

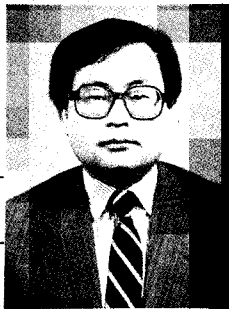
티타늄합금의 용해 및 정밀주조기술



현 용 택

(KIMM 재료기술연구부)

- '89. 2 인하대학교 금속공학과(학사)
- '91. 2 인하대학교 대학원 금속공학과(석사)
- '91-현재 한국기계연구원 연구원



이 용 태

(KIMM 재료기술연구부)

- '70-'74 서울대학교 금속공학(학사)
- '74-'76 한국과학기술원 재료공학(석사)
- '76-'80 국방과학연구소(선연 및 연구원)
- '80-'85 Case Western Reserve Univ. 재료공학(박사)
- '85-'85 Case Western Reserve Univ. 연구원
- '85-'90 독일 항공우주연구소(DLR) 연구원
- '80-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 머리말

티타늄합금은 비강도와 피로강도가 우수하면서 내식성도 뛰어나기 때문에 항공우주 분야에서 뿐만 아니라 석유화학, 전기화학, 해양, 의료분야 등으로의 이용도 점차적으로 증가하고 있다. 그러나 티타늄합금은 가공성이 좋지 않아 형상이 복잡한 제품의 경우에는 특별한 정밀 성형 기술이 필요하다.¹⁾ 이러한 목적을 충족시킬 수 있는 방법으로 정밀주조 공정과 분말야금 공정을 들 수 있는데, 두 공정 모두 가공과 용접공정을 생략할 수 있다는 장점이 있다. 특히 정밀주조 공정은 기계 가공이 불가능한 복잡한 형상과 증공형의 제품 제조가 가능하기 때문에 정밀 성형의 한 방법으로 많이 이용되고 있다.²⁾ 일반적으로 대기와 반응성이 크지 않은 금속재료의 정밀주조 기술은 상당히 발달되어 있지만 티타늄합금과 같이 용융상태에서 반응성이 큰 재료의 정밀주조의 경우는 용해, 주형 및 주물재료, 주형설계 등 많은 기술들이 해결해야 될 과제들로 남아 있다.³⁾

티타늄합금의 용해는 일반적으로 1950년대에 개발된 진공 아크 용해법을 주로 사용해 왔는데, 이 방법을 이용하여 항공기용 부품까지도 제조되어 실용화 되고 있다. 최근에는 티타늄 제품의 청정도, 설비비 및 조업성 등의 관점에서 유리한 전자빔 용해법, 고주파 용해법 및 플라즈마 아크 용해법 등이 등장하고 있다. 그러나 현재 티타늄합금의 용해에 가장 많이 사용되는 방법은 소모 전극식 진공 아크 용해법과 전자빔 용해법이 대표적이라 할 수 있다.

티타늄의 정밀주조에 이용되는 주형은 부품 형상이 소형이면서 간단한 경우에는 금형이 주로

이용되지만, 복잡하면서도 대형품인 경우에는 흑연 또는 지르코니아 주형이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이들 주형을 이용할 경우 용융 티타늄과 주형재료와의 반응에 의한 표면오염 및 거칠기가 문제 되므로 이를 제거하기 위해서는 화학적인 처리법에 의한 후처리 공정이 필요하기 때문에 제조원가와 정밀도 면에서 해결해야 될 문제가 아직도 남아 있다. 그러나 세계 선진국에서는 최근 티타늄에 대한 정밀 성형 기술의 발달과 티타늄 주조품에 대한 수요가 증대 되면서 이들 티타늄 주물이 갖는 문제점들을 해결하기 위한 주조방법의 개발에 많은 연구 개발이 진행되고 있다. 그러나 국내의 티타늄합금 용해 및 주조기술은 거의 전무한 상태로, 특히 티타늄합금의 주조공정에 쓰이는 주형용 내화물 및 용해용 도가니의 국내생산이 전무하며 또한 선진국에서는 이에 대한 기술이전을 기피하고 있기 때문에 이러한 문제들을 해결하기 위한 연구가 필연적으로 수행되어야 한다.

본 글에서는 선진국에서 사용하고 있는 티타늄합금의 용해, 정밀주조법과 더불어 티타늄 정밀주조품의 특성에 대하여 알아보고, 또한 국내의 티타늄 용해 및 주조기술 현황에 대하여 간단히 살펴 보고자 한다.

2. 티타늄의 용해 및 정밀주조 기술

티타늄은 용융상태에서 반응성이 대단히 높기 때문에 이 재료의 용해는 다른 일반 금속에 비하여 다소 특수한 공정을 필요로 한다. 이는 티타늄이

산소, 질소와의 친화력이 강하면서 용점(약 1670℃)이 높기 때문에 철이나 알루미늄에서 사용되는 일반적인 용해방법으로는 분위기와 반응성 때문에 청정한 용탕을 얻기가 힘들며, 또한 일반적인 주형재료는 용탕과의 반응에 의해 주조품 표면에 오염층과 pin hole 등의 결함이 발생하기 쉽기 때문이다. 따라서 오염이 적고 안전한 화학조성의 용탕을 얻는 용해 기술, 반응이 최소화 될 수 있는 주형재에 의한 정밀도가 높은 주형 제조기술이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있다.⁴⁾

