

타이타늄 소재 마찰교반용접 기술 동향

천창근^{*,†} · 김성욱^{*} · 김홍주^{*} · 장웅성^{*} · 노중석^{**}

^{*}포항산업과학연구원과

^{**}(주)태광테크

Recent Trends of Friction Stir Welding of Titanium

Chang-Keun Chun^{*,†}, Sung-Wook Kim^{*}, Heung-Joo Kim^{*}, Woong-seong Chang^{*} and Joong-suk Noh^{***}

^{*}Research Institute of Industrial Science & Technology

^{**}R&D center, Taekwang Tech Co., LTD

[†]Corresponding author : ckchun@rist.re.kr

Abstract

Titanium and its alloys have been widely using in the various field of industry application due to high corrosion resistant properties and mechanical properties. Titanium is highly reactive in the high temperature state and the formation of titanium oxide and porosities in the nuggets of fusion welding will results in the degradation of the mechanical properties. For this reason the studies of friction stir welding for titanium have been investigated recently. The FSW zones of titanium were classified by the weld nugget (WN), the linear transition boundary (TB) and the heat affected zone (HAZ). The WN along with titanium parent was characterized by the presence of twins and dislocations. The average grain size and hardness of WN has been changed according to heat input. The grain refinement resulted from the FSW increased the hardness in the stir zone. Sound dissimilar joints between SUS 304 and CP-Ti were achieved using an advancing speed of 50 mm/min and rotation speeds in the range of 700-1100 rpm. Aluminum 1060 and titanium alloy Ti-6Al-4V plates were lap joined by friction stir welding, hence the ultimate tensile shear strength of joint reached 100% of Al 1060. Mg alloy and Ti were successfully butt joined by inserting a probe into the Mg alloy plate with slightly offsetting. But Ti-Al intermetallic compound layers formed at the interface of these joints.

Key Words : Titanium alloys, Friction stir welding, Dissimilar welding

1. 서 론

최근 타이타늄 소재는 우수한 내식성과 기계적인 물성 때문에 다양한 산업분야에 적용이 확대되고 있다. Grade 1, 2 순 타이타늄은 우수한 내식성과 연성으로 인하여 발전소나 선박 등의 열교환기나 반응용기 등으로 사용되며 Grade 5와 같은 고강도 타이타늄 합금은 항공기 등의 부품제조에 적용되고 있다. 타이타늄의 용점은 약 1,670도, 밀도는 4.51g/cm³로서 합금원소 및 구성조직에 따라 순수 타이타늄, α형 합금, 준안정 α형 합금, α+β형 합금, 준안정 β형 합금, β형 합금으로 나눌 수 있으며 Ti-6Al-4V합금이 대표적인 α+β형 합금

으로 구조용 소재로 가장 많이 사용되고 있다. 합금에 따라 인장강도는 245~800 MPa, 연신율은 10~40% 까지 다양하다¹⁾.

타이타늄 및 타이타늄 합금의 용접성을 살펴보면 아크용접, 플라즈마용접, 레이저 및 전자빔용접과 같은 용융용접을 모두 적용할 수 있으나 다만 대기 중 고온에서 용접을 실시할 경우 비활성가스로 차폐를 실시하여야 한다. 만약 불완전한 차폐가 이루어지면 접합 후 금속표면에 금색, 주홍색, 청색 등 무지개 빛을 띠며 완전한 차폐가 이루어지면 깨끗한 은백색을 띤다. 인서트 메탈을 이용하는 브레이징 적용 시 진공로에서 Ag-Al-Ti계 인서트재를 주로 이용하며 진공 챔버에서 용접

을 실시하는 전자빔 용접은 타이타늄 소재 용접에 가장 이상적인 공정으로 알려져 있다. 현재 두께 5mm 이상 정밀 부품의 제조는 대부분 전자빔으로 용접한다^{1,2)}.

본 특집호에서는 비교적 최근에 개발된 고상용접인 마찰교반용접을 타이타늄 및 타이타늄 합금에 적용할 때 필요한 불활성 가스 차폐기술과 마찰교반용접 틀 소재 기술개발 동향, 타이타늄 동종 또는 다른 소재와의 이종용접을 실시하였을 때 접합부의 조직 및 기계적인 물성 등 종합적인 접합성능에 대하여 알아보려고 한다.

