

페라이트계 스테인리스강 GTA 용접부 특성에 미치는 보호가스 중 산소의 영향

이 원 배^{*,†} · 엄 상 호^{*} · 우 인 수^{*}

^{*}POSCO 기술연구원

Effects of Oxygen Contents in Shielding Gas on the Properties of Ferritic Stainless Steel GTA Weld

Won-Bae Lee^{*,†}, Sang-Ho Uhm^{*} and In-Su Woo^{*}

^{*}POSCO Technical Research Laboratory, Pohang 790-300, Korea

[†]Corresponding author : wonbaelee@posco.com

(Received June 14, 2010 ; Revised July 6, 2010 ; Accepted July 12, 2010)

Abstract

The properties of GTA weld for ferritic stainless steel have been studied with different O₂ contents in Ar shielding gas at the constant welding speed. A small amount of O₂ (0.01~1.0%) was mixed in Ar shielding gas in order to improve the weld penetration. The fully penetrated GTA weld was acquired at 160A weld current shielded by pure Ar gas. Addition of oxygen larger than 0.1% made a full penetration at lower weld current than 160A. The small addition of O₂ in Ar shielding gas improved the penetration properties of GTA weld because the O₂ in the molten pool accelerated the flow of molten pool and changed the flow pattern from outward to inward direction. The impact energy and DBTT (Ductile- Brittle-Transition-Temperature) of the GTA weld shielded by Ar+O₂ (less 0.3%) was similar and the corrosion properties of GTA weld was slightly inferior to those of GTA weld shielded by pure Ar gas.

Key Words : Ferritic stainless steel GTA weld, Shielding gas compositions, Penetration

1. 서 론

페라이트계 스테인리스강 (Fe-Cr계, 이하 400계 STS강)은 오스테나이트계 스테인리스강 (Fe-Cr-Ni계, 이하 300계 STS강)에 비해 저가 이므로 STS강 산업분야에서 원가절감을 위해 강종대체가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 400계 STS강은 300계 STS강에 비해 용접 및 열전도도가 높기 때문에 GTA (Gas Tungsten Arc)용접 시 용접입열을 상대적으로 높여야 하며 이를 위해 용접속도를 낮추거나 용접전류를 높여야 하기 때문에 용접생산성 및 용접부 품질이 저하하는 문제가 있다.

GTA용접 시 용입 특성에 영향을 미치는 인자는 용융 pool의 표면장력 및 부력, