

## 타이타늄의 고효율 용접기술

이 동근·이용태

### High Efficiency Welding Technology of Titanium Alloy

Dong-Geun Lee and Yong Tai Lee

#### 1. 머리말

1948년 미 듀폰사에서 처음으로 스폰지 타이타늄을 공업적인 생산하기 시작한 이후 타이타늄 소재는 산화성 및 환원성 분위기에서 내식성이 우수하고, 특히  $-200 \sim 600^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 어떤 공업용 합금보다 비강도(강도/비중)가 우수하여 항공기 및 군수용 재료로서 많이 사용되어 왔으며, 그 외의 다양한 분야에 적용하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>1-5)</sup>.

21세기 첨단과학과 복지건강 사회에서 친환경 소재, 에너지의 효율적 활용, 인체친화형 시스템 개발, 성능의 지속성 및 신뢰성 구축 등의 중요성이 대두되면서 타이타늄 소재에 대한 연구 및 관련 산업이 전 세계적으로 빠르게 성장·확대되고 있다. 타이타늄 소재는 비강도, 생체적합성, 고온강도 및 열적 특성, 해수내식성 등 많은 장점들로 인해 사용이 증대되고 있으며, 그 사용 용도도 기존의 방위산업, 우주항공산업 분야에서 자동차산업, 스포츠, 의료, 해양산업, 석유화학, 원자력 등 다양한 민수산업 및 레저 산업분야로 확대·발전되어가고 있다. 항공기, 열교환기 등에서 생체용에 이르기까지 용도가 확대됨에 따라 산업현장에서는 타이타늄의 접합 및 용접 기술의 중요성이 더욱 증대되고 있다.

#### 2. 타이타늄 및 그 합금의 특징

타이타늄은 비강도, 내식성 및 고온 특성 등이 우수하며, 비자성, 내알러지성, 컬러링(coloring) 등 많은 특징들을 갖는 우수한 소재이다. 순 타이타늄의 열전도율은 철의 1/3, 알루미늄의 1/10, 동 1/20 정도로 낮으며, 전기전도율 또한 동 3.1% 정도로서 매우 낮으나 통전성이 있어 저항용접이 가능하다. 그리고 생체적합특성이 우수하여 알러지성이 매우 낮고 금속이온의 방출이 낮아 악세사리, 의료용 소재, 웰빙형 주방도구 등으로 사용이 확대되고 있는 실정이다.

타이타늄은 1790년 영국의 William Gregor에 의해서 Ti금속의 존재를 발견하였고, 이어 Martin Kraproth (1795), Wilerston(1823), Muller(1856), Kilirov (1875), Hunter(1910), Van Arkel(1925), 크롤법의 개발로 공업적 생산공정기술에 크게 기여한 야금학자 Kroll(1936) 등과 같은 과학자들의 노력이 더해져서 드디어 1950년부터 타이타늄 압연재가 공업적으로 산업화되기 시작하여 대량 생산되면서 현재에 이르고 있다.

타이타늄은 상온에서 hcp구조를 갖는  $\alpha$ 상과 약  $883^\circ\text{C}$ 에서 변태하여 bcc구조를 갖는  $\beta$ 상의 동소체로 이루어져 있다. 순수 타이타늄에 합금원소를 첨가하게 되면 어느 온도구간에서  $\alpha$ 상과  $\beta$ 상이 공존하는 영역이 존재하게 되며, 합금원소의 종류 및 양에 따라서 이상영역이 상온까지 그 온도범위가 확장될 수 있다. 따라서, 타이타늄 합금은 합금원소의 종류와 양에 따라 다양한 합금이 존재하고, 대표적으로 순 타이타늄,  $\alpha$ 형 합금,  $\alpha + \beta$ 형 합금,  $\beta$ 형 합금으로 나눈다.  $\alpha$ 형 타이타늄 합금은  $\alpha + \beta$ 형이나  $\beta$ 형 타이타늄 합금에 비하여 내식성이 우수하고, 고온 크립저항성이 뛰어난 것에 반하여 단상으로만 존재하기 때문에 열처리에 의한 강도와 인성의 증가 효과를 기대할 수 없는 단점이 있다. 이 합금의 열처리는 단순히 가공 후의 잔류응력을 제거하기 위한 어닐링(annealing) 또는 재결정화 처리뿐이다. 그러나 열처리에 민감하지 않은 성질로 인해 용접성은 뛰어나다<sup>6)</sup>. 반면  $\beta$ 형 타이타늄 합금은 열처리가 가능하기 때문에 강도와 인성이 좋으나, 용접성 및 고온 크립저항성 등이 나쁘다. 또한 많은 양의  $\beta$ 안정화 원소의 첨가로 고온 안정상인  $\beta$ 상이 상온에서도 준안정상으로 존재하기 때문에 경화능이 우수하고 가공성도 우수하다. 그러나  $\beta$ 안정화 원소로 인해 다른 타이타늄 합금에 비해 밀도가 증가하게 되며 creep 강도나 연성이 떨어지게 된다. 따라서 실용합금으로서  $\alpha$ 합금과  $\beta$ 합금의 우수한 성질을 고루 갖춘  $\alpha + \beta$ 합금이 많이 사용되어 왔으며,

