

타이타늄 구조 기술

[요약문]

타이타늄은 경량성, 고강도성, 내화학성, 인체친화성, 내환경성 등의 물성을 이용하여 다양한 산업분야에 활용되고 있다. 다양한 산업분야에 정형부품으로 타이타늄을 가공하는 기술 중에서 가장 경제성이 높은 분야로 주조공정을 들 수 있다. 주조공정으로 부품을 제조하면 복잡한 형상을 기계가공하지 않고 거의 정형으로 제조할 수 있으며, 기계적 물성 또한 단조품에 버금가는 제품을 생산할 수 있다. 또한 다량의 제품을 생산할 수 있기 때문에 경제성에서도 유리하다. 이와 같은 주조품을 제조하는 데는 진공에서 불순물의 유입을 최소화 할 수 있는 특수 용해공정과 주형과의 반응을 최소화 할 수 있는 주형재료와 주조방안이 필수적이다. 본 고에서는 반응성이 높은 타이타늄을 용해하는 기술과 주형과의 반응이 최소화 될 수 있는 주형재료의 선정, 그리고 실 제품에 활용하기 위한 다양한 후처리 기술에 대하여 요약하였다.

1. 머릿말

타이타늄은 항공우주분야에서부터 자동차, 에너지, 화학, 해양, 발전, 스포츠 및 의공학 분야에 이르기까지 타이타늄과 그 합금(이후로 타이타늄)으로 만들어진 부품이 다양하게 이용됨에 따라 이제는 그 중요성을 다시 강조하지 않아도 될 정도로 우리의 일상생활에 깊이 관여하고 있다. 타이타늄은 상온에서 비강도가 높고 내식성이 탁월한 반면에, 용융 상태에서 반응성이 심하고 상온에서 가공이 어렵기 때문에 다양한 산업에 소요되는 최종 제품의 형상을 가지는 타이타늄 정형 부품을 생산하기가 쉽지 않다.

타이타늄 부품을 정형으로 가공하는 방법으로는 크게 항온단조, 분말야금, 그리고 정밀주조 등이 있다. 이들 공정 방법은 최종형상을 가지는 제품을 기계가공하지 않고 정밀하게 생산해 낼 수 있는 전형적인 정형 공정기술이지만, 이들 제조기술 간에는 어느 공정이 특별히 경제적으로 우월하다고 말할 수 없을 정도로 상호간에 장점을 가지고 있다.

먼저 항온단조 공정은 항공기에 사용되는 타이타늄 부품을 정형으로 가공하기 위해 가장 널리 이용되고 있는 생산기술이다. 그러나 한 예로, F-22 전투기에 사용되는 center bulkhead 부품을 항온단조 공법으로 제조하는 경우에는 최종 제품의 무게가 약 150kg 정도 밖에 되지 않는 Ti-6Al-4V 부품을 제조하기 위하여 먼저 VAR 용해 방법으로 3,000kg 이상의 잉크트를 용해 주조하여 다단계의 단조공정을 통하여야만 최종 제품을 만들 수 있을 정도로 재료의 회수율이 낮다. 또한 항공기 부품과 같이 형상이 복잡하면서 중공 및 박육을 가지는 제품을 생산하는 데는 생산 설비의 고가로 인하여 그리고 다단계의 단조공정과 여러 조의 금형을 사용하여야 하기 때문에 단조 또는 항온단조와 같은 공정으로는 경제성 있는 제품을 생산하기가 어렵다.^[1]

분말을 이용한 정형가공법(분말야금)은 복잡한 형상의 제품을 생산할 수 있지만, 원료로 사용되는 고순도의 타이타늄 분재와 타이타늄 분말을 제조하기가 어렵고, 크기 분포가 고른 분말을 대량으로 또한 경제적으로 생산하기가 어렵다. 또한 분말야금으로 제조된 부품은 최종 제품의 밀도가 완전하지 못하여 결함을 제거하기 위하여 소결 후 정



수압(HIP, hot isostatic pressing) 처리가 반드시 필요하다. 또한 대형의 부품을 분말야금 공정으로 생산하기에는 경제적으로나 생산성 면에서 약점을 가지고 있다.^[2]

반면에 용해 및 주조에 의한 타이타늄 부품을 제조하는 데는 또 다른 어려움이 있다. 타이타늄은 액체 상태에서 산소 등의 가스 상과 반응이 커서 반드시 진공에서 조업이 수행되어야 한다. 또한 용탕과 접촉하는 도가니와도 반응하여 용탕을 오염시킬 수 있기 때문에 수냉 동 도가니나 Skull Melting과 같은 특별한 용해공정이 필요하다. 이에 더하여 고온의 용융 상태에서는 주조 과정 중에 주형재와도 반응이 일어나기 때문에 주조품의 오염을 배제하기 위해서도 용탕의 온도를 용점 이상으로 크게 충분히 높일 수가 없어서 유동도(fluidity)가 낮아져서 완전한 주조품의 형상을 제조하는데 어려움이 있다. 아울러 주조 결함을 제거하기 위해서는 정수압(HIP) 처리와 같은 후처리가 필요하다. 정밀주조에 의한 제품을 생산하는 경우에는 일회용으로 사용되는 주형재료가 고가임에도 불구하고, 용탕과 주형간의 계면반응 생성물인 α -case로 인하여 기계적 물성의 저하를 방지하기 위한 화학제거(Chemical Milling) 처리와 같은 후가공을 해야 하기 때문에 가공에 따른 치수정밀도 저하와 환경오염 문제가 있다.^[3] 또한 금형을 이용하는 경우에는 반복적으로 1700°C 이상의 용탕 열 충격을 견디는 경제적인 금형소재를 선정하는데 어려움이 있다.^[4]

타이타늄의 주조도 다른 금속재료의 성형에서와 마찬가지로 주로 복잡한 형상의 제품을 경제적으로 제조하는 중요한 공정 기술의 하나이다. 이에 더하여 타이타늄은 실용 금속 중에서 유일하게 주조재가 단조재에 필적하는 기계적 물성을 가질 수 있는 금속소재이다.^[5] 타이타늄의 주조는 사형주조와 로스트왁스를 이용하는 정밀주조로 구분된다. 사형주조는 주로 석유화학용 및 공업용 벨브나 펌프 등과 같은 부품을 제조하는데 이용되고, 정밀주조는 오래 전부터 항공우주용 부품을 제조하는데 사용되어져 왔다. 정밀주조법은 대표적인 정형가공법(NS, net shape) 중에 하나이지만, 현재 타이타늄의 주조는 정형가공법이 아니라 근정형가공법(NNS, near-net shape) 밖에 될 수 없다. 이는 타이타늄 주조품이 HIP 처리, 케미칼 밀링 및 기계적 가공 등의 후처리가 반드시 필요한 문제점을 가지고 있기 때문이다.

본 고에서는 현재까지 개발된 타이타늄 주조법들의 특징과 문제점에 대하여 알아보고, 주조 방법으로 제조하는 부품을 단조재에 필적하는 물성을 가지면서도 경제성이 우수한 제품을 생산할 수 있는 정밀주조기술의 현황과 응용 전망에 대하여 알아보려고 한다.

2. 기술의 분류 및 특징

타이타늄의 주조는 주형의 제조 방법에 따라 사형주조와 금형주조, 그리고 로스트왁스를 사용하는 정밀주조로 구분될 수 있다. 또한 제조 기술의 관점에서는 용해 및 주조 기술, 주형재질 기술, 후처리 공정 기술 등으로 나눌 수 있다. 본 고에서는 주조 공정의 순서에 따라 용융 기술, 용탕주입 기술, 주형재료 기술, 후처리 기술 등에 대하여 순차적으로 살펴보고자 한다.

