

# 초내열 합금 분말의 응용



박 노 광 (내열재료실 선임연구원)

'73-'77	연세대 금속공학과(학사)
'77-'79	한국과학기술원 재료공학과(석사)
'83-'87	Monash University(박사)
'89-'90	The University of Michigan(연구원)
'79-현재	한국기계연구소 선임연구원

## 1. 머릿말

니켈기지 초내열 합금은 석출물( $\gamma$ ,  $\gamma^*$ , 탄화물 등)에 의한 강화 및 합금원소의 고용에 의한 강화 효과에 의하여, 고온에서의 기계적 성질이 우수하고 내식·내마모성이 뛰어나 항공기용 엔진 재료로 다량 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 이들 석출량을 증가시키기 위하여 알루미늄, 티타늄 등의 합금 첨가량은 점점 증가 되었으나 고온 성형성은 점차로 나빠게 되었다. 즉, 고온 강도가 높기 때문에 일반적인 단조, 압출 등이 곤란하고, 정밀 주조할 경우에도 조성편석, 수축공 등의 주조 결함을 피할 수 없고 결정립이 조대하여 비교적 저온·고응력 하에서 이용되는 터빈 디스크 등의 부품을 제조할 수 없게 되었으며, 이에 따라 분말야금법이 많은 기대를 모으게 되었다.

일례로 GE엔진에 사용되는 RENE 95 및 Pratt & Whitney 엔진에 사용되는 IN 100등은 알루미늄, 티타늄, 니오비움, 바나듐의 총합량이 10% 정도 이어서,  $\gamma$ 체적이 약 60% 수준을 유지하고 탄화물도 다량 함유하기 때문에 일반적인 성형법(단조, 주조등)으로는 양질의 제품을 제조할 수 없는 상황이다. 또한 이들 니켈기지 초내열 합금은 가격이 비싸기 때문에 정밀 성형을 함으로써 재료 절감을 하여야 할 필요가 있다.

1960년대 부터 항공기 엔진 제작 회사에서는 분말 야금법에 의한 초내열 합금 부품 제조의 관련된 연구개발을 수행하여 상당수의 부품을 실용화하게 되었다. 분말 야금법은 주조 및 일반 소성 가공법에 비하여 다음과 같은 특색을 갖는다.

- ① 미세 결정립에 의한 우수한 고온 성형성을 이용하여 Near Net성형할 수 있어 재료 절감

및 공정 단순화에 따라 부품 생산비가 저렴하다.

- ②급냉 응고된 분말은 균질하기 때문에 주조 합금에 비하여 균일한 기계적 특성을 갖는 제품 제조가 가능하다.
- ③고온 성형성이 향상됨에 따라 석출물 함량이 많은 신종 합금 개발이 가능하다.

## 2. 초내열 합금 분말 제조

니켈기 초내열 합금 분말은 고순도 잉고트를 원소재로하여 제조되는데, 이들 잉고트 제조를 위해선 일반적으로 2단계 진공 용해에 의하여 탈산 및 성분 조절한 후 진공 아크 용해, 전기 슬래그 용해, 전자빔 용해 등에 의하여 정련하며 미국 Cannon Muskegon, Electro Metals, Special Metals 등에서 제조 공급하고 있다. 이들 정련된 잉고트는 실제적으로 진공 혹은 불활성 가스분무법 (Vacuum or Argon gas atomization)이나 회전 전극법(Rotating electrode process)등에 의하여 합금 분말로 변환되며, 이들 합금 분말 제조 공정은 크리프 파단 강도, 연신율 등을 감소시키는 것으로 알려진 질소 및 산소 함량을 100ppm이하로 관리하며, 내부 기공이 없고 입도의 분말을 제조할 수 있는 등의 유사점을 갖는다<sup>2)</sup>.