2.1 티타늄합금의 용해 방법

2.1.1 VAR 용해

티타늄의 VAR 용해 공정은 그림 1에 나타난 바와 같이 분쇄된 스폰지 티타늄을 압연기로 형상(briquette)을 만들어, 이들을 용접하여 일정한 길이의 봉상 전극(소모전극)을 만든다. 이 소모전극을 용해로에 설치하고, 진공 또는 불활성 가스 분위기에서 아크를 발생시켜 수냉동 도가니에서 용해한다. 이와같이 제조된 잉고트 내의 화학적 조성 균질화를 위하여 제조된 잉고트를 소모전극으로 하여 2~3회 재용해 하여 최종 제품을 얻게 된다. 티타늄은 산소, 질소와의 반응성이 매우 크기 때문에 그림 2에 나타난 것과 같이 로 및 도가니가 진공속에 장착된 시설내에서 용해를 하여야 한다. 도가니는 티타늄과 반응성이 작은 수냉동 도가니를 사용하고, 이 도가니 내에서 용탕과 소모전극 사이에 아크를 발생시켜 이 아크열에 의해 소모

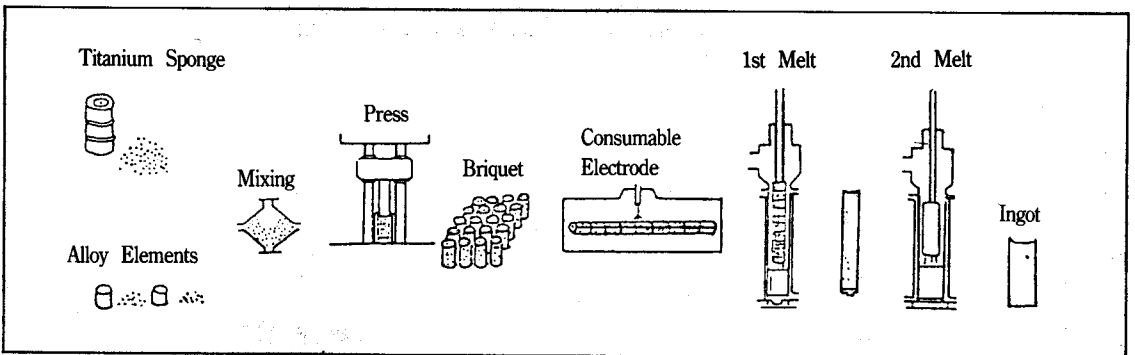


그림 1. 티타늄합금의 VAR공정

전극을 용해시킨다. 용해된 티타늄은 하부 부터 응고하여 티타늄 잉고트가 된다. 전원은 직류를 이용하는데, 소모전극을 음극으로 하고 잉고트를 양극으로 하여 용해한다.

현재 세계 대부분의 티타늄 잉고트가 이 VAR 방법으로 제조되고 있는데, 이는 다른 용해법에 비하여 취급이 용이하고 경제적인 면에서 유리하며, 또한 잉고트 품질의 재현성에 있어서도 우수하기 때문이다. 항공기 부품과 같은 엄격한 품질 조건을 만족시키는 잉고트 제조법으로서 오랜 역사를 갖고 있는 VAR 용해법은 앞으로도 티타늄의 용해에 보다 널리 이용될 것이다.

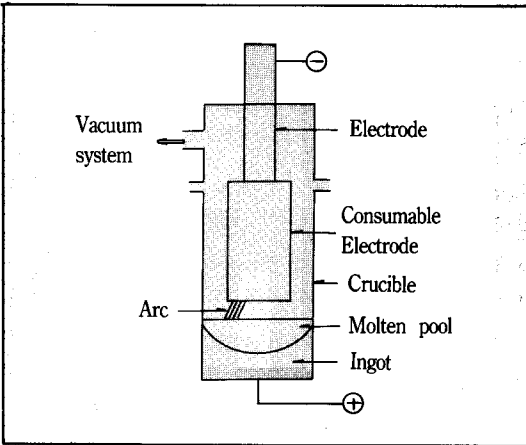


그림 2. VAR 용해로

2.1.2 전자 빔 용해(Electron Beam Melting)

공업용으로서의 전자 빔 용해는 1950년대의 중반에 Nb, Ta, Mo 등의 고융점 금속의 정련을 목적으로 개발되었으나, 현재는 고품질의 초내열 합금 또는 티타늄의 용해법으로서 가장 주목을 받고 있는 잉고트 제조 기술이다.

티타늄 용해용으로 사용되는 전자 빔 용해로는 수냉 hearth가 부착되어 있어 EBCHR(Electron Beam Cold Hearth Refining process)⁵⁾라 불리는데, 이 용해로의 개략도를 그림 3에 나타내었다. 정제된 원재료를 수냉식 도가니에 넣으면서 전자 빔 토치를 이용 hearth 윗부분을 선회하며 용해하고, 수냉 몰드내에 용탕을 주입하는 연속주조 방법으로 스크랩을 잉고트로 재용해 하는데 이

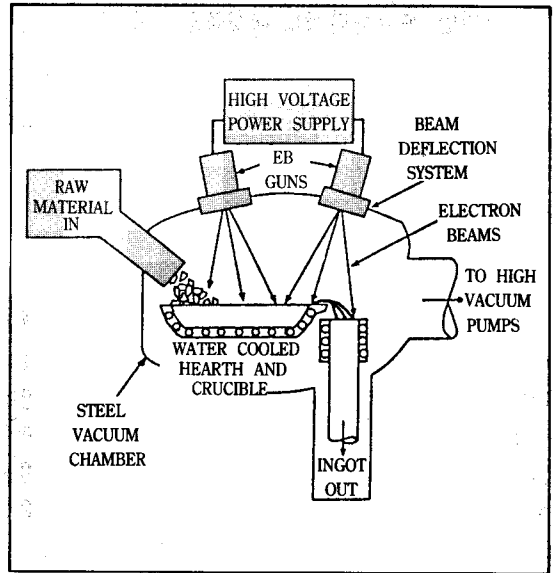


그림 3. 전자 빔 용해로(EBCHR)의 개략도

용될 수 있다. 티타늄 용해용으로서의 EBCHR은 종래의 VAR이나 다른 용해법에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.

