

# Ti 합금 정밀성형



박 노 광 (재료기술연구부 내열재료실)

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

## 1. 머릿말

티타늄 합금은 무게비 강도, 고온강도 및 피로 강도 등 기계적 성질이 우수하고 내식성이 좋기 때문에, 항공우주산업을 필두로 잠수정 및 석유 시추용 구조재, 원자력·화력·수력 발전소용 부품, 의료기기, 스포츠 용구에 이르기까지 그 응용분야는 매우 넓다. 그러나 티타늄 합금은 여타 금속소재에 비하여 용융상태에서 고온 반응성이 커서 모합금 제조가 어렵고, 소재가격이 US\$20~80/Lb로 비싸며, 가공성·용접성 등이 나쁘기 때문에 아직 제한적으로 이용되고 있다. 결국 일정 형상의 제품을 제조하기 위한 티타늄 원소재 양을 줄이고 후가공공정을 간소화할 필요성이 대두되는데, 이에 따라 티타늄 합금의 정밀성형이 주요 관심사로 되고 있다.

정밀성형법에 의해 복잡형상의 부품을 직접 제조할 경우, 재료비·가공비 등의 제조원가가 낮아지고, 공정 조건 관리가 용이하기 때문에 조직 및 기계적 성질이 우수한 제품을 제조할 수 있다. 티타늄 합금의 정밀성형 방법으로는 최종제품의 형상 및 요구 특성에 따라 여러가지가 이용될 수 있는데, 본 지에서는 티타늄 합금의 일반적인 제성질 및 진공주조, 정밀단조, 초소성가공, 용접 등 실용화되고 있는 공정기술에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 티타늄 합금 종류와 열처리 특성

순수 티타늄은 상온에서 hcp( $\alpha$ ) 구조를 갖고 있으나 882.5°C 이상의 온도에서는 bcc( $\beta$ ) 구조를 갖고 있다. 합금원소의 종류 및 양에 따라 티타늄

Table 1. Characteristics of commercial Ti alloys

Alpha/Near-Alpha				Alpha-Beta			Near-Beta/Beta							
Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	T	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-	Ti-
5Al-	5Al-	8Al-	6Al-	6Al-	6Al-	6Al-	5Al-	10V-	r	8Mo-	3Al-	11.5	15V	13V-
2.5	6Sn-	1Mo-	2Sn-	4V	6V-	2Sn-	2Sn-	2Fe-	a	8V-	8V-	Mo-	3Cr-	11Cr-
Sn	2Zr-	1V	4Zr-		2Sn	4Zr-	2Zr-	3Al	n	2Fe-	6Cr-	6Zr-	3Al-	3Al
	1Mo-		2Mo-			6Mo	4Mo-		a	3Al	4Mo-	4.5Sn	3Sn	
	0.2Si		0.1Si				4Cr		e		4Zr	(β-III)		
							(Ti-17)		Ti		(B-C)			

←		(α+β)/β transus												
←		HT flow stress												
		Fabricability												→
		(formability)												
		Strain-rate Sensitivity												→
		Heat-treatability												→
		Hardenability												→
		RT Strength, Toughness												→
←		HT Capability												
←		Weldability												
←		α-Stabilization												
		β-Stabilization												→
		Density												→
←		Moduli												

합금의 상변태온도는 증가되거나 감소되는 데, 변태온도를 증가시키는 합금원소는 α 안정화 원소로, 감소시키는 경우 β 안정화 원소로 불리운다. 따라서 합금원소에 따라 티타늄 합금은 α 합금, β 합금, α+β 합금 등으로 구분하고 α+β 합금을 더욱 세분하여 준 α 합금, α+β 합금, 준 β 합금 등으로 구분하기도 하는 데 이들 합금의 특성은 표 1과 같다[1].

티타늄 합금 중 그 사용범위가 비교적 넓은 Ti-6Al-4V 합금은 α+β 합금으로서, 소둔상태에서의 성형성이 과히 좋지는 않지만, 상온 및 고온에서의 기계적 성질이 우수하므로 구조재로서 각광을 받고 있다. 최근 고온용 합금으로서 여러가지 Near α 합금이 개발되었는데, Ti-5~6Al-2~5Sn-2~5Zr-0.2~6Mo를 기초로 한 여러가지 고온용 티

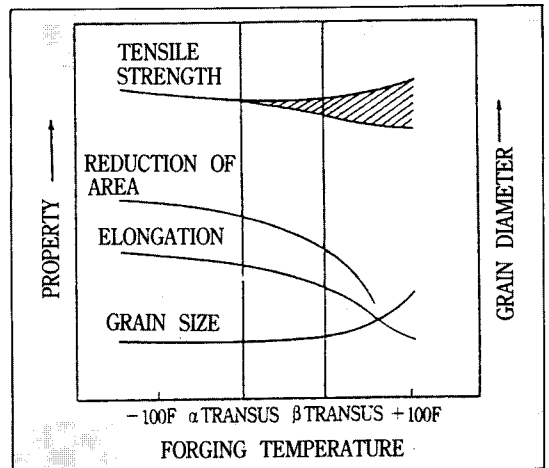


Fig. 1 Influence of forging temperature on beta grain size and room-temperature mechanical properties in β Ti alloys.

Table 2. Annealing and stress-relieving heat treatments for titanium alloys

Alloy	Annealing			Stress-relieving <sup>a</sup>	
	Temperature.°F	Time, h	Cooling medium	Temperature.°F	Time, h
Commercially pure grades	1200-1400	0.1-2	Air	900-1100	0.5-1
<u>Alpha alloys</u>					
Ti-5Al-2.5Sn	1325-1550	0.2-4	Air	1000-1200	1-4
Ti-8Al-1Mo-1V	1450 <sup>b</sup> 1450	1-8 0.25	Furnace Air	1075-1125	2
Ti-5Al-5Sn-2Mo-2Zr	1200-1450	0.5-2	Air	1100	2-8
Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo	1450-1650	1-4	Air	1100-1200	0.25-2
Ti-6Al-4Zr-2Mo-2Sn	1650 <sup>b</sup> 1450	0.5-1 0.25	Air Air	900-1200	1-4
<u>Alpha-beta alloys</u>					
Ti-3Al-2.5V	1200-1400	0.5-2	Air	1000-1100	0.5-2
Ti-6Al-4V	1300-1450	1-4	Air or furnace	1000-1100	2-4
Ti-7Al-4Mo	1300-1450	1-8	Air	900-1300	0.5-8
Ti-6Al-6V-2Sn	1300-1500	1-4	Air or furnace	900-1000	1-4
Ti-6Al-6Mo-4Zr-2Sn	1300-1350	2	Air	1100-1300	0.25-4
Ti-8Mn	1200-1400	0.5-1	Furnace to 1000°F, then air	900-1100	0.25-2
Ti-10V-2Fe-3Al	1450-1500 <sup>c</sup>	0.1-0.25	Air	1250-1300	0.5-2
<u>Beta Alloys</u>					
Ti-13V-11Cr-3Al	1300-1450	0.2-1	Air or water	900-1000	0.5-60
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn	1300-1400	0.2-1	Air or water	1325-1350	0.1-0.25
Ti-8Mo-8V-3Al-2Fe	1425-1450	0.1-0.25	Air or water	950-1100	1-4

a. Air cool

b. Duplex heat treatment

c. Not normally used in the annealed condition

타늄 합금이 항공기용 가스터빈 엔진소재로서 각광을 받고 있다.

티타늄 합금이 갖는 제반 특성은 제조공정 및 후열처리에 따라 다양하게 변화될 수 있는데, 그림 1과 그림 2에  $\beta$  합금 및  $\alpha+\beta$  합금의 단조온도에 따른 기계적 특성 변화의 예를 보여주고 있다[2].  $\alpha/\beta$  변태온도를 기점으로 연신을 및 단면수축율이 현저히 변화되는 것을 알 수 있으며, 강도 및 충격특성을 개선하기 위해서 변태온도 직하에서 소성가공을 하는 것이 유리하다. 그러나 고온에서의 크리프강도가 중요한 경우에는  $\beta$  변태온도

이상에서 소성 변형시킬 필요가 있다.

티타늄 합금의 열처리는 응력제거 열처리와 조직제어 열처리로 구분지을 수 있는데, 주로 진공 또는 분위기 중에서 수행된다. 응력제거 열처리는 후열처리를 요하지 않는 용접, 불균일 고온단조나 냉간가공후, 비대칭 기계가공 등을 수행한 뒤에 주로 수행하며,  $\alpha+\beta$  합금의 경우 480~700°C에서  $\beta$  합금의 경우 770°C 부근에서 수행한다. 응력제거 열처리를 수행할 경우, 칫수정도는 유지되고 균열형성이 방지되며 응력부식 균열 성장이 억제되지만, 모재에 시효효과가 나타나 연신을 등이

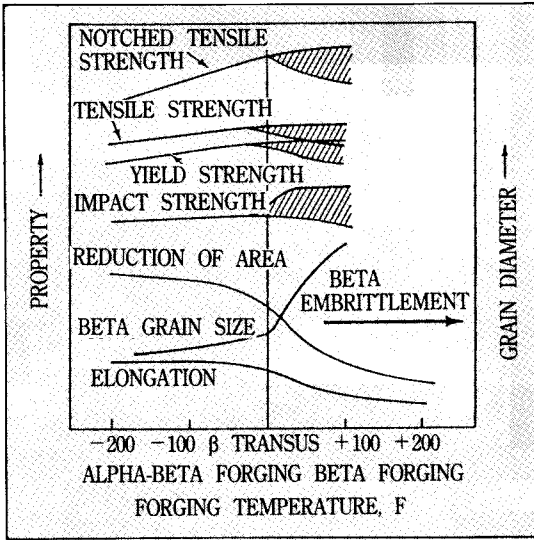


Fig. 2 Influence of forging temperature on beta grain size and room-temperature mechanical properties in  $\alpha+\beta$  Ti alloys.

저하될 수 있다. 소둔 열처리는 주로 연신율, 찻수 및 열적 안정성, 파단인성, 피로강도 등을 향상시키기 위해 수행한다. 표 2에 여러가지 티타늄 합금에 대한 소둔 및 응력제거 열처리 예를 나타내었는데, 잔류응력이 형성되는 것을 방지하기 위하여 열처리 후에 노냉 또는 공냉으로 균일 냉각시킨다[3].

용체화 및 시효처리는 주로  $\alpha+\beta$  합금 혹은  $\beta$  합금을 강화시키기 위하여 수행하는 데,  $\alpha+\beta$ 의 2상 온도영역에서 용체화 처리한 후 급냉하고 480~600°C 부근에서 시효처리를 수행한다. 용체화 처리시 형성된 불안정  $\beta$  상이나  $\beta'$  마르텐사이트 등은 시효처리시 안정된  $\alpha+\beta$  상으로 변태된다. 표 3에 용체화 및 시효 처리의 조건 예를 나타내었다[3].

$\alpha+\beta$  합금인 Ti-6Al-4V 합금을 2상 온도 혹은  $\beta$  온도 구간에서 용체화 처리할 경우에, 그 처

Table 3. Solution Treating and Ageing(Stabilizing) Treatment for Ti Alloys

Alloy	Solution temperature		Solution time.h	Cooling rate	Aging temperature		Aging time.h
	°F	°C			°F	°C	
Alpha or near-alpha alloys							
Ti-8Al-1Mo-1V.....	1800-1850(a)	980-1010(a)	1	Oil or water	1050-1100	565-595	...
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo.....	1750-1800	955-980	1	Air	1100	595	8
Alpha-beta alloys							
Ti-6Al-4V.....	1750-1775 (b, c)	955-970(b,c)	1	Water	900-1100	480-595	4-8
	1750-1775	955-970	1	Water	1300-1400	705-760	2-4
Ti-6Al-6V-2Sn (Cu+Fe)							
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	1550-1650	845-910	1	Water	900-1100	480-595	4-8
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	1550-1600	845-870	1	Air	1075-1125	580-605	4-8
Ti-6Al-2Sn-2Zr-2Mo -2Cr-0.25Si	1600-1700	870-925	1	Water	900-1100	480-595	4-8
Beta or near-beta alloys							
Ti-13V-11Cr-3Al	1426-1475	775-800	1/4-1	Air or water	800-900	425-480	4-100
Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn (beta III)	1275-1450	690-790	1/5-1	Air or water	900-1100	480-595	8-32
Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo -4Zr(beta C)	1500-1700	815-925	1	Water	850-1000	455-540	8-24
Ti-10V-2Fe-3Al	1400-1435	760-780	1	Water	925-975	495-525	8
Ti-15V-3Al-3Cr-3Sn	1450-1500	790-815	1/4	Air	950-1100	510-595	8-24

(a) For certain products, use solution temperature of 1650°F(890°C) for 1h then air cool or faster. (b) For thin plate or sheet, solution temperature down to 890°C(1650°F) can be used for 6 to 30 min. then water quench. (c) This treatment is used to develop maximum tensile properties in this alloy.

Table 4. Variation of Microstructures with Heat-treatment in Ti-6Al-4V

Des.	Heat Treatment	Cooling Rate		
		WQ	AC	FC
A	1950°F (1066°C)	$\alpha'+\beta$ , Prior $\beta$ g.b.	Acicular $\alpha+\beta$ , Prior $\beta$ g.b.	Plate $\alpha+\beta$ , Prior $\beta$ g.b.
B	1750°F (954°C)	Primary $\alpha$ , $\alpha'+\beta$ (Coarse)	Primary $\alpha$ , Acicular $\alpha+\beta$ (Coarse)	Equiaxed $\alpha$ , Intergranular $\beta$ (Coarse)
C	1650°F (899°C)	Primary $\alpha$ , $\alpha'+\beta$ (Fine)	Primary $\alpha$ , Acicular $\alpha+\beta$ (Fine)	Equiaxed $\alpha$ , Intergranular $\beta$ (Fine)
D	1550°F (843°C)	Primary $\alpha$ , Metastable $\beta$ (Fine)	Primary $\alpha$ , $\beta$ (Fine)	Equiaxed $\alpha$ , Intergranular $\beta$ (Fine)

Table 5. Variation of Mechanical Properties with Heat-treatment in Ti-6Al-4V

Des.	Treatment*	UTS MPa	2%YS MPa	Elongation %	RA %
A	1950F/WQ	1110	950	7.7	19.2
	After Aging	1170	1060	8.5	19.2
B	1750F/WQ	1120	950	17.0	60.2
	After Aging	1180	1070	16.5	56.4
C	1650F/WQ	1120	920	15.2	53.9
	After Aging	1120	1010	15.3	47.5
D	1550F/WQ	1010	770	20.0	54.7
	After Aging	1980	980	16.5	48.8
E	1950F/AC	1060	940	7.0	10.3
	After Aging	1060	940	9.8	16.0
F	1750F/AC	990	850	17.8	54.1
	After Aging	1020	900	16.1	45.7
G	1650F/AC	1000	870	17.5	54.7
	After Aging	1030	930	17.3	50.2
H	1550F/AC	1020	880	17.8	47.7
	After Aging	1030	930	16.8	46.9
I	1950F/FC	1040	940	10.5	15.6
	After Aging	1010	940	9.5	15.4
J	1750F/FC	940	840	18.8	46.0
	After Aging	970	880	18.2	49.1
K	1650F/FC	960	850	16.5	43.3
	After Aging	960	880	16.8	48.3
L	1550F/FC	1000	920	17.3	48.9
	After Aging	1060	950	17.0	49.6

\*Aging in all cases : 1000F(538°C) 4 Hrs : Air Cool

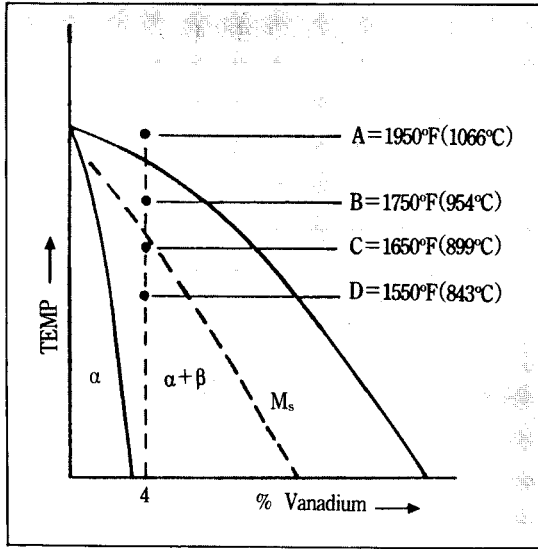


Fig. 3 Schematic phase diagram of Ti-6Al-4V

리온도 및 냉각속도에 따라 형성되는 미세조직과 시효후 상은 기계적 성질변화는 각기 그림 3 및 표 4, 5와 같다[10]. 2상 온도구역에서 용체화 처리한 경우가  $\beta$  온도구간에서 처리한 경우에 비하여 연신을 및 단면수축률이 월등하며, 용체화 처리후의 시효효과는 용체화 처리온도에서 냉각 속도가 빠를수록 크게 나타난다.