그 중에서도 Ti-6Al-4V합금이 전체 사용량의 50%이상을 차지하고 있다.

### 3. 타이타늄의 접합기술

일반적인 금속의 접합기술은 크게 액상접합, 고상접합, 기계적 결합 등으로 구별할 수 있으며, 각각의 접합 방식에 따라 다양하게 분류될 수 있다. 하지만 타이타늄의 접합이 타 금속의 접합과 달리 특수기술을 요구하는 가장 큰 이유는 타이타늄이 활성이 큰 금속으로 산소, 수소, 질소 등과 친화력이 강하다는 것이다.

지금까지 알려진 타이타늄의 일반적인 접합기술은 그림 1과 같이 접합부의 용융여부에 의해 크게 용접과 결합으로 구분될 수 있다. 좀 더 세부적인 분류에는 클래딩(cladding), FSW (friction stir welding), A-TIG (Activative TIG), TIG-F (TIG over the flux layer), TIG-FW (TIG using Flux-cored Filler Wire), Narrow-gap Arc Welding 등이 포함될 수 있다.

일반적으로 타이타늄의 접합방법은 타이타늄 제품의 용도, 형상, 품질, 치수 등을 고려하여 적절한 접합기술을 선택하게 되는데, 이 중에서 고품위의 품질을 요구하는 분야에는 전자빔 용접, 레이저 용접, 플라즈마 용접 등이 주로 활용되고 있다. 각각의 특성들을 가장 일반적인 아크용접법(TIG)과 비교하면 다음 표 1과 같다. 이들 용접법은 TIG용접과 달리 열 에너지의 밀도가 높아 용입깊이가 크기 때문에 비교적 두꺼운 판재의 용접도 가능하다. 전자빔 용접의 경우 용입깊이 및 용접부 특성이 매우 우수하여 항공우주 및 방위산업, 초정밀 부품 등 최고품질의 용접부 특성이 요구되는 곳에

주로 사용된다.

### 4. Flux를 이용한 타이타늄의 신(新)용접기술

일반적으로 타이타늄의 접합은 대기와 차단된 진공분위기 또는 불활성 분위기하에서 이루어져야 한다. 현재까지 국내의 타이타늄 산업 및 시장은 주로 장치산업에 의존하고 있으며, 국내 관련업체의 보유기술 또한 이와 관련한 TIG, MIG 등과 같은 용접관련기술이 주(主)를 이루고 있는 실정이다. 하지만, 최근에 플럭스(flux)를 이용하여 타이타늄 소재를 극히 효율적으로 접합할 수 있는 방법들이 고안되었고, 이들 방법에는 경제성 및 용접특성이 우수한 TIG-F와 TIG-FW 등의 접합기술이 포함된다.

#### 4.1 TIG-F 용접기술

타이타늄 소재의 응용분야 중 민수산업 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 접합기술은 TIG (Tungsten

