[논문] 열처리공학회지, 제32권 제3호(2019) J. of the Korean Society for Heat Treatment. https://doi.org/10.12656/jksht.2019.32.3.1

순수 타이타늄의 기계적 특성에 미치는 마찰 교반 용접 공정 조건의 영향

이용재*·최안드레*·이승준**·Hidetoshi Fujii**·신세은*[†]·이동근* *순천대학교 신소재공학과, **오사카대학교 용접접합연구소

Microstructure and Mechanical Properties of Pure Titanium Processed using Friction Stir Welding

Y. J. Lee*, A. Choi*, S. -J. Lee**, H. Fujii**, S. E. Shin*^{,†}, D. G. Lee*

*Materials Science and Metallurgical Engineering, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea **Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan

Abstract Friction stir welding is one of the interesting welding methods for titanium and its alloy which proceeds with plastic flow due to thermo-mechanical stirring and friction heat. Solid-state welding can solve severe problems such as high-temperature oxidation, interstitial oxygen diffusion and grain coarsening by liquid-state welding. Dynamic recrystallization and grain refinement can vary significantly with the plunging load and rotational speed of tool during friction stir welding, and suitable process conditions must be optimized to obtain microstructure and better mechanical characteristics. Suitable FSW conditions were 1000 kg of plunging load and 200 rpm of rotational speed and it showed YS 270 MPa, UTS 332.1 MPa, and El 17.3%, which were very similar to those of wrought titanium sheet.

(Received May 10, 2019; Revised May 17, 2019; Accepted May 24, 2019)

Key words : Titanium, Friction Stir Welding, Plunging load, Rotation speed

1. 서 론

타이타늄과 타이타늄 합금은 높은 비강도와 내식성 및 넓은 온도범위에서 우수한 기계적 특성 때문에 항공 우주 산업, 해양구조물, 화학공업, 생체재료 등 에서 매우 다양하게 적용되고 있다. 순수 타이타늄은 ASTM 규격에 따라 grade 1~4로 나눠지며 실온에 서 조밀육방격자(HCP)의 α상으로 존재하나 882°C 에서 동소변태점이 있어 그 이상의 온도에서는 체심 입방격자(BCC)의 β상으로 변화한다[1-6].

타이타늄 및 그 합금 소재는 낮은 열전도성 및 높 은 산화성으로 인해 결정립 조대화, 고온 산화 등의 문제점이 발생하고 용접부와 열영향부의 기계적 물성 을 저하시킨다[7]. 또한, 고온에서의 용접 시 산소 등 침입형 원소에 의해 기계적 특성이 급격히 낮아 지므로, 이를 억제하기 위해 진공 또는 비활성 분위

기하에서 액상용접을 실시한다. 액상 용접 시 공정비 용 증가와 용접부의 물성 저하 문제를 해결하기 위 한 방법으로 고상접합의 일종인 마찰 교반 용접 (FSW; Friction Stir Weld)을 타이타늄 판재에 적용 하는 것이 유리할 수 있다. 마찰 교반 용접은 1991 년부터 개발되어 적용되어 왔으며 Al, Mg 등 저용 융 재료에서 자주 사용되어 왔다. 최근에 고용융 재 료에 요구되는 tool의 개발로 Ti, Ni와 같은 고용융 금속에도 적용이 되기 시작하면서 Ti와 그 합금들 의 마찰 교반 용접 용접에 대한 연구가 진행되고 있다[8]. 마찰 교반 용접 tool에 의한 마찰 및 마찰 열로 인해 소성유동으로 용접이 진행되고 용접열이 변태점 이하의 온도에서 결정립 미세화와 활성가스의 침입 및 산화를 억제할 수 있어 기계적 특성향상을 기대할 수 있다. 또한 마찰 교반 용접 시 극심한 소성변형으로 인하여 결정립 내에 변형에너지가 쌓이

[†]Corresponding author. E-mail : shinsen@scnu.ac.kr Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

