

## 타이타늄 합금의 최신 용접기술 동향

윤병현·김숙환·장웅성

### Recent Trends of Welding Technology for Ti and Ti Alloys

Byoung Hyun Yoon, Suk Hwan Kim and Woong-Seong Chang

#### 1. 서 론

타이타늄은 1930년대 새로운 타이타늄 추출방법인 "Kroll법"이 고안되면서 대용량의 타이타늄의 추출이 가능해지고 그 사용도 본격화되었다. 초기에는 군용항공기용 소재로 사용되다가 민간항공기에 까지 적용되는 등 초기 타이타늄의 수요는 항공산업 중심이었다.

타이타늄은 우수한 비강도, 내식성, 고온강도 및 피로특성이 우수한 소재로 구조용으로는  $\alpha$ - $\beta$  상으로 구성된 Ti-6Al-4V합금이 많이 사용되고 있으며 최근에는 새로운 타이타늄의 합금들이 개발되면서 그 용도가 확대되고 있다. 타이타늄은  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상의 두 가지 상이 존재하는데 HCP 구조를 갖는  $\alpha$ 상은 882°C까지 안정하며 그 이후 BCC 구조의  $\beta$  상으로 변태한다.

첨가되는 합금 원소의 종류에 따라  $\alpha$ 합금, near  $\alpha$ 합금,  $\alpha$ - $\beta$ 합금, near  $\beta$ 합금 및  $\beta$ 합금으로 대별되는데 이러한 다양한 합금의 출현으로 항공산업으로 국한되던 용도가 산업용 및 소비재 분야까지 확대되고 있다. 그러나 순수 타이타늄을 제외한 타이타늄 합금의 용접 및 접합은 여러 가지 문제를 안고 있는 실정으로 선진국을 중심으로 새로운 용접공정 및 용접재료의 개발이 이루어지고 있다. 따라서 본 특집기사에서는 최근 타이타늄 및 타이타늄 합금이 확대 적용되고 있는 산업분야와 이를 위한 용접/접합공정과 관련된 기술적 특징을 중심으로 내용을 정리하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 타이타늄의 일반적 특성

타이타늄 및 타이타늄 합금은 뛰어난 내식성과 고강도 때문에 화학산업 및 항공산업에 적용되고 있다. 일반적으로 낮은 강도를 갖는 합금화 되지 않은 순수 (CP, commercially pure) 타이타늄은 화학공장, 발전소 등에서 탱크, 열교환기, 반응용기 등으로 사용된

다. 고강도 타이타늄 합금은 항공기와 같은 높은 비강도가 요구되는 부품에 적용되고 있다.

타이타늄은 용점이 약 1,670°C, 밀도는 4.51g/cm<sup>3</sup>이며, 1등급의 순수 타이타늄인 경우 인장강도는 245 MPa, 연신율은 24%이다. 순수 타이타늄은 883°C에서 HCP( $\alpha$ 상)로부터 BCC( $\beta$ 상)으로 동소변태하며, 변태온도는 합금원소 첨가에 따라 강하게 영향을 받아 상승하거나 하강한다. 산소, 질소 및 탄소와 같은 침입형 원소는  $\alpha$ 상 안정화원소이고, 수소는  $\beta$ 상 안정화원소이다. 순수 타이타늄은 불순물 함량의 증가에 따라 강도는 증가하지만 연신율은 감소하는 특징을 지니고 있으며, 온도에 따른 강도 및 크리프 강도는 300°C까지는 안정하지만 온도의 증가에 따라 감소한다<sup>1)</sup>.

타이타늄 합금은 합금원소 및 구성조직에 따라 (a) 순수 타이타늄, (b)  $\alpha$ 형 합금 (c)준안정  $\alpha$ 형 합금 (d)  $\alpha$ + $\beta$ 형 합금 (e) 준안정  $\beta$ 형 합금 (f)  $\beta$ 형 합금으로 나눌 수 있다. Ti-5Al-2.5Sn은  $\alpha$ 형 합금의 대표적인 합금으로 고온강도가 요구되는 항공기용 부품에 이용되고 있으며, Ti-6Al-4V합금은  $\alpha$ + $\beta$ 형 합금의 대표로 약 870MPa 이상의 강도가 높고 용접성 및 성형성이 양호하여 널리 사용되고 있다.