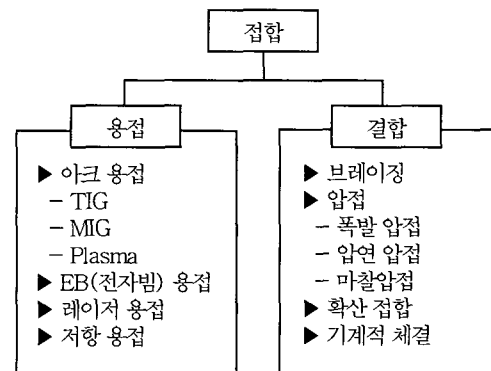


그림 1. 타이타늄의 일반적인 접합법의 분류

표 1. 타이타늄의 대표적인 용접기술의 비교

	TIG 용접	전자 빔 용접	레이저 빔 용접(CO <sub>2</sub> )	플라즈마 아크 용접
용접 깊이(mm)	0.5~5	0.5~200	0.5~20	0.1~10
최대출력(kW)	6	100	15 (60)	15
power 밀도 (W/m <sup>2</sup> )	3X10까지	1013까지	3X1011까지	3X10~3X1010
V개선의 필요성	필요	불필요	불필요	불필요
변형	크다	매우 작다	작다	작다
빔 정형	불가	불가	가능	불가
용접속도	느리다	매우 고속	고속	보통
조작상의 제한	거의 없다	고압과 X선 장해	고압과 빛 장해	조금
설비의 크기	작다	매우 크다	매우 크다	보통
원주용접	간단	곤란	곤란	가능
분리된 환경으로의 적용	가능	매우 곤란	가능성 크다	가능

Inert Gas Arc Welding)용접기술이다. 이 용접기술은 구체적으로 다음과 같은 장단점이 존재한다. 먼저 장점으로는 용접부의 기계적 성질이 모재와 거의 같은 수준으로 양호하며, 거의 모든 자세의 용접이 가능하고, 용접비드가 평평하며, 입열량과 용착량을 독립적으로 제어할 수 있고, 박판의 용접이 가능하다. 반면에 일반적인 단점으로는 용접속도가 느리고, 불활성 가스에 의해 실드를 필요하며, 이에 따른 설비 및 치구가 필요하다는 것 등이다. 또한 전자빔이나 레이저 등의 열원에 의한 용접보다 용접재료의 두께나 폭에 제한이 따른다.

이에 장점을 유지하면서 단점을 최소화하기위한 타이타늄의 신(新)용접기술로 E. O. Paton Electric Welding Institute에서 TIG-F (TIG over the flux layer) 기술이 개발되었다<sup>7)</sup>. 이 기술의 핵심은 산소가 없는 할로젠 플럭스(halide flux)를 실드가스와 함께 이용하는 것으로, 전자빔 용접이나 레이저 용접에 버금가는 입열량의 집적도와 큰 용입깊이, 좁은 용접부, 높은 용접속도 등의 특징을 갖는다. 주로 사용되는 플럭스로는 BaF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub>, NaF, AlF<sub>3</sub> 등이 있으며, 이 플럭스는 서스펜션형태이기 때문에 스프레이를 이용해 용접하고자 하는 부위에 뿌려주면 된다. 따라서 플럭스가 용접 예정부위에 균일하게 도포될 수 있으며, 그 양은 용접전류에 따라 조절될 수 있다. 플럭스의 주요 기능은 아크 열원을 집속시켜줌으로써 아크빔의 온도를 증가시켜주고 양극의 전류밀도를 상승시키는 역할이다. 부차적인 기능으로 플럭스에 의한 실드기능을 들 수 있다.

