

## Keyhole GTAW를 이용한 스테인리스강 및 Ti합금의 고능률 용접 기술

장 응 성 · 이 목 영 · 윤 병 현

### High Current Keyhole GTAW for Stainless Steels and Ti Alloys

Woong-Seong Chang, Mok-Young Lee and Byoung-Hyun Yoon

#### 1. 서 언

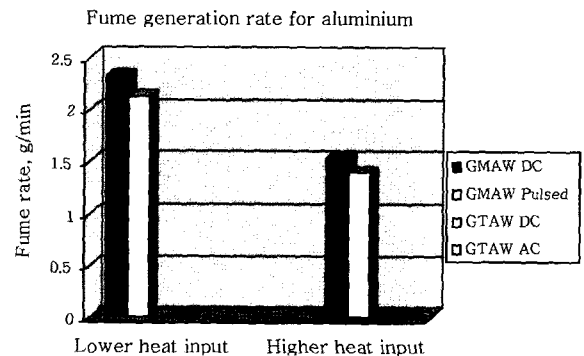
Keyhole GTAW 공정은 호주 *CSIRO* 에 의해 개발된 기술로서 지금까지 플라즈마 아크용접, 레이저 또는 전자빔 용접에 의해서만 가능했던 장점들을 구현할 수 있게 되었다. 이 비교적 간단한 공정은 기존의 아크 용접장치를 활용하여 자동화, 고품질, 심용입 용접이 가능하다. 이 기술은 GTAW 공정에 대한 광범위한 과학적 연구 결과를 바탕으로, 아크 특성, 용융지 안정화, 열 제거와 공정 효율 등과 관련한 상당수의 개선에 의해 달성되었으며 대표적인 사항들은 아래와 같다.

첫째, 대전류 가스텅스텐 아크의 방전 특성에 대한 충분한 이해와, 둘째, 1000A 전류까지 안정적이고 재현성있는 아크 품질을 얻을 수 있는 특수설계된 용접토치, 마지막으로 두가지 용접 인자의 실질적인 활용을 돕기 위한 용융지 거동의 기구에 대한 광범위한 이론적 검증을 포함한다.

용융 모드의 대전류 GTAW는 주로 알루미늄합금과 같은 저밀도금속에 적용되지만 키홀 모드는 전도성이 낮은 재료인 일반 구조용강, 스테인리스강, 니켈합금과 티타늄합금에 적합하다. 이 기술은 일반적인 GTAW의 고품질, 청정 특성과 함께 기존의 GTAW나 GMAW 공정과는 달리 심용입이 가능하다. 장점으로는 흠 가공이 필요없고 용가재의 사용이 필요없거나 상당히 줄일 수 있으며 높은 생산성과 안정적이고 환경친화적인 저흡 환경에서 작업이 가능하다. Keyhole GTAW의 응용 분야는 튜브나 파이프의 조관 및 배관, 대형 판재의 용접 등 다양하다. 일반적으로 이 기술은 자동화 공정에 의해 하향 수평 자세에서 주로 적용되지만 그 외 다양한 자세에서의 용접도 가능하다.

#### 2. Keyhole GTAW 공정의 원리

일반적으로 GTA 용접은 다양한 재료에 있어서 고품질의 이음부를 얻기 위해 사용되어 왔다. 흠 발생은 매우 낮고 플럭스도 사용되지 않으므로 청정한 공정으로 인정되고 있다(Fig. 1). 용접전류는 통상적으로 30A에서 250A 범위에서 제한되므로 수동 또는 자동으로 비교적 박판 용접에 적합하다. 그러나 3mm 이상의 두께에서는 V- 또는 X-type 흠 가공이 필요하다. 이러한 준비 과정과 비교적 낮은 출력 특성으로 인해 용가재를 이용한 다층용접이 필요하게 되고 결과적으로 작업시간이 길어지게 된다. 이러한 제약에 대한 대응 방법으로서는 GTAW 공정을 자동화하고 높은 전류 조건(300 A 이상)에서 작업하여 용융지의 변위를 유도하는 방법이다. 이 경우 용입이 깊어지고 square butt 이음부에 적용될 수 있다. 이러한 공정을 'buried arc', 'immersed



**Fig. 1** Comparison of aluminium fume generation rates for GMAW and GTAW processes. GTAW produces very low fume levels at both low and high current.