### 3. 주조기술

티타늄 주조법은 칫수정도가 높고 복잡한 제품을 경제적으로 제조할 수 있는 잇점을 갖기 때문에, 항공기부품을 위시하여 여타 산업용 기기 부품 제조에 그 응용도를 높여가고 있다. 현재 주조되고 있는 티타늄 합금은 대부분 소모성 전극 진공아크 또는 전자빔을 이용하여 용해되는 데, 그림 4에 소모성 전극식 진공아크를 이용한 티타늄 Skull 용해로의 개략도를 나타내었다[4].

티타늄 주조는 주로 Rammed Graphite Mold 법과 정밀주조법에 의해 이루어지고 있으며, Rammed Graphite Mold 법으로는 칫수정도가 낮은 대형부품 제조에 유리하고, 수백 마이크론의 표면 반응층을 형성하기 때문에 후가공 처리는 필수적이다. 한편 정밀주조법은 표면상태가 양호하고 칫수정도가 높기 때문에 복잡형상의 부품제조에 유리하지만

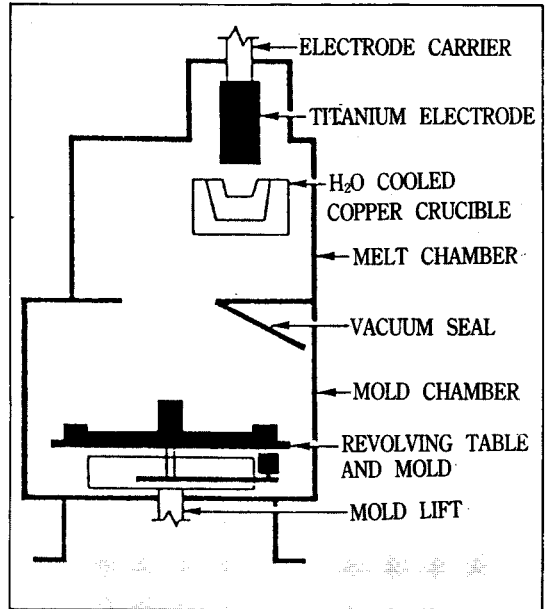


Fig. 4 Titanium skull melting furnace

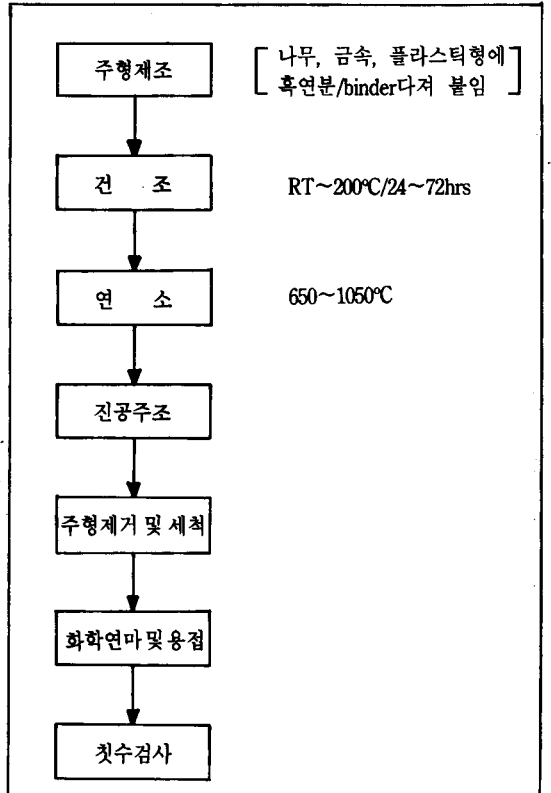


Fig. 5 Rammed graphite mold casting process for Ti alloys

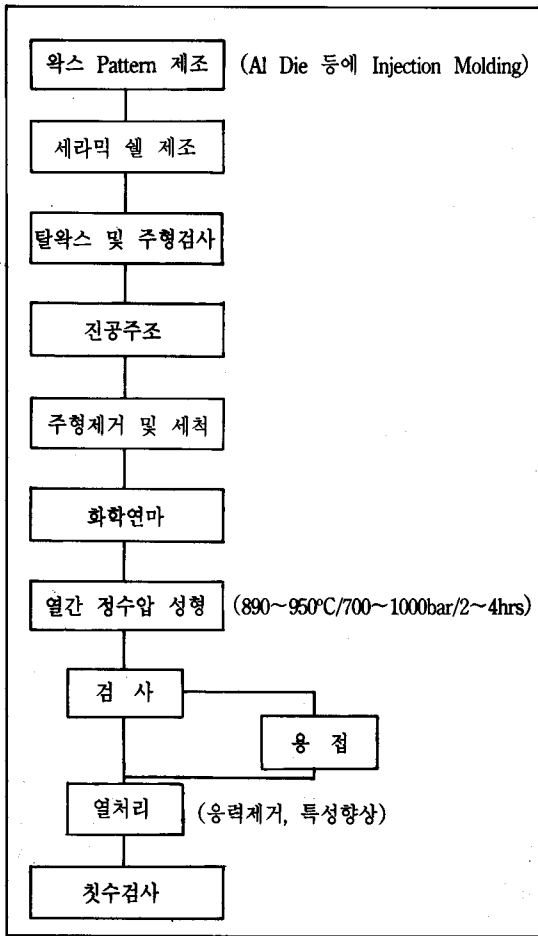


Fig. 6 Vacuum investment casting process for Ti alloys

Rammed Graphite Mold 법에 비해 비경제적이다. 그림 5 및 그림 6에 이들 두 공정을 도식적으로 나타내었으며, 표 6에 두 공정의 특성비교를 나타내었다[5, 6].

정밀주조법으로 높은 회수율을 갖는 고 칫수 정밀도의 부품을 제조하기 위해서는, 게이트 및 압탕의 설치방안, 열팽창을 감안한 왁스모형 제조, 용탕의 흐름을 감안한 왁스모형 조립, 반응성 및 열팽창을 고려한 점결제 및 주형재료 등을 선별하여야 하며, 얇은 부품내의 misrun 방지를 위해 원심주조기술이 많이 응용되고 있다.

고정밀도를 요하는 항공기 부품에는 정밀주조가 대부분 이용되고 있으며, 냉각 도중 형성되는 수축공은 피로성질을 저하시키기 때문에 열간 정수압성형(Hot Isostatic Pressing) 등에 의해 이들 수축공을 압착시킬 필요가 있다[그림 7 참조][4]. 또한 열간 정수압 성형은 정밀주조시 게이트 및 압탕숫자를 줄임으로 해서 정밀부품용으로 재활용할 수 없는 스크랩 발생을 현저하게 줄임으로써 회수율을 2배 정도 높일 수 있다. 열간 정수압 성형은 취화방지를 위해  $\beta$  변태온도 이하에서 수행되며, 성형후 잔존하는 수축공의 크기는 매우 작아 일반적인 X-ray 검사로 관측되지 않는다.

#### 4. 정밀단조

일반적으로 단조성 평가는 균열생성에 대한

