

생활소비재용 Gr.4 Ti판재 냉간압연 공정 개발

곽창섭, 이지훈, 김기홍, 김종국*, 최다니엘*
대구가톨릭대학교 패션테크산업연구센터, * 주식회사 삼신금속
e-mail: cskwak@cu.ac.kr

Development of Cold Rolling Process for Grade 4 Titanium Sheets for Consumer Products Applications

Chang-Sub Kwak
Fashion Tech Research Center, Daegu Catholic University

요약

본 연구에서는 생활소비재에 적용 가능한 Gr.4 Ti 판재의 냉간압연 공정기술을 개발하여 선진사 제품과 동등한 수준의 물리적 특성을 확보하고 상용화 가능성을 확인하고자 하였다. 우선 냉간압연 공정 개발을 위해 Ti 전용 워크를 3종을 제작하여 T.C Roll 기준에서 $0.052\mu\text{m}$ 급 조도를 획득하였으며 열처리 조건 최적화를 진행하였다. 이후 3.00mm급 열간압연 코일을 시작재로 하여 작업표준을 설계하고 0.8mm 및 0.6mm급 판재를 제작하여 목표 인장강도와 연신율을 달성하였다. 또한 제작된 판재를 이용하여 안경테를 제작하고 ISO 12870:2011 기준에 따른 치수 허용오차 시험을 통과함으로써 상용화 가능성을 입증하였다. 본 연구 결과는 국내 범용 압연설비를 활용한 Ti Gr.4 판재 생산이 가능함을 보여주며, 수입 의존적인 기능성 타이타늄 중간재의 국산화 및 생활소비재 산업 경쟁력 향상에 기여할 것으로 기대된다.

1. 서론

1.1 생활소비재용 Ti 소재와 산업 특징

국내 생활소비재용 타이타늄 중간재(선재, 판재 등) 시장은 안경테, 스포츠레저용품은 물론 임플란트, 인공관절 등으로의 사용 확대에 힘입어 1990년대부터 빠르게 증가하고 있다. 국내 기능성 타이타늄 중간재 시장 규모는 1990년 20억원에서 2005년 430억원으로 증가한 데 이어 2018년 1,225억원으로 2005년보다 3배 가까이 증가하는 등 규모역시 빠르게 성장하고 있다 [1-2].

하지만 국내의 경우 그 동안 기능성 타이타늄 중간재 원천기술은 물론 생산기술 부재로 국내 생산이 이루어지지 못하고 높은 가격으로 전량 수입에 의존하면서 기능성 타이타늄 중간재를 사용하는 생활소비재의 경쟁력 열세 및 산업발전 부진을 야기하고 있는 실정이다.

1.2 생활소비재용 Ti 소재 공급현황

국내 타이타늄 소재의 공급은 제련공정을 통해 생산된 스푼지(Sponge)를 전량수입하여 구조용, 기능성 타이타늄 소재 가공기업에서 잉곳/슬래브, 판/선재, 판재, 등을 제작하고 부품 및 제품의 공급망으로 이어지게 된다. 구조용 타이타늄 공급망은 국가기

반시설 등 필수적 요건에 의한 국가 및 대기업 투자로 생산공급 생태계를 유지하고 있으나 생활소비재 등에 적용가능한 기능성 타이타늄의 경우 수요 및 기술경쟁력 확보에 어려움을 겪어 대부분 수입에 의존하고 있다. [3]

1.3 연구범위와 방법

본 논문에서는 생활소비재에 적용가능한 Gr.4 Ti을 냉간압연하여 최종 양산 가능한 공정기술을 확보하고 ASTM에서 제시하는 기계적 성질 정보를 확인하고자 한다. 이후 제작된 판재를 생활소비재 중 안경테 공정에 적용하여 기존 공정하에서 제작성, 제작 후 오차 등을 파악하고자 하며 이를 통해 향후 국내 기능성 Ti 판재공급 가능성을 검토하고자 한다.

