알루미늄합금과 타이타늄합금 판재에 대한 마찰교반용접 계면부의 미세조직

이 광 진 · 방 기 상

Interfacial Microstructure of Dissimilar Friction Stir Welds between Al and Ti alloy Sheets

Kwan-gjin Lee and Ki-sang Bang

1. 서 론

마찰교반용접(Friction Stir Welding)은 영국의 TWI(The Welding Institute)가 개발한 접합 방법으로, Probe와 Shoulder로 구성되는 Tool을 고속으로 회전시키면서 용접하고자 하는 재료에 삽입하여 재료의 표면과 내부에서 발생하는 마찰열을 이용하여 재료를 연화함과 동시에 고온 소성 유동을 일으켜 틀의 좌우에 배치된 재료의 일부를 상호간에 맞은편 영역에 교반 혼합시켜 접합을 실현하는 고상 접합 방법이다¹⁻⁴⁾. 이 접합 방법은 기존의 용융 용접 방법들과 비교하여 발열이 최소한으로 억제되어, 접합 후 열에 의한 변형이 현저히 감소하고, 접합 후의 결함도 거의 발생하지 않으며, 강력한 소성 변형에 의해 접합부 조직이 모재보다 미세화 하는 등의 이점이 많아 개발된 지 십 수 년 밖에 지나지 않았음에도 불구하고, 이미 자동차, 철도 차량, 선박 및 항공 우주 분야 등 다양한 분야의 제품에 적용되고 있으며, 최근에는 동, 마그네슘, 타이타늄, 고장력강 등으로 적용을 확대하기 위한 연구가 진행되고 있다⁵⁻¹⁰⁾. 특히, Ti 합금은 경량금속이면서도 강도가 우수할 뿐 아니라 내식성 또한 우수하여 항공기의 각종 구조 부품 및 기능성부품 소재로의 적용 확대가 기대되고 있다. 이에 따라 기존의 항공기 구조용 소재인 Al 합금과 Ti 합금에 대한 이종금속의 용접 및 접합이 중요한 기술적 요인으로 주목을 받고 있다. Arc 및 Laser용접 등과 같은 기존의 용융용접 방법을 적용할 경우, 용접부에 Ti₃Al, TiAl, TiAl₂, Ti₂Al₅ 및 TiAl₃ 등과 같은 취약한 금속간화합물이 생성하여 강도특성이 현저히 저하하는 등 건전한 접합체를 얻기가 어려운 것이 현실이다. 이에 대표적인 고상접합 방법인 마찰교반용접에 관심이 집중되고 있으며, 미국과 유럽 등 항공기 제조업체를 중심으로 기초 연구가 진행되고 있다. 이 연구들

은 마찰교반접합 공정 및 강도 등의 물리적 특성에 관한 내용이 대부분이다. 그러나 이종금속의 경우, 건전한 물리적 특성을 얻기 위해서는 접합부 특히 접합계면 미세조직에 대한 연구와 조직제어가 필수적으로 선행되어야 한다.

본 연구에서는 Al 합금과 Ti 합금 판재에 대한 마찰교반접합부 계면 미세조직의 형성을 검토하기 위하여 고강도 Al 합금인 6061-T6 및 상용화된 Ti 합금인 Ti-6Al-4Ti 판재에 대하여 맞대기 마찰교반용접을 실시한 후, 접합 계면부에 대한 상세한 조직관찰 및 성분 분포를 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 대표적인 열처리형 고강도 Al 합금인 6061-T6와 상용 Ti 합금인 Ti-6Al-4V 판재(두께 5mm)를 사용하였으며, 그 화학적 조성과 기계적 성질을 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 마찰교반용접에는 국내에서 제작한 2차원 정밀 마찰교반용접 전용 장비를 사용하였으며, 그 외관 사진과 제원을 각각 Fig. 1과 Table 3에 나타내었다. 마찰교반용접 공정조

Table 1 Chemical composition of base metals (wt%)

	Si	Mg	V	other	Al	Ti
A6061-T6	0.56	0.98	-	0.69	bal.	-
Ti-6Al-4V	-	-	3.95	0.54	6.62	bal.

Table 2 Mechanical properties of base metals

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
A6061-T6	310	342	17
Ti-6Al-4V	880	950	14

Table 3 Specification of the 2-dimensional precision FSW machine

Item		Spec.
Type		Stand Type
X-axis	Stroke	1,600 mm
	Speed	max. 2,800 mm/min (3.2kw)
Y-axis	Stroke	1,800 mm
	Speed	max. 2,800 mm/min (3.2kw)
Z-axis	Stroke	360 mm
	Speed	max. 2,800 mm/min (5.5kw)
Turn Axis		1~20 rpm (2.1kw)
Spindle Speed		max. 3,000 rpm (22kw)
Tilting angle		max. 5°
Pressure Load		max. 2,000 Kgf
Temperature Telemetry System		Available
Cooling System		Available

Fig. 1 2-Dimensional precision FSW machine**Table 4** Friction stir welding condition

Specimen size		5t x 100w x 200L
Tool (SKD61)	Probe dia.	6(root) to 4(tip) mm
	Shoulder dia.	15mm
Process condition	Travel speed	2.5mm/sec
	rpm	1000
	Tilting	3°

건과 사용한 Tool에 대한 정보는 Table 4에 나타내었다. Probe의 마모와 Al 합금의 과열을 방지하기 위하여 Probe 삽입 위치를 Al 합금 쪽으로 조정하여 Probe의 측면이 Ti 합금의 TD-Plane과 접하도록 하였다.

접합부에 대한 미세조직 관찰은 접합부 단면에 대하

여 실시하였으며, 결정립 조직은 Keller 용액에 의한 에칭 후, 광학현미경(OM: Nikon, Epiphot200)을 사용하여 실시하였다. 특히, 접합계면 미세조직에 대한 관찰에는 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM: JEOL, 30Kv, JSM-700F)와 주사투과전자현미경(STEM: FEI, 300Kv, Tecnai)를 사용하였으며, STEM 박막 시편의 제조에는 집속이온비임(FIB: FEI, Quanta3D)를 사용하였다. 접합부 계면에 대하여 명시야상 및 고각환형압시야상(HAADF)의 관찰을 실시하였으며, 성분원소 분포를 측정하였다.

3. 접합부 미세조직

마찰교반용접부에 대한 전반적인 관찰은 광학현미경을 사용하여 모재(BM: Base Metal), 교반부(SZ: Stir Zone) 및 접합계면(WI: Weld Interface)으로 나누어 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. (a)에 보이는 바와 같이, SZ에는 Probe와 Ti alloy와의 접촉교반에 의해 떨어져 나온 Ti alloy의 입자들로 사료되는 다양한 크기의 입자들이 관찰되었다. 용접 표면부에 해당하는 Probe root area(b)에서는 Al의 미세 재결정립과 Ti alloy의 입자로 생각되는 100 μ m 정도 크기의 입자들이 관찰되었다. 특히, Ti alloy에 의한 동심원 형태의 Metal Flow가 관찰되었고, 이것은 이 영역에서 강력한 교반이 있었다는 것을 의미하며, 결과적으로 접합 상태가 양호할 것으로 추측할 수 있다. (c), (d) 및 (e)에 SZ와 Al 및 Ti 모재에 대한 관찰 결과

Fig. 2 Optical macrograph(a) and micrographs of the FSWed region. (b) probe root area of the weld interface, (c) stir zone of Al alloy, (d) base metal of Al alloy, (e) base metal of Ti alloy

를 나타내었다. 수 십 μm 크기의 Al 모재의 결정립과 달리 SZ에서는 광학현미경 사진으로는 식별이 어려운 수 μm 정도의 미세 결정립이 관찰되었다. 이는 마찰교반용접 공정 중의 Tool에 의한 발열과 강한 소성유동에 기인한 연속적 동적 재결정 (Continuous Dynamic Recrystallization)에 의한 것으로 사료된다.

FE-SEM에 의한 마찰교반용접부 계면(Welding Direction Plane)에 대한 SEI(scanning electron image) 관찰 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Probe 측면이 Ti alloy 모재 쪽으로 약 1mm 정도 삽입된 상태인 Probe root area 즉, 용접 표면부에서는 작게는 Sub-micrometer부터 Millimeter 크기에 이르기까지 매우 다양한 사이즈의 입자들이 관찰되었으며, 특히 이들은 일정한 방향성을 유지하고 있었다. 이것은 고속 회전하는 Probe가 Ti alloy 쪽으로 삽입되어 교반된 영향으로 생각된다. 또, 이 입자들에 대한 EDX 분석 결과, Ti alloy 모재의 성분과 흡사한 결과를 얻었다. 이 결과로부터, 마찰교반용접부에서 관찰되는 입자들은 Probe의 교반작용에 의해 Ti alloy에서 떨어져 나온 Ti alloy fragment인 것으로 판단되었다. 한편, Probe 측면이 Ti alloy 모재 쪽으로 삽입되지 않고 맞닿은 상태인 Probe tip area 즉, 용접 저면부에서는 표면부에서와 같은 Ti alloy fragment의 dynamic한 소성유동의 흔적은 관찰되지 않았다. 다만, 표면부에서 발생하고 복잡 다양한 소성유동에 의해 저면부까지 표류된 미세한 입자들이 관찰되었다.

이상의 결과로부터, 물리적 특성이 다른 이종금속 간의 마찰교반용접부의 미세조직은 Probe의 삽입위치에 크게 영향을 받는다는 것과 충분한 교반을 통해 건전한 용접부를 얻기 위해서는 Probe가 상대 모재에 삽입되도록 해야 한다는 것을 확인하였다. 이들을 상용 가능한 수준으로 향상시키기 위해서는 용접부 특히 계면부의 미세조직 형성에 대한 면밀한 관찰과 고찰이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 용접 계면부에 대하여 Nano-order 수준의 분석을 수행하기 위하여 고성능 STEM을 적용하였다. 동종금속 시편의 경우는 전용 Solution을 사용하면 어렵지 않게 TEM 관찰용 박막

Fig. 3 SEM images of the weld interface. Probe root(a) and tip(b) area

시편을 제작할 수 있다. 그러나, 물리화학적 특성이 확연히 다른 이종금속 시편의 경우는 박막 시편의 제조가 매우 어려울 뿐 아니라, 시편의 두께가 일정하지 않아 양질의 관찰 결과를 얻기가 어렵다. 본 연구에서는 이러한 난점을 해결하기 위하여 Focused Ion Beam을 사용하였으며, 박막 시편 및 그 제조 장면을 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 가공 스테이지에 장착된 용접시편에 대하여 Ar ion을 사용하여 관찰하고자 하는 부분인 용접부에 대하여 Thinning 작업을 하고 있는 In-Situ 사진을 나타내고 있으며, 현재 박막 시편의 두께는 $45\mu\text{m}$ 내외 인 것으로 측정되었다. 이와 같은 공정을 거쳐 완성된 박막 시편을 (b)에 나타내었다. 타원형 흰색 원으로 표시한 부분이 마찰교반용접 계면부에 해당하며, 용접 표면부는 건전한 용접이 이루어진 것으로 보이는 반면, 저면부에서는 미세한 틈새가 관찰되었다. 이것은 켜기 형상을 한 Probe 측면이 Ti alloy 모재 쪽으로 삽입되지 않고 단순히 맞닿은 상태여서 모재 간의 직접적인 교반이 부족하였던 결과로 사료된다.

TEM에 의한 마찰교반용접 계면부에 대한 명시야상 관찰 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 상대적으로 낮은 배율 관찰 결과를 (a)에 나타내었으며, 우측 상단부에서 Ti alloy 모재의 결정입계(Grain boundary),가 관찰되었고, 좌측 상단에서 우측 하단을 향하는 용접계면(Weld Interface)과 교반부(Stir Zone)가 관찰되었다. 특히, SZ내부에서는 대략적으로 접합계면과 평행한 Lamella 형태의 Contrast가 관찰되었다. 이들은 Probe의 고속 회전과 교반작용에 의한 모재의 Metal Flow일 것으로 사료된다. 이 결과로부터, 이종금속에

Fig. 4 TEM specimen preparation by FIB. (a) thinning process by Ar ion, (b) finished thin film

