

## 안경용 순티타늄 wire 제조 공정개발

최계훈<sup>1</sup>, 김상연<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>대구보건대학 안경광학과

### Development of Manufacturing Process of Pure Titanium Wire to make Eyewear Frame

Gye-hun Choi<sup>1</sup> and Sang-Yeoun Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Ophthalmic Optics, Daegu Health College

**요 약** 직경 400mm 순티타늄 잉고트(Gr2)를 제작하고 성분 분석한 결과 산소함량이 0.073wt%이고 철함량이 0.03wt%로서 ASTM Gr.2 규격을 만족하였다. 이들을 가공하여 42mm 선재를 만들고 18단 열간 압연하여 9mm 선재를 만들었다. 10단 열간 가공한 15.8mm 선재를 표면에서부터 중심부로 가면서 경도 분석한 결과 Hv150~200로써 거의 일정한 값을 나타내고 있었다. 최종 9mm 선재는 열간 압연기에 인입시 온도에 따라 항복강도와 연신율은 달랐지만 인장강도는 근사한 값을 나타내었으며 모두 ASTM B863규격을 만족하였다.

**Abstract** After pure titanium Ingot(G2) with 400mm in diameter was manufactured, the analysis of its ingredients showed that the oxygen content was 0.073wt% and the iron content was 0.03wt%, which made ASTM Gr.2 standardization satisfactory. The processed titanium ingot produced 42mm wire rod, and hot rolling of 18th phase produced 9mm wire rod. The hardness analysis of 15.8mm wire rod, which was processed in hot rolling of 10th phase from the surface to the center, resulted in almost constant value with Hv150~200. The last 9mm wire rod had a different yield strength and elongation percentage depending on the temperature as it was led in to a hot roller. However, tensile strength revealed an approximate value and made ASTM B863 standardization satisfactory.

**Key Words** : Titanium, Eyewear, Reversing, Mill;VAR;Hot Rolling

### 1. 서론

대구 지역은 전세계 4대 안경테 생산지 가운데 한 곳이다. 지난 50여 년 동안 안경테산업은 우리나라의 경제 발전과 더불어 꾸준히 성장 하여 왔다. 그러나 기술의 집약성이 떨어지고 노동집약형 산업구조를 탈피하지 못해 세계시장에서 경쟁력이 점점 떨어지고 있는 실정이다. 그 중 금속안경테 제조는 안경테 산업의 기본이 될 정도로 많은 안경업체가 참여해 있고 근래의 세계시장은 티타늄을 소재로 한 안경테가 고가로 유통되고 있는 실정이다. 이것은 티타늄 합금이 지닌 가볍고 내식성이 좋은 특성

이 안경테에 잘 적용된 예이다. 이와 같이 티타늄 및 티타늄합금은 국내 수요가 상당함에도 불구하고 용해/주조/단조/압연/압출 및 선재제조 기술에 대한 기반 및 생산체재가 이루어지지 않아 전량 수입에 의존하는 실정이다. 선진국에서는 이의 개발에 많은 연구와 투자가 이루어졌으나, 국내에서는 여기에 관련되는 기술적 문제, 투자비 문제 때문에 아직까지는 미개척 기술로 남아 있다. 단지, 실험실적 규모의 티타늄 연구가 전부가 할 수 있고, 이러한 실험실적 연구로는 티타늄 합금이 응용되는 분야의 기대에 부응시킬 수 없는 실정이다. 티타늄의 잉고트 제조를 위한 용해 및 재 용해 기술, 주조 응고에 대한 기반

본 연구를 위해 후원해준 대구광역시와 지역 안경업계, (재)한국안경산업지원센터, (주)KPC 및 대구보건대학 관계자 여러분께 감사드린다.

