

티타늄 합금의 선재 제조기술



박 주 환

(고려상사 (주))

- '67-'71 서울대학교 금속과(학사)
- '74-'77 고려제강(주)
- '92-'94 부산대학교 산업대학원 금속과(석사)
- '77-현재 고려상사(주) 연구개발 담당 이사



김 창 주

(KIMM 재료기술연구부)

- '67-'71 성균관대학교 금속과(학사)
- '73-'76 서울기계공고 교사
- '76-'78 연세대학교 산업대학원 재료과(석사)
- '78-'79 포항제철 기술연구소 주임연구원
- '82-'86 부산대학교 대학원 금속과(박사)
- '79-현재 한국기계연구원 책임연구원



김 형 욱

(KIMM 재료기술연구부)

- '87-'91 한양대학교 재료과(학사)
- '91-'93 한양대학교 대학원 재료과(석사)
- '93-현재 한국기계연구원 연구원

1. 머릿말

티타늄 합금은 가볍고, 강하고, 내식성 및 내열성이 좋아서 주로 항공기 및 화학공업분야 등의 핵심 부품재로서 발전하여 왔으며, 현재에는 자동차, 원자력 및 해상 구조물과 같은 여러 분야에서 고성능 재료로서 관심이 높아지고 있다.

이상과 같은 목적에 사용되는 합금 소형재(素形材)의 형상은 일반적으로는 판재, 봉재, 관재 및 선재 등이며 일부는 단조품이나 주물이다. 이 중에서 선재는 그 주요 적용 대상이 spring과 fastener라 볼 수 있으며, 이러한 부품은 모두 고강도 내피로성 구조재를 의미한다. 따라서 이들은 제조과정 중에서 거의 최고치의 비강도를 나타낼 수 있는 최적의 가공열처리 공정이 적절히 도입되어야 한다. 그러나 티타늄 합금은 열간가공을 위한 고온에서 산화가 심하고, 냉간에서의 소성가공성이 매우 어려운 것이 문제점이다. 한편 고강도 구조재용 선재의 제조과정에는 반드시 냉간가공을 거쳐야 하며, 현재에는 이러한 목적에 맞게 개발된 일부의 합금이 있다. 그렇지만 아직도 선재의 원활한 냉간 가공(스웨이징, 인발, 단조)을 위해서는 대개 다음과 같은 점들이 해결되어야 할 숙제로 남아 있다.

- 1) 냉간 가공성과 물성이 보다 우수한 새로운 티타늄 합금의 개발
- 2) 냉간 가공을 고려한 최적의 가공열처리 방안
- 3) 냉간 가공용 스웨이징 및 인발 다이스의 최적 설계기술
- 4) 냉간 인발을 위한 윤활피막 및 윤활재 개발

5) 생산원가 절감 방안

2. 티타늄 합금의 실용현황

전술한 바와 같이 티타늄 합금은 철강이나 다른 비철합금에 비하여 여러가지 면에서 얻을 수 있는 우수한 특성으로 항공기, 화학공업, 원자력 및 해상 구조물과 같은 분야에서는 물론 근래에는 의료, 육상 운송기 및 스포츠 용품 등과 같은 분야에서도 적용범위가 확대되고 있으며, 그 실례를 분야별로 열거하여 보면 대개 다음과 같다.

그리고 표 1에는 현재 양산 또는 주문 생산에 의해 상품화된 합금재들의 유형 및 기계적 특성이다. 모든 티타늄 합금이 일반 철강재와 특별히 구별되는 특징으로서는 항복강도(Y.S)/인장강도(T.S)의 비율이 90% 이상임을 알 수 있으며, 이는 피로강도가 높을 수 있는 특성을 나타낸다.

- 1) 우주, 항공기: 기체 구조재, 엔진부품, fastener
- 2) 해양 구조물: 해수 담수화용 장치, LNG 해수 냉각관 및 판
- 3) 자동차: connecting rod, spring, bolt, retainer
- 4) 화학공업: NaOH 전해용 전극, 반응탑, 증류탑, 농축기, 열교환기 등의 기기 및 배관재
- 5) 발전: 화력, 원자력발전의 복수기관, 관판
- 6) 의료: 치과, 심장 박동기, 혈관 클립, 인공 뼈, 인공 관절, 두개골 보충재, 의지, 의수, 수술용구, 핀셋
- 7) 약세서리: 안경테, 벡타이 핀
- 8) 스포츠 용품: 골프채, 테니스 라켓, pickel, 자전거
- 9) 정밀기기: 시계, 카메라, 컴퓨터
- 10) 선박: 축류, fastener, 키 및 선 외기 부품
- 11) 원자력 폐기물 처리: 운송용기

3. 소형재(素形材)의 제조공정

티타늄 합금은 용해 및 정련에 있어서도 일반

적인 금속재의 경우와는 달리, VAR 등과 같은 설비에서 이루어진다. 여기서 얻어진 주괴는 열간 가공성의 어려움과 고온에서의 심한 산화 등의 문제로 주괴는 석회분을 피복한 상태에서 가열 후 일단, 단조에 의한 열간 가공으로 슬라브나 빌렛으로 제조된다. 그리고 이후의 제조공정은 일반 금속재료의 경우와 유사하나, 냉간 인발에 의한 선재나 관재를 제조하는 과정에서는 목표로 하는 물성에 맞는 다양한 가공열처리가 도입되어 물성을 제어할 수 있다.