Table 6. Comparison between Rammed Graphite Mold Casting Process and Investment Casting Process

	Rammed Graphite	Investment
Min. Size Limits	0.5-1kg	Less than .05 kg
Max. Size Limits	450 kg	45 kg
Thickness Tolerance	$\pm .76$ mm(up to 142 mm) & .003 mm/mm thereafter	$\pm .25$ mm(up to 152 mm) & .005 mm/mm thereafter
Min. Wall Sections	3 mm	1.5 mm
Draft Angles	1°~3°	0°
Surface Finish	250 RMS	125 RMS
Tooling Cost	Inexpensive	Expensive
Microstructure	Small Grain	Large Grain
Strength	Slightly Higher Than Investment	Same as Wrought*

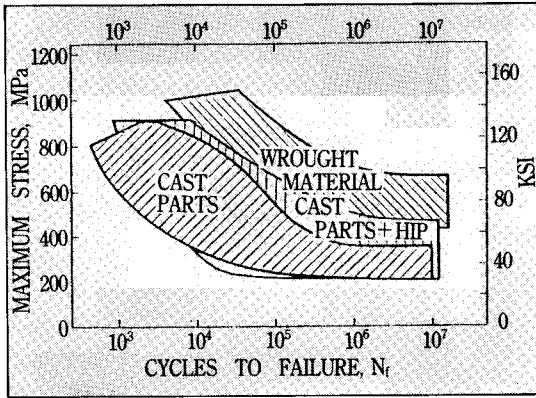


Fig. 7 Effect of hot isostatic pressing on fatigue properties of Ti casting.

저항성, 유동응력, 변형속도 민감도 등에 의해 결정되는 데, 티타늄 합금의 단조성은 알루미늄 합금, 철 합금 등에 비해 현저히 낮고 니켈 합금과 유사하다. 티타늄 합금의 일반단조 조건은 합금 조성, 최종제품의 형상 및 요구특성 등에 따라 결정되는 데, 주로 850~1050°C의 온도 범위에서,  $10^{\circ} \sim 10^{\circ} S^{-1}$  사이의 단조속도로 성형하며 금형 온도는 100~300°C로 유지한다. 그러나 이 경우 형상제어, 조직제어에 어려움이 많고, 단조설비의 용량이 상대적으로 커야 하며 다단계 공정이 필요하기 때문에 제품 생산단가는 상대적으로 높아진다. 따라서 금형온도를 단조재 온도 부근까지 가열하는 고온단조(Hot Die Forging)·항온단조(Isothermal Forging) 등의 정밀단조 기술이 티타늄 부품제조에 많이 이용된다.

이들 단조공정의 특징으로는 금형냉각·단열가열 효과가 없기 때문에 미세조직과 기계적 특성 조절이 용이하고, 단조조건의 재현성이 높아 조직 및 기계적 성질 관리가 용이하며, 단조하중이 일반단조에 비해 적기 때문에 단조설비의 용량은 상대적으로 작으며, Near Net Shaping 또는 Net Shaping이 가능하기 때문에 재료비 및 후가공비가 절감된다. 또한 정밀주조법에 비해서 결함을 거의 함유하지 않고 잉고트 내의 주조결함은 파괴되므로 피로강도가 우수하다.