그림 2는 타이타늄의 TIG 용접시 플럭스를 이용하지

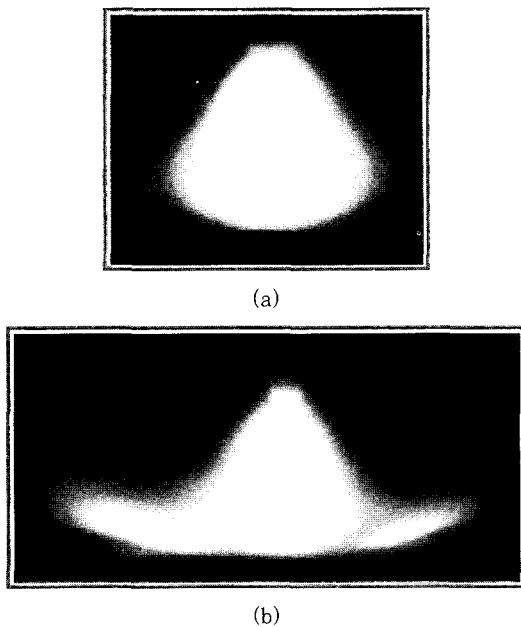


그림 2. (a) 일반 TIG 용접시 아크빔 형상, (b) 플럭스를 이용한 TIG 용접시 아크빔 형상

않은 경우와 이용한 경우에 대해 아크빔의 조사 형상을 촬영한 것으로, 플럭스의 사용에 의해 아크빔의 집속이 강화되는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 실제 TIG 용접을 수행할 경우 아크빔과 용접부의 형상에 대해 도식적으로 나타낸 것으로, 플럭스를 사용하지 않을 경우에는 아크빔이 퍼지고 전류밀도가 낮기 때문에 용접풀의 폭이 넓고 용접깊이가 얇다. 그러나 플럭스를 사용한 경우에는 아크빔의 집속이 이루어져 용접풀의 폭이 좁고 용접깊이가 현저히 증가하게 된다. 즉, 타이타늄의 TIG-F 용접시 플럭스의 사용은 아크빔의 투과깊이를 증가시키고, 용접부의 폭을 감소시키며, 용접에 필요한 입열량을 감소시키는 효과를 가져온다. 그림 4는 아크빔의 중심축을 기준으로 좌우 대칭이 되는 빔라인의 온도분포를 나타낸 것으로 플럭스를 이용하지 않은 경우에는 빔영역의 반경이 약 0.7cm정도이나, 플럭스를 사용한 경우에는 약 0.37cm정도로 반경이 감소하는 것을 알 수 있으며, 빔의 투과깊이 또한 증가함을 확인할 수 있다. 특히, 플럭스의 사용에 의해 아크빔의 집속이 향상됨으로써 좁은 영역에 빔이 집중되어 전류밀도가 증가하게 되며, 그에