Note: GMAW may produce more fume at low current than high current due to changes in metal transfer behaviour.

arc' 또는 간단히 'high current' GTAW라고 부른다.

## 2.1 대전류 melt-in GTAW

대전류 melt-in mode의 GTAW 공정에서는 대입열과 용융지의 변위 효과가 결합하여 비교적 깊은 용입을 얻을 수 있다(Fig. 2). 이러한 변위는 약 250A 이상의 용접전류에서 전자기적으로 유도되는 아크력의 증가에 기인한다. 이 아크력은 전극 아래의 용융지에 깊은 크레이터를 생성시킬 수 있으므로 아크가 소재표면에서 상당한 깊이까지 도달할 수 있게 된다. 그 결과 효율적이고 심용입이 가능한 용접 공정이 된다.

비록 이러한 대전류 GTAW 공정의 중요성에 대해서는 1960년대부터 관심을 받아왔지만 용융지 표면의 조절과 같은 근본적 문제로 인해 실질적으로 적용하는 데에는 어려움이 많았다. 용융지 표면은 표면장력과 부력 작용에 의해 마치 탄성막과 같이 거동하는데 이 현상은 비누방울을 볼 때 막에 일정한 정도의 변형이 유지되는 것과 유사하다고 볼 수 있다(Fig. 3). 따라서, 이 공정은 약 500A 이상에서는 아주 불안정해 지는 경우가 많다. 게다가 용융지의 대류에 대한 영향과 서로 충돌하여 용입 정도를 조절하는 것이 어렵다. 마지막으로 hollow bead라고 알려진 결합이 350A 이상의 전류에서 발생할 수 있다.

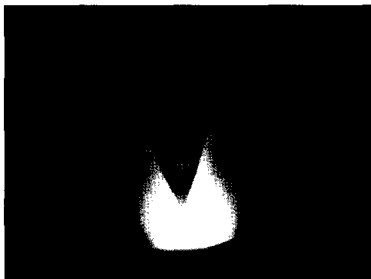


Fig. 2 Close up of the high current melt-in mode GTAW process showing crater formed as a result of the strong arc forces

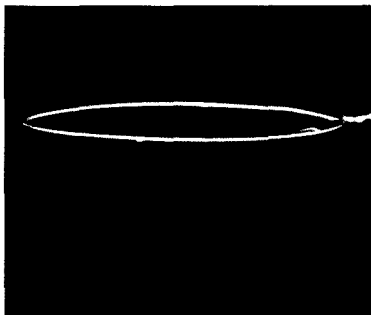


Fig. 3 Soap film analogue of a high current melt-in mode weld pool surface used to visually illustrate the need for well-controlled (arc) forces to maintain a stable geometry

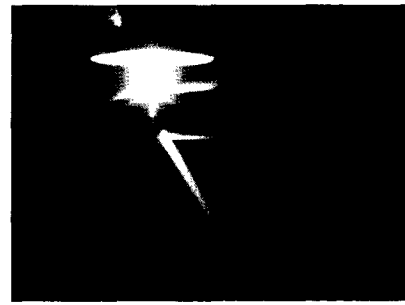


Fig. 4 End-on view of a keyhole GTA weld on 8mm wall thickness AISI 304 (stainless steel) pipe

## 2.2 Keyhole GTAW

키홀 모드 공정은 용융지의 불안정을 해결할 수 있는 우수한 방법이다. 특히, open 된 'keyhole' 형상은 아크 가스가 용접부의 root 부를 통해 배출될 수 있다(Fig. 4). 앞서 언급한 바와 같이 용융지 표면은 탄성막의 성질을 지니므로 비누막을 이용한 비유는 이 현상이 어떻게 일어나는지를 형상화하는데 유용하게 사용될 수 있다.