여기서 냉간 인발 과정에는 특별한 기술이 요하며, 대표적으로는 윤활피막처리, 윤활제 및 다이의 설계에 관한 것이다.

티타늄 합금은 이상에서 지적한 몇 가지 특기할 사항을 참조하고, 소형재(素形材)의 개략적인 제조를 보면 다음의 그림 1에서와 같은 공정도에 따라 이루어지고 있다.

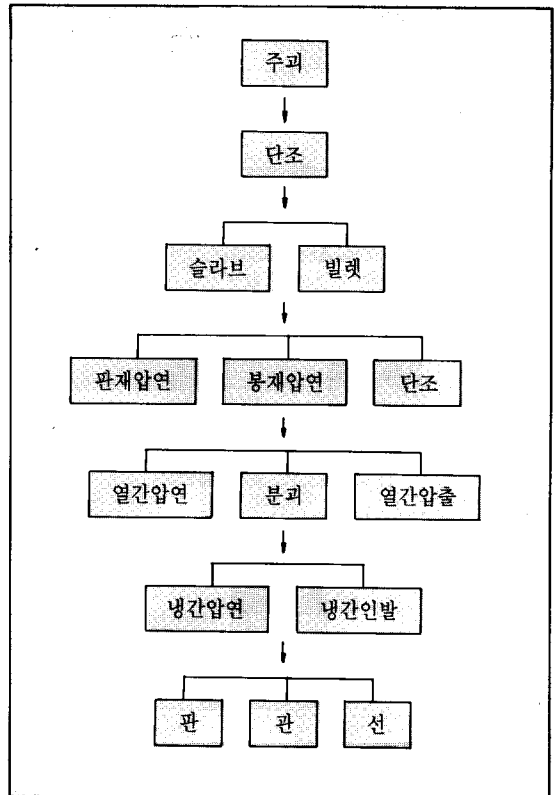


그림 1. 티타늄 합금 소형재(素形材)의 제조공정

표 1. 각종 티타늄 합금의 기계적 성질

type	chemical composition	heat treat.	T.S.(MPa)	Y.S.(MPa)	E1(%)
α	5Al-2.5Sn	Ann	≥ 823	≥ 794	≥ 10
	5Al-2.5Sn ELI	Ann	≥ 686	≥ 618	≥ 10
near α	5.5Al-3.5Sn-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.3Mo-0.3Si	STA	≥ 1,020	≥ 892	≥ 16
	11Sn-2.25Al-5Zr-1Mo-0.2Si	STA	1,098	989	15
	8Al-1Mo-1V	STA	≥ 892	≥ 824	≥ 10
	6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.08Si	Ann	≥ 932	≥ 863	≥ 8
		STA	≥ 1,010	≥ 922	≥ 18
	5Al-5Sn-2Zr-2Mo-0.25Si	STA	1,043	961	13
	6Al-2Nb-1Ta-1Mo	as rolled	851	755	13
	6Al-2Sn-1.5Zr-1Mo-0.35Bi-0.1Si	DAnn	1,009	940	11
	6Al-2.8Sn-4Zr-0.4Mo-0.45Si-0.070- _≥ 0.02Fe	β-foged & aged			
6Al-5Zr-0.5Mo-0.2Si	STA	≥ 990	> 853	> 6	
α+β	8Mn	Ann	940	858	15
	6Al-4V	STA	1,190	1,120	≥ 10
	3Al-2.5V	SR	≥ 863	≥ 726	≥ 8
	3Al-1.5V-2Fe	STA	≥ 1,177	≥ 726	≥ 2
	5.5Al-4Sn-4Zr-0.3Mo-0.5Si-0.06C-1Nb	STA	≥ 1,030	≥ 912	≥ 6
	6Al-6V-2Sn	Ann	≥ 1,069	≥ 1,000	≥ 8
		STA	≥ 1,206	≥ 1,098	≥ 10
	7Al-1Mo	STA	1,098	1,030	16
	6Al-2Sn-2Zr-2Mo-2Cr-0.25Si	STA	1,270	1,133	11
	6Al-2Sn-4Zr-6Mo	STA	≥ 1,177	≥ 1,098	≥ 10
	4.5Al-5Mo-1.5Cr	DSTA	≥ 1,030	≥ 981	≥ 13
	5Al-2Cr-1Fe	Ann	≥ 892	≥ 824	≥ 10
	5Al-1.5Fe-1.5Cr-1.2Mo	Ann	1,049	1,030	18
	3Al-2.5V-0.05Pd-0.4Ni	SR	≥ 863	≥ 726	≥ 8
		Ann	≥ 932	892~1,236	≥ 10
β	10V-2Fe-3Al	STA	≥ 1,245	≥ 1,098	≥ 4
	5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr	STA	≥ 1,128	≥ 1,059	≥ 5
	13V-11Cr-3Al	STA	≥ 1,245	≥ 824	≥ 4
	3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	STA	≥ 1,442	≥ 1,373	≥ 7
	11.5Mo-6Zr-4.5Sn	ST	≥ 755	≥ 618	≥ 50
		STA	≥ 1,245	≥ 1,206	≥ 8
	8Mo-8V-2Fe-3Al	STA	1,304	1,236	8
	15Mo-5Zr	ST	≥ 863	-	-
		STA	≥ 1,373	≥ 1,373	-
	15Mo-5Zr-3Al	ST	706~941	686~834	≥ 12
		STA	≥ 883	-	-
	15V-3Cr-3Sn-3Al	ST	≥ 1,471	≥ 1,471	≥ 5
		STA	≥ 1,000	961~1,177	≥ 7
	6Al-4V-10Cr-1.3C	ST	≥ 932	≥ 883	≥ 4
	20V-4Al-1Sn	ST	≥ 637	≥ 598	≥ 15
	STA	≥ 1,079	≥ 932	≥ 7	