2.1 용융 기술

주조는 변형 저항이 낮은 액체 상태에서 주형에 부어서 최종 제품의 형상을 가지는 고체 상태로 변화시키는 성형 기술로 금속 소재의 용융은 모든 주조공정의 출발점이 된다. 타이타늄의 용융 기술은 녹은 금속을 담은 도가니의 형태에 따라서 수냉동 도가니와 내화물 도가니 용융법으로 나눌 수 있다. 타이타늄의 용융공정 선택은 절대적으로 어떤 공정이 우수한 것이 아니라 합금의 종류, 형태, 크기, 용도, 경제성 및 작동인자 등에 따라서 적절히 선택되어지며, 이러한 공정들의 특징을 표 1에 정리하였다. 아울러 각각의 용해방법에 따른 주조공정의 장단점에 대하여 표 2에 정리하였다.

표 1. 타이타늄의 용융방법에 따른 비교

Melting Method		Pressure (Pa)	Power Effectivity	Magnetic Effect	Composition Change	
Cold Crucible Melting	V A R	Consumable Electrode	0.1~10 ⁵	Low (DC) High Current, Low Voltage	Middle	Low
		Non-Consumable Electrode				
	Electron Beam Melting		10 ⁻⁴ ~10	Low (DC) LC, HV	Low	High (Al, Sn, Cr)
	Plasma Arc Melting		0.1~10 ³	Low (DC) LC, LV	Middle	Low
Induction Melting	Skull		< 10 ⁵	Low (AC)	High	Low
	Magnetic Suspension			Middle (AC)	High	
Refractory Crucible Melting	Graphite Induction Melting		< 10 ⁵	Middle (AC)	Low	Low
	Lime Induction Melting		~	High (AC)	High	

표 2. 각종 용해방식에 따른 주조공정의 장단점 비교

용해방식	장점	단점	비고
소모 전극식 아크 용해	- 대형 주물 제조가 가능하다 - 유지비용이 저렴하다 - 용해 조업시간이 짧다	- 장입원료의 형상이 제한적이다 - 원료의 리사이클링이 어렵다 - 용탕의 온도제어가 불가하다	- 세계적으로 가장 많이 사용되는 용해방법
부유 용해	- 주물 제조시간이 짧다 - 원료의 리사이클링이 가능하다 - 도가니 오염이 적다.	- 설비비가 비싸다 - 용해 용량이 제한적이다	- 소형 정밀 주조품의 생산에 적합
고주파 유도용해 (CaO도가니)	- 원료의 리사이클링이 가능하다 - 범용 용해로도 사용 가능하다 - 합금의 균질화가 가능하다	- 도가니와의 반응으로 오염 가능성이 있다 - 용해시간이 길다 - 도가니가 비싸다	- 국내에서 가장 많이 사용되는 용해방법
전자빔 용해	- 원료의 리사이클링이 가능하다 - 도가니와 반응하지 않아 오염문제가 없다 - 용해 분위기가 양호하다	- 설비비가 비싸다 - 보수유지가 어렵다 - 합금성분의 조절이 어렵다	- 조업 비용이 고가

2.1.1 진공 아크 재용해(VAR, vacuum arc remelting)

진공 아크 재용해법, 즉 VAR은 소량에서부터 10톤이 넘는 대형의 잉곳 제조까지도 가능한 용융방법이다. 전극의 형태에 따라서 소모식 전극과 비소모식 전극 VAR로 나누어지며, 소모식 전극의 경우에는 전극 자체가 용융 시키고자 하는 타이타늄이며, 비소모식 전극으로는 초기의 텅스텐과 흑연에서 현재는 수냉동 전극이 사용되어지고 있다.⁶⁾ 소모식 전극 VAR은 대 전류 영역에서 아크가 일정한 전압 하에서 아크 길이의 변화에 따라 전류가 변하면서 아크의 길이를 일정하게 유지하려는 정전압특성에 의해 전극인 타이타늄이 용융되는 원리를 이용한 것이다. 반면에 비소모식 전극 VAR은 중 전류 영역에서, 아크가 일정한 전류를 유지하며 안정화되기 위해서 스스로 전압이 바뀌는



정전류 특성(수하특성)에 의한 아크의 자기 제어성을 이용하는 것으로 전극 자체가 소모되지 않고, 전극과 도전체 사이에서 발생하는 아크의 열에 의하여 용해하고자 하는 소재를 용융시키는 방법이다.

소모식 전극 VAR의 경우에는 원소재를 프레스 성형하여 브리켓(briquette)을 만들고 이를 용접하여 봉상의 소모 전극으로 만들어야 하며, 건전한 타이타늄을 얻기 위하여 2회 이상의 재용융이 필요하다. 비소모식 전극 VAR은 원 소재 성형이 불필요하여 스크랩을 직접 재활용할 수 있지만, 일정한 크기로 아크를 조정하는데 어려움이 따른다. 소모식 및 비소모식 전극 VAR은 모두 수냉동 도가니를 사용하기 때문에 용탕에 충분한 과열을 줄 수 없는 관계로 대형 밸브 등의 큰 주조품을 제조하는데만 적용이 가능하다. 그러나 주조품은 결함을 완전히 제거하기 위하여 HIP 처리가 필요하다는 문제점이 있다.

2.1.2 전자빔 용융(EB, electron beam melting)

EB 용해장치는 초기에는 Nb, Ta, Mo 등의 고용점 금속의 용융을 목적으로 개발되었으나, 현재는 고품질의 초내열합금 및 타이타늄 용융법으로 많이 사용되고 있다.^[7] EB 용융법으로는 저급의 타이타늄 스크랩을 이용하여 정련된 건전한 잉곳을 제조할 수 있다. 또한 열원인 전자빔의 조사 위치를 전자기력에 의해 정확히 제어할 수 있으며, 수냉 주형 부근의 용탕에 충분한 과열을 줄 수 있는 장점이 있다. 그러나 타이타늄 용융 Al, Sn 및 Cr 등과 같은 증발하기 쉬운 합금성분의 조절이 어려워서, EB 용융법은 타이타늄 주조 보다는 정련 및 간단한 형상의 잉곳 제조에 적합한 용융법이다.

2.1.3 플라즈마 아크 용융법(PAM, plasma arc melting)

PAM은 비소모식 전극의 플라즈마 아크를 사용하는 용융법으로 저진공($10^{-3} \sim 10^{-1}$ torr) 영역에서 대기압 이상까지 넓은 범위 영역에서 용해가 가능하다. 도가니는 수냉동을 사용한다.^[8] PAM은 EB와 동일하게 각형과 환형 등 여러 형상의 주괴형상을 제조할 수 있으며, 작업분위기를 대기압 이상으로 할 경우에는 합금원소의 증발 손실을 최소화할 수 있다. 또한 스폰지 타이타늄을 직접 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 PAM도 수냉동 도가니를 사용하므로 잉곳이나 분말을 제조하기 위하여 용해하는 데는 적합하지만 타이타늄을 용해하여 건전한 주조품을 제조하는 용해공정으로는 부적합하다.

2.1.4 유도 스킨 용융법(ISM, induction skull melting)

ISM은 기존의 유도 용융에서 도가니를 수냉동으로 바꿔 타이타늄 용탕의 도가니 오염을 배제할 수 있도록 작업하는 것이 큰 특징이다.^[9] 따라서 최근에는 ISM을 cold crucible 용융법으로 분류하기도 한다. ISM은 같은 양의 타이타늄을 용융하는데 일반적인 내화물 도가니를 사용하는 유도 용융보다 더 많은 전력을 필요로 하지만 강한 교반효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 용융상태에서 용탕의 과열을 충분히 확보하기 위하여 용탕을 빠른 속도로 주입해야 함은 물론, 압탕과 탕구계를 크게 해야 한다는 어려움이 있다. 이에 따라 주조결함이 발생할 가능성이 높고, 이들 결함을 제거하기 위해서는 추가적인 HIP 처리가 필요하다. 용해하기 위한 타이타늄의 조성에 따라서는 skull을 교환해야 하는 문제점도 따른다. 대표적인 타이타늄 스킨용해장비의 모식도를 그림 1에 나타내었다.

2.1.5 흑연 도가니 유도용융(graphite crucible induction melting)

코일형상의 도체 중심에 영구자석을 이동시키면 자체가 변화하고 도체에 전류가 흐르는데, 이를 전자유도작용이라 한다. 고주파 유도가열은 전자유도작용을 이용하여 영구자석 대신 코일에 교류전류를 흘려 교반자속이 발생하게 됨으로 피가열물에 유도전류가 흐르도록 한다. 유도전류에 의한 와전류로 Joule 열을 발생시키며, 이렇게 발생된 열로서 가열하는 것을 유도가열이라 한다. 다른 용융법에 비해 유도용융은 에너지 효율이 높아서 용탕에 충분한 과열 부여와 전자기 교반효과로 용탕의 온도와 성분을 균일하게 조정하는 것이 가능하며, 진공에서부터 가압까지 분위기 조절이 용이하다는 장점이 있다. 흑연 도가니 유도용융은 타이타늄을 직접 유도가열 시키는 것이 아니라, 흑연을 유

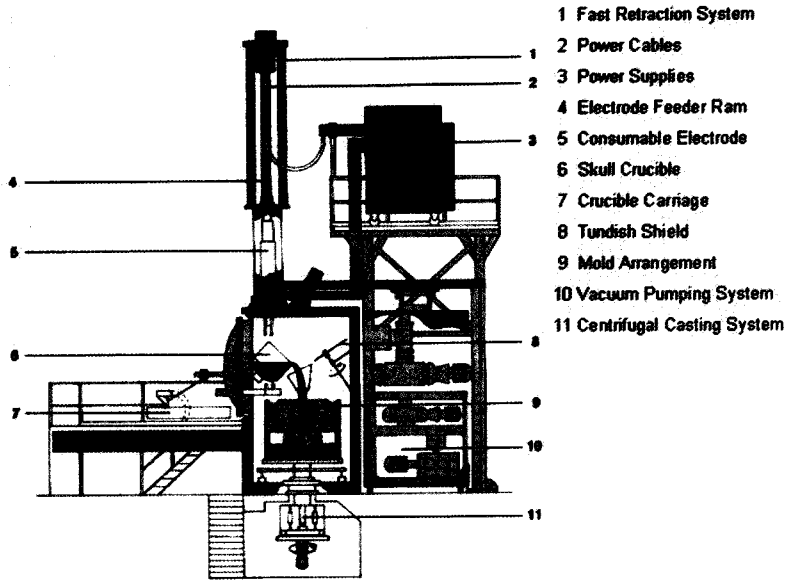


그림 1. 대표적인 유도스킬용해 모식도(출처 : Leybold-Heraeus L300SM)

도가열 시켜서 타이타늄을 간접적으로 용융시키는 방법이다. 이 흑연 도가니 유도용융은 직접 유도방식에 비해 열효율이 낮으며, 타이타늄 용탕과 반응을 최소한으로 억제하기 위하여 고순도 흑연 도가니의 사용과 전처리 과정이 필요하다. 흑연 도가니와 용탕 간의 직접적인 접촉은 초기 원료 내에 존재하는 탄소의 농도보다 수배 이상 증가할 수 있기 때문에 충분히 유의해야 한다.

2.1.6 석회 도가니 유도용융(lime crucible induction melting)

Al_2O_3 와 MgO , ZrO_2 등의 내화물 도가니는 일반적인 Fe계 합금의 유도용융 공정에서는 안정적으로 사용할 수 있지만, 타이타늄의 경우에는 용탕과의 반응뿐만이 아니라 격렬한 침식현상으로 도가니의 사용이 불가능한 것으로 알려져 있다.^[10] 그러나 석회 도가니 유도용융은 용융 타이타늄과 도가니와의 반응으로 용탕 내의 산소 농도가 초기에 투입된 원료보다 2배 이상 상승하게 된다. 이는 타이타늄의 물성을 크게 저해할 정도의 수준은 아니나 충분히 유의해야 한다. 이 도가니를 반복적으로 사용하더라도 침식되지 않고 내용성이 우수한 용융법이다.^[11] 다만, 석회 도가니는 흡습성이 상당히 심하여 사용 전에 반드시 수분을 제거하는 전처리가 필요하다. 대기 중에 장시간 노출하여 보관되면 도가니가 붕괴될 수도 있으며 적절한 작업강도를 확보하기 어려울 수도 있기 때문에 보관과 전처리 작업에 유의해야 한다.

2.2 용탕 주입 기술

지금까지는 도가니 및 열원의 종류에 따라서 타이타늄의 다양한 용융 방법을 살펴보았다. 주조 공정에서는 이렇게 용융된 타이타늄을 어떠한 방법으로 주형에 효과적으로 주입할 것인가가 중요한 요소가 된다. 용융 타이타늄과 공기와의 반응을 억제하고, 용탕의 주입시 주형과의 반응에 의해 생성되는 가스를 완전히 제거하기 위하여 용탕의 주입은 반드시 진공 중에서 수행하게 된다. 용탕을 유지하는 도가니와의 반응에 의한 불순물의 유입을 억제하기 위해서는 용탕과 도가니와의 직접적인 접촉을 피해야 한다. 타이타늄 용탕의 주입방법은 크게, 정적주조, 원심주조, 진공다이캐스팅 및 반중력주조법으로 나눌 수 있다.



2.2.1 정적 주조

정적 주조는 용융된 타이타늄을 별도의 추가 장비 없이 주조할 수 있는 가장 손쉬운 주조방법이다. 그러나 수냉동도가니를 사용하는 대부분의 타이타늄 용융법에서는 용탕에 충분한 과열을 부여하기 힘들고, 용탕 주입속도 제어 또한 어렵다. 즉, 타이타늄의 용탕 유동성 확보에 어려움이 따른다. 이를 극복하기 위하여, 흑연 및 석회도가니 유도 용융법을 이용하여 용탕의 온도를 상승시키거나, 주형의 예열 온도를 상승시켜 주조하기도 한다. 반응성이 큰 타이타늄을 주조하는 경우에는 내화물 주형과의 반응에 의해 α -case가 형성되는 문제가 있으며, 금형 주조를 수행하는 경우에는 열충격에 의한 열간 균열 및 주형과 타이타늄 간의 슬더링 문제가 생기기도 한다. 따라서 일반적인 정적 주조 방법으로 타이타늄을 주조하는 경우에는 탕구계의 치수를 크게 하고 압탕을 설치하는 것이 필요하다. 그러나 충분한 압탕을 설치하더라도 건전한 지향성 응고가 어렵게 되어 주조품에 결함이 발생할 수 있다. 현저한 결함이 아닌 주조품의 경우에는 육성 보수용접을 하거나 내부의 결함을 제거할 수 있는 HIP 처리를 함으로써 재생할 수 있다.