##### 2.2 타이타늄의 용접

###### 2.2.1 타이타늄의 용접성

타이타늄 및 타이타늄 합금은 GTAW, GMAW를 비롯한 플라즈마 아크요점, 레이저 및 전자빔 용접 등의 용융 용접공정으로 용접할 수 있다. 그러나 500°C를 넘으면 타이타늄은 산소, 질소, 탄소 및 수소에 의해 쉽게 경화될 수 있어서, 용융, 응고되는 동안 대기, 수소, 탄소화합물 등의 오염을 방지하기 위한 차폐를 실시해야 한다는 것이다. 만일 일정량 이상 오염되는 경우 용접하는 동안 응력에 의한 균열이 발생할 수 있다.

**Table 1** Typical mechanical properties and physical properties of Ti and Ti alloys<sup>2)</sup>

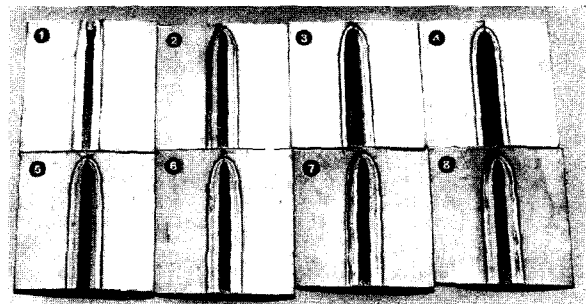
Designation	Commerically Pure Titanium	Medium Strength Alloys	High Strength Alloys	Highest Strength
Alloy Type	Alpha	Alpha-Beta	Alpha-Beta	Beta
0.2% Proof Stress MPa	345 - 480	480 - 550	725 - 1000	1100 - 1400
Tensile Strength MPa	480 - 620	600 - 650	830 - 1100	1200 - 1500
Elongation %	20 - 25	15 - 20	8 - 15	6 - 12
Tensile Modulus GPa	103	104	110 - 120	69 - 110
Torsion Modulus GPa	45	43	40 - 48	38 - 45
Hardness HV	160 - 220	200 - 280	300 - 400	360 - 450
Density kg/l	4.51	4.48 - 4.51	4.43 - 4.60	4.81 - 4.93
Thermal Expansion 10 <sup>-6</sup> /°C	8.9	8.3	8.9	7.2 - 9.5
Conductivity W/mK	22	8.0	6.7	6.3 - 7.6
Specific Heat J/kg/°C	525	544	565	490 - 524

비록 국부적인 보호가스 차폐로 용접부를 보호할 수 있으나 중요 부품의 경우 고진공 또는 불활성 분위기의 보호 챔버 내에서 용접할 필요가 있으며, 엄격한 용접부 개선, 가스품질, 차폐 전략이 필요하다.

타이타늄은 대기 중에서 고온으로 가열하게 되면 표면이 대기로부터 오염되어 여러 가지 색상으로 변화하게 되는데, 가열온도의 상승과 더불어 금색, 주홍색, 청색 등의 순서로 변한다. 회색, 황백색으로 변한 경우 용접부에 문제가 많은 것으로 판단하여 용접비드와 인접부를 완전히 제거하여야 한다<sup>3)</sup>.

타이타늄의 용접성은 일반적으로 용접금속의 인성과 연성에 달려있다. 순수 타이타늄을 이용한 제작은 비교적 쉬우며, 보통 용접상태 그대로 사용한다. 타이타늄 합금은 용접금속의 인성과 연성이 감소되므로 합금의 종류에 따라 주의가 요구된다.

타이타늄의 용접에서 가장 일반적인 용접공정은 GTAW 이다. 보통 불활성 가스로 아르곤을 사용하지만 용입 및 용접속도 증가를 위해서 헬륨을 혼합하여 적용하기도 한다. 용접부의 오염을 제한할 경우 불활성 가스 분



**Fig. 1** Color variation of GTAW weldment with shielding gas<sup>2)</sup>

**Table 2** Weldability of the common ASTM grades<sup>2)</sup>

ASTM Grades	Weldability	Comments
1,2,3,4,7,11,12,13 14,15,16,17,26,27	Excellent	Commercially pure and low alloy grades with minor additions of Pd, Ru, Mo etc
9,18,28	Excellent	Ti-3Al-2.5V grades
5,23,24,29	Fair-good	Ti-6Al-4V grades
21	Excellent	Beta alloy
6,6ELI	Good-excellent	Ti-5Al-2.5Sn