Ann ; 소둔

STA ; 용체화+시효

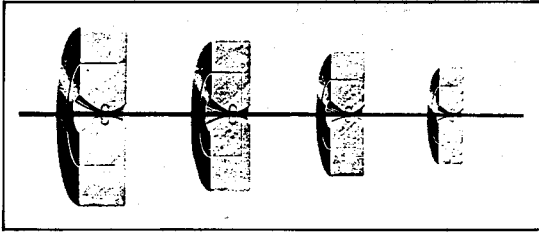
SR ; 응력제거 소둔

ST ; 용체화

DSTA ; 2중 용체화+시효

DAnn ; 2중 소둔

4. 티타늄 합금의 선재제조



티타늄 합금의 선재제조를 위한 냉간 인발은 각 제조사에 따라 독자적인 기술을 보유하고 있으며 일부의 제조사에 따라서는 특허로써 보호하고 있다.

여기서는 최근에 출원된 몇가지 사례를 소개하고, 수집된 자료를 바탕으로 실험실적인 면에서 시도해 본 공정과 그 결과를 제시한다.

4.1 특허 예-1

출원자 : 스미토모금속(주), 1986. 10. 30

제목 : 티타늄 합금 선재의 신선방법

○개요 : 티타늄 합금 선재 표면에 산화피막을 형성한 후, 윤활처리하여 신선하는 방법에 있어서, 신선 전에 진공처리하여 재료를 연화한다. 그 후에 450~750°C의 온도범위에서 산화처리로 표면에 산화피막을 형성함과 동시에, 가스 흡수에 의한 표면경화층의 깊이를 0.04mm 이하로 제어한 후, 윤활처리하여 신선하는 방법이다.

가. 실시 예-1

1) 재료

재질 : β -C 티타늄 합금 선재

선경 : Φ 9.5mm

화학적분 : Al 3.4%, V 8.2%, Cr 6.1%, Mo 3.9%, Zr 4.2%, Ti 나머지

2) Shaving : Φ 9.5mm \rightarrow Φ 8.5mm

3) 열처리

850°C×2시간(진공 10^{-2} torr) \rightarrow 급냉
 \rightarrow 700~500°C×5~30분(대기) \rightarrow 급냉

4) 피막액

poly 불화 ethylene telomer 7%+trichloro +trifluoro ethane 용액 중 5분 침적

5) 윤활제

stearin 산 Ca 분말

6) 감면율 : 73.2%(Φ 9.5mm \rightarrow Φ 8.5mm, pass 당 20%)

나. 실시 예-2

1) 재료 : 실시 예-1과 같음

2) Shaving : 실시 예-1과 같음

3) 진공소둔 : 850°C×60분

4) 산화처리 : 다음 각 온도별 10분씩이며, 표면 산화층의 두께가 0.04mm를 초과하면 신선시에 표면터짐균열이 일어남.(표 2 참조)

표 2. 산화처리온도 및 신선상태

산화온도 (°C)	신선 pass 수							
	1	2	3	4	5	6	7	8
350°C	○	△						
450°C	○	○	○	○	○	○	○	△
550°C	○	○	○	○	○	○	○	○
650°C	○	○	○	○	○	○	○	○
750°C	○	○	○	○	○	○	○	○
850°C	○	X						
950°C	X							

○ ; 신선양호, △ ; 표면소착, X ; 표면균열

다. 실시 예-3

1) 재료 : 실시 예-1에 의해 제조된 Φ 4.4mm 선재

2) 진공소둔 : 850°C×60분

3) 산화처리 : 다음 각 온도별 산화처리 및 신선상태는 표 3과 같음.