2.2.2 원심주조

용탕 상태에서 반응성이 심한 타이타늄을 주조하는 경우에는 용탕의 온도를 올리거나 주형을 예열하는 방법에 의해 유동성을 향상시키는 방법 보다는, 원심력에 의하여 용탕 유동성을 확보하는 것이 타이타늄의 특성 상보다 더 효과적이다. 타이타늄의 원심주조법은 크게 수직형과 수평형 원심주조로 나눌 수 있다. 그림 2에 나타난 수직형 원심주조가 가장 일반적인 방법으로 널리 사용되고 있다.

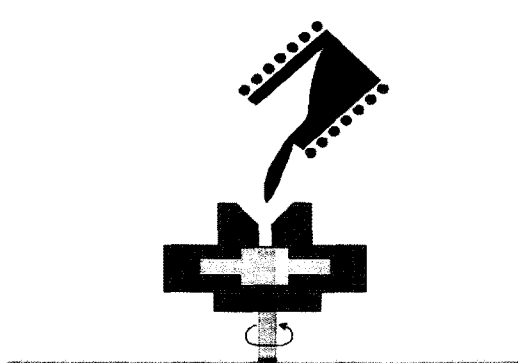


그림 2. 타이타늄 합금용 수직형 원심주조 장비 개략도

그러나 수직형 원심주조는 타이타늄 용탕의 입계 원심력의 확보를 위하여 주형 직경을 크게 하여야 하며 회전속도 또한 빨라져야 한다. 이로 인해서 30 G 이상의 원심력을 견디기 위한 주형이 필요하다. 이에 따라, 실질적인 생산 수율이 10% 이하로 떨어지고, 고속 원심회전으로 용탕 충전 시 난류에 의한 기포 혼입을 피할 수 없게 된다. 따라서 원심주조라는 특수 공정을 이용하면서도 주조품 내부의 건전성 확보를 위해 HIP 처리가 필요한 문제점이 있다. 반면에, 그림 3에 나타난 수평형 원심주조는 주형 내에서 원심력을 발생시키는 것이 아니라 용탕 자체에 원심력을 부여하는 방법으로 10 G 이하의 원심력과 최소한의 용탕 과열만으로도 HIP 처리 없이 박육 부품의 건전한 주조가 가능하다. 그러나, 수평형 원심주조는 안정한 용탕 흐름을 위하여 1회에 주조할 수 있는 타이타늄의 용융 양에 제한이 따르며, 정밀주조의 경우에는 주형을 고정하는 장치 상의 어려움이 따른다.

2.2.3 진공다이캐스팅

일반적인 타이타늄에 비해서 용점이 200°C 이상 낮은 TiAl 합금을 이용하여 자동차 배기 밸브를 진공다이캐스팅

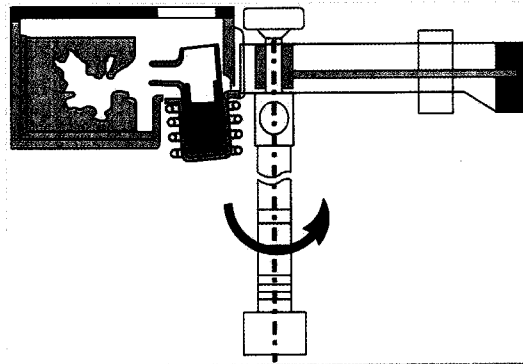


그림 3. 타이타늄 합금용 수평형 원심주조 장비 개략도

으로 제조하는 연구가 미국의 에디슨 재료기술센터(EMTEC, Edison materials technology center)와 자동차 회사들의 후원으로 진행되었다.^[12] 타이타늄의 진공 다이캐스팅법은 정밀주조에 비해서 고효율의 생산성을 나타낼 수 있지만, 다이캐스팅의 특성 상 난류에 의한 기포 혼입으로 HIP 처리가 필요하며, 지속적으로 작업 신뢰성을 확보할 수 있는 금형, 슬리브 및 플런저 재료 개발이 먼저 선행되어야 한다.

2.2.4 반중력주조(CLV, countergravity low-pressure vacuum melt process)

반중력주조 CLV는 1970년대 미국의 Hitchiner 사에서 철계 합금의 효율적인 정형가공법으로 개발되었다.^[13] 현재는 TiAl 합금 주조에도 사용되고 있으며, 일본의 Daido Steel에서는 용융방법을 ISM으로 바꾸고 LEVICAST라는 명칭으로 사용하고 있다.^[14] 그림 3에 나타낸 것과 같이 주조방안에 크게 영향을 받지 않고 안정한 층류로 주입됨으로써 주조품이 건전하여 HIP 처리한 제품에 필적하는 연신률을 나타내며, 생산수율이 85% 이상으로 높은 장점을 가지고 있다. 반면에 CLV 법은 용탕과 주형 사이에서 장시간 용탕에 접하고 있는 riser에서 용탕오염이 발생하고, 균열이 발생할 수 있는 문제점을 가지고 있다. 그림 4에 반중력 주조장비의 모식도를 나타내었다.

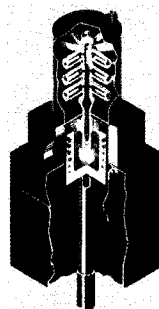


그림 4. 반중력 주조 장비, CLV 개략도(출처 : <http://www.hitchiner.com>)

2.3 주형재료 기술

타이타늄(용점 1,668℃)의 주조는 일반적으로 1,800℃ 이상에서 용해하여 주형 내에서 응고시키는데, 이 온도에서는 용융된 타이타늄이 대부분의 내화물과 반응하기 때문에 주물 표면에 0.1-0.5mm 정도의 산소나 질소가 많은 부화층(α -case)이 생성되게 된다. 표면 오염층의 발생은 타이타늄 주물의 표면층을 취화시키고, 기계가공성을 저하시키기 때문에 이러한 표면 반응을 최소화 할 수 있는 열역학적으로 안정한 주형재를 개발하는 것이 가장 중요하다.



타이타늄 합금 주조 기술 실용화의 최대 걸림돌은 바로 용융 타이타늄과 반응하지 않는 완벽한 주형재료가 현재까지도 개발되지 못하고 있기 때문이라고도 할 수 있다.

타이타늄의 주형은 일반적인 주형의 작업강도, 성형성, 통기도 및 붕괴성 이외에 용탕에 대한 열적 안정성이라는 항목을 만족하여야 한다. 현재까지 개발된 타이타늄의 주형은 크게 간단한 형상의 주조품을 위해서는 동(Cu), 고순도 흑연블럭, Ta 및 Nb 등의 영구주형을 사용하는데 반하여, 복잡한 형상의 주물을 제조하는 데는 흑연, ZrO₂ 및 Y₂O₃ 등의 산화물을 이용한 정밀주조 주형을 사용하고 있다. 현장에서는 사형주조를 위한 주형재료로는 흑연(C)과 마그네시아(MgO₂)가, 정밀주조용으로는 칼시아(CaO), 지르코니아(ZrO₂), 텅스텐(W) 등의 재료가 사용되고 있다. 열역학적 관점에서는 타이타늄의 용융온도에서 칼시아, 토리아, 지르코니아, 그라파이트 등이 비교적 안정하다고 할 수 있다.