2. 용접부 차폐

일반적으로 타이타늄은 활성이 큰 금속으로 산소, 수소, 질소 등과 친화력이 매우 강하므로 타이타늄을 용접할 때는 대기와 차단된 진공 분위기 또는 불활성 분위기에서 이루어져야 한다. 마찰교반용접이 고상접합이긴 하지만 용접을 실시할 때 상당한 열이 발생되며 틀 적하에는 약 1,000도 이상 온도가 상승할 수 있으므로 용접부가 대기와 노출되지 않도록 지속적인 아르곤 주입이 필요하다. 대기와 완전한 차폐가 이루어지지 못하면 마찰교반용접부 표면의 색깔이 변색되며 차폐가 완전하면 깨끗한 비드 사이로 은백색이 보여진다. 한편 마찰교반용접 공정은 틀과 소재의 기계적인 마찰을 통하여 용접을 실시하는 데 이때 용접부가 공기에 노출되지 않기 위하여 일반적인 노즐을 통하여 불활성가스를 분사하면 용접 시 발생하는 버르(burr)에 불이 붙어 화재의 위험이 있다. 따라서 타이타늄 마찰교반용접을 실시할 때 Fig. 1과 같이 용접부와 틀을 대기와 완전히 차폐할 수 있는 방안이 필요하다.

3. 마찰교반 용접 틀

타이타늄과 같은 고융점 소재를 마찰교반용접하기 위한 틀의 조건은 고강도, 내마모성, 고인성 등을 만족하

여야 하며 이와 같은 소재로는 미국 Megastir사에서 판매하고 있는 PCBN(poly-crystalline cubic boron nitride)이나 일본의 Furuya사에서 제조하는 이리듐 합금 등이 대표적이다. 하지만 이러한 소재는 강도 또는 인성은 우수하나 가격적인 측면에서 실용성이 떨어지기 때문에 비교적 경제적이면서 구입하기 쉬운 티타늄 카바이드 합금(TiC alloy)이나 텅스텐 중합금(W-Ni-Fe alloy), 초경소재 (W-Co alloy) 등을 사용하여 마찰교반용접 틀을 제작한다. 티타늄 카바이드 합금은 TiC 분말을 진공로에서 소결한 후 HIP(hot isostatic pressing) 처리과정을 통하여 제작하는 것으로 열처리 전후 치수안정성이 확보되며 기지합금 성분을 변화시켜 인성, 내열성, 내식성, 내충격성이 우수한 장점을 가진 소재이다. 텅스텐 중합금(W-Ni-Fe alloy) 소재는 니켈 함유를 통하여 초고인성과 초내열성을 확보하고 단조 공정과 다단계 열처리를 통한 결정립 미세화로 고강도를 확보하는 소재이며, 초경소재(WC-Co alloy)는 용해/주조법과 분말야금법으로 제조할 수 있으나 균질한 상 분포와 미세한 결정립을 얻을 수 있도록 진공소결이나 HIP을 이용한 분말야금법이 주로 사용된다. 하지만 이러한 특성들을 가진 소재들도 타이타늄 소재를 마찰교반용접하기에는 고온 내마모성이 부족하여 장거리 용접에 사용하지 못하는 실정이다.

따라서 최근에는 CFSW(China Friction Stir Welding)나 TWI(The Welding Institute), EWI(The Edison Welding Institute) 등에서는 텅스텐-레늄 합금을 이용하여 마찰교반용접 틀을 제조하는 연구를 시도하여 두께 2mm 타이타늄 판재를 한번에 약 4m 정도 용접한다고 보고하고 있다. 국내 연구기관에서는 Fig. 2와 같이 분체 입자간 틈새에 펄스 전류를 투입하여 방전 플라즈마를 발생시켜 에너지를 열확산 및 전계 확산으로 소결 하는 SPS (spark plasma sintering) 공정을 이용하여 코발트가 없는 텅스텐-카바이드 소재를 제조하여 틀의 내마모성 향상에 관한 연구를 진행하고 있