_	Samples	FSW Condition			
		Plunging load (kg)	Rotation speed (rpm)	Traveling speed (mm/min)	
_	Sample 1	1000	200	100	
-	Sample 2	1000	400	100	
-	Sample 3	2000	200	100	

Table 1. FSW conditions of different samples

게 되고 이러한 변형에너지가 구동력이 되어 동적 재 결정이 일어나 용접부의 강도를 강화시킬 수 있다[9]. 따라서 본 논문에서는 순수 타이타늄 판재를 마찰 교반 용접하였을 때 tool의 회전속도와 가압 하중의 변화에 따라 미세조직이 어떻게 변하는지 관찰하였고 미세조직의 변화가 기계적 특성에 어떤 영향을 미치 는지에 대해 알아보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 마찰 교반 용접

본 연구에서는 순수 α-Ti의 마찰 교반 용접 조건 에 따른 미세구조 및 기계적 성질을 확인하고자 ASTM Grade 2의 2 mm의 판재를 사용하였다. α-Ti의 마찰 교반 용접을 용접속도 100 mm/min 로 동일하게 하고, 회전속도와 하중에 차이를 3가지로 나누어 각각 진행하였고, 공정 조건은 Table 1과 같 다. 용접속도는 100 mm/min으로 동일하게 진행하였 다. Fig. 1은 마찰 교반 용접의 공구(tool), 용접재, 전진각 및 용접방향 등의 도식화 그림이다. 여기서 마찰 교반 용접용 공구는 12 mm의 어깨치수와 4 mm의 직경을 가지는 탄화 텅스텐(WC : tungsten carbide)이며 선반에 클램프로 샘플을 고정하고 장착 된 공구는 3°의 전진각으로 회전방향은 용접방향의 반대방향인 반시계방향으로 시행하였다.

2.2 조직 관찰 및 기계적 특성 분석

Gr.2 Ti의 마찰 교반 용접조건에 따른 미세조직의 변화를 관찰하기 위해 용접부의 횡단면을 $1 \mu m$ 까지 정밀연마를 수행하고, 5 ml의 질산(HNO₃), 2 ml의 불산(HF)를 100ml의 증류수(H₂O)를 혼합한 에칭액 을 사용하여 에칭한 후, 광학현미경(Optical Microscope, OM, BX53M, Olympus, Japan)과 주 사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM,



Fig. 1. Schematic image of FSW process.

JSM-7001F, JEOL, Japan)을 이용하여 미세조직을 관찰하였다. 용접부는 모재(Base Metal, BM), 열 영향부(Heat Affected Zone, HAZ), 열 기계적영향 부(Thermal-Mechanical Affected Zone, TMAZ), 교반부(Stir Zone, SZ)으로 각각 구분하였다.

미세조직의 변화가 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 마찰 교반 용접한 Gr.2 판재를 길이 와 폭을 48 × 3 mm, 표점거리 20 mm의 판상형 인 장시험편을 정밀 가공하여 제작하여 유압식 만능재료 시험기(DSCK, Ssaul Bestech, Korea)를 이용하여 초기변형률 0.04 mm/min 인장시험을 수행하였으며 Fig. 1에 인장시험편의 치수와 교반부의 위치에 맞는 시편의 가공 부위를 나타내었다. 경도시험은 Vickers hardness test(HM-200, Mitutoyo, Japan)를 이용하 여 모재, 열 영향부, 열 기계적영향부 및 교반부로 영역을 나누어 하중 1 kgf 으로 15초 동안 측정하였 다. 또한, 시험편에서 소성변형이 집중되는 곳을 인 장시험과 실시간으로 이미지 분석을 수행하기 위해 디지털 이미지 상관관계(Digital Image Correlation, DIC, Mercury RT, Sobriety, Chezh)를 이용하여 변위 및 변형률을 전 영역에 걸쳐 관찰하고, 국부영 역에서 다시 이미지정보를 분석하여 소성변형에 따른 이미지 상관관계를 분석하였다.