표 3. 산화처리온도 및 신선상태

산화온도 (°C)	신선 pass 수							
	1	2	3	4	5	6	7	8
350°C	○	○	○	○	△			
450°C	○	○	○	○	○	○	○	○
550°C	○	○	○	○	○	○	○	○
650°C	○	○	○	○	○	○	X	
750°C	○	○	○	○	○	X		
850°C	X							

4.2 특허 예-2

출원자 : 스미토모금속(주), 1988. 2. 18

제목 : β 형 티타늄 합금 선재의 제조방법

○개요 : 탈청한 β 형 티타늄 합금 표면에 아연 또는 아연과 철을 함유한 입자를 투사하여 아연 또는 철아연 합금표면을 형성시킨 후에 인산 아연처리를 행함으로써 윤활 처리를 한다. 이는 냉간 신선시에 표면 성상이 건전하고, 피로강도가 높은 β 형 티타늄 합금 선재를 안정하게 생산하는 방법으로 다음 그림 2에 도표로 정리하였다.

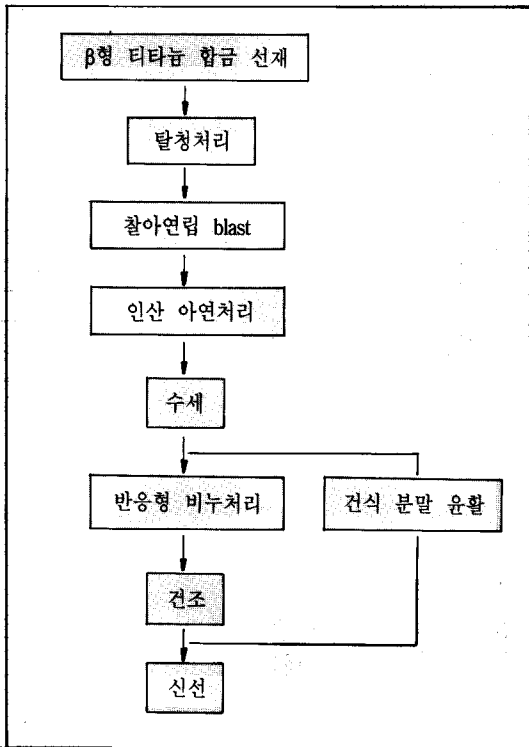


그림 2. 주요 공정도

가. 재료 : Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, Ti-3Al-8V-6Cr-4 Mo-4Zr

나. 탈청법

shot blast법, shot peening법 : 양호, 투사밀

도-탄소강보다 수배 많게→철아연립 blast 시에 철아연 합금층의 부착성이 좋고, 내소착성을 높인다.

*in line 처리가 필요함(원가나 품질상 바람직함)

다. 인산 아연처리-1(bonderite 처리)

*철립을 핵으로 하여 표면에 철아연 합금층을 만들어 아연이 부착된 입자

*철아연 합금층의 부착량 : 1~40g/m²

라. 인산 아연처리-2(bonderite 처리)

in-line 처리 : 부착량 7g/m² 이상

batch 처리 : 같음

마. 반응형 비누층 형성 : 부착량 2g/m² 이상
stearin 산 Ca : 건조(자연, 열풍, 적외선, 고주파유도가열)

stearin 산 Na : 위와 같음

바. 건식 윤활분말 : 공영사 유지, Koshin-Y107

사. 냉간 신선가공 : 인발 다이스, 롤러 다이스

아. 실시 예-1

1) 재료

재질 : Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, Ti-3Al-8V-6Cr-4 Mo-4Zr

선경 : Φ 5.5mm

2) shot blast : in-line

투사밀도 : 약 4,500kg/m²,

연마재 : Φ 0.3mm의 강구

→철아연립 blast : 10g/m²의 철아연 합금층

3) 인산 아연 피막처리

전 산도 : 150 point,

처리온도 및 시간 : 80°C×20초,

피막 부착량 : 6.8g/m²→수세

4) stearin 산 Na 처리

농도 : 약 3 point,

처리온도 및 시간 : 80°C×5초,

부착량 : 약 43g/m²→200°C 건조→다이스 신선(Φ 5.5mm→ Φ 4.0mm)

5) 200°C 건조+건식 분말 윤활제(부착량 5.6 g/m²)→다이스 신선(Φ 5.5mm→ Φ 4.0mm)

6) 결과 : 표 4 참조

표 4. 각종 처리시의 피로 및 인장강도

시험 번호	시료	윤활재 처리 종별	신선상태		시효 후(500°C×2hr)	
			피로강도 (Kg/mm ²)	피로강도 (Kg/mm ²)	피로강도 (Kg/mm ²)	피로강도 (Kg/mm ²)
1	A	반응형 비누처리	21.5	133.5	36.0	157.0
2	B	반응형 비누처리	22.5	134.5	37.0	158.3
3	A	건식분말 다이스 윤활	21.5	133.4	36.0	157.5
4	B	건식분말 다이스 윤활	22.0	135.0	37.0	158.5
5	A	600°C×10분 산화피막 형성 + 불소수지 도포	18.0	130.1	29.5	154.2
6	B	650°C×5분 산화피막 형성 + 불소수지 도포	18.5	132.0	30.0	155.0
7	B	600°C×20분 후 공냉 + 진공용체화처리 (950°C×20분) + 불소수지 도포	17.5	129.6	28.5	150.4

* 피로강도 : 나카무라식 피로시험에 의해 응력진폭을 107까지 변화시킨 양진폭 피로강도를 구한 것임.