(1) 티타늄 스크랩의 잉고트화가 가능하다. 특히 다른 용해법에서는 잉고트화 하기 어려운 낮은 품질의 티타늄 스크랩을 사용하여 건전한 잉고트를 만들 수 있다.⁶⁾

(2) Ta, Mo, W 등의 고밀도 개재물과 티타늄 질화물 등의 저밀도 개재물을 제거할 수 있다. 일반적으로 티타늄 스크랩 중에는 고밀도 개재물이, 또 스폰지 티타늄과 티타늄 스크랩에는 티타늄 질화물이 흔히 혼입되어 있다.^{6,7)} EBCHR 용해에서는 원료가 일단 수냉 hearth 내에서 전자 빔에 의해서 용해되어, 완전히 용해된 용탕만이 수냉 몰드 내에 주입되고, 여기에서 다시 용해하여 잉고트를 만든다. 수냉 hearth 내의 용탕은 전자 빔에 의해서 고온으로 유지되기 때문에 융점이 높은 티타늄 질화물 등도 용해가 가능하다. 또 고밀도 개재물은 용탕이 수냉 hearth 내에 있는 동안 pool 밑에 가라앉아 버리기 때문에 화학적으로 보다 균일한 제품을 얻을 수 있다.

(3) 직접 슬래브를 만들 수 있기 때문에 다음의 단조공정을 생략할 수 있다.^{8,7)}

(4) 용탕 중으로 부터 직접 샘플링이 가능하다.⁷⁾

이와같은 장점이 있는 반면 전자 빔 용해는 다음과 같은 단점도 있다.

(1) 티타늄합금 스크랩을 용해할 때 Al 등과 같은 증발하기 쉬운 성분의 증발 손실이 있어 성분 조절이 어렵다.⁷⁾

(2) 스폰지 티타늄에는 $MgCl_2$ 와 $NaCl$ 등의 휘발 성분이 포함되어 있기 때문에 이들의 증발에 의해 전자 빔의 발생이 방해를 받는다.⁶⁾ 이 때문에 스폰지 티타늄의 배합비율이 많은 원료를 용해할 경우는 $MgCl_2$ 나 $NaCl$ 의 함유량이 낮은 스폰지 티타늄을 선택하는 것이 좋다.

항공 우주 재료로서의 티타늄합금은 결함인 없는 완전한 것이 요구되는데, 티타늄 질화물은 이들 부품에 치명적인 결함인 α 편석의 원인이 된다. 티타늄 질화물은 일반적인 다른 용해법으로는 제거가 곤란하므로 티타늄 질화물이 전혀 포함되어 있지 않은 스폰지 티타늄 또는 티타늄 스크랩이 원료로서 이상적이라 할 수 있다. EBCHR은 이와같은 티타늄 질화물이 혼입되어 있어도 잉고트에 α 편석이 되는 것을 방지할 수 있기 때문에 향후 티타늄합금이 엄격한 용도에 사용되는 한 EBCHR의 유용성은 더욱 더 커질 것이다.

2.1.3 플라즈마 아크 용해(Plasma Arc Melting)

비소모전극으로서 플라즈마 토치를 사용한 용해법으로, 이 방법은 전자 빔 용해와 대단히 유사한데 열원으로 플라즈마 토치를 사용한다는 것이 다른 점이다. 플라즈마 토치의 특징은 저진공 ($10^{-3} \sim 10^{-1}$ Torr)에서 대기압 까지 넓은 범위에 걸쳐 용해가 가능하다.^{8,9)} 이 용해법은 앞에서 설명한 EBCHR 과 마찬가지로 환형과 각형 등의 여러가지 형상의 잉고트를 제조할 수 있다.^{8,10,11)} 또 티타늄 스크랩을 용이하게 잉고트로 할 수 있다는 점도 EBCHR과 유사하며 VAR에 비해서 유리한 점이다.

수냉 hearth가 부착된 플라즈마 용해는 원료를 hearth 내에서 일단 용해하여 이것을 몰드 내로 유입하고 다시 플라즈마 용해하기 때문에 VAR에서 재용해를 할 필요가 없다. 순수 티타늄 뿐만 아니라

티타늄합금도 이 방법에 의하면 1회의 용해만으로도 건전한 잉고트를 얻을 수 있다.¹²⁾ 도가니 내에 직접 원료를 투입하여 용고된 잉고트를 차례로 인발하는 방식의 용해로의 경우는 플라즈마 용해에 의해서 만들어진 잉고트를 소모전극으로 하여 VAR에서 2차 용해를 해야 한다.¹³⁾ 이와같이 플라즈마 용해는 많은 점에서 전자 빔 용해와 유사한 특징을 갖고 있지만 플라즈마 용해는 합금원소의 증발손실이 없고, 스폰지 티타늄의 사용율에도 제한이 없으며 용해로의 제조 및 작동 비용도 전자 빔 용해에 비하여 경제적이기 때문에 티타늄의 용해에는 플라즈마 용해 방법이 더 유리하다고 알려져 있다.¹⁴⁾ 그러나 티타늄의 용해에 있어 전자 빔 용해, 플라즈마 용해 중 어느 쪽이 더 유리한가는 원료사정, 최종제품의 요구 품질 및 가공 비용 등을 종합적으로 검토하여 판단해야만 한다.

2.1.4 Electroslag Remelting(ESR)

ESR은 VAR과 같이 소모전극을 사용하는 용해법으로 flux에 의한 정제효과를 목적으로 초내열 합금 등의 용해에 이용되어 왔다. 그러나 티타늄의 용해에 적용되기 시작한 것은 1960년대 초반 구 소련의 Morozov 등에 의해 연구되어 사용되어진 것이 효시라 할 수 있다.¹⁵⁾ 이 용해법은 CaF_2 를 flux로 사용하여 원형의 잉고트 뿐만이 아니라 슬래브 형상의 잉고트를 제조할 수 있으며, 아울러 표면상태도 VAR에서 용해한 것보다 더 나은 제품을 생산할 수 있다. 그러나 이 방법도 VAR과 마찬가지로 소모전극을 만들어야 하고 flux로서 사용되는 CaF_2 가 고가이기 때문에 경제적으로 유리한 용해법이라고는 할 수 없다. 또 이 방법은 슬래그에 의한 잉고트의 오염을 피할 수 없어 제품의 인성 및 충격강도가 저하된다는 단점이 있다.^{17,18)}

2.1.5 Induction Slag Melting

Induction Slag Melting 방법은 순 티타늄에서도 유도 용해가 가능하도록 하기 위하여 1970년대에 미국의 Bureau of Mines 에서 개발한 기술로, 이 방법의 개략도를 그림 4에 나타내었다. 이 용해

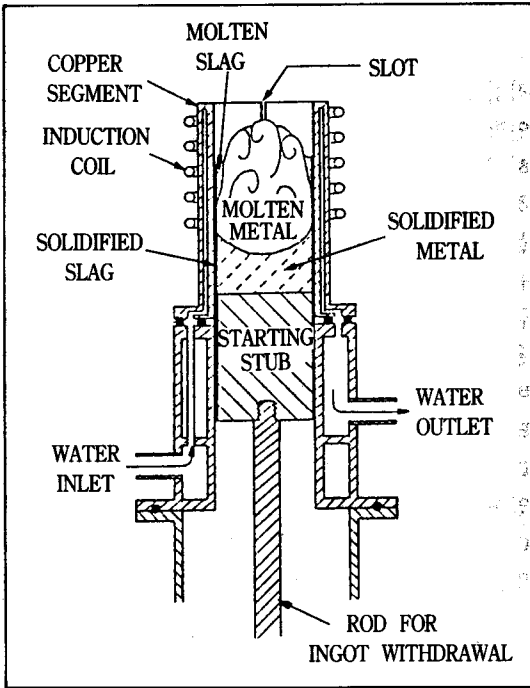


그림 4. USBM induction slag crucible 개략도

법은 분할된 수냉동 도가니를 사용하며 이들 사이에는 내화물로 채워져 있다. 티타늄 용해를 위해서는 우선 원료를 넣고, 여기에 피상의 갈슘 불화물(CaF_2)을 첨가한다. 이 용해방법의 초기설비에는 티타늄과 동 도가니 사이의 전기 절연체로서 이와같은 용융 CaF_2 슬래그가 사용되었는데, 이는 아크로 부터 도가니가 손상되는 것을 방지하기 위해서이다. 장입물의 용해가 시작되면 불화물은 용탕의 상부 및 바깥쪽으로 이동하여 동 도가니의 내부를 코팅시킨다. 수냉동 도가니와 용탕이 접하는 곳에서는 용탕이 즉시 응고되어 티타늄의 아크 용해에서와 같은 skull이 형성된다. 따라서 Induction Slag Melting 방법은 일반적인 세라믹 도가니의 유도용해와 cold-wall 아크 스킴 용해의 몇가지를 조합한 방법이라 할 수 있다. Induction Slag Melting 법의 초기 설비는 약 3.6kg의 티타늄을 용해할 수 있었는데, 주로 회수 scrap을 용해하여 아크 용해용 장입물을 제조하는 것을 목적으로 하였다. 그리고 이 방법은 보통의 내화물 도가니를 사용하는 유도용해보다 같은 양의 재료를 용해하는데 더 많은 전력을 필요로 하지만

높은 전력에 의해서 강력한 교반효과를 얻을 수 있기 때문에 균일한 조성의 잉고트를 제조할 수 있다.

2.2 티타늄의 정밀주조 공정

티타늄의 정밀주조 공정을 그림 5에 나타내었는데, 일반적으로 주형은 Lost-wax법으로 제조되고 있다. 티타늄의 정밀주조에서는 용해방법, 주형재질 외에도 후처리 공정에 있어서 기존의 다른 합금의 주조법과는 다른 몇가지 특징이 있다. 서구의 몇몇 주조회사에서는 주형제거, blast 처리 후에 chemical milling 을 행하여 주조품의 표면 오염층을 균일하게 제거하기도 한다.²¹⁾ 이는 항공기 부품과 같은 엄격한 품질이 요구되는 주조

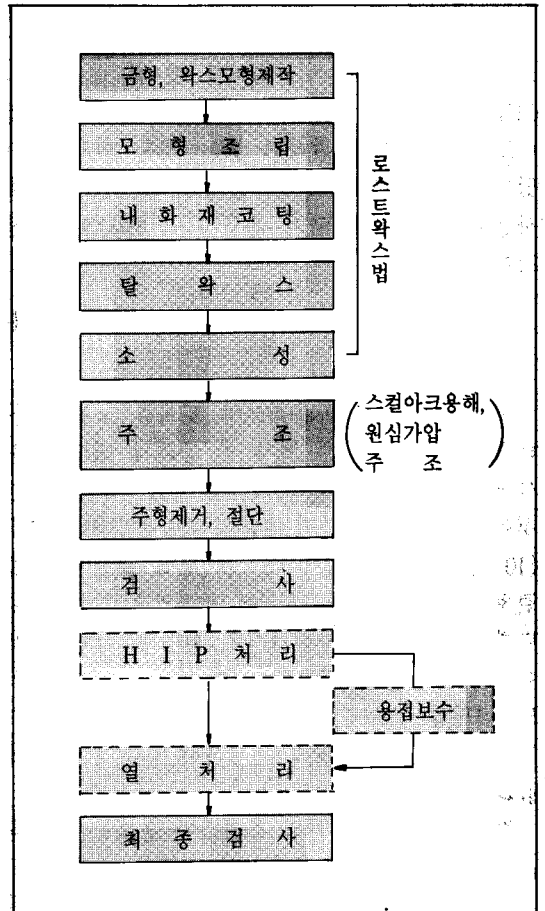


그림 5. 티타늄 정밀주조 공정

품에 있어서는 필수적인 공정이다. HIP 처리도 티타늄 주조에 있어 특수한 공정으로 내부결함을 감소시켜 건전한 주조품을 얻기 위함이다. HIP 처리 후 표면결함은 용접보수를 실시하며, 최종적으로 주조품에 필요한 열처리를 행하여 X-ray 검사, 침투탐상시험 등의 비파괴 검사, 정밀도 검사, 화학조성 및 기계적 성질을 시험한 후에 출하된다.

2.2.1 주형제작

티타늄은 활성이 매우 강한 금속이기 때문에 티타늄 주물을 얻는 데에는 적절한 주형이 필요하다. 일반 금속용 주형에 요구되는 조건으로는 적당한 강도, 통기도, 열간성질 및 잔류강도 외에도 주형 분리가 용이해야 되고 또한 표면조도도 작아야 되는데, 티타늄은 이에 더불어 용탕과의 반응이 작아야 된다는 것이 무엇보다도 중요한 조건이다. 만일 부적합한 내화재를 주형재료로 사용할 경우 용융 티타늄과 주형재료가 서로 접하는 곳에서 계면반응이 일어나 고온에서 티타늄과 친화력이 큰 산소, 질소 및 탄소 등과 반응하여 blow hole, pin hole 및 porosity 등의 결함이 발생할 수 있고, 또한 α -case와 같은 상이 생겨 주조품에 취화현상을 가져올 수도 있다.

현재 티타늄의 정밀주조에 있어서는 rammed graphite 주형과 Investment 법에서의 흑연²²⁾, 고융점금속²²⁾, $\text{CaO}^{23)}$, $\text{Y}_2\text{O}_3^{25)}$ 및 ZrO_2 주형 외에도 텅스텐 분말 피복주형 등이 널리 사용되고 있으나²⁶⁾, 산화물 내화재를 이용한 Investment 주조법이 티타늄의 정밀주조 공정으로 거의 전용되어 왔다.

1) Rammed Graphite Mold 법

Rammed Graphite Mold 법은 최초로 티타늄을 주조하기 위하여 개발된 주형 제작방법으로 비교적 대형의 제품을 생산하는데 이용되어 왔는데, 최근에는 헬리콥터의 rotor hubs 같은 대형의 항공기 부품도 생산하고 있다. 이 방법은 graphite 분말, pitch, corn 시럽, 전분과 물의 혼합물을 목재 pattern에 다져 주형 단면을 만들게 된다. Corn 시럽과 전분은 다져진 주형에 적당한 green strength를 주며 대기중에서 24시간 혹은 약 200°C에서 짧은 시간동안 건조되고 그 후 약 1025°C에서 24

시간 동안 소성된다. 이 방법에 의한 크고 복잡한 형상을 가진 주형은 여러 부분으로 결합되어 사용할 수 있다.

2) Investment Casting 법

이 방법은 크게 Solid Mold 법과 Ceramic Shell Mold법으로 나눌 수 있는데, Ceramic Shell Mold 법은 Solid Mold법을 개량한 방법이다. Solid Mold 법은 우선 주조하고자 하는 제품과 거의 같게, 제조과정 중 사용재료와 열팽창량, 수축량을 고려한 치수의 모형을 왁스 또는 유사한 재료로 만들고, 그 모형의 표면을 미립자의 내화물과 점결제를 혼합한 slurry로 피복하여, 그것이 건조하는 중에 거친 내화물 입자를 끼얹는다. 이것을 건조하여 주형상자에 넣고, 점결제와 함께 혼합된 내화물 입자를 그 둘레에 채워 건조한 후 가열하여 왁스모형을 용출시켜 주형을 만든다. 주형내에 남아있는 소량의 왁스는 고온으로 가열하여 연소시킨다. 이렇게 하여 주형내부에 완전한 공간을 만들고, 주형을 고온상태로 유지하면서 용탕을 주입하는 것이다.

Ceramic Shell Mold법은 왁스모형 제작까지는 Solid Mold법과 같고, 왁스모형에의 내화물의 피복은 Solid Mold법과 같은 방법으로 이 방법을 수 회 반복하여 소정의 두께로 만든 다음에 건조한 후 가열하여 왁스모형을 용출시킨다. 그 후의 주형의 가열주입은 Solid Mold법과 동일하다. 이 두 방법의 공정을 그림 6에 나타내었다.