가스 분무법은 Crucible, Special Metals, Kelsey-Hayes, Henry Wiggin등에서 이용하는 방법으로, 분무하고자 하는 합금을 Tundish를 통하여 보내며 고속 불활성 가스를 노즐을 통해 불어주면 합금 방울들이 알곤 용기내에서 비산되며 응고된다<sup>34)</sup>. 이 방법은 비교적 경제적이고 손쉽게 입도를 조절할 수 있으나, 회전 전극법에 비하여 분말 형태가 불규칙 형태이고 아주 미세한 입자들도 형성된다.

진공 가스 분무법은 Homogeneous Metals사가 이용하는 방법으로, 초내열 합금 용탕을 수소 가스로 과포화시킨후 진공 용기에 연결된 밸브를 열어 줌으로써 수소 가스가 노즐을 통하여 분출되는 힘을 이용하여 합금 방울이 진공 용기내에서 형성되며 급냉한다<sup>35)</sup>. 이 방법으로는 매우 청정한 분말을 제조할 수 있으나, 분말 형태를 조절할 수가 없고 수소의 폭발 위험성이 내재되어 있다.

회전 전극법은 Nuclear Metals사에서 이용하는 방법으로, 초내열 합금 잉고트를 1000-20000 rev/min로 고속 회전하는 소모성 전극으로 하고 텅스텐 전극 혹은 플라즈마를 이용하여 용해시킴으로써 합금 방울이 알곤 용기내에서 비산하며 응고된다<sup>6)</sup>. 이 방법으로는 사용 전력, 전극 직경, 잉고트 회전 속도를 바꿈으로써 분말 입경 분포도가 좁은 양질의 구형 입자를 얻을 수 있으나, 연속 작업이 곤란하고 소량 생산에 유리하다.

이들 방법으로 제조된 초내열합금은 각기 다른 특성을 갖는데, 전반적으로 분말형태 및 입도분포가 다르고, 동일입도 및 합금에서 수지상 간격, 미세결정화도, 기공도, 밀도 및 산소/질소 함량이 다르다. 용해 분무시에 혼입되는 비금속 개재물·알곤가스, 입자 표면의 산화물 또는 TiC와 같은 분체 입계(Prior Particle Boundary)등은 디스크 제조 후 저주기 피로 특성을 저하시키기 때문에 이의 제거를 위하여 후처리 작업이 필요하다<sup>7)</sup>.

## 3. 분말 성형

초내열 합금 분말은 소결성이 좋지 않기 때문에 일반적으로 고온 정수압 성형(Hot Isostatic Pressing)과 고온 정수압 성형/고온 소성 가공의 복합 성형법을 이용하여 부품을 제조한다. 고온 정수압 성형법은 분말을 유리, 연강, 스테인레스강 등으로 만든 용기(Can)에 넣고 진공을 뽑은 후 밀봉하고 고온 고압하에서 성형시키는 공정이다.

고온 정수압 성형시 유의점은 단순 공정으로 100% 밀도를 얻고, 분말 입계에 흔히 형성되는 분체 입계(Prior Particle Boundary)등에 대한 대책마련이다. 고밀도를 얻기 위하여 전통적으로 전형(Preform)을 만들거나, 분말 입계에 형성된 탄화물 층 제거를 위하여 탄소 함량을 조절하거나 후가공 처리를 한다. 표1에 초내열 합금 분말의 이용 사례 및 그 특성을 나타내었다.

## 4. 열기계적 처리(Thermomechanical Treatment)에 의한 조직 개선

초내열 합금의 열·기계적 처리는 주로 고온

표1) 초내열 합금 분말의 성형

합금 및 분말제조	성형	기계적 특성
MAR-M200 : 알콘 분무	HIP(Hot Isostatic Pressing)	HIP도중 초소성 특성 발현
IN-100 : 알콘 분무	HIP+단조 ; HIP+압출	일반 주조 및 단조품과 동일
RENE95 : 회전 전극법	HIP ; HIP+단조	일반 주조 및 단조품과 동일
ASTROLOY : 알콘 분무	HIP+단조	일반 주조 및 단조품 보다우수
Low Carbon ASTROLOY : 진공 분무	HIP	인장 및 피로 특성이 주조 및 단조품과 동일