* 불소수지 : AG-Lub

4.3 특허 예-3

출원자 : 스미토모금속(주), 1988. 6. 3

제목 : 티타늄 재료의 신선 가공방법

가. 표면 탈청 후, 순 티타늄 또는 티타늄 합금 소재선을 톨러 다이스 등에 의해 냉간 압연가공하고, 다듬질 치수보다도 다소 큰 치수로 신선한다. 그리고 이를 홀 다이스에 의해 인발가공하여 소정의 치수인 선재로 신선하는 방법이다.

나. 소착방지를 위해 홀 다이스의 AP 각도를 8~11°, 감면율을 10% 이상으로 인발함.

다. 실시 예-1 : 다음의 표 5에서와 같은 공정에 의하였으며, 이 때의 총 감면율은 91%이다.(Φ 10.0mm → Φ 3.0mm)

예-2 : 다음의 표 6에서와 같은 공정에 의하였으며, 이 때의 총 감면율은 60%이다.(Φ 22mm → Φ 14mm)

4.4 특허 예-4

출원자 : 스미토모금속(주), 1988. 8. 26

제목 : 고티로강도 β형 티타늄 선재의 제조방법

가. 탈청한 β형 티타늄 합금소재를 산화 가능한 분위기 중에서 600°C 이상으로, 또는 β 변태점 미만의 온도에서 가열하여 표면에 0.1~3μm 두께의 산화피막을 형성시킨다. 그리고 나서 후열처리함이 없이 냉간인발 신선하는 방법임.

나. 산화피막의 두께 : 선재 단면을 마이크로 현미경, 주사전자 현미경 또는 광학 현미경으로 관찰하여 확실히 티타늄 합금의 소지와 구별 가능한 산화피막 부분의 두께를 말함.

다. 산화피막의 두께 : 0.1~3μm

- 1) 고도의 윤활성이 부여됨.
- 2) 신선시 그 피막에 작은 균열이 발생해도 모재 표면에 영향을 주지 않음.
- 3) 모재 표층의 산소부회층은 남으므로 신선

표 5. 신선가공 공정 및 결과

번호	표면 scale	가공방법 및 조건	가공의 가부	표면품질	편경차
1	유	다이스 신선	가	요철 큼(거칠기 0.02mm)	0.015mm
2	유	롤러 다이스 신선	가	요철 큼(거칠기 0.02mm)	0.03mm
3	무	다이스 신선	감면율 3% 이하에서 소착	-	-
4	무	롤러 다이스 신선	가	양호	0.025mm
5	무	롤러 다이스 + 다이스 신선 감면율 13%, AP각 13°	소착	-	-
6	무	롤러 다이스 + 다이스 신선 감면율 13%, AP각 10°	소착	-	-
7	무	롤러 다이스 + 다이스 신선 감면율 8%, AP각 13°	소착	-	-
8	무	롤러 다이스+ 다이스 신선 감면율 8%, AP각 10°	가	양호	0.01mm ↓

표 6. 신선가공 공정 및 결과

번호	표면 scale	가공방법 및 조건	가공의 가부	표면품질	편경차
1	유	다이스 신선	감면율 25% 이상시 소착	-	-
2	유	스웨이징 가공	가	요철 큼(거칠기 0.03mm)	0.08mm
3	유	다이스 신선	가	-	-
4	무	다이스 신선	감면율 10% 이상시 소착	-	-
5	무	롤러 다이스 신선	가	양호	0.08mm
6	무	롤러 다이스+다이스 신선 감면율 12%, AP각 13°	소착	-	-
7	무	롤러 다이스+다이스 신선 감면율 12%, AP각 10°	소착	-	-
8	무	롤러 다이스 + 다이스 신선 감면율 7%, AP각 13°	소착	-	-
9	무	롤러 다이스 +다이스 신선 감면율 7%, AP각 10°	가	소착	0.04mm ↓

후의 모재 표면은 윤활되고 신선 후 인장강도 및 피로강도를 높일 수 있다.