키홀 모드 아크는 아크 가스의 흐름과 결합하여 매우 건전하고 안정된 용융지를 만든다. 그러나 요구되는 아크 특성을 얻기 위해 사용되는 조건들은 일반 GTAW나 대전류 GTAW 작업과는 확연히 다르다. 용접조건이 keyhole 용접에 적합하지 않는 경우에는 상당히 불안정하게 되고 심지어는 용융지로부터 액체금속이 방출되기도 한다. 키홀과 관련한 물리적 기구로 말미암아 이 공정은 비교적 열전도성이 낮은 재료에 적합하다. 플라즈마 아크, 레이저 빔 용접과 같이 완전 용입형 키홀 공정들은 용융금속의 용락은 표면장력에 의해 방지된다. 결론적으로, 용접이 가능한 최대 두께는 root bead의 형성폭과 재료의 밀도에 반비례한다. 여기서 한가지 시사점은 키홀 하단부의 용융역 폭은 일반적으로 4mm 이하이다.

GTAW 키홀은 다른 공정과 같은 고에너지 밀도를 요구하지 않으므로 낮은 열전도성을 지닌 재료에 가장 효과적이다. 이 공정은 탄소강에 대해서도 적용될 수 있지만 낮은 전도성의 오스테나이트계 스테인리스강이나 티타늄합금에 있어서 더욱 효과적이며 실제로 티타늄합금은 다층용접시 오염되기 쉽고 상대적으로 낮은 밀도를 지니며 니켈합금의 경우 다층용접시 재열균열의 발생 위험이 높으므로 이 공정의 이상적인 적용 대상이다.

## 3. Keyhole GTAW 공정의 성능

Keyhole mode GTAW는 다양한 금속 및 합금의 아

래보기 자세 자동화 용접공정이다. 이 공정은 일반적으로 3~12 mm 두께 범위의 저전도성 금속에 대한 단층용접으로 적합하다. 응용분야로서는 대형판재와 아크 아래에서 회전하는 용기나 관에 적용 가능하다. 이러한 작동 특성 때문에 다른 아크용접 공정에 비해 용융지에서의 대류 거동에 덜 영향을 받는다. 이 공정은 일반적인 공정에서 가장 큰 관심 대상인 모재 화학성분 변화에 따른 민감성과 이 조성이 Marangoni 유동에 미치는 영향으로부터 자유롭다.



(Marangoni 유동은 액체금속 표면의 표면장력 변화에 따라서 용융지에 생기는 유동이다. 형성된 유동 거동에 따라서 GTAW 용융지의 용입이 깊어질 수도 있고 얇아질 수도 있는데 특히 모재의 표면활성화원소 잔류 수준에 의존한다. 이 현상은 GTAW 성능의 신뢰성, 특히 스테인리스강에 큰 영향을 미치므로 그동안 많은 과학적 연구가 수행되었다. 예를 들어 용접 비드형상과 용입깊이가 동일한 회사의 동일한 강에 있어서도 허용하기 힘든 수준으로 변한다).

Keyhole GTAW 는 기존의 GTAW와 동일한 수준의 품질을 제공하면서 통상의 SAW 공정과 대등한 생산성을 얻을 수 있다. 품질은 플럭스를 사용하지 않으면서 아크와 용융지내에서 부드럽고 예측 가능한 유동을 생성함으로써 얻어진다. 이는 허용 가능한 오염 수준을 낮추고 일반적인 non-turbulent pool 환경에서 entrapment 의 위험을 더욱 낮추기 때문이다. 게다가 심용입특성은 양호한 열효율을 제공하고 이로 인해 다른 공정에 비해 총입열량과 변형이 감소한다.

부가적인 생산성 향상 효과는 흠 가공이 필요없으므로 이음부 준비, 용가재 첨가, 용접 층수가 최소화된다. 이 키홀 공정은 비교적 빠른 용접속도가 특징인데 전형적인 키홀 공정성능의 예는 12 mm 두께의 오스테나이트계 스테인리스강을 300 mm/min 속도로 단층 용접이 가능하고 8 mm 두께의 탄소강은 500 mm/min 속도로, 그리고 3 mm 두께의 페라이트계 스테인리스강은 1000 mm/min 속도로 용접이 가능하다. 12mm 스테인리스강에 대한 일반 GTAW와 키홀 GTAW의 비교 예는 Table 1에 나타내었다.