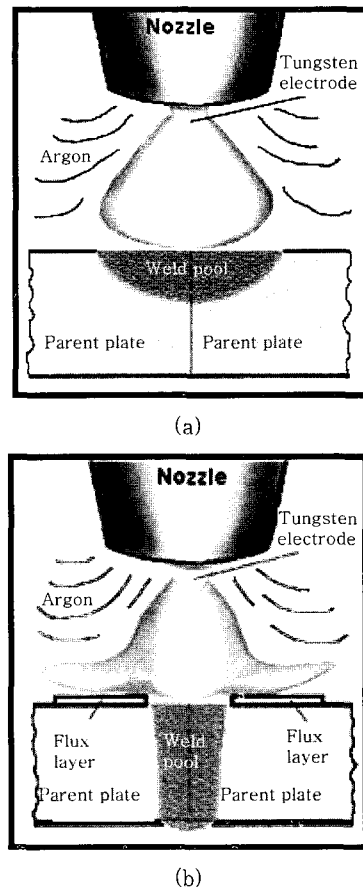


그림 3. 아크빔 및 용접풀 형상을 나타낸 도식도; (a) 플럭스 미사용, (b) 플럭스 사용

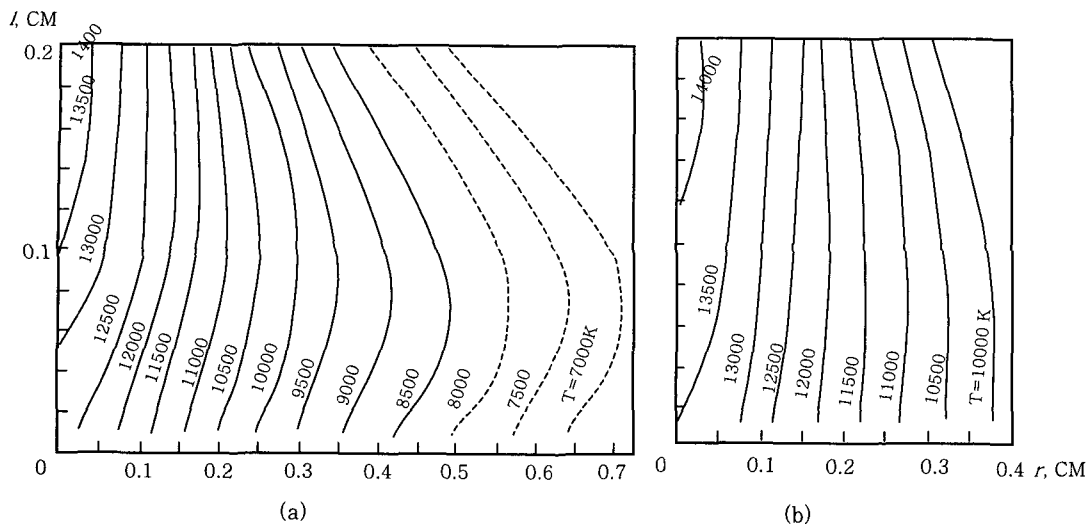


그림 4. 아크빔의 중심축을 기준으로 한 온도분포; (a) without flux, (b) with flux

따라 동일한 용접영역내에 더 높은 용접온도를 형성하게 되는 것이다. 따라서, 일반적인 아크빔을 이용하는 TIG용접에 비해 용접 입열량을 저감시킬 수 있어 생산성을 향상시킬 수 있다. 이러한 용접부의 전류밀도 증가 효과는 사용하는 플럭스의 종류에 따라 다소간 차이가 있으며, 이를 그림 5에 도시하였다. BaF<sub>2</sub>이나 CaF<sub>2</sub> 등의 사용보다는 NaF, AlF<sub>3</sub> 등의 플럭스 사용이 아크빔의 집속을 높여 온도를 증가시키는 것을 확인할 수 있다.

따라서, 아크빔의 집속증대효과에 의해 어떠한 사전 홈(groove) 준비없이 단 1회 용접(one pass)만으로도 최대 6mm 두께의 타이타늄 소재를 용접할 수 있다. 이것은 전통적인 일반 TIG 용접에 비해 용접전류는

1.5~2배로 감소시킬 수 있고, 용접부위 폭 및 HAZ 부위 폭 또한 1.5~2배로 감소시킬 수 있는 것이다. TIG-F 방법에 의한 1회(one pass) 최소 용접두께는 약 0.8mm정도이고, 최대 용접두께는 약 6.0mm정도이다. TIG-F 방법을 이용한 아크용접은 플러그 용접뿐만 아니라 butt, 겹침, T-joint 등을 용접하는데 효과적이며, 수직 및 수평 평면에 대해 작업을 수행할 수 있다. 더욱이 1.0m를 용접하는데 플럭스의 양이 겨우 7-10그램 정도로 매우 적은 양이 소요될 뿐이다. 이에 플럭스를 이용하는 경우 얻을 수 있는 경제적 이득을 기존 방법과 비교하여 적용하는 재료의 두께에 따라 조사하였다. 일반적인 TIG 용접법에 비해 플럭스를 이용하여 용접하는 경우 소요되는 시간, 에너지, filler wire, 아르곤 가스 등에 대해 비교 평가하여 두께 3mm이하의 경우는 그림 6(a)에, 3mm이상 6mm이하의 두께를 용접하는 경우에 대해서는 그림 6(b)에 나타내었다. 두께 3mm이하의 소재를 용접할 경우 power 나 filler wire의 소비가 25%이상 절약되는 것을 알 수 있으며, 전체적으로 TIG-F 접합법의 사용으로 인해 1.0m를 용접하는데 약 15~20%의 경제적 이득을 얻을 수 있다. 두께 3~6mm의 소재를 용접할 경우에는 용접공정에 소요되는 시간을 1/2이하로 단축시킬 수 있으며, filler wire, 아르곤 가스 등에서도 60%정도의 절감효과를 얻을 수 있어 기존 TIG 용접법에 비해 평균 50%이상의 경제성 증대효과를 얻을 수 있다.

한편, 타이타늄 소재의 아크 용접부위의 급속학적 결합중 하나로 기공이 있다. 이것은 준정적 하중 하에서는 용접부의 기계적 특성에는 큰 영향을 미치지 못하나 피로와 같은 동적 하중 하에서는 치명적인 결함으로 작용할 수 있다. 타이타늄 소재에서 용접부 기공은 주로