Fig. 2. OM images of the welded joint for each samples; (a), (b) Sample 1, (c), (d) Sample 2, and (e), (f) Sample 3. (a), (c), (e) BM, and (b), (d), (f) TMAZ of the samples.

3. 실험결과 및 고찰

순수 타이타늄 소재(Gr.2)는 HCP 결정구조를 갖 으며 열전도도가 철강소재의 약 1/4로 매우 낮으므 로, 마찰 교반 용접 시 열의 방출이 느려 마찰에 의한 국부적 열축적이 철강소재에 비해 매우 높은 편이다. 이에 Sample 1~Sample 3 소재의 교반부 와 열 기계적영향부의 미세조직을 OM과 SEM으로 관찰하여 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 세 가지 시편 모두에서 tool의 마찰교반에 의해 열 기 계적영향부의 미세조직이 모재의 조직에 비해 연신된 결정립 형상으로 변형되어 있는 것을 관찰할 수 있 다(Fig. 2). Fig. 3(a)는 가장 낮은 히중(1000 kg)과 200 rpm의 회전속도로 마찰 교반한 Sample 1의 소 성 변형된 미세조직을 나타내고 있다. Sample 2의 교반부 는 Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 작은 크기의 결정립들이 다수 분포하는데, 이것은 마찰교반 시 발 생하는 마찰열에 의한 동적 재결정에 의한 것이다 [8]. Fig. 3(c)는 미세한 마르텐사이트 조직을 보이는 교반부의 미세조직으로, 2000 kg의 높은 가압하중으 로 인해 국부적 열 축적이 매우 높아 교반부의 온 도가 급상승한 후 급냉이 되므로 마르텐사이트 조직 을 갖게 된다.

Fig. 4는 Sample 1~Sample 3 소재의 마찰 교반 영역을 수직으로 절단한 단면의 비커스 경도분포를 나타낸 것으로, 마찰 교반 용접에 의한 접합부는 tool의 회전방향과 진행방향에 의하여 전진측 (advancing side, AS)과 후진측(retreating side,



Fig. 3. SEM images of the SZ region for each samples; (a) Sample 1, (b) Sample 2, and (c) Sample 3.

RS)이 다른 재료유동 및 열이력이 발생하는데, AS영 역이 재료유동성 및 기계적 특성에서 RS보다 우수 한 결과를 보인다고 일반적으로 보고되고 있으며, 본 실험 결과도 마찬가지로 3가지 샘플에 대하여 AS영 역의 경도가 RS영역보다 다소 높은 값을 나타내었 다[10]. 1000 kg-200 rpm 조건의 Sample 1의 경우, AS영역의 심한 소성 변형과 그에 따른 높은 마찰열 로 인해 동적재결정현상이 발생하여 Fig. 3(a)에서 관찰되듯이 작은 결정립 크기를 갖는 미세조직으로 인해 높은 경도값을 보인다[11]. 1000 kg-400 rpm 조건의 Sample 2의 경우, 빠른 회전속도로 인해 Sample 1보다 높은 마찰열이 발생되므로 동적재결정 후 일부 결정립 성장 이 이루어져 미세한 결정립과



Fig. 4. Vickers hardness profiles on the cross-section of the welded zone according to welding conditions.