주형은 점결제에 포함된 유기물을 완전히 제거하기 위하여 1,000°C 전후의 고온에서 소성하는 동시에 용탕을 주입하기 전에 공기 중에서, 보관 중에 흡입된 주형 내의 수분을 완전히 제거하기 위한 가열처리를 한 후에 사용하게 된다.

2.3.1 영구주형

봉형, 각형 및 배기밸브와 같이 비교적 간단한 형상에 대하여, Cu, 기계적으로 가공한 흑연블럭, H-13 공구강, Ta 및 Nb 등의 영구주형을 사용하여 타이타늄 주조품의 경제적인 대량생산에 적용하고자 하는 연구들이 진행되어 왔다. 그러나 수냉동과 고순도 흑연블럭의 경우에는 정밀한 주조품 보다는 잉고트 제조에 적합하다. 독일의 ALD 사에서는 Ta 및 Nb 금형을 이용하여 순타이타늄에 비해서 200°C 이상 용점이 낮은 TiAl 합금의 주조품을 제조하는 주형으로에 적용하고 있으나, 유동성 확보를 위해서 금형 예열 및 원심력 부여 등이 필요하며 금형의 열간균열, 열화 및 낮은 생산수율의 문제점을 보완해야 한다는 문제점을 가지고 있다.^[15] H-13 공구강으로 제조된 주형은 Ti-6Al-4V을 주조하는 경우 심지어 1회 주조 시에도 주형과 용탕간의 슬더링 현상 및 용탕오염을 피할 수 없다고 알려져 있다.^[16] 따라서 영구금형을 이용한 경제적인 타이타늄의 대량생산에 위해서는 금형열화, 열간균열 및 슬더링 문제를 해결할 수 있는 금형에 대한 연구가 선행되어야 한다.

2.3.2 Rammed 흑연 주형

타이타늄의 주형으로 가장 오래된 역사와 활용도를 가진 주형은 흑연 분말을 피치, 전분, 물 등과 혼합한 후에 일 반적인 사형과 동일한 방법으로 주형을 제작하는 rammed 흑연 주형이다. 그러나 원재료인 고순도 흑연은 에너지 다소비재이며, 주형을 고온의 환원성 분위기에서만 소성시켜야 하며, 흑연의 높은 열전도도로 압탕 효과가 적으며, 흑연에 의한 α -case 형성을 피할 수 없다는 문제점이 있다.^[17]

2.3.3 산화물 주형

α -case는 타이타늄 제품의 표면에 알파 상을 안정화 침입형 원소인 산소, 질소 및 탄소 등과의 반응에 의해 취약한 산화물을 형성시켜서, 표면에서 쉽게 균열을 만들고 전파 시키는 반응 층을 말한다. 이러한 α -case는 주조 공정에서 뿐만 아니라 열처리 공정에서도 발생할 수 있는 반응 층이다. 그러나 주조 공정에서는 반응성이 큰 타이타늄 용탕과 세라믹 주형재료와 고온에서 화학적 반응에 의하여 타이타늄에 33at%까지 고용이 가능한 산소의 확산에 의해 형성되는 TiO₂ 반응층이 주된 α -case 생성 원인으로 알려져 있다. 따라서 주형에서 분해된 산소에 의한 α -case 생성을 최소화하기 위하여, 표준상태에서 타이타늄의 산화물 표준생성자유에너지(ΔG_0)보다 낮은 ΔG_0 를 가지는 ZrO₂, ZrSiO₄, CaO, LaOF, MgO 및 Y₂O₃ 등의 산화물을 타이타늄 합금의 주형으로 적용해 왔다. 이 중에서 타이타늄의 주형으로 가장 경제적으로 사용할 수 있는 것은 CaO 이지만, CaO은 흡습성이 있는 관계로 일반적인 점결제를 사용할 수 없을 뿐만 아니라 주형에 작업강도 부여를 위한 back-up 재료를 사용할 수 없는 관계로 주형재료로 사용이 제한되어져 왔다. α -case 형성 기구를 감한한 안정한 산화물로 주형을 사용하는 경우에는 케미칼 밀링과 같은 후공정을 사용하여 제거해야 할 정도로 두꺼운 α -case-case가 형성된다. 그러나 Y₂O₃로 제조된 주형에서는 추가적인

방법으로 α -case를 제거해야 할 정도로 두껍게 형성되지는 않지만 재료자체가 고가이라는 것이 문제가 된다. 또한 Y_2O_3 전용 점결제를 사용하여야 함으로 주형의 작업강도가 부족하다는 문제점이 있다. 따라서 경제적으로 타이타늄 합금을 정밀주조하기 위해서는 열역학적 접근에도 불구하고 발생하는 α -case 문제를 해결하기 위한 추가적인 연구가 필요하다. 고온에서 반응성이 큰 타이타늄 용탕과 주형재 사이의 반응에 의해 형성되는 α -case 형성 기구에 관한 정확한 기구를 규명하고, 이를 바탕으로 경제적으로도 유용한 주형재료가 개발되어야 한다.

2.4 후처리 기술

타이타늄 주물에서는 용해방식, 주형재료 선정과 아울러 최종 주조품의 품질을 향상시키고 보증하기 위해서는 후처리 기술의 적용이 반드시 고려되어야 한다. 타이타늄 주물에서는 재료의 높은 활성에 의하여 표면결합과 내부결합과 같은 구조결합이 자주 발생한다. 이들 구조결합은 후처리 기술에 의해 보수되어야 완전한 주물품을 제조할 수 있다. 먼저 주형과 반응에 의한 표면결합은 표면정도와 조도를 떨어뜨리고 기계적 물성을 감소시키기 때문에 육성용접이나 보수용접 등의 방법으로 보완하게 된다.

표면의 결함을 보수하기 위한 육성용접은 일반 타이타늄 제품의 용접이나 동일한 TIG 방법으로 수행한다. 다만 용접 과정에서 표면의 산화를 방지하기 위하여 알콘이 충전된 불활성 가스 박스(glow box) 등과 같은 분위기에서 작업한 다음 표면을 갈아내어 표면정도를 맞추는 작업이 수행되어야 한다. 표면의 결함은 형광침투탐사와 같은 비파괴 방법을 동원하여 보수작업 전에 결함의 깊이를 예측하여 보수하여야 한다. 보수 후에는 산세 등을 통하여 표면을 세정하여야 한다.

타이타늄의 높은 활성으로 인하여 도가니 등과의 반응에 의하여 발생한 기체가 주물 내부에서 응고하게 되면 기포 등과 같은 내부결합이 발생하게 된다. 이러한 내부결합은 피로 등과 같은 동적 물성을 현저히 저하시키기 때문에 항공기 부품과 같은 주조품에서는 비파괴 검사를 통하여 반드시 검사되고, 또한 보수되어야 한다. 내부의 결함이 규정 이내로 작은 크기의 기포인 경우에는 HIP(Hot Isostatic Pressing) 처리로 보수가 가능하다. HIP 처리는 항공우주용 타이타늄 주물품을 제조하는데 사용되었으나, 최근에는 모든 타이타늄의 주조품에 적용하는 경향으로 변화되어 가고 있다. HIP 처리 비용도 장비의 대형화와 효율화에 따라 저렴해지고 있다.