가공성 및 사용 조건에서의 기계적 특성을 향상시키기 위하여 수행된다. 고온 가공성 측면에서 보면 미세결정립에 의한 가공성 향상과 고온 재결정에 의한 초소성 변형 특성을 이용할 수 있는데, Pratt & Whitney사에서 개발한 터어빈 디스크 제조법인 게이터라이징(Gatorizing)공정이 그 한 예이다<sup>8)</sup>. 즉 초내열 합금 IN 100을 재결정 온도 직하에서 높은 변형 속도로 가공하면 단일 가열 현상에 의하여 재결정이 일어나 1-10 $\mu$ m의 결정립을 얻을 수 있어 초소성 가공을 수행할 수 있다.

한편 일본 기계기술연구소에서는 초소성 발현 속도가 증가된 개량 IN 100을 S35C에 산 후 초소성 발현 온도까지 가열하고 저온으로 가열된 금형을 이용하여 단조하는 공정인 초소성 온간 팩 단조법(Superplastic Warm-Die and Pack Forging)을 개발하였는데 이 경우 결정립 미세화를 위한 압출 공정이 성행되어야 한다<sup>9)</sup>. 이 처럼 초내열 합금 분말을 재결정시켜 결정립도 10 $\mu$ m이하의 미세조직을 얻을 수 있으면, 변형 용력이 낮고 인장 연신율이 수백%에 이르는 초소성 특성을 이용할 수 있다.

개진한 바처럼 초내열 합금 분말은 고온 성형성이 우수하지만, 실제 사용시 결정립이 미세할수록 고온 크리프 저항성이 떨어지는 등의 단점이 있으므로 이를 보완하기 위하여 성형후 기계적 특성 향상을 위한 열기계적 처리를 필요로 한다<sup>2)</sup>. 일례로 성형후 재결정 온도 이상이며  $\gamma$ 의 단상 온도 구역인 고온에서 결정립 조대화 처리를 행하고 후 열처리를 통하여 석출 강화 효과를 얻을 수 있으므로 주조 합금 이상의 기계적 특성을 얻을 수 있게 된다. 결정립 조대화를 촉진하기 위하여

저탄소를 함유한 니켈기 초내열 합금의 사용도 가능하다<sup>10)</sup>.

이처럼 기계적 성질이 우수하지만 고온 성형성이 나쁜 초내열 합금에 분말야금 기법을 사용함으로써, 제조 가격이 싸고 기계적 성질이 우수한 엔진 부품을 제조할 수 있게 되었다. 실제로 F100, F404, CFM56, F-101, F110, T700등 제트기에서 헬기용 엔진에 이르기까지 많은 부품이 현재 분말야금법에 의하여 생산되고 있다.

## 5. 연구개발 현황 및 전망

초내열 합금 분말의 응용에 관한 연구는 제트 엔진 제작회사인 Pratt & Whitney, General Electric을 위시하여 독일의 MAN, 프랑스의 ENSMP, 일본의 기계 기술연구소 등에서도 연구를 수행하고 있다. 주로 관련 기술이 항공기용 엔진 분야에 국한되어 있으나 그 기술의 집적도가 여타 금속 재료에 비하여 높기 때문에 그간 많은 연구가 추진되어 왔다. 이는 단조용 초내열 합금 및 공정에 관하여 지난 10여년간 학회 및 전문지에 발표된 논문중 약 50%가 초내열 합금 분말 응용에 관한 것임을 보아서도 알 수 있다.