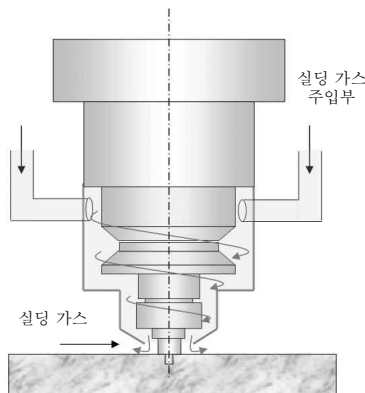


Fig. 1 Concept of shielding

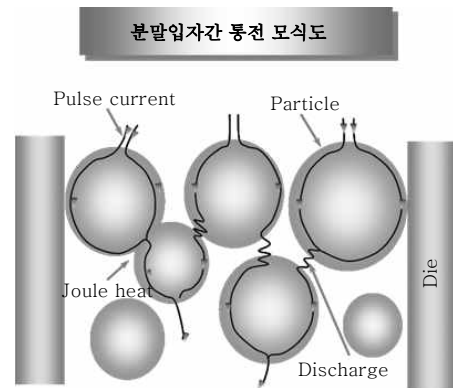


Fig. 2 Principle of spark plasma sintering

Table 1 Comparison of hardness and toughness in SPS & HIP process

	Hardness (kg/mm ²)	Toughness (MPam ^{1/2})
SPS Process	2160	14.55
HIP(1300)	1800	6.68
HIP(1300)	1870	7.2
HP(1350)	1860	8.2
HP(1400)	1870	8.6

다. Table 1은 텅스텐-카바이드 소재를 제조하는 데 있어 종래에 주로 사용하는 공정과 SPS 공정으로 제조한 소재의 경도와 파괴인성을 비교한 것으로 SPS 공정으로 제조한 텅스텐-카바이드 소재가 종래 공정에서 제조한 툴 소재보다 경도는 약 20%, 파괴인성은 약 80% 향상된 결과를 보이고 있다³⁾.

4. 마찰교반 동종 용접

일반적으로 타이타늄 합금은 용융용접을 실시할 때 동반되는 연속적인 가열과 냉각 과정에서 발생하는 동소변태로 인하여 건전한 용접부를 얻기가 쉽지 않다. 마찰교반용접의 경우 고상용접이므로 용접을 실시할 때 변태점인 880도 이하에서 입열량을 조절하면서 접합을 실시한다면 보다 건전한 용접부가 얻어질 것으로 기대된다.

Fig. 3은 CP-Ti을 맞대어 마찰교반용접한 단면 사진과 미세조직을 나타내는 것으로 모재(A)는 등축정 결정구조를 보이며 평균 결정립 크기가 약 25 μ m의 α -상 조직이며 어떤 결정입자는 층상쌍정구조(lamella twin structure)가 관측되어졌으며 열영향부(B)는 모재에 비해 미세한 결정립들이 성장한 것을 알 수 있었

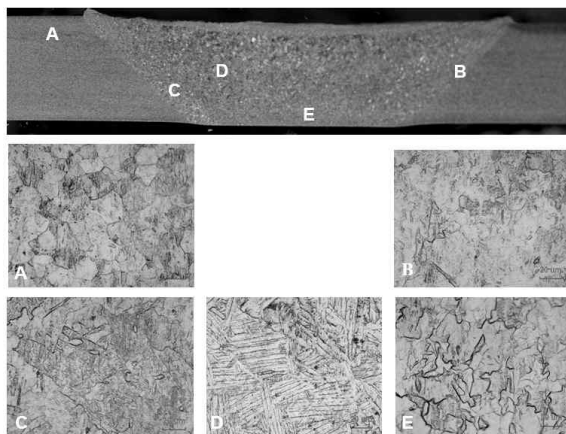


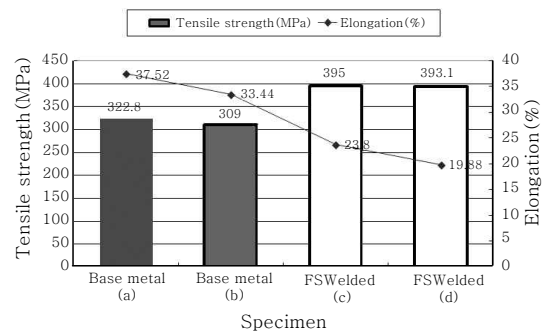
Fig. 3 Optical macrostructure and microstructure of CP Ti