순타이타늄 주조품의 HIP 처리 조건은 일반적으로 850°C에서 100MPa의 압력을 가하여 수행한다. 타이타늄 합금의 경우에는 고온에서의 강도 조건에 따라 이 보다 약간 높은 온도와 압력 조건에서 수행되기도 한다. HIP 처리 시 고온, 고압에서 주물품의 표면에 반응을 억제하기 위한 세정(탈지, 산세 등)과 고순도의 알콘 가스를 사용하여 작업을 수행하여야 한다. 또한 항공기 부품과 같은 주조품은 표면에 유리를 도포하여 HIP 작업을 수행함으로써 표면의 반응을 억제하고 전수압(Hydraulic Pressing)을 가할 수 있도록 작업하기도 한다.

HIP 처리를 수행하는 경우에는 주형 설계 시부터 압탕이나 탕구 등의 부착도 고려하여 제조하는 것이 재료의 수율을 증대시키는데 유리하다. 내부의 결함이 큰 경우에는 HIP 처리 후에 큰 수축이 일어나서 제품을 불용처리하게 되는 경우도 발생한다. 따라서 HIP 처리 전에 X-선 검사(Radiographic Inspection) 등으로 철저히 비파괴 검사를 수행하여 합격이 가능한 제품에 대해서만 후처리를 수행하는 것이 경제성 향상에 유리하다.

3. 국내 · 외 기술개발 현황

3.1 국외 현황

타이타늄의 주조 기술은 1950년대의 미국의 광산청에서 시작된 진공유도 용융법 이후에 지속적으로 개발되어 오고 있다. 특히 도가니의 오염을 최소한으로 줄일 수 있는 수냉동 도가니를 사용하는 VAR, PAM 및 ISM 등이 집중적으로 개발되어 오고 있다. 그러나 이러한 용융 및 주조법은 도가니와 용탕의 반응은 배제할 수 있지만, 수냉동을 사용하므로 건전한 주조에 필요한 용탕의 과열을 충분히 부여할 수 없다는 문제점이 있다. 따라서 후가공을 생략할 수



있는 정밀주조 공정임에도 불구하고, 미충전 및 기공의 결함을 제거하기 위하여, 반드시 HIP 처리 및 용접 보수의 공정이 필요하며, 제품의 형상과 크기 또한 단순한 대형부품만으로는 제약이 있어서, 정밀한 부품의 정형가공에는 사용할 수 없다는 문제점들이 보고되고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 주형의 예열과 원심력 부여 등의 방법들이 지속적으로 개발되고 있다.

현재까지 타이타늄의 주조 시 계면반응을 제어하기 위해 개발된 방법들로는 크게 흑연, CaO, LaOF, ZrO₂ 및 Y₂O₃를 사용하는 방법들이 있다. 흑연 주형의 경우, 환원성 분위기에서만 주형을 위한 소성을 해야 하고, 높은 열전도도로 인하여 특별한 주조 방안의 수립과 예열을 해야 하는 문제가 있으며, 주조품 표면에 탄소와의 반응층을 형성한다는 기술적인 문제점도 있다. CaO는 경제적이면서 타이타늄과 반응하지 않는 안정한 재료로 알려져 있으나, 주형의 작업 강도를 부여하는 back-up 과정 및 탈 왁스 공정에서 흡습성에 의한 주형의 변형으로 주형재료로 사용하기에 부적합하다. 한편, IIIa 및 IIIb 족인 플루오르화물 및 탄탄족을 첨가하여 heat-sink의 역할로 타이타늄 용탕과의 계면반응을 최소화 하고자 하는 연구가 진행되었으나, 크게 효과적이지는 못하였다.^[18] 현재는 독일과 미국에서는 독점적으로 ZrO₂와 CaO, 안정화 ZrO₂ 및 Y₂O₃를 바탕으로 주형재료를 시판하고 있으나, 고가이면서도 2~300 μ m 정도의 계면반응을 완전히 제거할 수 없다는 한계가 있다. 이에 기술선진국에서도 기존의 우주·항공 및 군수품을 위주로 한정되어 개발되어온 타이타늄을 다양한 신종 산업으로 확대 적용하기 위한 주형재료에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

3.2 국내 현황

주조기술은 크기와 형상에 구애 받지 않고 높은 치수정밀도와 신뢰성을 가진 경제적인 정형가공법 중에 하나로 철계와 비철계 합금에 널리 사용되고 있다. 국내에서의 타이타늄 주조 기술 연구는 재료연구소(KIMS)를 위시한 국책연구소 등에서 수행한 용융방법, 주입방법 및 주형재료에 관한 기초 연구가 어느 정도 성과를 거두고 있다. 그러나 국내 산업현장에서는 철계, 알루미늄 합금 및 초합금 등의 주조기술은 상당한 기술력을 확보하고 있으나, 타이타늄에 대한 주조 원천기술의 인프라 구축은 매우 미미한 실정이다. 이는 타이타늄이 용탕상태에서 만능용매라고 할 정도로 활성이 심한 금속으로, 용탕을 안정하게 용융 및 유지할 수 있는 특수 용융장비, 도가니 및 주형 제조에 어려움이 따르기 때문이다. 2006년도 통계자료(관세청)에 따르면, 타이타늄 합금 수입량 72.4%가 완성된 부품, 판재 및 튜브의 형태로 수입이 될 정도로, 국내 산업에서는 타이타늄 주조 기술이 몇몇 중소기업에서 제한적으로 활용되고 있고, 현재까지 국내 타이타늄 부품의 대부분은 수입에 의존하고 있는 실정이다.

4. 응용 분야 및 향후 전망

타이타늄은 우주·항공 및 군수품에서부터 응용되기 시작하여, 현재는 가전제품에 이르기까지 그 활용은 우리의 일상생활에 친숙할 정도로 확대되고 있다. 이러한 다양한 분야에 대하여, 타이타늄 주조 기술의 적용 분야는 실로 광대하다고 할 수 있다. 이 중에서 크게 우주·항공, 자동차, 의공학, 스포츠 및 IT 분야에 사용되는 부품에의 적용 가능성을 살펴보고자 한다.

4.1 항공우주 분야

역사적으로 항공우주 분야에 타이타늄 부품이 다양하게 사용되어져 왔다. 그림 5에 나타낸 것처럼 지금까지 개발된 항공기 중에서 최대인원을 수용할 수 있는 Airbus A380에는 다양한 타이타늄 구조재가 적용되며, 이 중에서 rib, fitting 및 bottom plate 등은 현재 단조기술로 제조되는 부품과 주조품이 서로 경합을 벌이고 있는 분야이다.^[19] 항공기 부품으로 사용하기 위하여 타이타늄 정밀주조로 제조된 복잡형상의 부품을 그림 6에 나타내었다.

한편, F-22 전투기에서는 구조재료의 42%가 타이타늄이 사용되고 있다.^[20] 그러나 아직까지 항공기 성능 향상에

가장 기여할 것으로 예상이 되는 엔진의 터빈 블레이드는 사용온도가 낮은 저온·저압 영역에서만 사용되며, 고온산화 및 고온 이상 파괴 현상으로 인하여 경제성보다는 안정성을 우선시 하는 항공기 엔진 특성상 제한을 받고 있다. 따라서 우주·항공기 엔진 분야에서는 고온에서 안정하게 사용할 수 있는 타이타늄 주조품 개발이 선행되어야 한다.