현재 항공기 엔진에 사용되는 초내열 합금 중 약 75%가 단조 합금이며 그중 대부분은 IN718인데, 이 합금은 전세계 단조용 초내열 합금 생산량 중 약 35%를 점유하고 있다. 그러나 IN718은 그 사용온도가 650 $^{\circ}$ C이하로 제한 받기 때문에 고온 기계적 특성을 향상키 위한 초내열 합금 분말 이용이 기대된다. 일례로 열간 정수압 공정을 이용하는 경우, 압력용기의 크기에 제한을 받기 때문에 로

터와 같은 대형 부품을 제조하는 데는 어려움이 있으나 후처리가 필요하지 않은 단순 열간 정수압 성형 기술의 개발로 소규모의 엔진 부품 제조에 응용 분야가 확대될 전망이다. 일례로 열간 정수압법으로 RENE 95합금을 이용하여 터빈 디스크를 제조할 경우 통상 적인 성형법(다단계 단조 및 가공)보다 1/3-1/5수준의 재료비 및 가공비 절감을 꾀할 수 있다<sup>11)</sup>.

### 6. 맺음말

가스터빈의 효율증대 및 생산비 절감 목적으로, General Electric사, Pratt & Whitney사 등지에서 90년대 초 부터 이용되기 시작한 니켈기초내열 합금분말은 엔진 Seal, 디스크 등의 주요 부품에 IN 718대용으로 주로 이용되고 있다. 이는 분말 제조 및 처리 과정에서 개재물 혼입을 막고 재질의 순도를 높임으로써 피로특성이 향상되고, 고온 정수압 성형·초소성 가공 등 공정기술의 진보에 따라 저렴하게 복잡한 구조물을 제조할 수 있었기에 가능하였다.

니켈기 초내열 합금은 여타 금속재료에 비하여 가공성이 떨어지기 때문에 분말 형태로의 이용이 기대되지만, 아직 분말관리 및 정밀성형에 관한 연구여지가 많이 남아 있다. 또한 관련 분야에의 기술축적은 티타늄 합금등 여타 금속재료의 성형에 직접 응용 할 수 있어 그 파급 효과가 매우 크다.

국내에는 항공·우주 재료에 관한 관심이 고조되면서, KIMM이 중심이 되어 주로 구조용 초내열 합금 제조 및 특성 개선에 대한 연구를 수행하고 있으며, 지난 1-2년 사이에 단조용 니켈기 합금 IN718 및 분말 합금 RENE 95에 대한

연구를 시작으로, 단조 및 분말 초내열 합금의 성형 및 열기계적 처리 관련 기술에 관해서도 연구에 박차를 가하고 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Superalloys Source Book, ed. Matthew J. Donachie, Jr., ASM, Metals Park, OH 440373, 1984.
- [2] G. H. Gessinger and M. J. Bomford, Inter. Met. Rev., Vol. 19, 1976, pp. 51.
- [3] R. H. Van stone, F. J. Rizzo, and J. F. Radavich, "Rapid Solidification Processing, Principles and Technologies II", Claitors Publ, Baton Rouge, LA, 1980, pp. 260.
- [4] R. H. Van Stone and R. P. Gangloff, "Rapid Solidification Processing, Principles and Technologies II", Ibid, pp. 317.
- [5] Homogeneous Metals, Inc., Met. Powder Rept., Vol. 36, No. 2, 1981, pp. 69.
- [6] "Advanced Fabrication Techniques in Powder Metallurgy and Their Economic Implications", AGARD Conf. Proc. No. 200, April 4-9, 1976.
- [7] L. E. Coyne and W. H. Everett, Metal Powder Rep., Vol. 36, 1981, pp. 419.
- [8] US Patent, 3 519 503.
- [9] Y. Torisaka, M. Katoh and M. Miyagawa, 철과 강, Vol. 73, 1987, pp. 899.
- [10] S. H. Reichman and J. W. Smythe, Inter. J. Powder Metall., Vol. 6, 1970, pp. 65.
- [11] H. D. Hanes, D. A. Seifert and C. R. Watts, "Hot Isostatic Pressing", Battelle Press, Columbus, 1979.