조대한 결정립이 혼재된 미세조직을 나타낸다. 이로 인해, Sample 2보다 낮은 비커스 경도값을 갖게 된 다(Fig. 3(b)). 동적재결정 및 결정립성장으로 인해 RS와 AS 전 영역에 걸쳐 Sample 1보다 낮은 비커 스경도특성을 나타내었다. 2000 kg-200 rpm 조건의 Sample 3의 경우는 가장 높은 가압하중으로 인해 극심한 소성 변형과 그에 따른 마찰열로 인해 교반 부의 온도가 매우 상승하고, 그 후 급냉으로 인해 마르텐사이트 변태가 발생하게 되고, 따라서, 경도가 다른 조건의 샘플보다 훨씬 높은 값을 갖게 된다 (Fig. 3(c)). 동적 재결정은 마찰 교반 용접 시 소성 변형이 증가할수록 전위와 같은 결함의 수가 증가하 고 에너지의 양도 증가하는데 충분한 온도가 동반될 시 전위들이 충분히 확산하여 정상적인 새로운 입자 의 핵이 생성된다. 이때 생성된 입자가 찌그러진 조 직 속에서 성장하여 조직 전체가 새로운 조직으로 바뀌는 현상을 뜻한다. 선행 논문에 따르면 공정 조 건에 따라 입열량이 885°C까지 오르는 것을 확인할 수 있었다[12]. 이러한 이유로 Sample 3은 높은 하 중으로 인한 마찰열로 인해 빠른 냉각속도를 가져 그 과정에 마르텐사이트가 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. Sample 1과 Sample 2에서는 동적재결정이 일어났지만 tool의 회전 속도가 더 빠른 Sample 2 가 재결정이 일어난 후 결정립이 더 성장한 것을 확인할 수 있었다. 모든 마찰교반 공정 조건의 샘플 에서 교반부에서의 비커스경도 값이 가장 높은 경향 을 나타내었으며, 열 기계적영향부 및 열 영향부에

Samples	Tensile properties			
Samples	UTS (MPa)	YS (MPa)	El (%)	
Sample 1	332.1	270.0	17.3	
Sample 2	275.1	246.0	13.3	
Sample 3	340.0	294.0	4.9	

Table 2. Tensile properties of the FSWed samples



Fig. 5. Fractography of the FSWed samples after tensile test; (a)-(c) Sample 1, (d)-(f) Sample 2, and (g)-(i) Sample 3.

가까울수록 비커스경도 값이 감소하는 경향을 나타내 었다.

각 마찰교반 공정 조건에 따른 모든 샘플의 상온 인장특성을 평가한 결과를 Table 2에 나타내었다. Sample 1~Sample 3의 항복강도(yield strength, YS)는 각각 270 MPa, 246 MPa, 294 MPa으로 Sample 1에 비해 Sample 2가 낮은 항복강도값을 나타내는데, 이것은 앞서 설명한 바와 같이 동적재결 정 후 결정립성장에 의한 결정립조대화로 Hall-Petch 식에 따라 항복강도가 감소하였기 때문이다. 동일한 이유로 연신율(elongation)의 경우도 Sample 2가 Sample 1보다 낮은 13.3%를 갖게 되며, Sample 3의 경우 급냉으로 인한 마르텐사이트 조직 을 갖게 됨으로써 4.9%의 가장 낮은 연신율을 나타 내었다. ASTM F67의 규격에 따르면 용접하지 않 은 일반 Gr.2 판재의 항복강도, 인장강도, 연신율은 각각 275 MPa, 345 MPa, 20%으로, Table 2의 마 찰 교반 용접한 Sample 1 특성과 유사하여 매우 우수한 마찰 교반 용접 특성을 갖는 것을 알 수 있 었다. 각 샘플의 인장파면을 관찰한 결과, Sample 1과 Sample 2는 dimple 형상을 갖는 전형적인 연 성파괴특성을 보이나, Sample 3의 경우는 마르텐사



Fig. 6. Observation of DIC during tensile testing of the FSWed samples.

이트 조직의 영향으로 cleavage 형상의 취성파괴 양 상을 보이고 있다. 이러한 경향은 인장시험 시 Sample 3이 가장 낮은 연신율을 갖는 것과 일치하 는 결과이다. Sample 1과 Sample 3은 동일한 회 전속도(200 rpm)의 조건하에서 가압 하중을 1000 kg에서 2000 kg으로 증가시킨 경우로, 가압하중의 증가로 인해 인장특성이 크게 변화하는 것을 알 수 있었다.