고온 또는 항온단조 시 고려되어야 할 사항은 금형온도, 단조재 온도, 단조속도, 윤활재, 예비

성형체 형상 및 칫수 등으로, 각 단조업체의 설비와 단조재에 대한 요구특성에 따라 이들 조건은 결정된다. 최적 단조조건을 도출하기 위하여, 단조재의 열적·기계적특성, 단조재와 금형간의 계면 마찰, 단조재와 금형 혹은 분위기와의 열전달 등에 대한 기본자료가 필요하며, 이들 자료를 근거로 최종제품을 제조하기 위한 단조공정(단조속도, 온도, 유지시간)과 예비 성형체 형상 및 칫수 등이 선정된다. 최근 유수의 티타늄 합금 정밀단조 회사에서는 티타늄 합금재의 재료특성, 단조재/금형 계면특성, 소성변형 등에 대한 자료를 근거로 티타늄 부품을 제조/가공하기 위한 CAD/CAM을 활용하고 있다.

고온단조용 금형 재료의 선택은 단조온도, 단조하중, 칫수정밀도, 금형제조 단가 등을 고려하여 선정하는 데, 고온강도 및 크리프 강도가 우수해야 하기 때문에 니켈 기지 합금이나 몰리브덴 합금이 이용된다. 니켈 기지 합금은  $\alpha + \beta$  합금 등을 약 760°C까지 대기중에서 단조하는 데 이용되지만, 그 이상의 고온에서는 TZM 금형이 이용되는 데 이 경우 산화방지를 위해서 진공 혹은 분위기를 이용하여야 한다. 고온 단조용 윤활재는 그 윤활 특성, 밀착성, 열적 안정성 등이 우수하고 금형 재료와 반응하지 않아야 되기 때문에 주로 유리질 윤활제가 이용되고 있다.

### 5. 초소성 성형

일반적으로 소재가 특정 온도 및 변형속도에서 수백~수천 %의 인장 연신율을 나타내는 현상을 초소성이라 하는 데, 이때 소재변형 응력은 매우 낮고 변형속도 민감도( $m = \partial \ln \sigma / \partial \ln \dot{\epsilon}$ )는 일반금속 소재가 0.001~0.2 정도인데 반하여 0.3~0.9 정도의 높은 값을 나타내게 되며, 이에 따라 소재변형시 국부 소성변형(Localized Necking)의 발생 및 진전이 저지된다. 대부분의 티타늄 합금은  $0.4T_m$  ( $T_m$ =용해온도) 이상에서 초소성 특성을 나타내는 데, 표 7에 초소성 변형하에서의 온도 및 변형속도를 나타내었다[7].

초소성 특성을 공업적으로 이용하기 위해서는 초소성 발현온도는 낮을수록, 그때의 변형속도는



Table 7. Superplastic Characteristics of Ti Alloys

Alloy	Test Temp. (°C)	Strain Rate (sec <sup>-1</sup> )	m	Elongation (%)
<b>Alpha/Beta</b>				
Ti-6Al-4V	840-870	1.3×10 <sup>-4</sup> to 10 <sup>-3</sup>	0.75	750-1170
Ti-6Al-5V	850	8×10 <sup>-4</sup>	0.70	700-1100
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	900	2×10 <sup>-4</sup>	0.67	538
Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr	871	2×10 <sup>-4</sup>	0.63-0.81	>510
Ti-6Al-4V-2Ni	815	2×10 <sup>-4</sup>	0.85	720
Ti-6Al-4V-2Co	815	2×10 <sup>-4</sup>	0.53	670
Ti-6Al-4V-2Fe	815	2×10 <sup>-4</sup>	0.54	650
Ti-5Al-2.5Sn	1000	2×10 <sup>-4</sup>	0.49	420
<b>Beta &amp; Near-Beta</b>				
Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	815	2×10 <sup>-4</sup>	0.5	229
Ti-13Cr-11V-3Al	800	-	-	<150
Ti-8Mn	750	-	0.43	150
Ti-15Mo	800	-	0.60	100
<b>Alpha</b>				
C.P. Ti	850	1.7×10 <sup>-4</sup>	-	115

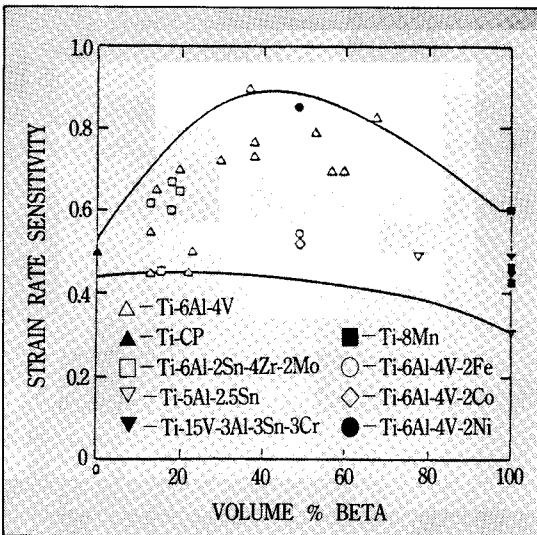


Fig. 8 Variation of strain rate sensitivity(m) with % β phase.