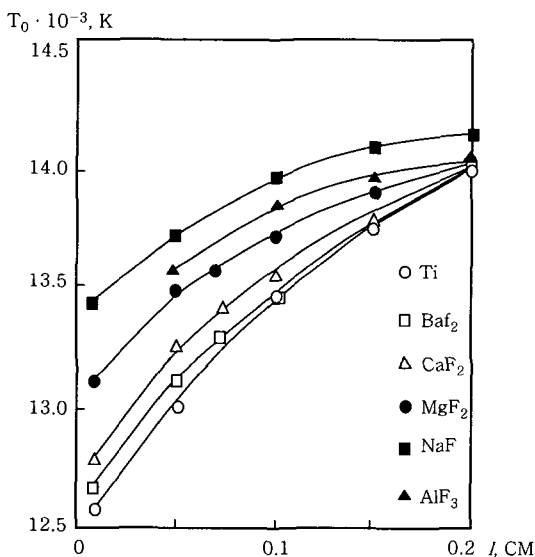
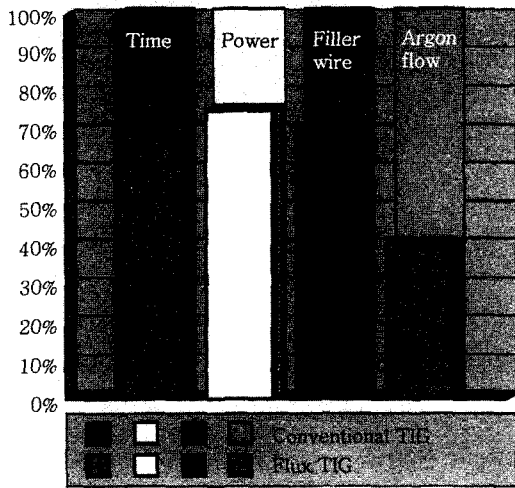
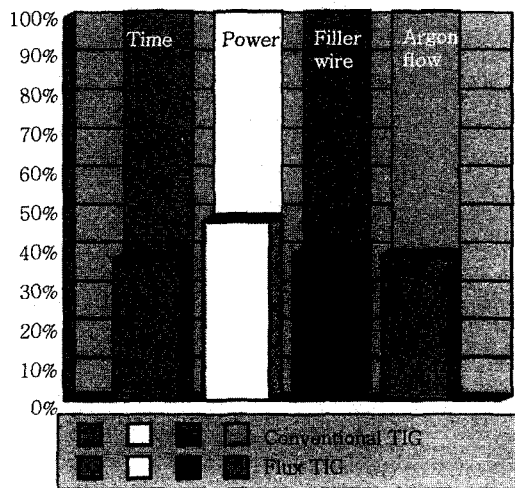


그림 5. 아크빔의 중심축을 기준으로 온도 분포에 미치는 플럭스의 영향



(a)



(b)

그림 6. 기존 TIG와 TIG-F 접합기술의 경제적 이점 비교; (a) 두께 3mm 이하, (b) 두께 6mm이하



그림 7. 플럭스를 이용한 타이타늄 용접부위; 아래 사진은 플럭스에 의한 슬래그 껍질(slag crust)을 제거한 후 용접부위

응고시 액상에서 가스 불순물 특히 수소의 방출에 의한 것이 주요 원인으로 알려져 있다. TIG-F 용접방법에서 사용하는 플럭스는 hydride fluoride ( $Ti_xF_yHz$ )를

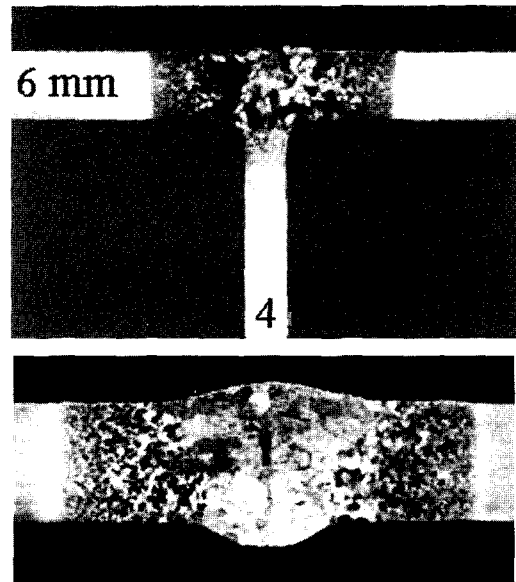


그림 8. TIG-F법에 의해 용접된 용접부위의 단면 마크로 사진

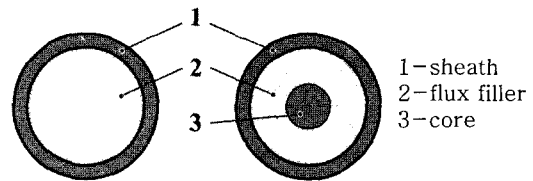


그림 9. Flux-cored filler wire의 형상(단면도)

