가 그 특징을 이루고 있다. 최근 Swissmetal사는 Cu-Be 합금을 대체하기 위한 Cu-Ni-Sn 분무주조 합금 개발에 박차를 가하고 있다. Cu-Ni-Sn 합금 주조체는 고액 공존영역이 매우 크기 때문에 조대한 수지상 및



심각한 편석으로 인하여 열간 가공이 거의 불가능했다. 그러나 이러한 합금계는 분무주조시 편석없이 등방성 결정립을 얻을 수 있어 합금의 응용 분야가 확대될 전망이다.

**3.4. 고품위 특수강 및 부품 제조**

●고속도공구강 빌렛 제조

현재 고품위 고속도공구강은 분말야금법(HIP)을 이용하여 생산되고 있으나, 그 제조 비용이 kg당 3만 원 이상이기 때문에 적용범위가 제한되고 있다. 고속도공구강은 주단조 공정을 통해서 생산은 가능하나 합금원소 첨가량의 한계로 그 물성이 저급인 수준에 머물러 있다. 고속도공구강은 용고 온도 영역이 넓어 분무주조 공정에 매우 적합한 것으로 알려져 있으며, 현재 포항산업과학연구원, Sumitomo 중공업 및 Kobe 철강등에서 연구 개발을 수행하고 있다. 이중 포항산업과학연구원은 5년여의 연구개발을 통해 새로운 분무주조용 고 V계 고속도공구강의 개발에 성공하였다. 신 개발 분무주조 고속도공구강의 제반 물성은 분말야금 고속도공구강과 비슷한 수준이며 내마모성은 월등히 향상된 것으로 나타났다. 본 소재는 분말야금 고속도공구강에 비해 제조 단가가 현저하게 저렴하여 향후 고속도공구강의 수요 확대에 일익을 담당할 것으로 사료된다.

●심레스 스테인레스강 파이프 제조

스웨덴의 Sandvik Steel사는 분무주조 공정을 이용하여 대형 스테인레스강 혹은 니켈합금 파이프를 제조하는 대표적인 업체이다. 현재 외경 40 cm의 파이프를 약 8 m 길이까지 제조가 가능하며, 파이프의 두께는 2~5 cm까지 제어가 가능하다. 파이프 제조시, 분무주조 공정 적용은 장점은 용탕으로부터 한번에 파이프를 제조할 수 있으며(Fig.2), 열간 가공 혹은 냉간 가공 없이도 단조품 파이프의 물성에 근접할 수 있다는 것이다. 분무주조를 위해서 약 1.2톤 규모의 이동식 래들(Calidus Ladele)을 이용하고 있으며 래들의 하부에 특수하게 고안된 용탕 노즐을 장착하여 하부 출탕식으로 분당 80 kg의 속도로 분무주조가 가능하다. 래들내의 용탕은 분무주조 동안 일정한 온도를 유지하도록 설계 되었으며, 용탕의 유출속도를 일정하게 하기 위해 래들 내의 분압을 조절한다. 이러한 파이프는 분무주조 상태로 응용이 가능하며, 또한 더욱 우수한 물성과 크기를 제어하기 위해서 열간 및

냉간 가공을 행할 수 있어 단조재 파이프 보다 월등한 물성을 기대할 수 있다.

●압연용 공구강 롤 제조

Sumitomo 중공업은 1986년에 소형 롤 제조용 분무주조 Pilot Plant를 설치했으며, 1991년에 선재용 마무리 롤의 상업화에 성공하였다. Fig. 8와 같은 방법으로 길이 50 cm, 직경 80 cm의 롤의 제조가 가능하며, 현재 고크롬계 주철 및 고크롬계 공구강 롤을 분무주조에 의해 제조하고 있다. 이러한 합금계는 주조시 조대한 크롬 탄화물이 생성되어 인성이 매우 열악하기 때문에 분무 주조시 탄화물이 미세화되어 인성이 월등하게 향상되어 롤의 조업 수명이 3배 이상 연장되는 것으로 알려져 있다. 기존의 고크롬 주철 압연롤은 열간압연판의 고강도화 및 박물화 추세에 따라 고속도강 압연롤로 대체되고 있는 실정이다. 그러나 고속도강 열연롤은 원심주조법등의 주조에 의해서 제조되고 있어 내부의 탄화물이 매우 조대하다는 단점을 갖고 있다. 분무주조 기술이 발전함에 따라, 이러한 대형 고속도강 압연롤의 제조도 가능하게 되었다. 현재 British Rollmaker, Forged Roll 및 Babcock & Wilcox등에서는 대형 열연롤의 상업화를 위한 연구 개발이 공동 연구로 진행 중에 있다.

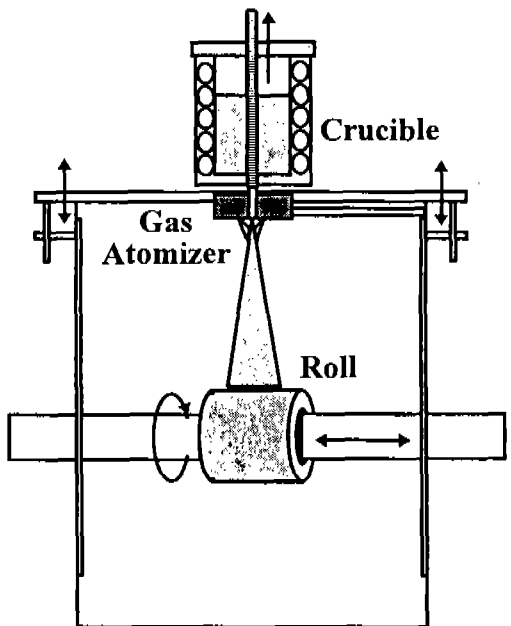


Fig. 8. Spray casting equipment for production of roll or tube.