Investment 주조용 주형재로서 반응성 측면에서 가장 안정한 산화물은 Y_2O_3 이나 재료가 고가이고 열충격에 약한 단점이 있어 주조품 원가상승의 원인이 된다. CaO 는 반응성 측면에서 Y_2O_3 보다는 떨어지지만 비교적 안정성도 우수하며 열충격에도 강한 특징을 지니고 있다. 그러나 CaO 는 흡습성이 강하여 대기중의 수분과 접촉시 강도가 떨어지며 박리현상까지 생기기 때문에 분위기 조절이 용이한 곳에서 사용되어야 한다.

이들 내화재를 기본으로 여러가지의 binder로 정밀주조용 주형이 제조되고 있는데, 서구 및 일본의 많은 주조 회사들은 이들이 어떤 주형재를 사용하고 있는가는 각 회사의 Know-How로 자세히 밝히지 않고 있는 실정이다.

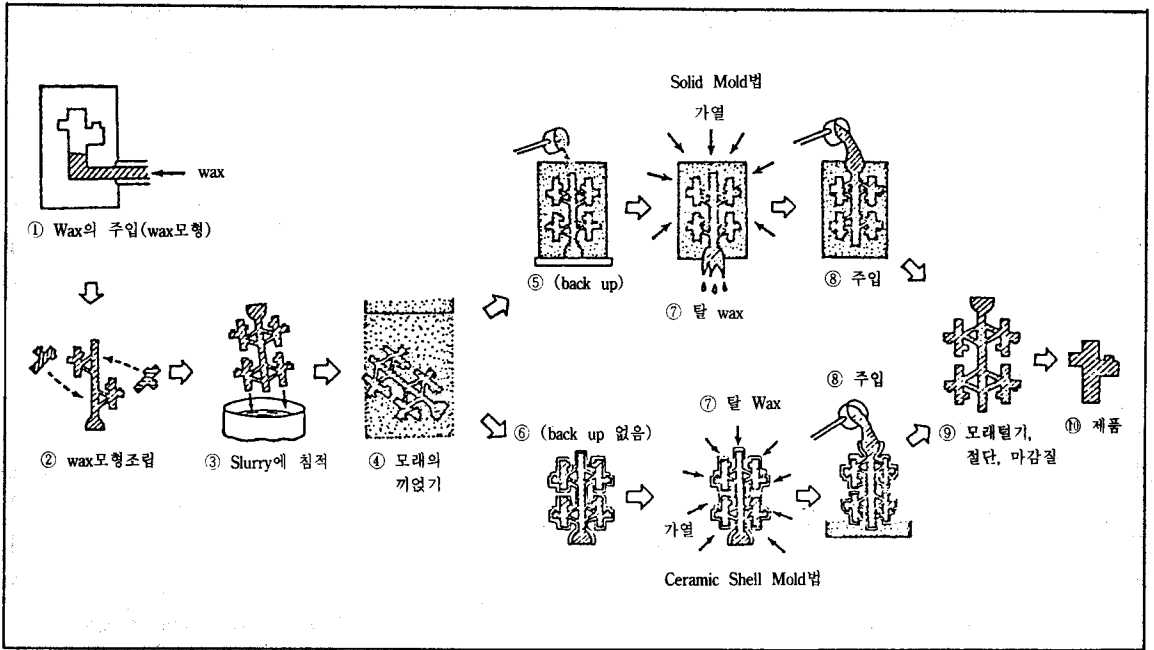


그림 6. Investment 주조법의 기본과정

2.2.2 HIP(Hot Isostatic Press) 처리

티타늄 주조품에서는 내부의 주조결함을 줄이기 위하여 원심 가압주조 등과 같은 방법이 이용되고 있지만 shrinkage와 같은 결함을 방지하는 것은 쉽지 않다. 따라서 결함이 거의 없는 고품질이 요구되는 부품에서는 HIP처리를 할 필요가 있다. HIP처리는 아르곤 가스가 채워진 가열압력용기 내에서 행하여 지는데, 이에 의해 주조품 내부의 결함을 제거할 수 있다. 주조품의 HIP 처리는 몰드없이 행해지므로 분말의 HIP성형 처리보다 경제적이다. HIP처리는 주조품의 재질, 형상에 따라 변형저항이 다르고, 또 기계적 특성의 영향을 고려하여 온도, 압력, 시간 등의 조건을 설정해야 한다. 일본의 진공야금(주)의 HIP 처리 결과에 의하면 주조품 내부의 결함을 거의 완전하게 제거할 수 있었으며, 또 기계적 특성에 있어서도 HIP 처리를 하지않은 부품에 비하여 인장성질은 약간 떨어지지만 피로강도는 크게 향상된 것으로 보고하고 있다.²⁷⁾ 따라서 항공기 부품과 같이 피로성질이 중요한 곳에서는 반드시 HIP 처리를 실시해야 한다.

2.2.3 용접보수

HIP 처리에 의해 내부결합이 감소하면서 주형 표면이 움푹 패인다든지 또는 표면에 다른 결함이 있는 경우는 육성 용접으로 보수한다. 티타늄의 용접은 일반적으로 TIG용접을 실시하는데, 티타늄은 활성이 있기 때문에 용접도 불활성 분위기에서 실시하여야 한다. 이와같이 보수 용접을 한 주물은 열처리에 의해 응력을 제거해야 한다.