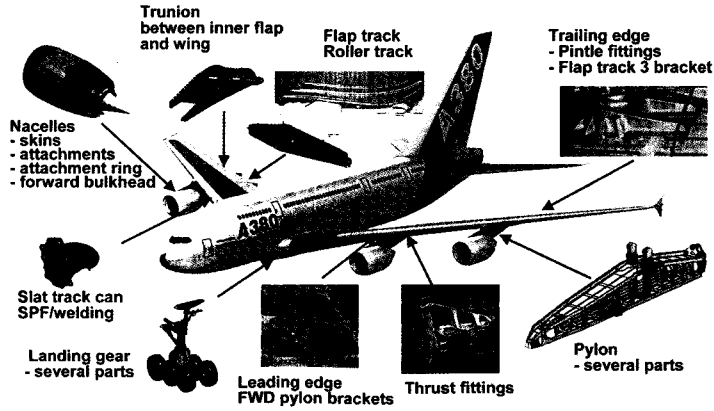


그림 5. Airbus A380의 타이타늄 구조재 적용현황

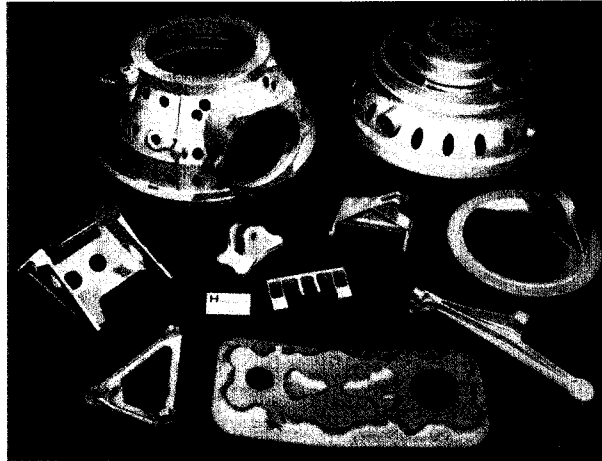


그림 6. Ti 정밀주조로 제조된 항공기 부품(출처: Howmet)

4.2 자동차 분야

자동차 부품으로 사용되는 타이타늄 부품은 현재 일본, 독일 및 미국의 자동차 메이커에서 터보차저, 배기밸브 및 커넥팅 로드 등에 부분적으로 실적용 하고 있다. 특히 디젤 엔진의 전유물이었던, 터보차저는 연비 향상과 출력 증강이라는 이유에서 휘발유 자동차에도 적용이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 현재 사용되고 있는 내열강 및 초합금 터보차저는 2000~2500rpm 이하에서 작동이 원활하게 되지 않는 터보지연의 문제가 있으며, 이를 해결하기 위하여 터보차저를 크기별로 2개를 설치하거나, VGT(variable geometry turbo-charger)라는 기술로 극복하고자 하고 있으나, 여전히 실제 주행에 필요한 2000rpm 이하 영역에서 그 효율에 문제가 있다. 따라서 터보지연의 문제를 완전히 해결할 수 있는 TiAl 터보차저가 각광을 받고 있다. 이 TiAl 터보차저는 박육의 복잡한 형상으로 정밀주조 공정과 분말 공정이 서로 경쟁하고 있으며, TiAl 합금과 강 샤프트 간의 고온에서 안정한 접합 기술문제가 해결해야 할



과제이다.

또한, 자동차의 배기밸브는 현재 공구강의 단조품을 사용하고 있다. 그러나 이러한 공구강을 TiAl 합금으로 대체 할 경우에는 엔진의 작동온도 상승과 관성질량의 감소로 엔진의 설계변화 없이 최대 연비를 2% 이상 상승시킬 수 있는 장점이 있다. 현재 이 TiAl 합금 배기밸브는 단조 공정과 금형을 이용한 주조 공정이 서로 경쟁하고 있으며, 독일 ALD 사에서는 금형주조를 통해서 연간 60만개의 TiAl 배기밸브 생산을 계획하고 있다.

커넥팅로드는 엔진의 피스톤 왕복운동을 회전운동으로 바꾸어 주는 부품으로 엔진의 핵심 관절이라 할 수 있다. 현재 특수강을 사용하고 있지만, 비강도가 높고 내마모 특성이 우수한 타이타늄을 적용하면 관성질량의 감소로 인한 엔진 출력이 증가되며, 이는 엔진 자체의 소형화와 경량화로 이어질 수 있다. 현재 커넥팅 로드는 Ti-6Al-4V 합금이 가장 널리 사용되고 있으며, 제조는 단조 공정 후에 내마모 향상을 위한 표면처리를 거치게 된다.^[21] 그러나 표면 개질이 필요 없는 우수한 기계적 특성, 내마모성 및 윤활특성이 우수한 타이타늄 복합재료를 HIP 처리가 필요 없는 수평형 원심주조 기술과 결합한다면, 경제적으로 커넥팅로드를 제조할 수 있을 뿐만 아니라 자동차 엔진의 성능향상에도 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

4.3 의공학 분야

생체재료는 이제 더 이상 낯설은 의학용어가 아니며, 생활수준 향상에 따라서 단순한 생명연장이 아닌 웰빙의 차원에서 의학과 공학을 접목시킨 의공학발전이 타이타늄 생체재료에서도 지속적으로 이루어지고 있다. 타이타늄은 경량이면서 내식성 및 우수한 생체적합성을 가진 소재이며, 금속재료 중에서 비교적 낮은 약 100GPa의 탄성계수를 가지는 합금이다. 타이타늄 중에서 대표적인 생체재료는 Ti-6Al-4V ELI 등급으로 지난 수십 년간 사용되어 왔으며, 기계적 특성만이 아니라 생체적합성 등의 다양한 특성을 검증받은 재료이다. 그러나 최근에 들어서는 V와 Al의 유해 논란이 제기되고 있으며, 좀 더 인간 뼈의 탄성계수인 10~30GPa에 가까운 합금을 개발하기 위하여 Nb와 Ta 가 첨가된 합금들이 개발되어지고 있다.^[22]

현재 인공고관절 등을 비롯한 정형외과용 임플란트와 치과용 임플란트 등의 타이타늄은 거의 전량 수입에 의존하고 있으며, 그 제조 방법이 기계적인 가공에 의존하고 있기 때문에, 타이타늄 생체재료의 가격은 원소재의 20~100 배에 달하는 실정이다. 생체재료의 특성상 다품종 소량생산 및 맞춤형 생산이 요구되어 지며, 이런 특성에 부합하는 경제적인 타이타늄 정밀주조기술의 개발이 요구된다.

4.4 스포츠 레저 분야

스포츠 분야에서는 가볍고도 강인한 성질의 소재가 필요하며, 타이타늄은 이러한 요구 특성을 잘 만족하고 있다. 대표적으로 Ti-6Al-4V 골프헤드는 이제 골프헤드의 기준이 될 정도로 보편화되어 있다. 한편, 내식성이 우수하고 인체의 피부와 알레르기 반응이 없기 때문에 땀을 많이 흘리는 경우도 사용이 가능한 스포츠 시계도 타이타늄 이 적용되고 있으며, 같은 이유에서 등산용품 및 악세사리와 같은 장신구에도 타이타늄 주조기술의 적용이 가능하다.

4.5 IT 분야

현대인의 필수품인 핸드폰은 고기능화 고급화 되어가면서 현재는 카메라에서 위성방송의 기능까지 추가되어지고 있다. 따라서 핸드폰의 크기는 소형화 추세에서 다시 점점 커지고 있으며, 전자파 차폐능, 내충격성, 다양한 색상 및 디자인이 요구



그림 7. Nokia에서 개발한 타이타늄 케이스 핸드폰 8910

되어지고 있다. 이러한 추세에 맞추어서 Nokia 에서는 그림 7에 나타난 8910이라는 모델의 케이스를 타이타늄 주조 폼으로 대체하여 상당히 좋은 반응을 얻고 있으며, 후속모델을 출시할 예정이다. 이 핸드폰 케이스는 박육이면서 복잡한 형상을 가지고 있기 때문에 기존의 카메라 케이스처럼 용접을 할 경우에는 외관에 문제가 발생할 수 있으며, 대량생산에 부적합하다. 따라서 금형 및 정밀주조 기술을 이용한 경제적인 타이타늄 정형가공 기술을 필요로 하고 있다.