#### 4. 분무주조기술의 향후 개발 방향

분무주조 공정은 주조법에 비해 합금 원소의 편석이나 조대한 2차상 형성을 억제시킬 수 있고 보다 많은 합금원소를 첨가할 수 있다. 또한 분말야금법에 비해 산화물에 의한 영향이 감소되고 가격이 저렴하다는 장점을 지니고 있다. 이러한 장점은 앞에서 언급한 바 있는 Alcan사의 Al-4wt%Li계 합금(UL40)의 물성에서 확실하게 인식할 수 있으며, 분무주조 공정은 장차 Mg합금이나 Cu합금 개발에도 많이 응용될 것으로 예상된다. 또한 1993년 말부터 미해군 연구소에서는 Skull Melting장비를 장착한 분무주조 장치로부터 Ti합금 및 Ti-Al 금속간화합물 제조 연구를 시작하여 이에 대한 관심이 고조되고 있다.

분무주조 공정의 커다란 특징은 금속기 복합재료를 제조할 수 있다는 데 있다. 금속기 복합재료의 개발은 Al기지 복합재료로부터 비롯되었으나, 최근에는 Friction-Surfacing 응용을 위한 철강재 금속복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Friction-Surfacing을 이용하면 기지재료의 표면 미세조직을 미세하게 할 수 있어서, 소재의 내구성 향상을 위한 복합재료 코팅에 있어서 매우 주목받고 있는 기술이다. Friction-Surfacing을 위한 복합재료는 20~50  $\mu\text{m}$  크기의  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말을 5% 함유한  $\text{D}_2$  공기강으로서 분무주조법으로 제조가 가능하다. 이러한 복합재료를 이용하여 철강재 표면에 Friction-Surfacing을 행하면 코팅층이 미세하고 균일하게 되어 소재의 내마모성을 크게 향상시킬 수 있다. 표면 코팅층에서 균일한 보강재 분포를 확보하기 위해서는 초기 복합재료 빌렛의 미세조직이 우수하고 그 제조단가가 저렴하여야 하는데, 이러한 복합재료의 제조는 분무주조법을 이용하여야만 가능한 것으로 알려져 있다. 본 기술의 응용은 우수한 내마모특성이 요구되는 분야를 비롯하여 매우 광범위할 것으로 추정된다.

분무주조 기술의 또 다른 응용분야로 In-situ 합금화를 들 수 있다. 분무주조법을 이용하면 빌렛 제조 공정 동안 특성에 유리한 강화상을 빌렛 내부에 직접 형성시킬 수 있다. 이러한 강화상은 분무주조 동안

분무 액적이 분무가스 또는 주입되는 입자 또는 제2의 합금원소등과 반응하여 형성될 수 있다. 예를 들면, Ti를 함유한 철강의 분무주조시  $\text{Cr}_3\text{N}_2$  입자를 동시에 주입하면 용탕내의 Ti와  $\text{Cr}_3\text{N}_2$  입자가 반응하여 빌렛 내부에 미세한 TiN강화상이 균일하게 생성된다. 이러한 기술의 가능성은 무궁무진하며, 앞으로 많은 합금계에 적용될 수 있을 것으로 전망된다.

#### 5. 결 론

분무주조 공정은 20여년의 짧은 역사를 갖고 있는 합금 및 부품 제조 공정이지만, 그 역사에 비해서 산업화 속도는 빠른 편이라고 판단할 수 있다. 산업의 고도화와 함께 고품질의 신소재 부품의 수요가 증가하고 있으며, 이러한 신소재는 소량 다품종 생산을 요구하고 있어 경제적으로나 기술적인 측면에서 분무주조 기술의 응용분야는 확대될 것으로 예측된다. 국내에서는 절삭공구, 산업용 나이프 및 소형 톨로그속도공구강 소재 제조 연구가 진행되고 있고, 일부 업체에서 내마모성 알루미늄 합금 개발도 상당한 수준에 도달해 이들의 상업화 가능성을 기대할 수 있다. 국내의 분말야금 업체에서도 본 기술에 대해서 좀 더 관심을 갖고 미래를 대비한다면 분무주조 기술의 국내 활성화도 머지 않은 장래에 이루어 질 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. A. R. E. Singer, J. Inst. Met., **100** (1972) 185
2. E. J. Lavernia and J. J. Grant, Mater. Sci. Eng., **A 98** (1988) 381
3. E. J. Lavernia, G. Rai and N. J. Grant, Inter. J. Powder Metall., **22** (1986) 9
4. A. R. E. Singer and S. Ozabek, Powder Metall., **28** (1985) 72
5. B. Williams, Met. Powder Report, **10** (1987) 720
6. R. W. Evans, A. G. Leatham and R. G. Brooks, Powder Metall., **28** (1985) 13
7. A. Moran and D. White, J. Metals, **42** (1990) 21