라. 구체적 내용

1) β형 티타늄 합금

- β변태점 이상의 온도에서 열간압연
- Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr
- Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al
- Ti-13V-11Cr-3Al

2) 주요공정

탈청→600°C 이상 β 변태점 미만의 온도에서 0.5~7분간 가열하여 0.1~3μm 두께의 산화피막 형성→냉간에서 신선
 가열로: Batch식 또는 연속식
 냉각: 공냉 이상

마. 실시 예

- 1) 선재: Φ6.4mm, Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(β 변태점: 793°C)
- 2) Roller dies: 산화피막 및 산소부화층 제거
- 3) 재산화피막 처리
- 4) 2 Pass 신선: Φ35mm→Φ325mm→Φ30mm (13.8%) (14.8%)
 윤활제: Koshin Y-107(공영사 유지)

4.5 실험공정 예

재료: Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(β-c) 합금

가. 표면을 거칠게 함

- 1) 목적: 열간 가공된 소선의 표면이 거칠어 Shaving한 티타늄 합금 선재의 표면은 너무 미려하여 냉간 신선시 윤활제의 pick up이 좋지 못하므로 소선의 표면을 약간 거칠게 하여 윤활제 pick up성을 개선하기 위함.
- 2) 방법: HNO₃+HF(17%) 용액에 20분 간 침적함.

나. 산화피막 형성

- 1) 목적: 윤활피막의 한 방법으로 소선 표면에 산화피막을 형성시킴.
- 2) 650°C에서 5분간 대기 중에서 가열 후 공냉함.

다. 신선용 윤활피막 도포

- 1) 목적: 티타늄 합금 선재에 적합한 윤활 피막제를 도포함.
- 2) 방법: *ML-119: 2유화 몰리브덴(MoS₂)+흑연

표 7. 시험결과

No.	산화피막처리		진공용체화처리		산화피막두께 (μm)	신선상황	신선상태 시효 후			
	온도 (°C)	시간 (분)	온도 (°C)	시간 (분)			T.S	F.S	T.S	F.S
1	650	1	-	-	1.20	0	135.0	22.0	165.0	32.0
2	650	3	-	-	1.50	0	133.0	22.0	163.3	32.0
3	700	1	-	-	2.50	0	129.5	21.0	160.0	31.0
4	610	1	-	-	0.20	0	135.7	22.0	166.5	32.0
5	450	30	-	-	0.50	2회 pass시 단선				
6	650	5	-	-	0.05	소착				
7	450	3	-	-	0.05	1회 pass시 단선				
8	600	5	-	-	15.00	스케일 탈락 소착				
9	650	12	-	-	4.00	0	129.0	15.0	156.5	25.0
10	550	10	800	30	1.00	0	110.0	14.0	145.0	28.0
11	600	5	950	20	1.00	0	108.0	14.0	142.0	27.0

T.S: 인장강도(Kg/mm²),

F.S: 피로강도(Kg/mm²)

(C)+규산염(SiO₂·NaO·K₂O) 등을 함유한 고도의 윤활성 피막제이며, 이를 도포함.

*YEX-117: 4가 불소계 수지로 윤활성이 우수한 피막제이며, 이를 도포함.

*MP-40G

라. 냉간 신선

*Φ5.7mm→Φ3.5mm(감면율: 62.3%)

- 1) 신선기: 24"×8H
- 2) 윤활제: MP-40G
- 3) 다이스: 초경 H형(AP각=9~10°, BR길이=15~25% d)
- 4) 신선속도: 30m/분
- 5) 다이스 비율
5.68→5.24→4.83→4.45→4.10→3.78→3.50
14.9% 15.0% 15.1% 15.1% 15.0% 14.3%

*Φ6.4mm→Φ3.5mm(감면율: 69.6%)

- 1) 신선기: 24"×8H
- 2) 윤활제: MP-40G
- 3) 다이스: 초경 H형(AP각=9~10°, BR길이=15~25% d)
- 4) 다이스 비율
6.35→5.75→5.24→4.83→4.45→4.10→3.78→3.50
18.0% 16.9% 15.0% 15.1% 15.1% 15.0% 14.3%

*Φ6.35mm→Φ4.83mm(감면율: 42.1%)

- 1) 신선기: 24"×8H
- 2) 윤활제: MP-40G
- 3) 다이스: 초경 H형(AP각=9~10°, BR길이=15~25% d)
- 4) 신선속도: 30m/분
- 5) 다이스 비율
6.35 → 5.75 → 5.24 → 4.83
18.0% 16.9% 15.0%

*Φ4.83mm→Φ3.50mm(감면율: 47.5%)

- 1) 신선기: 24"×8H
- 2) 윤활제: MP-40G
- 3) 다이스: 초경 H형(AP각=9~10°, BR길이=15~25% d)
- 4) 신선속도: 30m/분

5) 다이스 비율

4.83 → 4.45 → 4.10 → 3.78 → 3.50
15.1% 15.1% 15.0% 14.3%

마. 표면세척

1) 목적: 진공소둔을 위한 표면의 잔류 피막이나 윤활제의 제거

2) 방법:

*윤활제+피막제: 알카리 용액에 10~15분 침적 후 수세함.