3. 티타늄 정밀주조품의 품질 및 용도

지금까지의 티타늄 정밀주조품은 주로 항공기 분야에 국한되어 왔다. 일반적으로 주조상태의 제품은 기공과 같은 결함들을 갖고 있기 때문에 낮은 피로강도를 갖게 되며, 그 변동폭도 넓게 나타난다. 따라서 항공기 부품과 같은 고도의 품질이 요구되는 부품은 단조재 정도의 기계적성질을 얻기 위하여 HIP 공정과 적절한 열처리 공정을 거쳐야 한다.^{30,31,32)} 그림 7에 주조재 및 단조재의 피로성질을 나타내었는데, 여기에서도 알 수 있는 바와 같이 주조 후 적절한 후처리

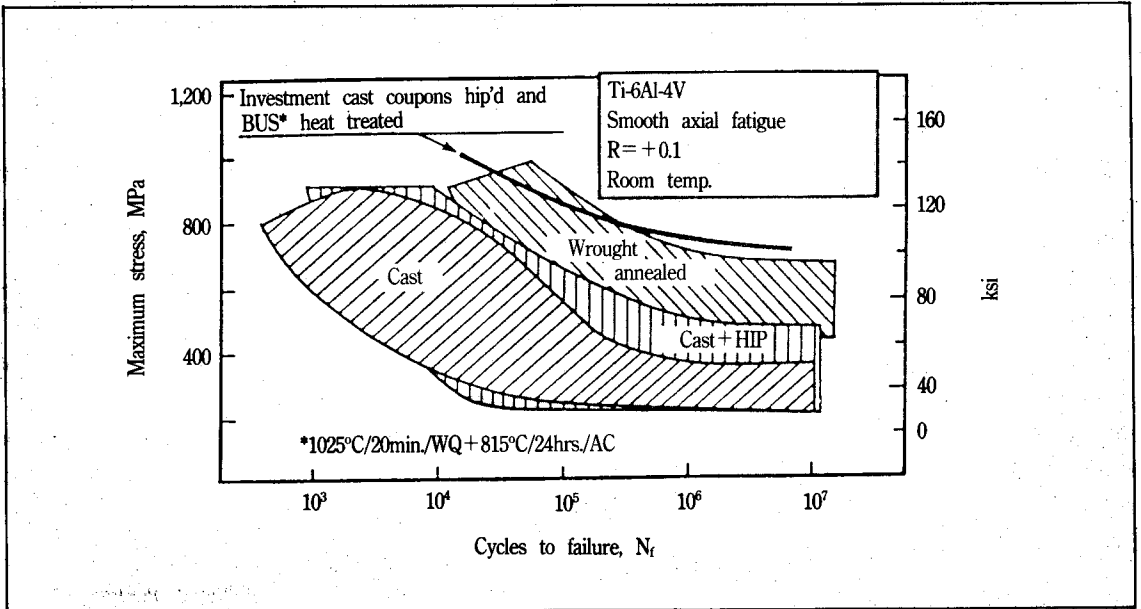


그림 7. 주조재 및 단조재의 피로성질 비교³²⁾

공정을 거치면 단조재와 비슷한 피로성질을 갖게 할 수 있다. 이와같은 피로성질 외에도 티타늄 주물의 인장성질은 같은 재질의 단조재에 비하여 신율은 떨어지지만 다른 특성에 있어서는 거의 동등하다.²⁸⁾ 항공기 부품에서는 대형이면서 복잡한 형상의 주조품이 많아 대형 정밀주조품의 주형 조형기술, 보다 복잡한 형상을 가능하게 하는 세라믹 core기술 및 표면오염층을 균일하게 제거하는 chemical milling 기술이 무엇보다도 중요한 과제로 보다 많은 연구 개발이 진행되어야 한다. 해양 구조물이나 화학공업과 같은 주로 내부식성이 요구되는 곳에서는 항공기 부품과 같이 엄격한 품질이 요구되지 않으므로 종종 특수한 공정을 거치지 않은 일반 주조상태로 이용되기도 한다.

티타늄 정밀주조품은 앞에서 열거한 항공기 부품이외에도 스포츠용품 및 장식품 등의 일반 소비재로서의 용도도 기대가 되는데, 한 예로 골프 클럽의 metal wood 용으로 티타늄 정밀주조품을 사용할 경우 티타늄은 경량(스텐레스의 약 60%) 이면서 비강도(스텐레스의 약 1.6배)가 높기 때문에 기존의 클럽에서 얻을 수 없었던 비행거리의 증가와 안정성을 겸비한 metal wood의 설계가 가능하다. 이와같은 일반 소비재로서의 사용이

기대되는 주조품의 시장 확대를 위해서는 저가 고품의 안정적 공급이 무엇보다도 중요하다. 이와같은 일반 소비재로서의 용도 외에도 화학공업, 해양, 의료분야에서도 티타늄 정밀주조품의 이용이 기대되는데, 특히 티타늄은 생체용 재료로서 기존의 스텐레스나 Co-Cr합금에 비하여 우수한 생체 적합성을 나타내기 때문에 생체 implant재로서 뿐만이 아니라 인공뼈, 인공관절, 치과용 및 척추 고정구 등 의료분야에 있어서 그 응용 범위가 점차 확대되고 있다. 티타늄 정밀 주조품의 한 예를 그림 8에 나타내었다.