의한 마찰교반용접 시편의 용접계면에는 각 모재로 예상되는 수 백 nm 정도 두께의 층들이 용접계면과 평행하게 형성된다는 것이 확인되었다. 용접 계면부를 조금 더 상세하게 관찰한 결과를 (b)에 나타내었다. (a)에서와 마찬가지로 좌측 상단에서 우측 하단을 향하여 용접계면이 관찰되었다. 특히, Ti alloy 모재 쪽으로 불룩한 부채꼴들이 연결된 형상이 관찰되었으며, 이들은 측면에 Spiral 가공을 한 Probe가 Ti alloy에 삽입된 상태로 고속 회전 및 교반하면서 진행한 흔적으로 판단되었다. 또한, 용접계면 좌측의 SZ에서는 Ti alloy fragment로 생각되어지는 100nm 정도 사이즈의 미세한 입자들도 다량 관찰되었다.

Fig. 5에서 TEM 관찰한 용접계면을 포함하는 조금 확대된 영역에 대한 고각환형암시야(HAADF: High Angle Annular Dark Field) 관찰 결과와 동일 영역에 대한 성분원소 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. HAADF 관찰에서는 명시야상에서와 비슷한 양상의 결과가 얻어졌다. 구체적으로는, 용접계면을 경계로 좌측의 SZ에서는 용접계면에 평행한 수 백 nm 정도 두께의 층이 관찰되었다. 이 층들 간의 Contrast 차이가 뚜렷하게 나타난 것으로 미루어 볼 때, 여러 가지 성분이 혼합되어 있지 않고, 층별로 특정 성분이 농축된 Lamella 구조인 것으로 판단되었다. Fig 5에서 Probe의 Spiral 가공에 의해 생성되었을 것으로 사료된, 부채꼴이 연결된 형상을 한 부분은 다른 Contrast를 나

Fig. 5 TEM bright field images of the weld interface. (a) high mag., (b) ultra high mag

Fig. 6 High angle annular dark field(HAADF) image and element mapping of the weld interface

타내었고, 특정 성분이 농축되었을 가능성을 시사하였다. 동일 영역에 대한 성분원소를 측정된 결과, 용접계면 좌측의 SZ 내에 형성된 Lamella 중에 밝은 부분에서는 Ti와 V이 주로 검출되었고, 어두운 부분에서는 Al이 주로 검출되었다. 이 결과로부터, 이들 Lamella는 고속으로 회전하는 Probe의 교반작용에 의해 야기된 각 모재의 Metal Flow 인 것으로 판단되었다. 또한, 기존의 용융용접의 용접부에서 발견되는 금속간화합물로 보이는 상(Phase)은 관찰되지 않았으며, 이것은 본 연구에서의 용접공정이 용융 및 응고과정을 수반하지 않는다는 반증이라 할 수 있겠다. 그리고, 부채꼴이 연결된 형상을 나타낸 계면에는 Si이 농축되어 있는 것으로 확인되었다. 이 점에 관해서는 보다 정밀하고 깊이 있는 고찰이 요구되며, 향후 미소영역의 부분적인 용융 및 응고 등의 관점에서 실험을 수행하여 그 결과를 보고하고자 한다. Mg은 특별한 분포특성을 나타내지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 알루미늄합금(6061-T6)과 상용화된 타이타늄합금(Ti-6Al-4V) 판재에 대하여 맞대기 형식의 마찰교반용접을 실시하여 시편을 제작하고, 그 용접부 특히 용접계면에 대하여 FE-SEM 및 STEM 등의 고도장비를 사용하여 그 미세조직을 상세히 관찰하였으며, 그 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) Al alloy와 Ti alloy 판재에 대한 마찰교반용접 부 특히 용접계면의 형상과 미세조직은 Probe의 삽입 위치에 크게 영향을 받는다는 것이 명확하게 확인되었다. 다시 말하면, Probe 측면이 Ti alloy 모재 쪽으로 1mm 정도 삽입된 경우에는 각 모재간의 교반이 강하게 일어남과 동시에, 용접계면에 평행한 Lamella 구조가 형성되는 것을 확인하였다. 이와 대조적으로 Probe 측면이 Ti alloy 모재에 삽입되지 않고 단순히 맞닿은 경우에는 각 모재간의 교반이 일어나지 않고, 그 결과 이 부분에서는 견고한 용접이 이루어지지 않는 것으로 확인되었다.