*산화피막: 불산과 질산의 혼합액(HNO₃+17% HF)에 10~15분 침적 후 수세함.

바. 용체화 열처리

만일 냉간 일반과정에서 가공경화가 심하여 용체화 및 소둔처리가 필요시에는 다음의 용체화 열처리 후, 앞의 "나" 항인 산화피막 형성 공정에서부터 이하 공정을 재연함.

1) 목적: 냉간 신선가공시 발생한 내부응력을 제거하고 조직을 재결정시켜 연화하기 위함.

2) 방법: 800°C×30분, 진공도 10⁻⁴torr 이하의 진공로에서 가열 후 로냉(또는 가스로 냉각)

5. 기계적 특성 변화

표 8은 직경이 64mm인 소선을 35mm까지 냉간에서 인발하는 과정에서 각 단계별 가공율인 단면감면율에 따른 인장특성 및 경도의 변화를 나타낸 것이고, 그림 3은 위의 결과 중에서 인장강도와 단면감소율의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 보면 강도나 연성은 가공율에 따라 변화하나 가공율이 약 30%까지는 급격히 변화한, 가공율이 30~40%를 넘어서면 그 변화가 완만해지며, 가공율이 약 60~70% 이상에서 부터는 더욱 완만한 변화를 보인다.

그리고 표 9는 직경이 64mm인 소선을 35mm까지 냉간 신선 후 여러 시효처리 조건에 따른 인장특성의 변화를 나타낸 것이며, 그림 4와 5는 각각 시효처리 온도와 시간에 따른 인장강도 및 단면감소율의 변화를 보이고 있다. 이들의 결과에서 보면 180Kg/mm² 정도인 최고의 인장강도를 얻기 위해서는 425~450°C에서 10시간 정도의 시효처리가

바람직하며 이때의 연성인 단면감소율은 약 5% 정도에 불과한 것을 알 수 있고, 이러한 정도의 온도는 미시효 단계로 알려져 있다. 그러나 미세 조직상, 완전시효 단계인 550°C에서 8시간 정도 처리한 경우는 인장강도는 약 140Kg/mm², 단면감

소율은 약 50% 정도이다. 한편 이상의 중간시효 단계인 500°C에서 10시간 정도 처리한 경우에 인장강도는 약 160Kg/mm², 단면감소율은 약 20% 정도이다. 따라서 선재의 용도에 맞는 물성의 수준을 선택할 수 있는 방안이 제시될 수 있다.

표 8. Φ6.4mm → Φ3.5mm 신선 단계별 기계적 특성변화

선경(mm)	감면율(%)	TS(Kg/mm ²)	EL(%)	RA(%)	경도(HV)
6.40	0	91.1	10.0	57.0	282
5.75	19.3	113.0	6	38.3	288
5.24	32.9	126.8	4	31.4	319
4.83	43.0	129.7	3	28.3	322
4.45	51.7	131.8	2	26.3	311
4.10	59.0	132.8	2	25.8	315
3.78	65.1	133.7	2	26.0	323
3.50	70.1	133.9	1	25.6	321

표 9. Φ6.4mm → Φ 3.5mm 신선 후 시효처리시 기계적 특성변화

1) 인장강도(Kg/mm²)

처리온도	1시간	2시간	4시간	6시간	8시간	10시간	30시간	40시간	50시간
350°C	141	147	154	159	160	164	-	-	-
400°C	157	166	173	178	179	181	-	-	-
425°C	-	-	-	-	-	191	193	194	190
450°C	166	173	178	180	181	181	-	-	-
500°C	160	165	157	153	157	158	-	-	-
550°C	143	140	138	138	136	136	-	-	-
600°C	123	119	118	118	118	118	-	-	-

2) 단면감소(%)

처리온도	1시간	2시간	4시간	6시간	8시간	10시간	30시간	40시간	50시간
350°C	36	34	31	31	24	29	-	-	-
400°C	29	21	24	5	5	5	-	-	-
425°C	-	-	-	-	-	5	5	5	5
450°C	24	19	16	5	5	5	-	-	-
500°C	34	29	34	29	19	19	-	-	-
550°C	41	45	45	45	47	51	-	-	-
600°C	55	55	53	53	53	53	-	-	-