Table 2 Summary of the grain size and hardness of the samples welded under different conditions

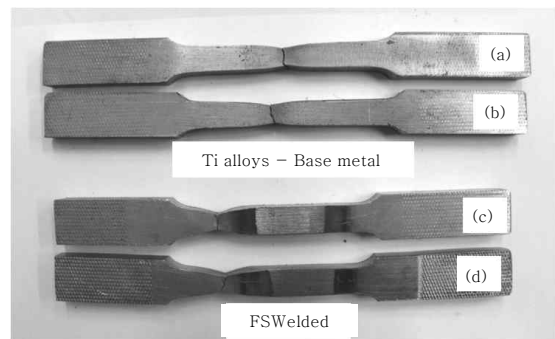
Welding Speed (mm/min)	Grain Size (μ m)	Hardness (Hv)
Base Metal	10	146
50	6.3	150
150	4	175
200	3.8	180
300	3.5	190

다. TMAZ(C)에서는 일반적인 알루미늄 합금의 마찰교반용접에서 관찰되는 기계적인 영향을 받은 연신 조직이 발생하지 않았으며 SZ(D, E)에서는 동적 재결정이 발생한 것으로 보이며 SZ 구간의 어떤 부분(D)에서는 모재에서 관측되는 층상 쌍정 구조도 보여지는 것으로 보아 전체적으로 α -상과 β 상의 혼합조직임을 알 수 있었다. 일반적인 CP Ti의 마찰교반용접부의 경도 분포를 분석해보면 모재보다 접합부의 경도가 약 20~30% 정도 상승하는 것으로 관측되었으며 특히 SZ 영역에서 상대적으로 높은 경도값이 나타났었다. 이는 Table 2에서 보듯이 결정립이 미세해지는 것과 비례하여 증가되는 현상이다.

Fig. 4는 CP Ti의 마찰교반용접부 기계적인 물성을



(a) Tensile strength and elongation



(b) Views of fracture parts after tensile strength test

Fig. 4 Comparison of mechanical property between Ti parents and welded Ti

분석하기 위해 모재와 용접부 각각 2개를 인장시험편을 제작한 후 인장 시험한 결과를 나타내는 것으로 마찰교반용접을 실시한 인장시험편의 경우 모재 시험편과 달리 인장시험편의 중앙 즉 용접부가 아닌 타이타늄 모재 부분에서 파단이 발생하는 것을 관측하였다. 인장강도의 크기도 모재보다 약 25% 상승된 결과를 얻을 수 있었지만 타이타늄 소재의 장점인 연신율이 약 30% 저하되어 성형성이 저하시키는 문제점이 발생하였다.

5. 마찰교반 이중 용접

M.Fazel-Najafabadi 등은 CP-Ti과 SUS 304 마찰교반 이중용접 실험을 실시하였다⁴⁾. 이중용접은 Fig. 5와 같이 SUS 304를 상부로 두 소재를 겹쳐 H13강과 초경으로 구성된 이중구조 툴을 사용하여 진행하였다. 실험결과 50mm/min의 진행속도 및 700-1100rpm 회전속도에서 건전한 용접부가 얻어졌으며, Fig. 6의 인장전단 시험결과와 같이 겹치기 용접부는 CP-Ti와 비슷한 약 119MPa의 최대 전단강도를 나타내었다. 이는 마찰교반에 의한 두 소재간의 와류형성과 계면에서의 기계적 체결에 기인하는 것으로 보여진다.