이 비교에는 V 또는 X 흠 가공이나 다층용접시 층간 그라인딩 등과 관련한 추가 시간은 포함되지 않았다. 이외의 장점은 작업 환경과 안전 분야인데 특히, 흠 발생, 전자기 간섭, 총에너지 소비량을 최소화할 수 있다. GTAW 기술은 이들 분야에서 잘 작용하는데 흠 발생은 GMAW 에 비해 무시할 수 있는 수준이다. 전자기 간섭 역시 DC 정전류 조건만 사용하므로 낮다. 마지막으로 에너지 소비량은 흠 가공 생략, 아크 효율 향상, 총 아크 가동시간 단축 등으로 인해 줄어든다.

**Table 1** A comparison of performance of conventional and keyhole GTAW for 12 mm AISI 304 stainless steel

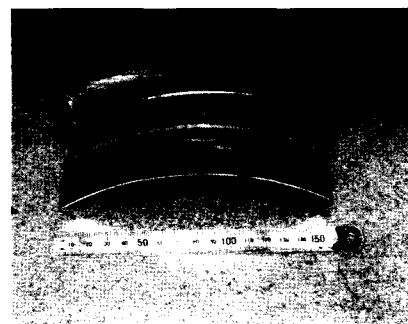
Parameter	Conventional GTAW	Keyhole GTAW
Macrograph		
Edge preparation	Single V, 60° angle	Closed square butt
No. of passes	7	1
Filler wire	1000 g/m	50 g/m
Current	320 A	640 A
Travel speed	200 mm/min	300 mm/min
Total welding time	35 min/m	3 min 20 sec/m

#### 4. 적용 예

Keyhole GTAW 용접은 키홀 모드에 의한 완전용입을 통해 흠 가공이나 용가재의 사용없이 고품위 고품질 용접을 구현할 수 있다. 이러한 용접은 주로 판재 및 pipe를 대상으로 적용되어 왔으나 최근에는 적용 대상이 점차 확대되고 있다. 용접 생산성은 재료 및 두께에 따라서 달라지는데 대표적인 사례는 다음과 같다.

- 가. 3mm 두께의 탄소강, 스테인리스강, Ti합금은 용접 속도 750mm/min
- 나. 4mm 두께의 페라이트계 스테인리스강은 600mm/min
- 다. 6mm 두께의 2205계 이상스테인리스강은 500mm/min
- 라. 8mm 두께의 탄소강은 400mm/min
- 마. 10mm 두께의 304 스테인리스강은 300mm/min
- 바. 14mm 두께의 Ti합금은 250mm/min

Fig. 5는 14mm 두께의 Ti pipe를 keyhole GTAW 공정에 의해 용접한 시험편을 나타내는데 I-butt 이음부에 용가재없이 용접한 결과이다. 한편 13mm의 Ti합금 판재에 대한 키홀 GTAW 용접부 단면을 일반



**Fig. 5** Sections from a 14 mm wall thickness titanium pipe welded with the keyhole GTAW process. Edges were simple square butt, and the weld was completed without using any filler addition

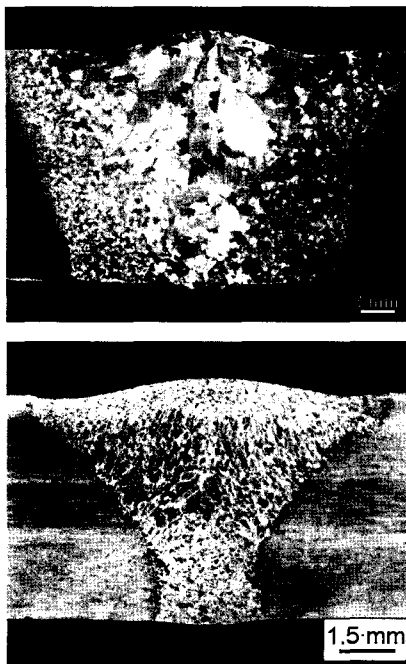


Fig. 6 Macrographs of keyhole GTA weld (top) and conventional GTA weld (bottom) in 13 mm thick ASTM B265 Grade 2-95a (CP titanium) plate. The conventional GTA weld was made using matching filler material, a double-V edge preparation and 6 welding passes