**Table 3** Weldability of selected non-ASTM Ti alloys<sup>2)</sup>

Alloy	Weldability	Comments
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Fair-good	Common aerospace alpha & beta grade
Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo	Limited	Aerospace alpha & beta grade
Beta III	Excellent	Beta alloy
Ti-15V-3Al-3Sn-3Cr	Excellent	Beta alloy

위기의 챔버 내에서 용접을 실시한다. GTAW는 수동 및 자동용접이 가능하다는 것과 고품질의 용접부를 얻을 수 있다는 것, 스패터가 적다는 장점이 있으나 생산성이 낮고 전극이 용융지에 닿을 경우 텅스텐 개재물이 생성될 수 있다는 단점이 있다.

한편, 타이타늄의 판 두께가 두꺼워지면(5mm이상) GMAW를 적용한다. 안정한 용착을 위해서는 높은 전류가 필요하며, 펄스 공정이 적용될 수 있다. 타이타늄 와이어 사용 시 오염될 경우에는 접촉 팁의 빠른 소모가 발생되며, 불량한 표면이 형성될 수 있다.

플럭스를 이용한 용접공정으로는 submerged arc, electro-slag 및 flux cored arc welding이 있으며, 적절한 플럭스를 선정하는데 어려움이 있다. 산화물 계열은 용접부를 오염시키며, 습기에 대한 방지가 필요하다. 일반적으로 플럭스를 이용한 용접은 타이타늄에 적절하지 않는 것으로 알려져 있으나 후물재의 제조비용을 절감하기 위해서는 용접법에 대한 연구가 필요하다.

고에너지 용접인 플라즈마 아크용접은 키홀 모드에 의한 완전용입이 가능하고, GTA 및 GMA 용접공정보다 생산적이면서 기공 형성 억제에 효과적이다. 용가재의 사용은 플라즈마 가스의 불안정성을 야기하므로 제살용접으로 적용한다.

최근에는 타이타늄에 대한 레이저 용접 공정 적용이 증가하고 있는 추세로, 자동화 생산에 있어 낮은 변형 및 생산성은 GTAW나 전자빔보다 우수하며, CO<sub>2</sub> 레이저는 25kW 장비를 이용 시 20mm의 판재를 한 번에 용접할 수 있다. Nd-YAG 레이저는 파이버 전송으로 인한 유연성이 있으나 출력에 제한이 있으며, 레이저 용접부는 루트 표면에 용접 스패터 발생의 우려가 있다.

전자빔 용접은 타이타늄 합금의 용접에 있어서 가장 이상적인 용접공정이다. 하지만 큰 구조물의 경우 장비의 비용이 막대하고 진공 배기시 장시간이 소요된다. 최근에는 생산성을 높이기 위한 방안으로 RPEB(Reduced Pressure Electron Beam)이 개발되었는데 RPEB는 용접부 주위를 10-1mbar의 저진공으로 적용한다.

한편, 타이타늄의 높은 저항과 낮은 열전도도 특성은 저항용접을 적용하기 적절하다. 이 경우 최적 용접을 위해서는 맞대는 면의 청정도가 중요하다. 점용접의 경우 구형의 구리전극을 이용하여 5~10kA, 수 kN의 압력으로 실시하며, 전기펄스에 의한 열사이클이 매우 빨라 보호가스는 불필요하다. 심용접의 경우에는 반복되는 열사이클로 인한 열의 축적으로 산화가 발생하므로 보호가스에 의한 용접부의 차폐 또는 수냉장치의 적용이 바람직하다.

마찰용접은 보호가스 차폐가 필요없고 빠른 공정과 높은 기계적 특성이 장점이다. 스테드 용접은 이동성 장비를 이용하여 타이타늄 건축용 판넬의 스테드 부착에 적용하고 있다. 회전 마찰용접은 부품의 회전이 필요하다라는 단점이 있으며, RFW(Radial Friction Welding)는 파이프 용접시 적용할 수 있는 공정으로 V형 링을 회전, 압축시켜 마찰용접을 수행한다. 이 장치는 고가이며, 아직까지 검증되지 않았다는 단점이 있다. 선형 마찰용접공정은 회전 마찰용접의 대칭성에 대한 제한을 탈피한 공정으로 항공엔진 분야에서 디스크에 블레이드를 연결하기 위한 방안으로 적용하고 있다.