\*교신저자 : 김상연(sykim@dhc.ac.kr)

접수일 11년 01월 07일

수정일 11년 01월 31일

게재확정일 11년 03월 10일

기술을 축적하여 국내에서 제조된 티타늄 Bloom 및 Billet에서 분괴압연, 조압연, 사상압연의 공정을 거쳐 소구경의 Coil 및 Wire가 생산될 경우, 향후 산업전반에 대한 파급효과는 지대하다. 본 연구에서는 안정테제조용으로 많이 쓰이는 직경 1-3mm 선재를 개발하기 위한 중간 단계로 순티타늄 잉고트(직경 400mm, 1000kg)를 제작하고 가공하여 직경 9mm 선재를 만들어 그 특성을 연구하였다. 9mm 선재를 신선하여 가는 선재를 만드는 과정은 이미 국내 유수의 업체에서 외국산 중간재를 도입하여 어느 정도 가공기술이 개발되어 있는 상태이므로 본 연구에서는 직경 9mm 선재 개발에 중점을 두었다. 통상 티타늄 선재의 개발은 잉고트에서 여러 단계의 반복적인 가공공정을 거쳐 최종 선재로 개발되고 있으며 이러한 다수의 가공 공정은 생산비를 증가시키는 주된 요인이 되고 있으며, 이를 고려하여 본 연구에서는 다단 열간 압연기를 사용한 새로운 공정개발의 가능성도 검토하였다.

## 2. 본론

### 2.1 순수티타늄

순수티타늄은 강도와 연성에 미치는 효과와 불순물(우선적으로 산소)의 정도에 의해서 크게 4가지 종류의 ASTM 등급을 갖는다. ASTM 1 grade의 경우, 가장 높은 순도, 낮은 강도, 그리고 상온에서의 연성과 성형성이 탁월하다. ASTM 2의 경우, ASTM1과 같은 질소한계량(Max.0.03%), ASTM 3grade와 같은 철 한계량(Max.0.3%)과 함께 순수티타늄의 산소범위인 0.18~0.4%의 중간 값인 0.25%을 최대값으로 하는 산소량을 화학성분 범위로 한다. ASTM2 grade의 철과 산소량이 증가함에 따라, 강도는 상승하는 반면 연성과 부식저항성은 Grade1에 비해 떨어지는 성질을 갖고 있다. 또한, 30~40ppm의 수소는 수소취성을 초래하게 된다[1]. 상변태 측면에서, 순수티타늄은 882℃에서 동소변태(allotropic transformation)하여 상온에서 안정상인 HCP구조를 가지는 α상과 고온에서 안정상인 BCC구조를 가지는 β상으로 변태된다. 이러한 순수티타늄의 화학적인 성질과 기계적 성질 등을 고려하여, 안정테에 적합한 소재를 결정하여야 한다.[2] 금속조직학적으로, 순수티타늄의 경우, α조직을 나타내며, α상 결정립의 크기에 따라 제조특성이 다르게 나타나는데, 표 1에 미세조직의 영향을 나타내었다[3].

[표 1] 미세조직이 물리적 성질 특성에 미치는 영향[4]

Fine (미세화)	Coarse (조대화)	특성	충상조직	등축정조직
○	○	탄성계수	○	+/(texture)
+	-	강도	-	+
+	-	연성	-	+
-	+	파괴인성	+	-
+	-	피로파괴 Initiation	-	+
-	+	피로파괴 propagation	+	-
-	+	크립강도	+	-
+	-	초소성	-	+
+	-	산화거동	+	-

안경다리 등 부품용으로 많이 사용되는 ASTM Grade 2-Unalloyed titanium, standard oxygen 소재의 기계적 성질을 표 2에 나타냈다.

[표 2] ASTM Grade2-Unalloyed titanium, standard oxygen 소재의 기계적 성질

	Tensile Requirement		
	T.S(MPa)	Y.S(MPa), 0.2%offset	E.L
Min.	345	275	18
Max.	-	-	-

### 2.2 티타늄 잉고트 제조

고순도 티타늄 스폰지를 사용하여 안정용 순티타늄 잉고트를 VAR(Vacuum Arc Remelting) 장비를 사용하여 제조하였다. 그 방법은 1차 티타늄 스폰지를 1500ton 수압기로 압축하여 직경 150mm 길이 170mm 브라켓을 만든 후 이들을 여러 개 Ar 분위기에서 용접으로 연결하여 소모성 전극을 만들었다. 이를 냉각수가 흐르는 구리 크루시블 내에서 진공 방전시켜 잉고트를 제작하였다. 잉고트 제작과 관련한 VAR운용 조건은 잉고트의 품질을 좌우하는 중요한 요소이다. 통상 최소 인가전류가 3000A 이상이 되어야 용해가 가능하고 8000A, 50V정도에서 최적의 용해속도가 유지되며, 진공도는 용해 시작 시 10<sup>-3</sup>Torr 이나 용해가 진행되면 가스 등이 발생하여 10<sup>-2</sup>Torr로 떨어지고, 냉각수의 온도도 30-33℃내외로 운용하여야 한다[5].

활성금속인 티타늄의 경우, 산소와의 반응이 강하

로, 고진공의 환경의 유지가 필수적이며, 용해 중 편석을 없애기 위해 일정한 아크전압의 유지, 냉각수량/수압의 조정, 전류 등의 변수들을 조절하여 방향성응고를 유도하였다.

일차 용해(Single melting)된 잉고트를 용해과정에 유입된 불순물을 제거하고 품질을 높이기 위해 이차 용해(Double melting)를 실시하였다(그림 1). 제조된 잉고트는 습식분석 및 가스 분석한 결과를 표 3에 나타냈다.



[그림 1] Double Melted Gr2 Ingot (직경400mm, 1000kg)

[표 3] Gr.2 잉고트의 화학조성[wt.%]

	Fe (max.)	C (max.)	H(ppm) (max.)	O (max.)	N (max.)	Ti
ASTM Gr2	0.3	0.08	150	0.25	0.03	Bal.
VS101	0.03	0.008	10	0.073	0.004	Bal.

### 2.3 직경 42mm 선재 제조

제조된 잉고트를 Hydraulic Press를 이용하여 Break Down을 실시하였다. 단조온도를 700-950℃내에서 유지하면서 단조분괴하여 블룸을 제작하였다. 제작된 블룸을 2가지 방법으로(압연, 압출)가공하여 5중(압연 시편 2중, 압출 시편 3중)의 42mm 선재를 만들었다.

압출시편은 가열된 블룸을 그림 2의 수동식 압출 금형기의 실린더에 장입하여 열간압출시켜 가공 후 직경 42mm 선재를 압출하였다. 압출금형의 규격은 1270Wx 2000Hx1500L 이고 직경 20~70mm x L의 시편을 가공할 수 있다.



[그림 2] 티타늄선재 압출금형



[그림 3] Reversing Mill

압연시편은 대구보건대학교 (주)KPC가 함께 안경용 소재개발을 목표로 설치 운용중인 Reversing Mill을 사용하여 제작하였다(그림 3).

가공 후 시편을 표면산화를 최소화하기 위한 Ar분위기 가열로에서 538~816℃범위 내에서 2.5~5시간 소둔하였다[6].

티타늄은 열전도도가 낮기 때문에 표면부, 측면부의 온도강하가 크게 일어나면서, 변형저항의 증가로 최대압연능력을 초과할 위험이 있어, 최적온도범위에 근접한 온도에서 열간압연을 실시하였다. 후 공정으로, 절단 및 가공, 열처리에 의해 본 연구에서 필요로 하는 직경 42mm 선재를 제조하였다(그림 4).



[그림 4] 직경 42mm선재(Round Bar)