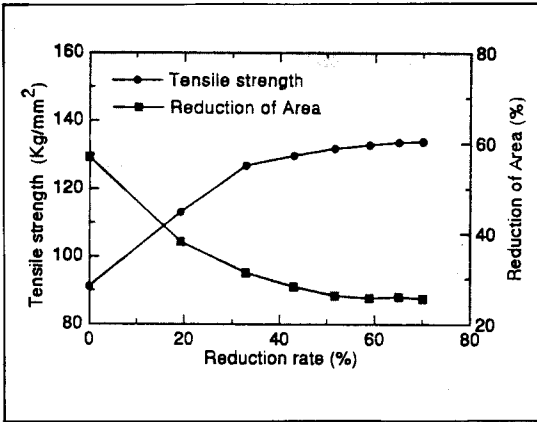


그림 3. $\Phi 6.4\text{mm} \rightarrow \Phi 3.5\text{mm}$ 신선 단계별 인장특성변화

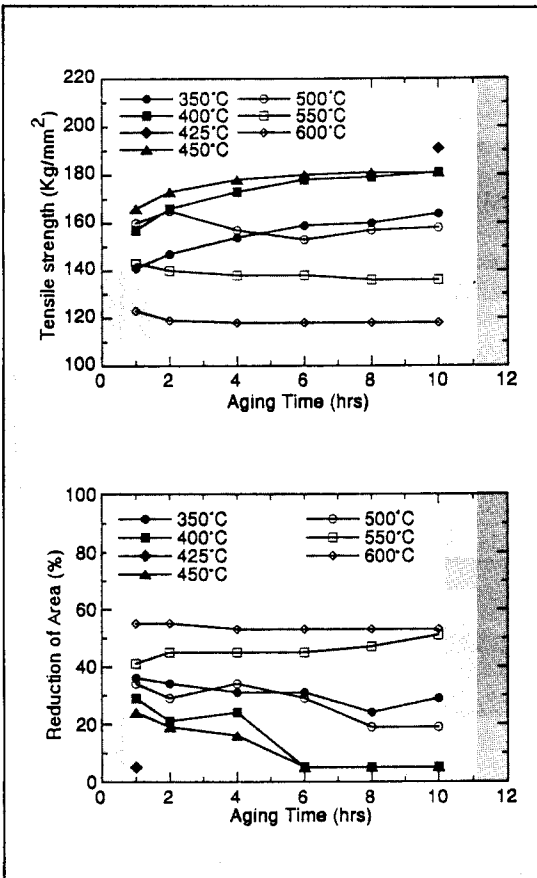


그림 4. $\Phi 6.4\text{mm} \rightarrow \Phi 3.5\text{mm}$ 신선 후 시효처리시 인장강도 및 단면감소율의 변화

6. 맺음말

종래에 있어서 티타늄 합금에 대한 연구개발은 주로 항공기 부품을 중심으로 이루어져 왔으나, 근래에 들어와 일반 산업용 소재로서 사용이 증대되고 있다. 이러한 현상을 기존의 강제 등에 비추어 보면 구조용재료로서의 대량 생산은 판, 봉, 선 및 관 등의 소형재의 형상이 주류를 이룰 것이다. 이는 각각의 용도와 특성의 다양성을 의미하며, 소형재에 따른 제조공정도 서로 다양할 것이다. 이 가운데서 선재는 냉간 인발이라는 공정이 필수적이나 티타늄 합금에 있어서는 결코 용이한 공정이 아니다. 따라서 현재까지 개발된 티타늄 합금 선재 제조기술과 더불어, 전술한 바와 같은 다음의 현안들이 극복되어야만 티타늄 합금 선재의 특성개선과 적용범위를 획기적으로 확대할 수 있다고 본다.

- 1) 냉간 가공성과 물성이 보다 우수한 새로운 티타늄 합금의 개발
- 2) 냉간 가공을 고려한 최적의 가공열처리 방안
- 3) 냉간 가공용 스웨이징 및 인발 다이스의 최적 설계기술
- 4) 냉간 인발을 위한 윤활피막 및 윤활재 개발
- 5) 생산원가 절감 방안

참고 문헌

- [1] 萩原好敏 ; (일본) 스프링기술연구회, 本田技術研究所, Ti에 관한 간담회자료(1990. 3) 21-26.
- [2] 轟明守行 ; 티타늄·지르코늄, Vol.38, No.2(1990) 123-125
- [3] 佐藤直邦 譯 ; 티타늄·지르코늄, Vol.42, No.2(1994) 90-93.
- [4] Paul J. Bania ; Recent development in low cost Titanium, TIMET report(1993)
- [5] 岡田稔, 外山和男, 市橋弘行 ; 住友金屬, Vol.41, No.2(1989) 63-68(1993. 8)
- [6] 이용태 외 24인 ; 자동차 엔진용 티타늄합금 부품개발(II), BSG016-1982-C(1994. 8)
- [7] 티탄의 가공기술, 日刊工業新聞社, 티타늄협회편 (1992) 175.

- [8] 戸梶恵郎, 小川武史, 大矢耕二; 材料, Vol.42, No. 473(1993) 169-175.
- [9] 石井仁, 江原隆一郎, 山田義和; 材料, Vol.42, No. 481(1993) 1218-1223.
- [10] 住友金屬工業(株); 일본 특허출원 昭 61-259416, 1986. 10. 30
- [11] 住友金屬工業(株); 일본 특허출원 昭 63-35523, 1988. 2. 18
- [12] 住友金屬工業(株); 일본 특허출원 昭 63-137082, 1988. 6. 3
- [13] 住友金屬工業(住); 일본 특허출원 昭 63-211757, 1988. 8. 26