계면접합공정으로는 확산접합을 들 수 있다. 타이타늄은 접합온도에서의 산화물 용해 특성으로 확산접합을 적용하기 가장 용이하다. 하지만 매우 느리고 상당한 정밀도가 필요하다는 단점이 있다. 전자빔을 이용한 확산접합은 계면에서만 가열되므로 에너지를 절약할 수 있으며, 매우 우수한 특성을 가진다는 보고가 있으나 상업적 적용은 아직 미흡한 단계이다. 플래시 버트 용접은 복잡하거나 큰 섹션의 맞대기 용접에 적합하며, 항공엔진의 stator rings을 생산하는데 사용된다. 폭발용접은 화약이 발화하는 동안 생기는 고압의 에너지를 금속간의 접합에 이용하며, 타이타늄의 이종접합 및 라이닝 공정, seal 용접 등에 적용될 수 있다.

인서트를 이용한 접합공정으로 브레이징이 있다. 브레이징 시 Ag-Al-Ti계 인서트를 이용하여 접합하며, 산화물제로 진공 브레이징로에서 작업한다. 주로 타이

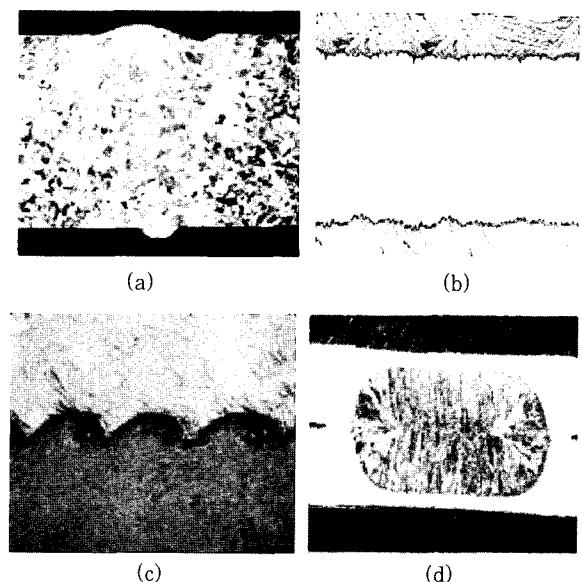


Fig. 2 Weldment of various welding method (a) Electron beam welding (b) Brazing (c) Explosive welding (d) Spot welding

타늄의 이중접합에 적용한다. 슬더링은 표면 산화물의 안정성으로 인하여 적용하기 매우 힘든 공정이다. 최근 매우 반응성이 큰 플럭스를 이용한 접합 또는 PVD, 코팅을 이용하여 Cu, Zn층을 형성한 후 접합하는 방식 등이 시도되고 있다.

접착제를 이용한 접합법은 판재의 접합 및 비금속과의 접합에 이용된다. 이 경우 접합하고자 하는 면의 전처리가 매우 중요하다. 한편, 부식에 대한 위험성이 큰 부위의 연결부에는 기계적 체결방식이 적용되기도 한다.

### 2.3 타이타늄에 대한 최신 용접공정 적용

대부분의 타이타늄 용접은 GTA 용접공정으로 진행되지만 저비용 고생산성 또는 고품질을 위해 좀 더 효율적인 공정이 고려될 수 있다. 타이타늄에 대한 최신 공정으로는 키홀티그 용접공정과 마찰교반 용접공정을 들 수 있다.

#### 2.3.1 Keyhole TIG 용접

Keyhole TIG 용접기술은 호주의 CSIRO에서 개발된 공정으로 고품질의 깊은 용입을 장점으로 가지는 아크 용접공정이다. 일반적으로 GTA 용접은 광범위의 소재를 고품질로 용접하기 위해 오랫동안 사용되어 왔고, 용접전류는 보통 30에서 250A사이에서 조절되어 후판의 경우 V- 또는 X-형으로 가공하여 다층용접하는 것이 일반적이다. 250A이상의 고전류를 적용하는 경우에는 전자기적으로 유도되는 아크력으로 인한 용융지의 이동과 높은 입열량의 효과로 비교적 깊은 용융지를 형성한다. 하지만 근본적으로 용융지의 불안정성으로 인하여 용접공정의 조절이 어려워 350A이상에서 용접부에 공동 등의 결함을 유발할 수 있다.