### 2.4 직경 9.0mm 선재 제조

직경42mm의 선재를 820℃ 가까이 가열 후, 고정된 gear ratio 및 RPM에 의해 최종적으로 9.0mm의 원형 선재가 만들어지도록 설계된 18단 압연기를 통해 열간압연을 실시하였다. 18단 압연기는 1차 10단 압연기를[7] 거치면 직경15.8mm 선재로 되고 2차 8단 압연기를 거치면 최종 직경 9mm 선재가 된다. 알루미늄과 스테인리스강을 통한 10단압연기와 8단압연기 사이의 압연속도의 연동가능성과 또한, 8단압연기에서 취출되어 나오는 선재를 코일형태로 감기위한 Coiler와의 연동을 수차례 시험을 실시하였다. 스테인리스강의 경우, 본 장비에 의한 높은 변형량과 변형속도에 의해 고온에서의 강도를 측정하고 티타늄 압연의 본 제작에 반영하였다. 티타늄의 경우, 열간 산화성이 매우 강하므로 표면에 Brittle한 α케이스 층의 형성은 선재의 품질에 영향을 미쳐, 생산원가 및 후공정으로의 연결에 차질을 미치게 된다. 대기 중에서 가열한 티타늄의 표면은 열간가공과정에서 scab, scratch 등의 표면결함을 유발시켰다. 가열시 표면 경화층의 존재는 롤러에 의한 압연 가공 시 불균일한 국부변형을 유발하면서 scab, scratch 등의 표면결함을 보이는 것으로 판단된다. 그림 5은 최종적으로 제조된 25kg의 티타늄 선재를 보여주고 있다.



[그림 5] 직경 9.0mm 티타늄 선재

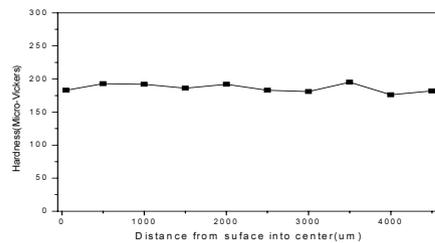
### 2.5 기계적 특성평가

15.8mm 선재의 기계적 특성을 시험해 본 결과 열간 압연재(42mm선재)가 열간 압출재(42mm)보다 항복강도에서 전반적으로 작은 값을 보였으나 모두 ASTM규격 조건인 275MPa 보다 큰 조건은 만족하였다. 이들은 42mm 선재를 만드는 방법이 다르므로 인한 미세조직에 의한 영향이 가공 후 15.8mm 선재의 항복강도에 영향을 미친 것이라 생각된다[표 4].

[표 4] 15.8mm 선재 기계적 물성치

	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	단면감소율 (%)	비고 (In-going Bar)
ASTM B863	≥275	≥345	≥18	-	-
측정값	408	529	30	55	압연재
	398	527	31	55	압연재
	443	538	32	55	압출재
	444	538	31	55	압출재
	447	541	34	55	압출재

선재 제조에는 열간압연공정이 열간압출공정보다 제조 효율성이 높다. 그래서 열간압연공정으로 제작한 15.8mm 선재의 경도를 표면에서부터 중심부로 가면서 수백μm간격으로 측정한 결과 Hv150~200에서 거의 일정한 값을 나타내고 있다[그림 6].

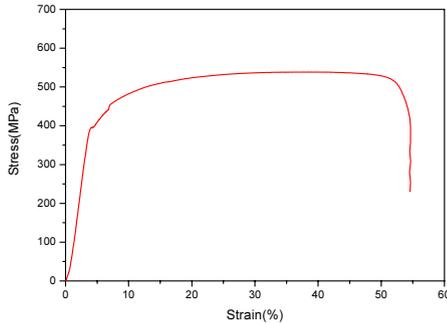


[그림 6] 15.8mm 선재의 경도값

이후 15.8mm선재를 8단 압연하여 9.0mm 선재를 제작하였고 Instron 만능시험기를 사용하여 1mm/min의 cross head speed로 인장시험 한 결과 그림 7과 같이 하부 항복강도와 상부 항복거동을 보이고 있으며, 인장강도인 539MPa 부근에서 파단이 일어나는 시점까지 일정한 변형거동을 보이고 있다. 9.0mm 선재의 특성 값을 보면, 모두 ASTM B683을 충족하고 있지만, 초기 인입시 가열온도조건에 의해 항복강도와 신율에 차이가 있음을 알 수 있었다. 열간압연기 인입시 가열 온도는 고온가열시 1000℃정도였고, 저온가열시 900℃정도였으며 높은 온도로 가열된 소재의 경우, 항복강도는 상대적으로 낮고 신율은 높은 값을 나타내었다. 또한, 외국산소재와 비교해 보면, 신율은 동일하지만, 강도는 상대적으로 높은 값을 나타내고 있다. 이런 결과들을 종합해보면, 동일 화학성분의 조건하에서도, 초기소재의 조직 및 압연된 소재의 열처리여부에 의해 다양한 값들을 발현할 수 있음을 알 수 있다 [표 5].

또한 본 연구에서 제작한 9mm의 선재의 기계적 특성

값인 강도가 수입소재보다 상대적으로 높기 때문에, 후 공정인 신선에도 큰 영향을 미칠 것이 예상된다.



[그림 7] 9mm 선재의 인장시 변형거동

[표 5] 9.0mm 선재 기계적 물성값

	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	단면감소율 (%)	비고
ASTM B863	≥275	≥345	≥18	-	-
측정값	391 410	538 539	35 25	-	1000℃가열 900℃가열
측정값	289	442	32	58	직경5.5mm (외국산소재)

### 3. 결론

직경 400mm 순티타늄 잉고트를 제작하고 가공하여 직경 9mm 선재를 개발하고 그 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제조한 400mm 순티타늄 잉고트는 산소함량이 0.073wt%이고 철함량이 0.03wt%로서 ASTM Gr.2 규격을 만족하는 고품질이었다.
2. 42mm 선재를 열간 압연시켜 제작한 시편보다 열간 압출하여 제작한 시편이 15.8mm 선재를 제작했을 때 항복강도가 작았다. 이것은 42mm 선재를 만드는 방법이 다름으로 인한 미세조직에 의한 영향이 가공 후 15.8mm 선재의 항복강도에 영향을 미친 것이라 생각 된다.
3. 열간압연공정으로 제작한 15.8mm 선재의 단면을 표면에서 부터 중심부로 가면서 경도 분석한 결과 Hv150~200로서 일정한 값을 나타내었다.

4. 최종 9mm 선재는 열간압연기 인입시 온도에 따라 항복강도와 연신율은 달랐지만 인장강도는 근사한 값을 나타내었으며 모두 ASTM B863 규격을 만족하였다.
5. 직경 400mm 잉고트에서 단조 및 18단 열간압연공정을 통해 직경 9.0mm 티타늄선재로 제작하는 새로운 제작공정을 개발하였다.

### 참고문헌

- [1] V. A. Joshi, Titanium Alloys, An Atlas of Structures and Fracture Features, p.9-11, Taylor & Francis (2006).
- [2] G. Lutjering, J. C. Williams, Titanium, p.21, Second Edition, Springer (2007).
- [3] Materials Properties Handbook Titanium Alloys, p.165-167
- [4] 열산화에 의한 티타늄의 발색효과, Journal of the Korean Institute of Surface Engineering V35. No.5. p.326, 2002
- [5] 진공아크용해법에 의한 티타늄 주조기술개발, 산업자원부, pp.66, 2002.
- [6] 이용태, 이종형, “타이타늄 가공기술”, 한국철강신문, pp.36, 2006.
- [7] Sang-Yeoun Kim, The Study on Titanium wire rod by Kocks Mill process, 대구보건대학 논문집, 2009, V29, No1, 192.

최계훈(Gye-Hun Choi)

[정회원]



- 1997년 2월 : 영남대학교 이과대학원(이학석사)
- 2000년 2월 : 영남대학교 이과대학원(박사 수료)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 대구보건대학 안경광학과 교수

<관심분야>  
안경테 금속 소재, 안경렌즈 설계

김 상 연(Sang-Yeoun Kim)

[정회원]



- 1977년 2월 : 경북대학교 문리대 물리학과(이학사)
- 1984년 8월 : 영남대학교 이과대학원(이학석사)
- 1989년 2월 : 영남대학교 이과대학원(이학박사)
- 1994년 4월 ~ 현재 : 대구보건대학 안경광학과 교수

<관심분야>

안경테 금속 소재, 안경렌즈