

# 플럭스(flux)를 이용한 타이타늄의 고효율 접합기술

이동근, 이용태 | 재료연구소

## 1. 머리말

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 전세계적으로 빠르게 성장·확대되고 있다.

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.

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. 따라서 일반적으로 타이타늄의 접합은 대기과 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. 이에 본 고에서는 플럭스(flux)를 이용하여 타이타늄 소재를 극히 효율적으로 접합할 수 있고, 경제성 및 용접특성이 우수한 TIG-F 및 TIG-FW, Narrow-gap arc welding 등의 접합기술을 플라즈마, 전자빔, 레이저 용접 등의 방법과 비교하여 설명하고 그 특성을 파악해 국내의 관련산업 발전에 도움이 되고자 한다.

## 2. 타이타늄의 접합기술

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.

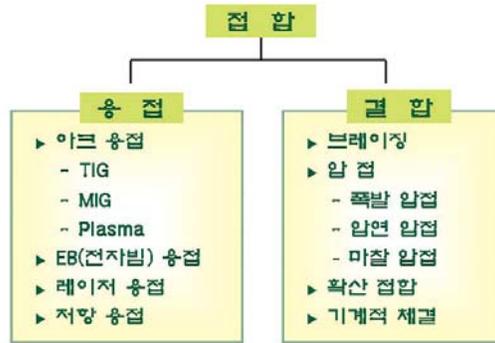


그림 1. 타이타늄의 일반적인 접합법의 분류.

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.

표 1. 타이타늄의 대표적인 용접기술의 비교.

	TIG 용접	전자빔 용접	레이저 빔용접(CO <sub>2</sub> )	플라즈마 아크용접
용접 깊이(mm)	0.5~5	0.5~200	0.5~20	01.~10
최대출력(kW)	6	100	15 (60)	15
power 밀도 (W/m <sup>2</sup> )	3×10까지	1013까지	3×1011까지	3×10~3×1010
V개선의 필요성	필요	불필요	불필요	불필요
변형	크다	매우작다	작다	작다
빔 정형	불가	불가	가능	불가
용접속도	느리다	매우 고속	고속	보통
조작상의 제한	거의 없다	고압과 X선 장애	고압과 빛 장애	조금
설비의 크기	작다	매우 크다	매우 크다	보통
원주용법	간단	곤란	곤란	가능
분리된 환경으로의 적용	가능	매우 곤란	가능성 크다	가능

### 3. TIG-F 용접기술

타이타늄 소재의 응용분야 중 민수산업 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 접합기술은 TIG (Tungsten 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 용접 속도가 느리고, 불활성 가스에 의한 실드가 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 최소화하기 위한 타이타늄의 신(新)용접기술로 E. O. Paton Electric Welding Institute에서 TIG-F (TIG over the flux layer) 기술이 개발되었다. 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  $BaF_2$ ,  $CaF_2$ ,  $MgF_2$ ,  $NaF$ ,  $AlF_3$  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.

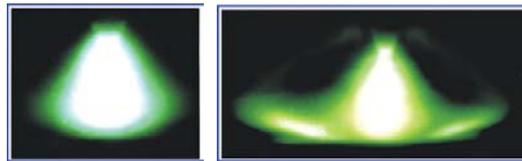


그림 2. (a) 일반 TIG 용접시 아크빔 형상, (b) 플럭스를 이용한 TIG 용접시 아크빔 형상.

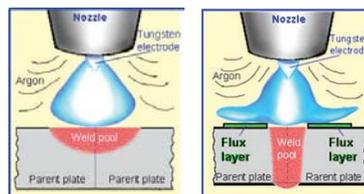


그림 3. 아크빔 및 용접풀 형상을 나타낸 도식도; (a) 플럭스 미사용, (b) 플럭스 사용.

그림 3은 실제 TIG 용접을 수행할 경우 아크빔과 용접풀의 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 0.7cm 정도이나, 플럭스를 사용한 경우에는 약 0.37cm 정도로 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 되

며, 그에 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.

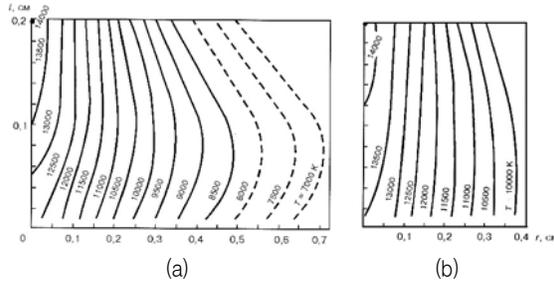


그림 4. 아크빔의 중심축을 기준으로 한 온도분포: (a) without flux, (b) with flux.