Keyhole TIG 용접은 이러한 용융지의 불안정성을 해결한 새로운 공정으로 키홀모드의 아크 및 아크가스는 안정된 용융지를 형성함으로써 고전류 아크 적용을 가능케 하였다. Fig. 3(a)는 Keyhole TIG 용접공정에 적용되는 토치이고, Fig. 3(b)는 Keyhole TIG 용접시 강한 아크력에 의해 형성된 전극 주변 용융지의 형상이다.

GTA 키홀은 다른 키홀공정 용접과는 달리 높은 에너지 밀도에 의존하지 않으므로 비교적 낮은 열전도도를 가지는 스테인레스강과 타이타늄의 용접에 적절하며, 다른 키홀공정 용접과 마찬가지로 루트에서는 표면장력에 의해 용락이 방지된다. 특히, 다층용접 동안 오염되기 쉽고, 밀도가 낮은 타이타늄의 경우 이 공정의 적용은 이상적이라 할 수 있다. 이 공정은 소재의 화학 조성 및 그에 따른 다른 Marangoni 유동에 의존하는

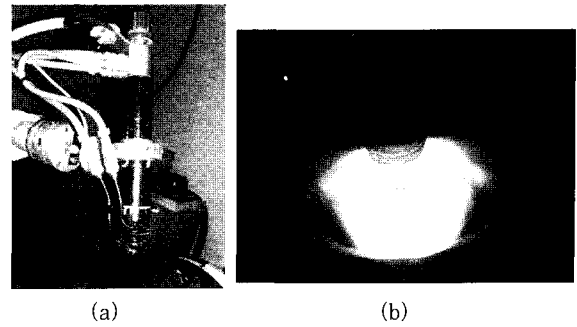


Fig. 3 Keyhole TIG welding (a) Torch (b) Keyhole

일반 아크 공정과 달리 용입이 용융지의 대류에 덜 의존적이며, 3에서 12mm 두께의 낮은 열전도도를 가지는 소재의 단층 공정으로 넓은 평판과 압력용기 및 파이프 용접에 적용될 수 있다<sup>4)</sup>.

Fig. 4는 키홀티그로 용접된 14mm 두께의 ASTM B862 Grade 12 티타늄 파이프의 섹션으로, 개선 없이 단순한 맞대기로 용접재료 없이 용접되었다.