2) 용접계면에 평행하게 형성된 Lamella 층에 대한 성분원소를 분석한 결과, 각각 모재의 성분과 거의 흡사한 결과가 얻어졌다. 이 결과로부터 용접계면의 Lamella 층은 Probe의 강한 교반작용에 의한 각 모재의 Metal Flow에 의해 형성된 것으로 판단되었다. 또한, 기존의 용융용접의 용접부에서 발견되는 금속간화합물들은 관찰되지 않았으며, 이것은 본 연구에서의 용접공정이 용융 및 응고과정을 수반하지 않는 고상용접 공정이라는 것의 근거라 할 수 있겠다.

향후, 자동차 및 항공기 등을 비롯한 그린 수송시스템 산업의 초경량 핵심부품에 Al, Mg, Ti 등의 적용을 확대하기 위하여 이들의 이종금속간 용접공정의 개발, 특히 대표적 고상용접의 하나인 마찰교반용접에 대한 적극적인 연구개발이 요구되는 상황이다. 특히, 생산라인의 제조공정을 고려한 모재의 선정, Tool의 형상 및 소재개발을 포함한 마찰교반용접 공정설계 및 접합부 미세조직 제어기술 등에 대한 폭넓은 추가 실험과 연구가 시급히 요구된다.

후 기

본 연구의 일부는 '광주지역 첨단부품소재 인프라구축사업(10-JE-1-0005)'의 지원으로 수행된 연구결과이며, 마찰교반용접 공정설계를 도와주신 (주)원젠 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

- 이광진
- 1973년생
- 한국생산기술연구원
- 이종소재 용접/접합 및 미세조직 제어
- e-mail : kjlee@kaeri.re.kr

참 고 문 헌

1. Kwangjin Lee : Effect of post weld heat treatment for crystal orientation distribution on friction stir welds of Al-Mg-Si series aluminum alloy sheets. Journal of KWJS **27-6** (2009), 62~67 (in Korean)
2. P. Bala Srinivasan, W. Dietzel, R. Zettler, J. F. dos Santos and V. Sivan : Stress corrosion cracking susceptibility of friction stir welded AA7075-AA6056 dissimilar joint, Mater. Sci. Eng. A, **392** (2005), 292-300
3. M. Peel, A. Steuwer, M. Preuss and P. J. Withers : Microstructure, mechanical properties and residual stress as a function of welding speed in aluminum AA5083 friction stir welds, Acta Mater., **51**(2003), 4791-4801
4. Y. S. Sato, H. Kokawa, K. Ikeda, M. Enomoto, S. Jogan and T. Hashimoto : Microstructure in the friction stir weld of an aluminum alloy, Metal. and mater. Trans. A, **32**(2001), 941-948
5. R. W. Fonda, J. F. Bingert and K. J. Colligan : Development of grain structure during friction stir welding, Scripta Mater., **51**(2004), 243-248
6. K. V. Java and S. L. Semiatin : Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloy, Scripta Mater., **43**(2000), 743-749
7. Y.S. Sato, Y. Kurihara, S.H.C. Park, H. Kokawa and N. Tsuji : Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding, Scripta Mater., **50**(2004), 57-60
8. S. Lathabai, M. J. Painter, G.M.D. Cantin and V.K. Tyagi : Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy, Scripta Mater., **55**(2006), 899-902
9. K. Nakata, Y.G. Kim, H. Fujii, T. Tsumura and T. Komazaki : Improvement of mechanical properties of aluminum die casting alloy by multi-pass friction stir processing, Mater. Sci. Eng. A, **437**(2006), 274-280
10. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa and T. Fukuhara : Microstructural evolution of ultrahigh carbon steel during friction stir welding, scripta Mater., **57**(2007), 557-560

- 방기상
- 1984생
- 조선대학교 선박해양공학 대학원
- 이종소재 마찰교반용접
- e-mail : ksbang@kitech.re.kr