클수록 유리하다. 티타늄 합금에서 이들 조건을 만족시키기 위해서는 결정립이 미세할수록 좋은데, 특히 조대한 결정립이 혼입될 경우 그 특성은 현저히 저하되므로 유의하여야 한다. 티타늄 합

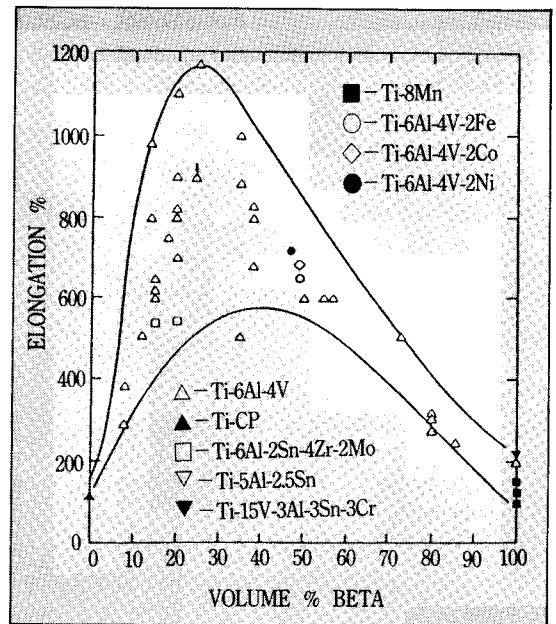


Fig. 9 Variation of elongation with % β phase.

금의 초소성 특성을 이용하여, 실제로 Nacelle frame, Service Panel 등 많은 항공기 부품이 제

조되고 있다.

$\alpha + \beta$  합금의 많은 경우 초소성 변형조건 하에서 500~1000%의 인장 연신율을 나타내는 데, 그 최대값은  $\beta$  상의 비율이 15~60% 일때 나타난다 [그림 8과 9 참조][7]. 온도에 따라 이들 상의 평균농도는 달라지기 때문에 확산속도 등이 변하게 되어 어느 조성이 초소성 특성 이용에 좋은가는 단적으로 말할 수 없다. 초소성 특성 향상을 위해서는 낮은 온도에서  $\alpha$ 와  $\beta$  상의 양비가 1:1로 거의 유지되도록 하는 것이 바람직한 데, 실제로  $\alpha + \beta$  합금에 H, Mo, Cr, Fe, Ni, Co 등을 소량 첨가함으로써 초소성 성형온도를 50°C 이상 낮출 수 있다.

$\alpha$  합금 또는  $\beta$  합금의 경우에는  $\alpha + \beta$  합금에 비하여 연신율이 떨어지기는 하지만 역시 초소성 특성을 나타낸다. 이들 합금은 제2상이 없기 때문에, 고온에서 결정립은 불안정하게 되고 초소성 성형시 결정립 성장하여 초소성 특성이 저하된다.  $\beta$  합금의 경우,  $\beta$  변태 온도 이하에서 냉간 가공한

후 시효 처리함으로써 미세한 결정립을 얻을 수 있고,  $\alpha$  합금의 경우에는 변태 온도 부근에서 하중을 가하며 가열 냉각을 반복함으로써 미세 결정립을 얻을 수 있다.

티타늄 합금의 초소성 특성을 이용하여 실제 부품을 제조하는 방법은 여러가지가 있겠으나, 가스압력을 이용한 부풀림 성형과 확산접합기술을 동시에 이용하는 기술이 많이 이용되고 있다. 부풀림 성형의 특색은 티타늄판재를 성형온도로 가열된 금형사이에 위치시키고 상하 금형중 한 쪽으로 압력을 가해줌으로써 판재가 부풀림 성형되도록 한다[그림 10 참조][8]. 부풀림 성형시 가압하는 속도는 판재의 소성 변형속도가 초소성 특성 발현 구간에 유지되도록 조절을 해야 하는데, 반복작업을 통하거나 분석적인 모델링을 통해 결정된다[9].