형성하기 위해 용접풀에 있는 수소를 플루오르에 의해 고착시킴으로써 용접부 표면에 슬래그 형태로 남아있게 된다. 이러한 슬래그 껍질은 용접부를 실드하는 효과를 나타낸다. 또한 그림 3에서 볼 수 있듯이 이 슬래그 껍질(slag crust)은 용접 후 비교적 간단히 제거될 수 있으며, 깨끗한 용접부 표면을 갖도록 하는데 도움이 된다. 플럭스에 의한 기공의 생성 억제효과에 의해 일반 TIG 방법보다 훨씬 우수한 용접부의 동적 특성을 제공할 수 있다.

#### 4.2 TIG-FW 용접기술

6mm이상의 두께인 타이타늄 소재를 용접하기 위해서 새로운 소모성 filler wire를 이용한 접합기술이 개발되었으며 이를 TIG-FW (TIG using Flux-cored Filler Wire) 접합기술이라 한다. 이 용접기술은 원리적으로 TIG-F기술과 동일하며, 단지 보다 두꺼운 소재를 건전하게 용접하기 위해 소모성 filler wire를 사용한다는 것이 구별된다고 하겠다. FW는 Flux filler를 타이타늄 호일로 포장한 형태를 갖으며 크게 화학조성

과 형상에 따라 두 가지로 개발되었다(그림 9). 용접부에 주입되는 플럭스의 양은 FW의 feed rate를 변화시킴으로써 조절이 가능하며, 이 플럭스의 양을 조절함으로써 넓은 영역의 용접전류밀도 범위내에서 용접이 가능하다. 그러므로 TIG-FW 접합기술은 두께가 6~16mm정도가 되는 타이타늄 및 타이타늄 합금을 사전 groove 준비없이 한번의 pass만으로 용접할 수 있다.

그림 10은 flux-cored filler wire를 이용한 아크빔 용접공정을 나타낸 대표도로서, 플럭스에 의한 실드효과가 있으나 대기 중에서 용접을 실시하므로 아르곤 가스에 의한 실드는 꼭 해주어야 한다. 두꺼운 타이타늄 소재를 용접하는 경우 기존의 groove를 준비해야하나, FW를 이용한 경우 groove 준비없이 one pass만에 용접할 수 있으며, 경제적 이득을 조사한 결과는 다음 그림 11과 같다. FW를 이용할 경우 기존 방법에 비해 소요시간 및 아르곤의 소비는 약 70%정도 절약되며, filler의 경우는 90%정도까지 감소시킬 수 있다. 전체적으로 두꺼운 타이타늄 소재 1.0m를 용접하는데 기존 TIG 용접방법에 비해 약 35~40%의 경제적 절감효과를 얻을 수 있다. 용접부의 건전성 측면에서는 앞 절의 TIG-F방법과 마찬가지로 사용하는 플럭스가 hydride fluoride를 형성하기 위해 용접풀에 있는 수소를 플루오르에 의해 고착시킴으로

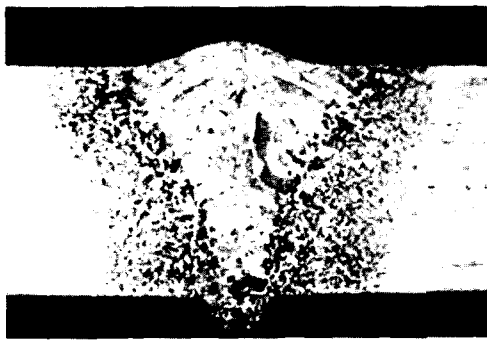
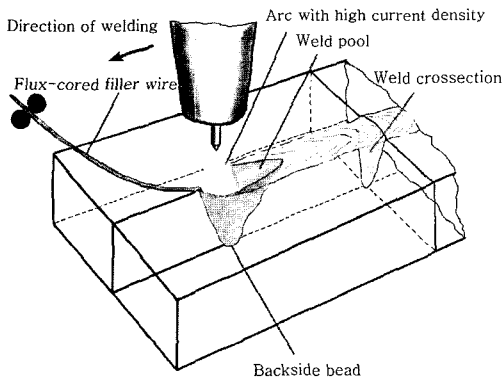