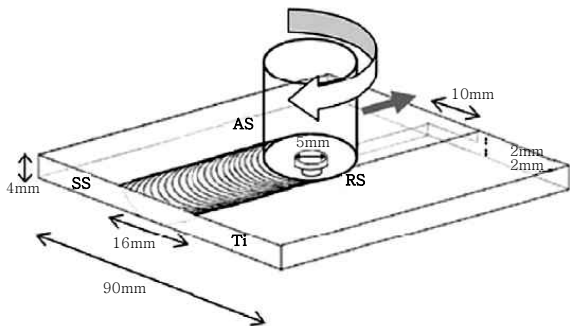


Fig. 5 Schematic diagram showing the geometry of a dissimilar 304SS/CP-Ti lap design using a double-shoulder tool¹⁾

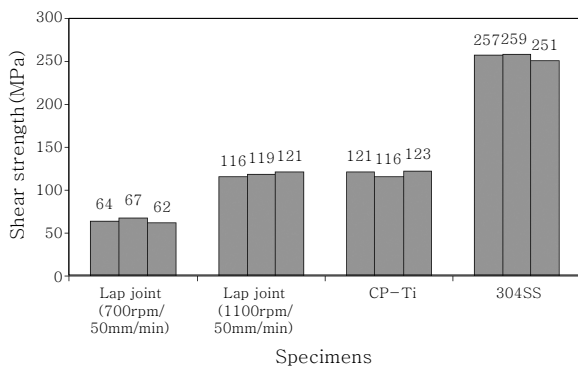


Fig. 6 Shear strength values of the fabricated dissimilar 304SS/CP-Ti lap joints and their as-received members¹⁾

Yanni Wei 등은 Ti-6Al-4V과 알루미늄 1060의 마찰교반이중용접 실험을 수행하였다⁵⁾. Fig. 7에서와 같이 알루미늄 판재를 상부로 겹치기 용접하여 초경 재질의 커팅핀을 적용하였다. 이는 마찰에 의한 온도상승을 감소시켜 용접부 내 금속간화합물 생성을 방지하는 효과가 있다. 용접결과 용접속도가 너무 느리거나 빠른 조건을 제외하고, 300mm/min 조건에서 알루미늄 모재파단의 건전한 용접부가 얻어졌다고 한다.

Masayuki Aonuma 등은 타이타늄과 마그네슘 합금의 마찰교반 이중용접을 시도하였다. Fig. 8과 같이 마찰교반용접 툴을 마그네슘 측으로 약간 이동시켜 삽입하여 용접을 실시하였으며 실험에 사용된 마그네슘 합금의 종류는 알루미늄 함유량에서 차이가 있는 AZ31, AZ61, AZ91을 각각 사용하였다⁶⁾. 시험결과 Fig. 9에서와 같이 마그네슘 합금 중 알루미늄 함유량이 증가할 수록 Ti-Al 금속간화합물 층이 두꺼워져 인장강도는 마그네슘합금 모재 강도의 약 30~60% 전후로 떨어지는 요인으로 작용하였으며 용접 후 열처리를 실시하면 금속간화합물층의 두께가 더 두꺼워져 접합부 강도는 더 떨어지는 결과를 나타내었다.

6. 결 언

타이타늄 소재는 우수한 기계적인 물성과 기능성으로 인하여 반도체 및 디스플레이 부품, 항공기 부품, 생체

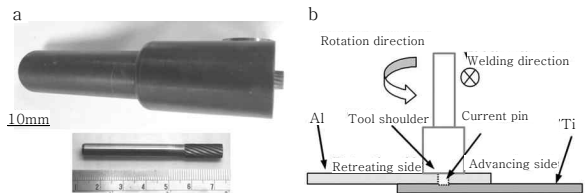


Fig. 7 Tool appearance and schematic diagram of a lap joint showing. (a) the external view of the stir tool and the cutting pin and (b) schematic diagram of a lap joint²⁾