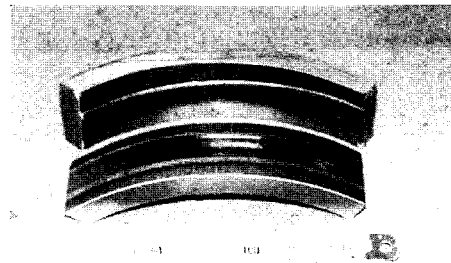


Fig. 4 Keyhole TIG welding of titanium pipe

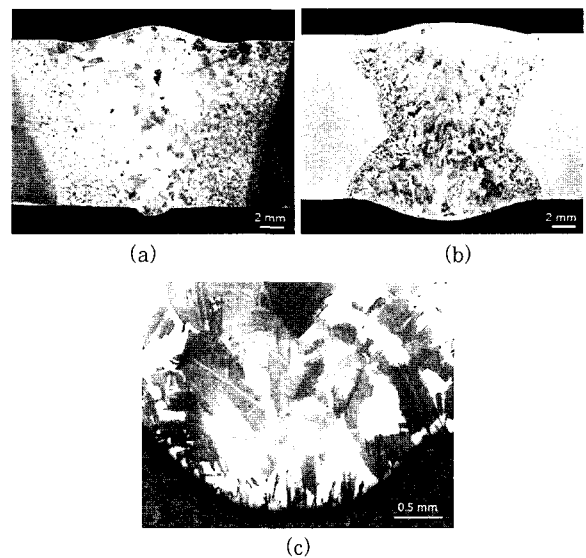


Fig. 5 Comparison of welding of CP Ti with welding method

Fig. 5(a) 및 (b)는 각각 13mm 두께 ASTM B265 Grade 2-95a(CP titanium)에 대한 Keyhole TIG와 일반 GTA 용접을 비교한 것으로, 일반 GTA 용접은 V형 개선에 용접재료를 이용하여 6패스로 용접한 것이다. Fig. 5(c)는 Keyhole TIG 용융 루트부의 미세조직으로 루트에서는 기공 등 아무런 결함도 관찰되지 않는다. (Etchant: ammonium bifluoride + water)<sup>5)</sup>

Fig. 6은 13mm 두께 ASTM B265 Grade 5-95a (Ti-6Al-V)에 대한 Keyhole TIG 용접결과로 Fig. 6(a)는 1패스 Keyhole TIG 용접이고, 6(b)는 비드를 완만하게 하기 위해 기존 용접부를 다시 용접한 결과이다. (c)는 용융 루트부, (d)는 열영향부의 마이크로 조직이다. 내부에는 기공을 비롯한 LOF(lack of fusion) 등 결함이 관찰되지 않는다. (Etchant: Kroll's Reagent)

2.3.2 마찰교반접합(FSW)

1991년 영국 TWI(The Welding Institute)에서 Al합금에 대한 신 개념의 용접법인 Friction Stir Welding(이하 FSW)이 개발되었다. 이 신 용접기술은 알루미늄을 접합하는데 매우 획기적인 접합법으로, 틀과 시편의 마찰열원을 이용하여 기존의 용융 접합에 비해 낮은 입열로 접합이 행해지기 때문에 작은 잔류응력, 적은 변형 등의 장점을 더욱 부각시킨 신 접합법이다. 또한 알루미늄, 마그네슘 합금 등의 경금속 등에 많은 연구 및 적용사례가 자동차, 선박, 전동차, 비행기 산업 등의 수송 기계산업 분야에서 경량화의 목적으로 상용화되고 있다.

Fig. 8은 마찰교반접합법을 이용하여 5.5mm 두께의 CP Ti를 맞대기 접합한 표면 사진으로서 접합 시

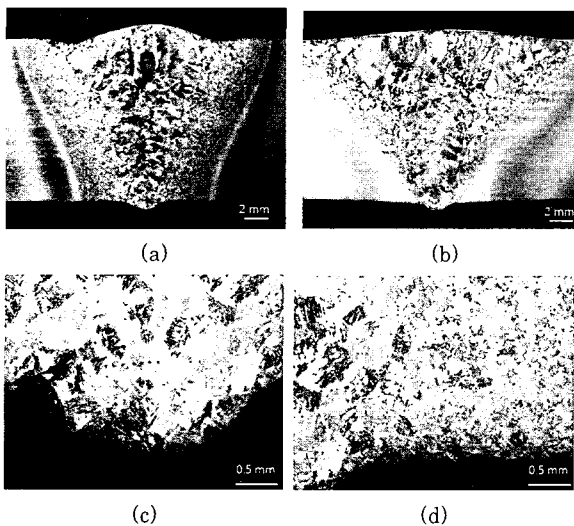


Fig. 6 Ti-6Al-V 타이타늄 합금에 대한 용접공정 비교 (a) Keyhole TIG 용접 (b) 재용융 용접 후 (c) 용융 루트부 (d) 열영향부(HAZ)

고열로 인한 변색이 되었으나 결함이 존재 하지 않았다. Fig. 9에 접합부에 수직인 방향으로 절단한 단면 사

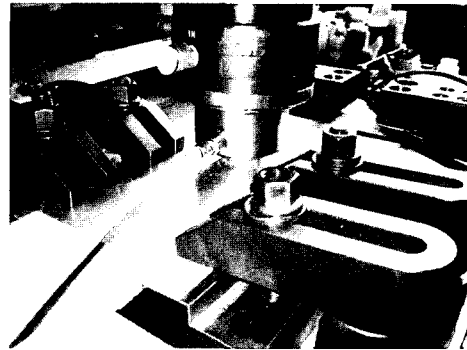
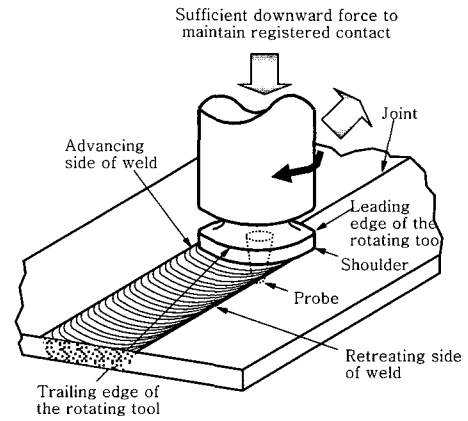