5. 맺음말

타이타늄 주조기술을 주조 공정의 순서에 따라서, 용융방법, 주입방법 및 주형의 종류, 후처리 기술에 대하여 살펴 보았다. 타이타늄은 경쟁소재와의 물성 우열에 따른 경쟁을 하고 있다기 보다는 경제성에 따른 타이타늄 자체의 공정 기술 간에 경쟁하고 있다. 타이타늄의 주조 기술을 실용화하기 위해서는 반드시 경제성이 높은 제조기술이 확립 되어 분말야금이나 정밀단조 등으로 제조되는 부품보다 가격적 비교 우위가 실현됨으로써 가능하다. 경제성 향상을 위해서는 다음의 세 가지분야에 대한 기술 개발이 요구된다.

먼저, 고효율의 열원을 사용할 수 있는 용융장비가 개발되어야 한다. 타이타늄은 용탕의 반응성으로 인해서 일반적인 용융장비가 아니라 고진공의 특수한 고가 용융장비를 사용해야 하며, 이러한 장비를 사용하더라도 용탕의 유동성 확보를 위한 충분한 과열부여가 어려운 것이 현실이다. 따라서 타이타늄 주조 기술을 실용화하기 위해서는 반드시 청정한 용탕과 아울러 충분한 과열을 부여할 수 있는 용융장비의 개발이 필요하다.

다음으로 청정하게 준비된 타이타늄 용탕이 안정한 주조방안으로 신속하게 주입할 수 있는 주입방법을 개발하여야 한다. 이러한 안정한 주입방법의 개발 없이는 타이타늄 주조비용의 3~10배 까지 소요되는 HIP 처리 및 용접보수 공정을 피할 수 없으며, 타이타늄 주조기술의 현실화는 요원하다.

마지막으로, 청정한 타이타늄 용탕이 안정하게 주형에 주입되더라도, 금형의 경우에는 용탕과 주형 사이에서 열화 발생 및 스톨링 현상이 일어난다면 경제적인 정형가공이 불가능하며, 산화물 주형의 경우에는 α -case가 형성된다면, 치수정밀도 저하, 케미칼 밀링 및 기계적 후가공을 필요로 하므로 이 또한 경제적인 정형가공이 될 수 없다. 따라서, 금형의 경우에는 열화와 스톨링 문제를 해결할 수 있는 금형소재를 개발하여야 하며, 산화물 주형의 경우에는 열역학적 접근에 따라서 고가의 안정한 산화물을 사용하더라도 α -case가 발생하는 문제점을 해결하기 위해서, 정밀한 계면반응 분석과 그를 바탕으로 정확한 α -case 형성 기구를 규명하고 이를 이용하여 경제적인 주형재료를 개발하여야 한다.

타이타늄 주조기술의 실용화는, 모든 주조 기술과 마찬가지로 청정한 용탕, 종류의 안정한 주입 및 주형기술의 확보에서 출발되어야 한다. 이러한 기술적 발전에 관한 국내의 현황에 대하여 기술하였다.

❁ 참고 문헌

- [1] C. Leyens and M. Peters, Titanium and Titanium Alloys, Wiley-VCH, Weinheim, (2003) 338-339.
- [2] R. Gerling, R. Leitgeb and F.P. Schimansky, "Porosity and argon concentration in gas atomized γ -TiAl powder and hot isostatically pressed compacts", Mat. Sci. Eng. A252(1998) 239-247.
- [3] C. Leyens and M. Peters, Titanium and Titanium Alloys, Wiley-VCH, Weinheim, (2003) 263-271.
- [4] A. Choudhury and M. Blum, "Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in a permanent mold", Vacuum, 47(1996), 829-831.
- [5] M. J. Donachie, Jr., Titanium a Technical Guide, ASM International, Ohio, USA(2000), 39-45.
- [6] D. M. Stefanescu et al., Metals Handbook, Vol. 15, ASM International, Ohio, USA(1990) 406-408.



- [7] D. M. Stefanescu et al., Metals Handbook, Vol. 15, ASM International, Ohio, USA(1990) 410-418.
- [8] D. M. Stefanescu et al., Metals Handbook, Vol. 15, ASM International, Ohio, USA(1990) 419-425.
- [9] 이용태, 김승언, 현용택, 정희원, 꿈의 신소재 티타늄, 한국철강신문, (2001) 123-126.
- [10] 김영직, 제1회 응고기술 심포지엄, “금속간 화합물 (Ni3Al, NiTi, TiAl)의 진공용해 및 주조”, (1990) 379-385.
- [11] T. Degawa et al., U.S. patent 4,710,481(1987)
- [12] D. Eylon, M. M. Keller and P. E. Jones, “Development of permanent-mold cast TiAl automotive valves”, Intermetallics, 6(1998) 703-708.
- [13] M. C. Flemings, Proceeding of 66th world foundry congress, “Invention and the Foundry Industry”, (2004) 3-19.
- [14] T. Tetsui, Adv. Eng. Mat., “Application of TiAl in a Turbocharger for Passenger Vehicles”, 3, 5 (2001) 307-310.
- [15] M. Blum, G. Jarczyk, H. Scholz, S. Pleier, P. Busse, H-J. Laudenberg, K. Segtrop, and R. Simon, Mat. Sci. Eng., “Prototype plant for the economical mass production of TiAl-valves”, A 329-331 (2002) 616-620.
- [16] P. A. Kobryn and S. L. Semiatin, Met. & Mat. Tran., “Determination of Interface Heat-transfer Coefficients for Permanent-Mold Casting of Ti-6Al-4V”, 32B(2001) 685-695.
- [17] Morozov et al., U.S. patent 3,389,743(1968)
- [18] Brown et al., U.S. patent 4,057,433(1977)
- [19] K. H. Rendings, Ti 2003, “Titanium products used at Airbus”, (2003) 2659-2666.
- [20] M. J. Donachie, Jr., Titanium a Technical Guide, ASM International, Ohio, USA(2000), 9-10.
- [21] 이용태, 김승언, 현용택, 정희원, 꿈의 신소재 티타늄, 한국철강신문, (2001) 204-205.
- [22] N. Sakaguchi, M. Niinomi, To. Akahori, J. Takeda and H. Toda, Mat. Sci. Eng., “Relationships between tensile deformation behavior and microstructure in Ti-Nb-Ta-Zr system alloys”, C25 (2005) 363-369.



김영직

· 성균관대학교 신소재공학과 교수
· 관심분야 : 경량금속기 복합재료 제조공정 개발
· E-mail : yjk1122@skku.edu



성시영

· 자동차부품연구원 소재공정연구센터 연구원
· 관심분야 : 타이타늄 및 타이타늄 복합재료 정형가공, 자동차용 경량소재
· E-mail : sysung@katech.re.kr



이용태

· 재료연구소 특수합금연구그룹 책임연구원
· 관심분야 : 타이타늄합금 응용연구, 항공기 엔진용 고온재료, 구조재료 성형연구
· E-mail : yltlee@kims.re.kr