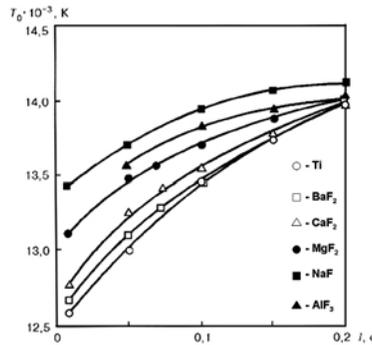


그림 5. 아크빔의 중심축을 기준으로 온도 분포에 미치는 플럭스의 영향.

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 power나 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.

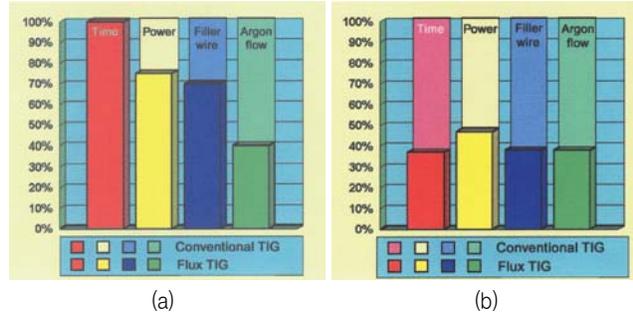


그림 6. 기존 TIG와 TIG-F 접합기술의 경제적 이점 비교; (a) 두께 3mm 이하, (b) 두께 6mm이하.

한편, 타이타늄 소재의 아크 용접부위의 금속학적 결함중 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 응고시 액상에서 가스 불순물 특히 수소의 방출에 의한 것이 주요 원인으로 알려져 있다. TIG-F 용접방법에서 사용하는 플럭스는 hydride fluoride ( $Ti_xFyHz$ )를 형성하기 위해 용접 풀에 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.

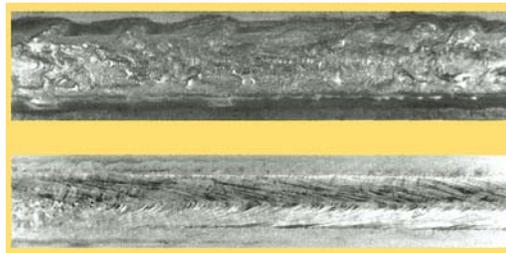


그림 7. 플럭스를 이용한 타이타늄 용접부위; 아래 사진은 플럭스에 의한 슬래그 껍질(slag crust)을 제거한 후 용접부위.

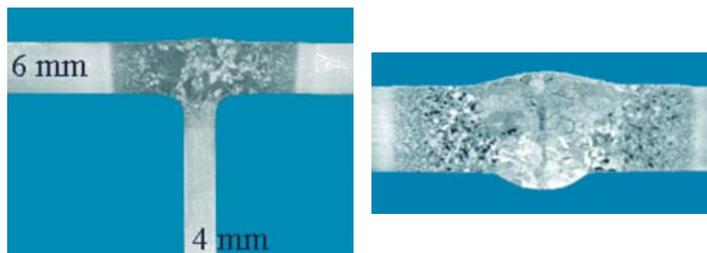


그림 8. TIG-F법에 의해 용접된 용접부위의 단면 마크로 사진.

#### 4. TIG-FW 용접기술

6mm이상의 두꺼운 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-F 기술과 동일하며, 단지 보다 두꺼운 소재를 건전하게 용접하기 위해 소모성 filler wire를 사용한다는 것이 구별된다고 하겠다. FW는 Flux filler를 타이타늄 호일로 포장한 형태를 갖으며 크게 화학조성과 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.

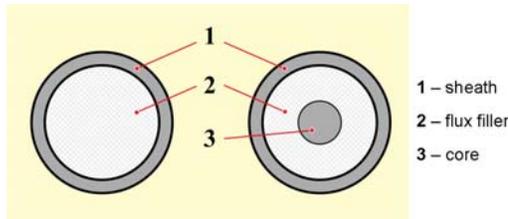


그림 9. Flux-cored filler wire의 형상(단면도).

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 절감되며, 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 고착시킴으로써 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 피로특성이 더욱 향상될 수 있다.