그림 10. FW를 이용한 TIG-FW 용접방법을 나타낸 도식도 및 용접부위의 단면 마크로 사진

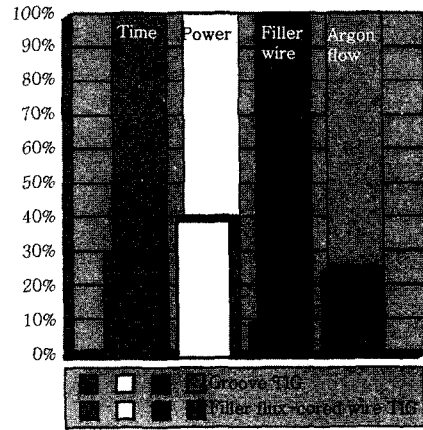


그림 11. 기존 TIG와 TIG-FW 접합기술의 경제적 이점 비교

써 기공의 생성을 억제하는 효과를 가져와 일반 TIG 방법보다 훨씬 우수한 용접부 품질을 제공할 수 있다. 플럭스를 이용한 아크빔 용접기술은 준정적 및 동적 하중하에서의 용접부 물성을 향상시킬 수 있으며, 특히 기존의 TIG용접기술에 비해 용접부의 피로 특성이 더욱 향상될 수 있다.

### 5. 맺음말

타이타늄 및 그 합금이 갖는 우수한 특성으로 인해 기존의 방위산업, 우주항공산업 분야에서 다양한 레저산업 및 민수산업분야로 그 활용성이 확대·발전되어감에 따라 산업현장에서는 타이타늄의 접합 기술의 중요성이 더욱 증대되고 있다. 최근에는 용접부위의 안정성, 우수한 준정적 및 동적 특성, 내식성 등에 대한 요구가 점차 높아짐에 따라 전자빔이나(EBW) 플라즈마(PAW), 레이저(LBW)를 열원으로 하는 용접법을 현장에 적용하려는 흐름이 있는 것이 현실이다. 그러나 이러한 용접기술들은 장치비용, 시설비용, 크기 및 공정 제한 등 경제성 면에서 현장에 적용하는데 많은 약점을 지니고 있다. 이에 기존의 TIG 용접법의 장점과 고열원의 EBW, LBW 등의 장점을 동시에 겸비한 플럭스를 이용한 TIG-F 및 TIG-FW 용접기술이 주목받고 있다. 플럭스를 이용한 이들 접합기술은 기존의 TIG 용접방법이 가지는 장점들을 그대로 유지하면서 단점들을 보완할 수 있고, 경제성도 확보할 수 있어 매우 유용한 접합기술로 현장에서 매우 각광받을 것으로 판단된다. 이러한 플럭스를 이용한 타이타늄의 고효율 접합기술은 타이타늄 제품의 신뢰성 확보, 불량률 저하, 높은 생산성, 제품의 다양화와 더불어 국내의 가격경쟁력을 높여주는 역할을 할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 한유라시아권 국제기술협력 사업인 '부품소재종합기술지원사업'과 재료연구소 '기본사업'의 지원하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. M.A. Greenfield and H. Margolin: Metall. Trans. A, **3A** (1972), 2649-2659
2. D. Eylon, J.A. Hall, C.M. Pierce and D.L. Ruckel: Metall. Trans. A, **7A** (1976), 1817-1826
3. A. Gysler and G. Lutjering: Metall. Trans. A, **13A** (1982), 1435-1443
4. H. Margolin, J.C. Williams, J.C. Chesnutt and G. Lutjering: Proc. of the 4th Int's Conf. on Ti, **1** (1980), 169-216
5. W. Lee and C. Lin: Mater. Sci. Eng., **A241** (1998), 48-59
6. Matthew J. Donachie, Jr.: Titanium, A Technical Guide, ASM INTERNATIONAL, Metals Park, OH, (1987), 131-155
7. V.P. Prilutsky and S.V. Akhonin: Technical Report of E.O. Paton Electric Welding Institute (2007)



- 이 동 근
- 1972년생
- 한국기계연구원부설 재료연구소
- 타이타늄합금, 고온내식재료, 특수접합
- e-mail: leechodg@kims.re.kr



- 이 용 태
- 1952년생
- 한국기계연구원부설 재료연구소
- 타이타늄합금, 고온내열재료, 항공소재
- e-mail : ytleee@kims.re.kr