### 6. 용접기술

티타늄 합금은 고온에서 반응성이 강해서 공

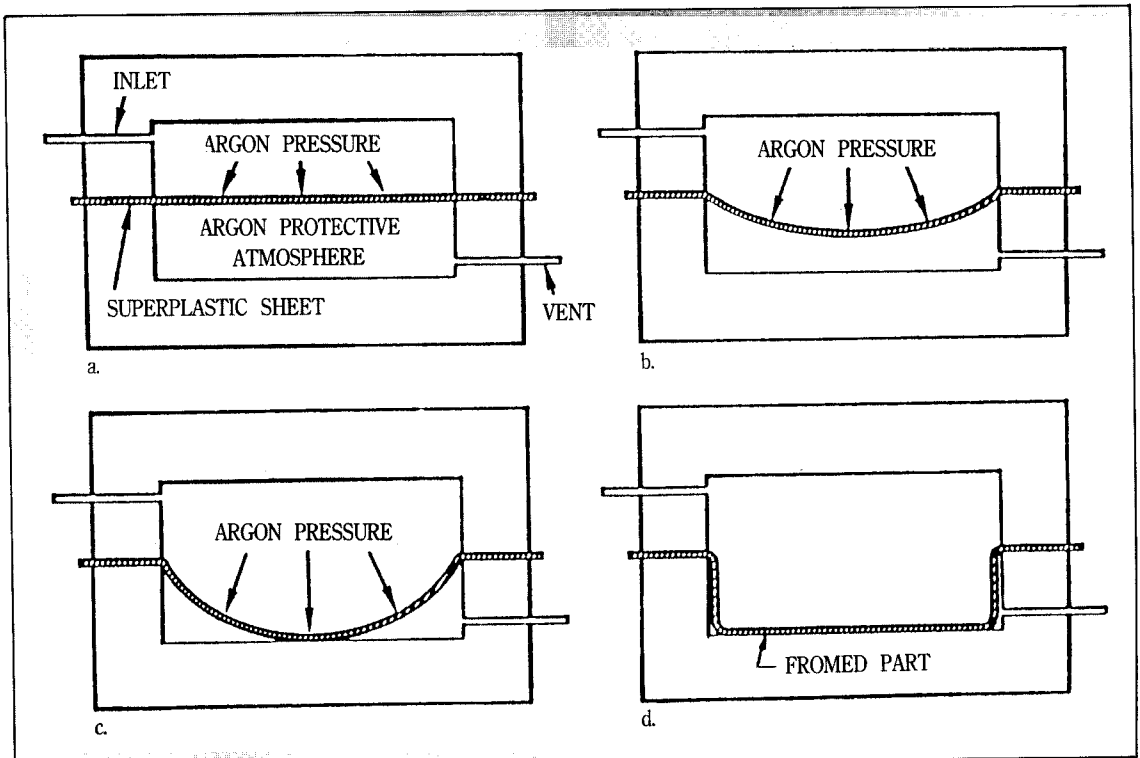


Fig. 10 Schematic diagram for superplastic blow forming

Table 8. Welding Parameters for TIG Welding

Sheet Thickness mm	W Diameter mm	Filler Wire Diameter mm	Travel Speed cm/min	Welding Current A	Ar Gas Flow Rate ℓ/min		
					Primary	Secondary	Backing
0.5	0.8	1.6	60	20~30	6~8	20~30	20~30
1	2.4	1.6	50	20~30	15	20~30	30~40
3*	2.4	1.6	25~30	①130~145 ②150~195 ③130~150	15	20~30	30~40
5**	3.2	1.6	20~26	②170~190 ③170~190	25	20~30	30~40

\*Double Welding

\*\*Triple Welding

기중의 산소, 질소 혹은 표면에 흡착된 기름, 손자국, 페인트 등이 용접온도에서 불순물로 혼입될 가능성이 크다. 티타늄 용접시 분위기를 깨끗하게 할 필요가 있는데, 염화물과 같은 것이 잔류할 경우 용접시 300°C 이상에서 응력부식 균열을 일으킬 수 있고, Hydrocarbon이 존재할 경우 용접재를 취화시킬 수 있으므로 주의를 요하며, 세척제로 일반 수도물 대신 아세톤 등을 이용한다.

티타늄 합금 용접에는 기존의 TIG, MIG, EB 용접, 플라즈마 용접, 레이저 용접, 마찰 용접 등이 대부분 이용될 수 있는데, TIG 용접이 가장 보편적으로 이용되고 있고 불순물에 의한 오염방지를 위해 일반 금속소재 용접시 보다 더욱 고진공 혹은 알곤 등의 불활성 분위기를 필요로 한다. 표 8에 TIG 용접조건 예를 나타내었는데, 용접부위 뿐 아니라 용접후 가열부위 및 판재 뒷면까지 불활성 가스 분위기를 유지해야 한다[3]. 용접부에 형성된 얇은 표면산화층은 2~4% HF+30~40% HNO<sub>3</sub> 수용액으로 산세할 수 있으나, 고온에서 두껍게 형성된 산화층은 Shot Blasting과 같은 방법으로 제거한다.

## 7. 맺음말

티타늄 합금은 원소재 및 가공비가 비싸기 때문에 기계적·화학적으로 우수한 제반 성질에도

불구하고 제한적으로 이용되고 있으나, 최근 Near Net Shaping 또는 Net Shaping 기술의 진보로 티타늄 합금은 점차 경쟁성을 띠게 되었다. 특히 주조기술의 발달과 정밀단조에 의한 치수·형상·조직 제어 기술의 진보, 항공산업 분야에서의 초소성 가공/확산접합 기술의 응용 등은 괄목할 만한 기술적 진보로 티타늄 합금의 상업적 이용 확대를 가능케 하고 있다.

국내에서는 티타늄 합금 성형 기술에 대한 개발 경험이 거의 없으나, KFP·HX 사업 등 특수사업과, Gas Turbine 개발사업의 전개 및 국내 석유화학공업, 해양산업의 육성에 따라 관련부품 제작기술의 국산화를 눈 앞에 두고 있다. 한국기계연구원에서는 관련 연구로서  $\alpha+\beta$  합금, 티타늄 금속간 화합물 등 성형에 관한 공정기술과 미세조직 제어에 의한 기계·화학적 특성 개선에 대한 연구를 현재 수행중이다.

## 참 고 문 헌

- [1] C. C. Chen, Titanium Science & Technology, 1984, p. 461.
- [2] Titanium and Titanium Alloys Source Book, ASM, ed. M. J. Donachie, Jr., ASM, Metals Park, OH 44073.
- [3] Welding Handbook, Vol. 4, ed. W. H. Kearns, Ame-

- rican Welding Society, Miami, FL 33126, 1982, p.433.
- [4] D. Eylon and F.H. Froes, in Titanium Net Shape Technologies, eds. F.H. Froes and D. Eylon, Met. Soc. AIME, Pa 15086, USA, 1984, p.155.
- [5] R.D. Williams and J. Dippel, Ti Net Shape Technology, 1984, p.193.
- [6] R.H. Colley, Titanium Science and Technology, 1984, p.151.
- [7] A.K. Ghosh and C.H. Hamilton, Def. Sci. J., Vol. 36, No.2, 1986, p.153.
- [8] C.H. Hamilton, (AGARD Lecture Series No.154), 1987, p.2-1.
- [9] M. Bellet and J.L. Chenot, Proceed. 6th World Conf. on Titanium, France 1988, p.1203.
- [10] Facts about the Metallography of Titanium, RMI Titanium, 1970.