Fig. 7 Principle of friction stir welding

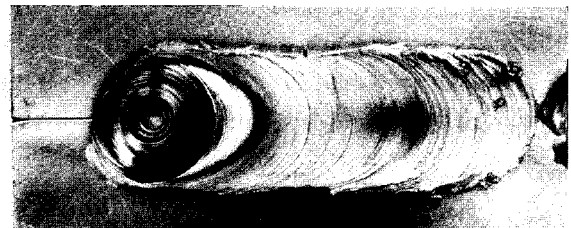


Fig. 8 Friction stir welding of CP Ti

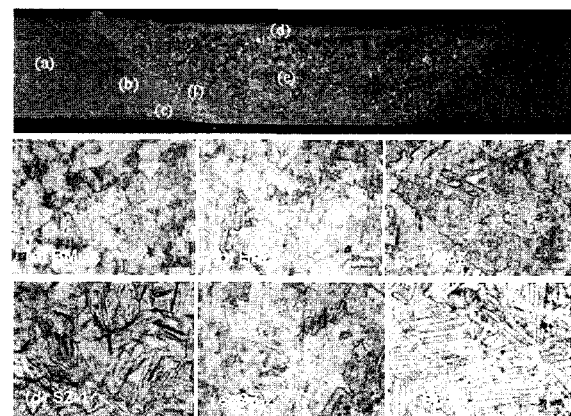


Fig. 9 Optical macrostructure and microstructures of CP Ti

진과 각 영역별 미세조직 사진을 나타내었다. Fig. 9(a) 모재는 평균 결정립 크기 약 25 $\mu$ m의  $\alpha$ -상 조직, Fig. 9(b)는 열영향부로서 모재에 비해 결정립들이 미세하게 성장한 것을 알 수 있다. (c)는 TMAZ로서 일반적인 Al합금의 FSW접합시 접합부에 나타나는 기계적 영향을 받은 연신 조직이 발생 하지 않았다. (f)는 중심에서 모재쪽으로 약간 떨어진 부분으로서  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상의 혼합조직이 관찰되었다. 이는 마찰교반용접의 특징인 접합부의 동적 재결정의 영향으로 사료된다.

Fig. 10은 CP Ti의 FSW 접합부의 경도 분포를 나타낸 것으로서 접합부의 경도는 180~190HV로 모재에 비해서 약간의 상승을 보이는데 이는 SZ의 경도값이 모재의 경도값보다 상대적으로 높아진 것을 알 수 있다.

### 2.4 타이타늄의 적용

타이타늄은 합금강과 같은 정도의 강도를 가지면서 강보다 30~40% 가볍고, 400~480 $^{\circ}$ C의 고온까지 견딜 수 있다. 또한 많은 화학약품에 대해서 우수한 내식성을 나타내므로, 우주항공, 화학산업, 해양분야 및 상업분야 전반에 걸쳐 기술적인 우수성과 경제성이 널리 입증되고 있다. 화학공업의 급속한 발전 및 신기술의 개발에 따라 화학공업용 장치재료는 고도의 내식성을 요구함에 따라 티타늄 수요가 증가하고 있는 실정이다.

타이타늄 합금의 우수한 고온강도, 내식성 등을 활용하여 가스 터빈 엔진 분야에서는 Fan blades, compressor blades, discs, hubs 및 non-rotor parts 등의 부품에 적용이 되고 있으며, 발전설비 및 중화학 분야에서는 티타늄 콘덴샤, 관형 열교환기, 판형 열교환기 등에 적용이 되고 있다.