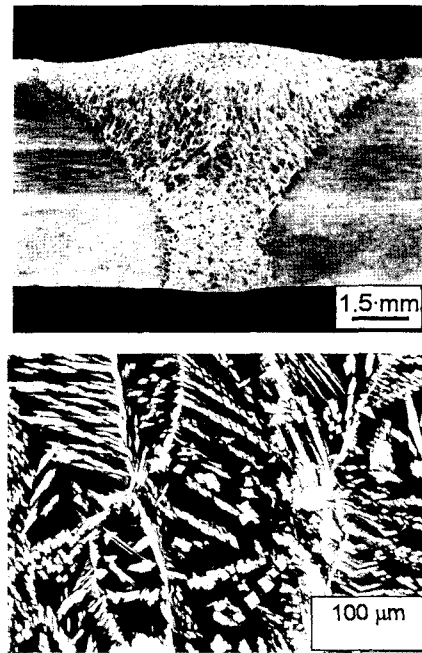


Fig. 7 Macrographs of keyhole GTA weld (top) and weld microstructure (bottom) in 13 mm thick duplex stainless steel plate. Phase balance was controlled by nitrogen addition in shielding gas

GTAW 용접부 단면과 비교한 결과를 Fig. 6에서 볼 수 있는데 일반 용접의 경우 X 홈 가공을 한 후 용가재를 사용하여 6층 용접을 실시한 경우이다.

마지막으로 Fig. 7에는 개발된 용접방법을 적용하여 13mm의 이상스테인리스강을 용접한 단면과 용접금속 조직을 나타내는데 이 경우 용접금속의 상 분율은 차폐 가스에 질소가스를 첨가하여 조정하였다.

### 5. 결 언

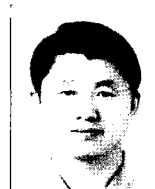
지금까지 국내 용접기술은 주로 조선, 중공업 및 자동차 산업을 중심으로 눈부신 발전을 이루어 왔으며 일 반강에 대한 용접 공정의 고효율화와 고기능화는 세계 적 수준이라고 판단된다. 그러나 특수강 및 비철금속에 대한 용접기술의 고도화와 관련한 기술 개발은 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히, GTA용접은 고품위 용접 이 가능하나 용접생산성 측면에서 용접속도가 상대적으로 빠른 GMA 용접에 비해 불리하므로 기술의 적용 확 대가 제한적인 실정이다. 이러한 관점에서 호주 CSIRO 와 RIST 용접센터에서는 고품위의 용접품질과 획기적 인 용접생산성을 동시에 얻을 수 있는 Keyhole GTA 용접기술의 상용화를 위해 공동 노력하고 있으며 국내 산업계 보급을 위하여 노력을 기울이고 있다

### 6. 참고문헌

- Jarvis, B. L. and Ahmed, N. U.: *Development of keyhole mode gas tungsten arc welding process.*, Science and Technology of Welding and Joining, 5, No. 1 2000, 1-7
- Lathabai, S., Jarvis, B. L. and Barton, K. J.: *Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium.*, Materials Science and Engineering A299, 2001, 81-93



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



- 이목영(李穆泳)
- 1965년생
- 포항산업과학연구원 용접센터
- 하이브리드용접, 레이저용접, 아크용접
- e-mail : acceleee@rist.re.kr



- 윤병현(尹秉鉉)
- 1964년생
- RIST 용접센터
- 용접야금, 철 및 비철재료 용접
- e-mail : paekam@rist.re.kr