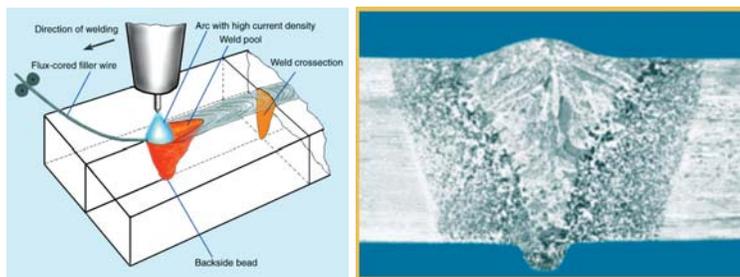


그림 10. FW를 이용한 TIG-FW 용접방법을 나타낸 도식도 및 용접부위의 단면 마크로 사진.

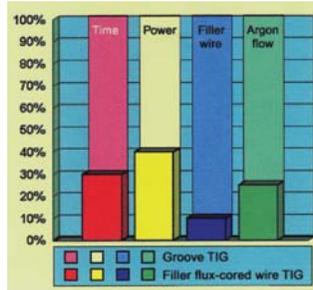


그림 11. 기존 TIG와 TIG-FW 접합기술의 경제적 이점 비교

## 5. Narrow-gap Arc Welding 용접기술

10mm이하의 큰 틈새를 갖는 후판의 타이타늄 소재를 용접하는데 있어 Narrow-gap arc welding 기술은 groove welding에 비해 매우 유용한 기술로 평가받고 있다. 일반적인 groove 용접과의 차이점은 그림 12에 도시되어 있다. Narrow-gap 아크용접 기술은 groove 용접기술에 비해 용착금속의 양을 약 30%까지 낮출 수 있고, 일의 생산성을 증대시킬 수 있으며, 용융 및 HAZ 부위의 폭을 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 또한, 타이타늄의 다른 용접법, 예를 들면, immersed-arc welding, MIG, ESW 등에 비해 용접 입열량이 낮고, 간단한 groove 준비로 인한 비용절감, 용접봉 및 전력의 절감, 그리고 용접 재료의 두께에 무관하게 고품질의 용접부위를 제공할 수 있는 장점이 있다. 이를 위해서는 무엇보다 용접봉과 용접부 수직면 사이의 신뢰성 있는 용해가 요구되며, 용접부의 불활성가스 실드 및 용접금속의 냉각이 확실히 이루어져야 한다.

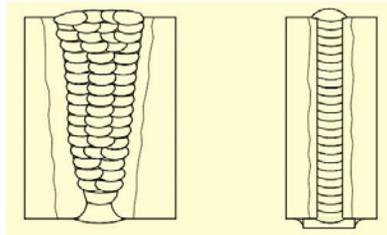


그림 12. (a) Groove welding, (b) Narrow-gap arc welding

각각의 pass에 대해 용접시 텅스텐 전극을 이용한 용접아크의 이동방식을 그림 13에 나타내었다. 외부 변환 자기장을 용접아크에 교대로 걸어줌으로써 두꺼운 타이타늄 소재를 건전하게 용접할 수 있다. 이 장치는 전자석과 power supply로 구성되는데, 1~80Hz 주파수 범위내에서 AC 펄스를 형성할 수 있도록 되어 있다. 이 방법에 사용되는 용접봉은 2~5mm 정도의 직경이 일반적이며, 10mm폭의 틈새의 경우 one pass당 약 4~8mm의 비드를 형성시킬 수 있다. 우크라이나의 E.O. Paton Electric Welding Institute에서는 타이타늄 소재의 용접을 위해 CNC welding head T432가 장착된 narrow-gap arc welding 장비(model AD 238)를 개발하였으며, 이 용접장비를 이용해 용접할 수 있는 최대 용량은 두께 110mm, 길이 최대 3000mm까지 narrow-gap 아크용접을 실시할 수 있도록 설계되었다.