자동차 분야에서는 아직 기초적인 적용단계로서 각종

밸브 및 스프링, 커넥팅 로드 등에 적용이 되고 있으나, 자동차에 대한 연비 및 효율 등에 대한 사회적 요구가 증대되고 있기 때문에 적용분야는 더 확대될 것으로 기대된다. 스포츠/레저분야는 생활수준 향상 및 고령화 사회 시대가 도래됨에 따라 타이타늄의 활용이 활발하게 적용되고 있는 분야중의 하나로 티타늄 골프 클럽 헤드, 테니스 라켓 프레임, 당구 큐 프레임, 야구 배트 및 자전거 프레임 등의 제품에 적용되고 있다.

우주항공분야에서는 항공기 가스터빈 엔진, blade, disc 또는 hub, inlet guide vane 및 케이스, 날개구조물들, 랜딩기어 부품들, 주요 소형 볼트류, 스프링류 등에 활용되고 있다.

타이타늄 합금의 인체에 친화적인 소재로 의료 분야에도 적용이 되고 있어서, 인공이식, 외과장비, 맥박조정기 케이스 또는 원심분리기 등에 활용이 되고 있다.

최근에는 일본 및 유럽을 중심으로 건축용 외장재로도 사용이 되고 있는데 건축물의 지붕, 외벽 등에 박판의 타이타늄을 활용한 시공이 이루어 지고 있다.

### 3. 결 론

선진국의 경우 타이타늄 수요의 약 70%가 우주항공 관련 분야에 적용되고 있으며, 최근 일본을 중심으로 항공분야 이외의 자동차, 건축, 스포츠/레저 등 소비재 분야로 확대 적용되고 있다. 이러한 추세는 현 응용분야의 확산 및 새로운 응용개발로 인해 일반산업, 해양분야 및 상업분야에서 괄목할 만한 성장이 이루어 질 것이다.

에너지 문제와 관련하여 자동차를 비롯한, 선박, 항공우주기기와 같은 수송기기의 경량화는 에너지를 절감하고 효율성을 높이는 방법이다. 용접기술은 수송기기의 경량화를 이루는데 핵심적인 생산기술로써 현재의 활용범위를 넓히기 위해서는 소재 자체의 물성향상도 중요하지만 우수한 용접성을 확보하기 위한 관련 기술의 개발이 반드시 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. 용접·접합편람, 대한용접학회, (1998), 278
2. Titanium information group, Welding Titanium, TWI, (1999), 3
3. W.A.Blaeslack and C.M.Banas: Welding Journal, 60-7,(1981), 121s-130s
4. Jarvis, B. L. and Ahmed, N. U. : Science and Technology of Welding and Joining 5, no. 1. (2000): 1-7
5. Lathabai, S., Jarvis, B. L. and Barton, K. J. : Materials Science and Engineering A299 (2001) 81-93

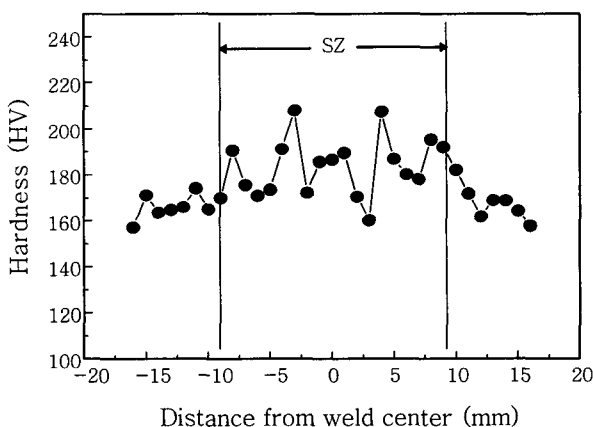


Fig. 10 Hardness distribution of Ti joints

6. 김환태, 에너지 절약형 경량소재의 용접기술 동향, KISTI, (2004)



- 윤병현(尹秉鉉)
- 1964년생
- 포항산업과학연구원, 용접센터
- 용접야금, 오버레이용접, 부식
- e-mail : paekam@rist.re.kr

7. KOBELCO: Ti product Catalogue(2007)



- 장웅성(張雄成)
- 1959년생
- RIST 용접센터
- 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 김숙환(金肅煥)
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 고밀도에너지 빔 용접공정, 정밀접합, 용접야금
- e-mail : weldksh@rist.re.kr