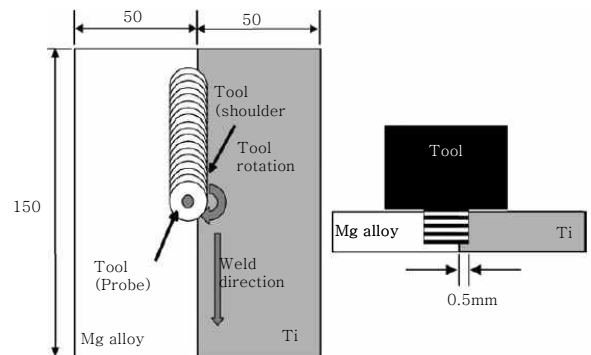


Fig. 8 Schematic of illustration of joint arrangement

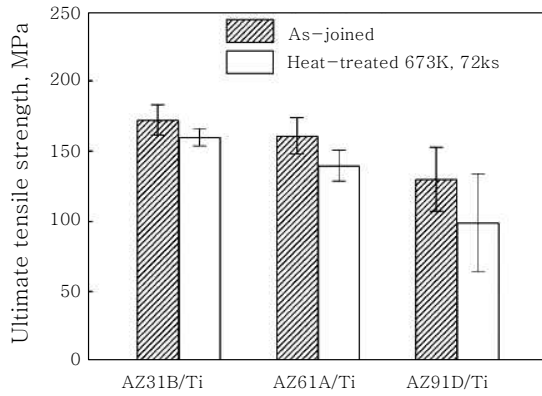


Fig. 9 The comparison of the tensile strength of joints

공학 재료로 그 활용성이 점점 확대되고 있다. 최근에는 용접부위의 안정성, 효율성, 경제성 관점에서 다양한 부품제조에 활용하기 위하여 마찰교반용접도 적극적으로 연구되고 있다. 그 결과 타이타늄 합금 동종 또는 다른 소재와의 이종용접을 실시하였을 때 용접부의 기계적인 물성 등을 종합해볼 때 다른 일반적인 용융용접에 비해 동등하거나 우수한 특성을 보인다. 하지만 탄소강과 같이 일반적인 고강도 소재를 마찰교반용접할 때 발생하는 문제인 과도한 틀 마모가 타이타늄 소재에도 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 향후 이러한 틀의 내마모성을 확보할 수 있는 공정기술 또는 소재기술에 연구 방향을 집중한다면 타이타늄 마찰교반용접기술도 동(銅)이나 알루미늄과 같은 강도가 높지 않은 비철금속 마찰교반용접과 같이 상용 부품제조에 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

1. Byoung-Hyun Yoon, Suk-Hwan Kim, Woong-seong Chang : Recent trends of welding technology for Ti and Ti alloys, Journal of KWJS, 25-5, October, 2007 22-28 (in Korean)
2. Dong-Geun Lee, Yong-Tai Lee : High efficiency welding technology of titanium alloy, Journal of KWJS, 25-5, October, 2007 15-21
3. 박현국 외 7명 : 마찰교반 접합용 텅스텐 카바이드 소결체 제조 방법, 공개특허 10-2013-0015 396, 대한민국특허청 (in Korean)
4. M.Fazel-Najafabadi, S.F.Kashani-Bozorg, A.Zarei-Hanzaki : Dissimilar lap joining of 304 stainless steel to CP-Ti employing friction stir welding, Materials and Design, 32 (2011) 1824-1832
5. Yanni Wei, Jinglong Li, Jiangtao Xiong, Fu Huang, Fusheng Zhang, Syed Hamid Raza : Joining aluminum to titanium alloy by friction stir lap welding with cutting pin, Materials Characterization, 71 (2012) 1-5
6. Masayuki Anonuma, Kazuhiro Nakata : Effect of alloying elements on interface microstructure of Mg-Al-Zn magnesium alloys and titanium joint by friction stir welding, Materials Science and Engineering, B 161 (2009) 46-49



- 천창근
- 1968년생
- 포항산업과학연구원
- 마찰교반 및 초음파용접 공정개발
- e-mail : ckchun@rist.re.kr



- 장웅성
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 철강 및 비철 용접성, 신용접기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 김성욱
- 1973년생
- 포항산업과학연구원
- 용접야금 및 이종금속용접/접합
- e-mail : sungwook@rist.re.kr



- 노중석
- 1977년생
- (주)태광테크
- 마찰교반용접공정 개발
- e-mail : jsnoh@a-tkt.co.kr