그림 8. 티타늄 정밀주조품의 예

4. 국내 현황

항공기 부품용 초내열합금 정밀주조에 관한 연구는 그 동안 한국기계연구원과 국내의 몇몇 정밀주조업체와 공동으로 연구를 수행하여 많은 연구결과와 기술 축적이 있어왔다. 그러나 티타늄 용해 및 주조에 관한 연구는 일부 연구소 및 대학에서 수행한 기초적인 연구에 불과하며, 이 분야에 경험이 있는 업체는 거의 전무한 실정이다. 다행히 1992년 부터 시작된 선도기술개발사업(G7 Project)의 “티타늄합금 부품 개발”연구를 통하여 한국기계연구원과 주조업체가 공동으로 정밀주조 방법을 이용하여 자동차용 엔진 부품 생산을 위한 티타늄 용해, 주형재료 선정 및 주형설계를 통한 시제품 생산까지를 계획하고 있다.

5. 맺음말

본 글에서는 티타늄합금의 용해 및 정밀주조법에 대하여 간단히 살펴보았다. 산업의 발달과 더불어 산업기기의 정밀화, 경량, 고강도화 등을 통한 고성능의 부품을 위하여 정밀도가 높은 복잡한 형상의 부품이 요구되면서 정밀주조법에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중에서 티타늄합금은 비강도가 높고 내부식성이 우수하기 때문에 항공기 부품을 비롯한 산업용 가스터빈, 각종 블레이드, 해양구조물, 의료용 기구 및 스포츠용품에 이르기 까지 그 응용 분야가 확대되고 있다. 현재까지는 티타늄 주물의 가격이 고가이고 기술적인 어려움으로 인하여 한정적인 부품에만 적용되어 왔으나 향후 기술개발과 함께 새로운 용도의 제품을 개발한다면 티타늄 주조품은 그 사용량이 더욱 확대될 것이다.

참 고 문 헌

[1] “Titanium, A Technical Guide”, ed. M.J. Donachie, ASM International, p.108, 1988.

[2] D. Eylon : Proc. 2nd Japan Intern. SAMPE Symp. & Exhibition, ed. I. Kimpara, K. Kageyama & Y. Kagawa, Chiba Japan, Dec. '91

[3] H. Stephan, W. Dietrich and H. Aichert : Proc. 4th Intern. Conf. Vac. Met., ISS-AIME, 801, '74.

[4] 賀集誠一朗 : “Titanium & Zirconium”, Vol. 23, No.1, p.23~29, 1975.

[5] C. H. Entekin and H. R. Harker : Proc. 1984 Vac. Metall. Conf. Spec. Metals, Melting Process, p.45, 1985.

[6] C. H. Entekin and D.S. Clarkson : Metal Progress, 7, p.35, 1986.

[7] V. K. Forsberg : Proc. 1984 Vac. Metall. Conf. Spec. Metals, Melting Process, p.39, 1985.

[8] Y. Kotani, K. Murase, F. Shimizu, T. Suzuki and T. Yamamoto : Titanium '80, Sci. Technol., 3, p. 2147, 1980.

[9] T. Fujiwara, K. Kato, K. Ono and H. Yamada : Titanium '80, Sci.Technol., 3, p.2135, 1980.

[10] B.E. Paton and V. I. Lakomsky : Titanium Sci. Technol., 1, p.505, 1973.

[11] E. I. Morozov, M.I. Musatov, A. D. Chuchuryukin and A. S. Fridman : Titanium '80, Sci. Technol., 3, p.2157, 1980.

[12] K. Murase, T. Suzuki and T. Yamamoto : Titanium Sci. Technol., 1, p.233, 1984.

[13] 山田博之, 清水孝純 : 電氣製鋼, 54, p.53, 1983.

[14] R. C. Eschenbach and G. Herman : Proc. 1984 Vac. Metall. Conf. Spec. Metals, Melting Process, p.17, 1985.

[15] E. I. Morozov, A. S. Ronzhin, I. A. Prostov, V. S. Matvear : Titanv Promyshlennosti, p.314, 1961.

[16] E. I. Morozov, A. D. Chuchuryukin : Titanium and Titanium Alloys, 1, p.161, 1982.

[17] R. H. Natziger and others : The Electroslag Melting Process, p.219, 1976.

[18] H. B. Bomberger and F. H. Froes : J. Met. 12, p.39, 1984.

[19] P. G. Clites and R. A. Beall : Proc. 5th Intern. Conf. on Electroslag and Special Melting Technology, p.477, 1975.

[20] P. G. Clites : The Inducto Slag Melting Process, p.32, 1982

[21] 伊藤喜昌 : 金屬, 2, p.23, 1988.

- [22] 賀集誠一朗 : "Titanium & Zirconium", Vol. 19, No.10, p. 256~259, 1971.
- [23] 山川通 他 : 日本金屬學會概要, 4, p. 211, 1987.
- [24] Bureau of Mines Report of Investigations, RI8541.
- [25] R. C. Feagin Sixth World Conference on Investment Casting, p. 4, 1984.
- [26] 宮本 進 : 金屬, Vol. 46, No. 7, p. 93, 1976.
- [27] 鹿田幸生, 稻田實 : 鑄物, Vol. 61, No. 7, p. 449, 1989.
- [28] ASTM 규격, B-348, 1987.
- [29] S. Wakita : Titanium & Zirconium, Vol. 38, No. 2, p. 107, 1990.
- [30] J. Kopchik et al. : Proceedings Annual Forum of the American Helicopter Society Vol.41, 1985
- [31] D. Eylon et al. : SAMPE Journal, Vol.22, 1986
- [32] D. Eylon et al. : The 5th International Conference on Titanium, 1984