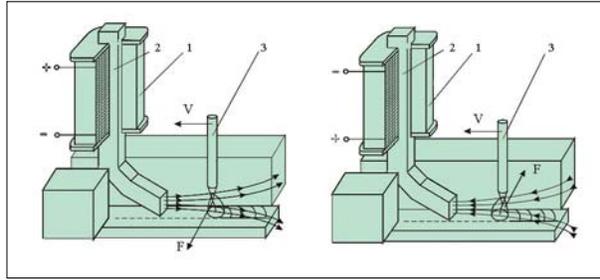


그림 13. 타이타늄 소재의 Narrow-gap 아크용접시 자기장 유도 방식

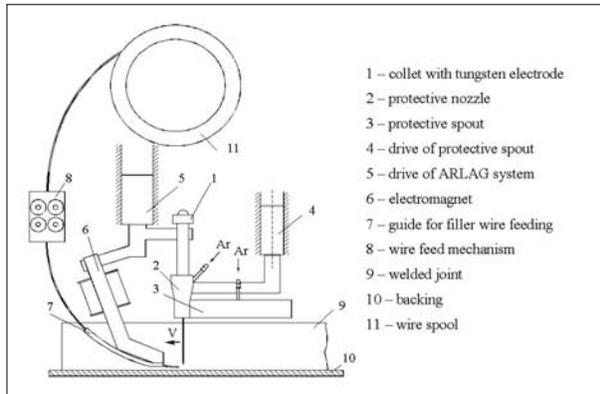


그림 14. Narrow-gap 아크용접장치의 도식적 개념도

용접 아크빔을 자기장에 의해 제어할 경우 여러 이점이 존재한다. 수직 groove 벽면근처에서 용접아크가 유지하는 시간은 유도자기장과 주파수 등의 인자들을 조절함으로써 제어할 수 있고, 이것은 틈새와 용접금속, 용융풀의 용융금속 사이의 아크 입열량을 재분배시킴으로써 용착효율을 증가시키고 동시에 용접금속과 모재(base metal)의 용융을 건전하게 한다. 이 용접기술에서 중요한 것 중 하나가 첫 번째 pass 단계에서 가장 간단하면서 일반적인 permanent backing을 하는 것으로, 용접공정의 생산성을 높이고 back bead의 품질을 향상시키는 기능을 한다. 물론 안정적인 열적 조건을 만족시키기 위해 backing에는 수냉이 이루어져야 하며, 이렇게 용접된 용접부위의 단면은 그림 15와 같이 매우 양호한 용접비드를 형성하는 것을 확인할 수 있다. 이 방법을 이용할 경우 20~110mm두께의 타이타늄 및 그 합금의 후판 소재를 양호하게 접합할 수 있으며, 용접부의 기계적 특성 및 기공율도 모재에 버금가는 것으로 매우 건전한 용접특성을 나타낸다.

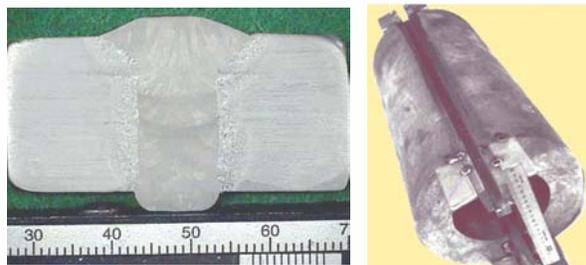


그림 15. Narrow-gap 아크 용접법에 의해 용접된 부위의 단면 및 L 800mm × t 50mm의 drum 용접.

## 6. 맺음말

타이타늄 소재는 비강도(강도/밀도), 고온강도 및 열적 특성, 해수내식성 등 많은 장점들로 인해 사용이 증대되고 있으며, 그 사용 용도도 기존의 군수산업/방위산업/우주항공산업 분야에서 스포츠/의료/해양/석유화학/원자력 등 다양한 민수산업 및 레저 산업분야로 확대·발전되어가고 있다. 이에 따라 산업현장에서는 타이타늄의 접합 및 용접 기술의 중요성이 더욱 증대되고 있다. 최근에는 용접부위의 안정성, 우수한 준정적 및 동적 특성, 내식성 등에 대한 요구가 점차 높아짐에 따라 전자빔(EBW)이나 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. 또한, 후판의 타이타늄 소재를 용접할 수 있는 Narrow-gap arc welding 기술의 개발은 기존의 방법에 비해 고효율, 고성능, 고경제성을 갖는 유용한 타이타늄 접합기술이다. 이러한 플럭스를 이용한 타이타늄의 고효율 접합기술은 관련업체들에게 타이타늄 제품의 신뢰성 확보, 불량률 저하, 높은 생산성, 제품의 다양화와 더불어 국내의 가격경쟁력을 높여주는 역할을 할 수 있어 국내 타이타늄 제품 관련시장의 성장·확대에도 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## ❁ 참고 문헌

[1] Technical Report of E.O. Paton Electric Welding Institute



이 동 근

· 재료연구소 소재성형연구센터 선임연구원  
· 관심분야: 타이타늄합금 응용연구 및 접합기술, 특성향상기술, 동적 물성과 파괴 및 변형거동



이 용 태

· 재료연구소 소재성형연구센터 책임연구원  
· 관심분야: 타이타늄합금 응용 연구, 항공기 엔진용 고온재료, 구조재료 성형연구