2. Ti 판재 압연 공정

2.1 주요 공정절차와 특징

판재 냉간제작의 일반적인 공정은 냉간 압연(Cold Rolling), 표면세척(Degrease line), 열처리(Bright Annealing), 형상 교정(Tension Levelling), 제품절단(Slitting)으로 구성되는데 소재의 특징에 따라 달라진다. 이중 중심이 되는 냉간압연의 경우 목표하는 판재의 특성 및 형상 조건을 달성하기 위하여 압하율,

Roll 구성, Taper량, 판재 장력 등을 조절하여 공정 및 조건을 구성한다.

특히 냉간압연시 소재의 물리적 성질에 따라 판재와 직접 접촉하는 압연에 직접적인 역할을 담당하는 워크롤(Workroll) 종류가 결정되면 이에 적합한 1ST/Roll, 2ND/Roll을 조합하여 압연 작업이 진행하며 워크롤의 표면거칠기에 따라 판재의 조도 특성을 변화시킬 수 있기 때문에 워크롤 가공 지식 종류 및 가공조건 개발이 필수적이다.

2.2 공정별 핵심 파라미터 분석

[표 1] 수집된 냉간압연 핵심 파라미터

구분	핵심 파라미터
냉간 압연	Line Length(m), Line speed(m/min), In Dia(mm), Out Dia(mm), Tension Max (kg), Weight coil(kg), Thickness(mm), Width(mm)
표면 세척	Line length(m), Line speed(m/min), Jog speed(m/min), In dia(mm), Out dia(mm), Weight coil(kg), Thickness(mm), Width(mm)
열처리	Line length(m), Line speed(m/min), Muffle length(m), In dia(mm), Out dia(mm), Tension(kg), POR/Tension(kg), Weight coil(kg), Thickness(mm), Width(mm)
형상 교정	Line length(m), Line speed(m/min), In dia(mm), Out dia(mm), Weight coil(kg), Thickness(mm), Width(mm)
제품절 단	Line length(m), Line speed(m/min), In dia(mm), Out dia(mm), Weight coil(kg), Thickness(mm), Width(mm)

수집된 주요 공정별 핵심 파라미터를 살펴보면 장비의 규격과 관련된 폭, 중량, 두께 등의 규격 정보를 공통적으로 갖고 있으며 라인 속도, 직경 정보는 생산속도 및 품질과 연결되는 공정에 존재하는 것을 확인할 수 있다.

한편 냉간압연의 경우 압연과정에서 파단 발생을 최소화 하기 위하여 최대 인장정보를 제어하고 있음을 알 수 있다.

3. Ti판재 냉간압연 공정 개발

앞서 설명한바와 같이 워크롤은 압연의 품질을 결정하는 중요한 부분으로 표면 품질이 우수한 Ti 판재 제조를 위해서는 Ti 전용 워크롤 개발이 필요하다. 이에 국산 CP-Ti Gr.2 원소재를 이용하여 기본압연을 위한 DICE(Cast Iron) Roll, Super H.S.S.(Super High Speed Steel) Roll, T.C(Textured Carbide) Roll 등 3종의 워크롤을 제작하였다.

제작된 워크롤의 품질을 확인하기 위해 압연 후 조도값을 테스트 하였으며 Dice roll은 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 의 조도값을 나타내었고 표면은 매우 거칠어 사용이 불가능한 정도로 확인되었으며 Super H.S.S. roll은 $0.15 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 의 양호한 표면 거칠상태를 나타내

었고, T.C roll은 $0.052 \mu\text{m}$ 로 가장 낮은 조도 확인 할 수 있었다. 특히 T.C roll은 3pass 이후에도 $0.052 \mu\text{m}$ 의 조도값을 확인할 수 있었다.

[표 2] Roll 성분 및 Pass 공증 후 연삭량 비교

구분	경도 (HRC)	조도 (1회, μm)	연삭량 (1회, μm)
Dice	60~63	$2 \sim 3$	60~70
Super H.S.S.	66~68	$0.15 \sim 0.3$	10~20
T. C.	72~74	0.052	5~10

3.2 열처리 조건 확보

순수 타이타늄의 재결정화는 HCP 구조 특성상 α 상에서 일어나는 650°C (923K)전후에서 발생한다. [4-5] 본 연구에서는 높은 냉간 가공도, 불순물(Fe, C, N, O) 정도 등을 고려하여 이보다 높은 $650 \sim 750^\circ\text{C}$ 에서 풀림이 일어날 것으로 판단하여 650°C , 670°C , 680°C 로 각각 온도조건을 설정하였다. 또한 4m/min 속도로 연속 열처리하고 판재 표면의 경도(Hv)를 측정하여 결과를 비교하였다.

[표 3] 열처리 조건에 따른 두께별 경도 차이 비교

두께 (mm)	폭 (mm)	경도 (Hv)	열처리 후 경도 (Hv)		
			650°C	670°C	680°C
0.8	2,740	333	296	284	265
0.6		342	306	291	277

테스트는 냉간압연된 Ti Gr.4 판재 0.8mm, 0.6mm 시편을 이용하였으며 표3과 같이 680°C 조건에서 열처리 전/후 경도 변화가 가장 큰 차이로 측정되었다.

3.3 작업표준 설계

본 연구에서는 열간압연된 3.0mm의 코일에서 최종 Ti Gr.4 0.8mm, 0.6mm 금 판재를 냉간압연하여 생활소비재 제작에 적용하고자 하였으며 이에 적합한 작업표준 설계가 필요하다.

한편 냉간압연 시 두께 감소가 클 경우 크랙과 가공경화가 쉽게 발생하므로, 압하량을 20% 이하로 구성하고 연성과 미세조직 안정화를 위해 열처리를 4pass마다 반영하였다.

여러번의 테스트를 통해 최종적으로 압연 작업 시 발생되는 압하 및 하중을 고려하여 3mm 두께에서 1.6mm 금 확보를 위해 4pass의 1차 압연을 진행하고 열처리 후 0.8mm 금 두께 확보를 위해 1.6mm 두께에서 0.8mm 금으로 4pass의 2차 압연을 진행하고 2차 열처리를 진행하였다. 또한 0.8mm 두께에서 2pass의 3차 압연을 통해 0.6mm 금 판재를 제작하는데 성공하였다.

[표 3] 연구된 Ti Gr.4 판재 작업표준

목표두께 (mm)	PASS	작업두께(mm)		압하량 (%)
		전	후	
1.6	1	3.0	2.6	13
	2	2.6	2.1	19
	3	2.1	1.8	14
	4	1.8	1.6	11
1차 열처리 (680°C)				
0.8	1	1.6	1.4	13
	2	1.4	1.2	14
	3	1.2	1.0	17
	4	1.0	0.8	20
2차 열처리 (680°C)				
0.6	1	0.8	0.7	13
	2	0.7	0.6	14

3.4 시험생산 및 평가

설계된 공정을 통해 냉간압연을 진행하였으며 형상 교정을 완료하였다. 최종적으로 Ti Gr.4 0.8mm 판재의 기계적 성질은 냉간(CSP)에서 인장강도 1023MPa, 연신율은 8.1%를 확인하였으며 열처리 후 Annealed 조건에서 연신율은 27%를 달성하였다. 또한 0.6mm 판재의 기계적 성질은 냉간에서 인장강도 1058MPa, 연신율은 7.1%를 확인하였으며 Annealed 조건에서 연신율은 27.5%를 확보하였다. 이는 ASTM B348/B265에서 제시하는 최소 인장강소와 연신율값 이상에 해당한다 할 수 있다.

[표 4] 제작된 Ti Gr.4 판재의 기계적 성질 (각 5장 평균)

두께 (mm)		인장강도 (MPa)		연신율(%)		탄성계수(GPa)	
목표	결과	YS	TS	CSP	Annealed	CSP	Annealed
0.8	0.79 6	890	102 3	8.1	27.0	99.6	110.3
0.6	0.59 0	900	105 8	7.1	27.5	99.5	107.5

4. 제품화 적용

제작된 Ti Gr.4 판재의 경우 열처리 후 연신율이 높아 가공성이 우수하고 높은 탄성계수로 변형 저항성 우수하여 안경테, 주방도구 등 다양한 생활소비재에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 안경테에 적용하여 활용 가능성을 확인하였다.

Gr.4 Ti 판재를 이용한 안경테 제작을 위해 우선 MCT 장비로 가공하여 립 외형을 형성하고, 가공 후 표면의 침 자국과 거칠기를 제거하고, 도금 전처리를 위한 미세 연마 및 브러싱 처리를 수행하였다. 이후 고정 지그를 통해 프론트와 헌지 부품을 정밀하게 위치시킨 후, TIG 방식의 저전류 국소 용접을 진행하고 엔드 피스 파트 밴딩을 통해 프론트와 템프간의 커브를 형성하고 귀 위치와 착용 각도 등을 고려한 인체공학적 곡률을 확보하였다.

그림1과 같이 제작된 Ti 안경테의 물리적 변형 정도를 파악하기 위해 ISO 12870 : 2011에 제시된 제작오차 시험을 진행하였으며 표4와 같이 기준값 이상을 확보하였다.

[표 4] 치수 허용오차 시험 결과

시험내용	기준 (mm)	허용오차 (mm)	측정 (mm)
렌즈 삽입부의 수평방향크기	오른쪽 왼쪽	52.20 52.20	± 0.5 ± 0.5
	—	20.70	± 0.5
좌우 렌즈간 거리	오른쪽 왼쪽	140.00 140.00	± 2.0 ± 2.0
	—	139.97 139.99	—



[그림 1] 제작된 Ti Gr.4 기반 안경테 샘플

5. 결론 및 시사점

본 연구는 생활소비재용 Ti Gr.4 판재 냉간압연 공정 기술을 확보하는데 목적이 있으며 제품에 적용하여 상용화 가능성을 파악하는데 의미가 있다. 이에 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 국내 냉간압연 전문기업의 범용 압연설비를 활용한 Ti Gr.4 0.6mm급 판재의 생산이 가능하며 기계적 성질과 가공 특성에서도 기준 선진사 등에 대비 유사동등 수준이 가능하다는 점이다. 물론 단일 기업대상으로 한 소량의 시험생산이지만 양산장비를 활용한 공정개발과 시험생산이라는 점에서 의미가 있다.

둘째, 국내의 경우 포스코 등에서 양산중인 CP-Ti의 경우 Gr.1~2의 순수타이타늄 생산에 집중하고 있어 Gr.4 및 Ti 합금 대다수는 선진사 및 중국 등으로부터의 수입에 의존하고 있다. 이에 본 연구가 국내 제작과 공급망 확보라는 측면과 기능성 타이타늄 시장 확대를 위한 다양성 확보 노력이 산업계에 의미를 제시한다 할 수 있다.

한편 본 연구에서는 생활소비재 시장 중 안경테에만 적용하는 등 상용화 품목에서의 한계점, Ti Gr.4 판재라는 소재와 규격적 한계점이 존재하여 추후 주방도구, 스포츠 용품 등 다양한 품목으로의 적용 가능성, 합금과 선재 등의 소재와 규격적 다양성을 확보하기 위한 추가적인 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

- [1] Roskill Information Services, Titanium Metal : Global

- Industry Markets and Outlooks to 2021, 2020
- [2] 한국무역협회, 국내 기능성 타이타늄 중간재 시장 현황, 2019
- [3] 정준우, 경상북도 타이타늄산업 발전 방안, 대구경북연구원, 2016
- [4] Baohui Zhu, Effect of Cold Deformation on Microstructure and Mechanical Behavior of Commercially Pure Grade 4 Titanium Strip, MDPI metals 2022, 12, 1166, <https://doi.org/10.3390/met12071166>
- [5] Xing Yu Sun, Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Commercially Pure Titanium Sheets after Thermomechanical Treatment with Cold Rolling and Annealing, Adv. Eng. Mater. 2025, 2500920, DOI: 10.1002/adem.202500920