모든 마찰교반 공정 조건에 대해 인장시험 시 RS 영역에서 파단이 일어나는 것을 알 수 있는데, 이를 확인하기 위해 DIC 분석을 이용하여 인장시험과 실 시간으로 소성변형 여부를 이미지분석을 실시하여 Fig. 6에 나타내었다. 대표적으로 소성 변형이 나타 나는 구간을 항복, 네킹, 파괴 시점으로 구분하여 각 시점에서 국부영역의 이미지정보를 고해상도로 집중 분석하였다. 그 결과, Fig. 6에 나타낸 모식도와 같 이, RS영역에서 소성변형이 집중되어 항복현상과 네 킹이 이 영역에서 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 인장파단이 경도가 가장 높은 교반부가 아닌 RS영 역에서 최종적으로 발생하는 것을 DIC분석을 통해 확인할 수 있었다.

순수 타이타늄의 마찰교반 용접 판재의 상온 인장 시험 시 RS 영역에서 네킹과 파괴가 일어나는 현상 은 앞서 미세조직 및 경도 분석을 통해 알 수 있듯 이, RS 영역의 미세조직이 AS영역보다 조대하고 상 대적으로 덜한 소성변형으로 인해, 항복현상 및 네킹 이 우선적으로 발생하게 되어 최종파괴가 발생하는 것이다.

4. 결 론

순수 타이타늄 Gr.2 판재를 가압하중 및 tool의 회전 속도를 다르게 마찰 교반 용접한 후, 미세조직 변화와 기계적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결 론을 얻을 수 있었다.

1. 타이타늄 판재를 마찰 교반 용접법을 이용하여 성공적으로 접합할 수 있었으며, Sample 1의 인장 특성의 경우 용접하지 않은 판재와 거의 유사한 특 성을 나타내었다.

2. 마찰 교반 용접 공정 조건 중에서, tool의 회전 속도 보다 가압 하중이 교반 용접에 미치는 영향이 더욱 큰 것을 확인할 수 있었으며, 가압 하중이 1000 kg에서 2000 kg으로 2배 증가함에 따라 높은 마찰열과 급냉으로 인한 마르텐사이트 조직의 형성으 로 높은 경도 향상과 벽개파괴 현상이 발생하였다.

3. Tool의 회전속도와 가압 하중의 적절한 조합을 통해 타이타늄의 마찰 교반 용접 조건을 최적화할 수 있었으며, 1000 kg-200 rpm이 적정 조건임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 순천대학교 학술연구비(학술기

반조성사업 II)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- 1. 강덕수, 이광진 : 대한용접접합학회지, 33 (2015) 1-7.
- S. Mironov, Y. S. Sato and H. Kokawa : Acta Mater. 57 (2009) 4519-4528.
- 천창근, 김성욱, 김홍주, 장웅성, 노중석 : 대한용접접 학학회지, 31 (2013) 16-20.
- F. C. Liu, J. Liao, Y. Gao and K. Nakata : J. Alloys Compd, 626 (2015) 304-308.
- 5. 윤창석, 박양균, 이형욱, 이동근 : 열처리공학회지, 32 (2019) 68-73.

- 윤창석, 박양균, 김종형, 이수창, 이동근 : 열처리공학 회지, 30 (2017) 279-284.
- Z. Yang, B. Qi, B. Cong, F. Liu and M. Yang : J. Mater. Process. Technol. 216 (2015) 35-47.
- N. Xu, Q. Song, Y. Bao, Y. Jiang, J. Shen and X. Cao : Sci. Technol. Weld. Joining, 22 (2017) 610-616.
- W. B. Lee, C. Y. Lee, W. S. Chang, Y. M. Yeon and S. B. Jung : Mater. Lett. 59 (2005) 3315-3318.
- H. Choi, S. Hong, J. Roh, H. Choi, S. Kang, R ussell J. Steel and H. Han : Acta Mater. 61 (2013) 2649-2661.
- 11. Y. Zhang, Y. S. Sato, H. Kokawa, S. H. C. Park and S. Hirano : Mater. Sci. Eng. A, **488** (2008) 25-30.
- L. H. Wu, D. Wang, B. L. Xiao and Z. Y. Ma : Scripta Mater, 78 (2014) 17-20.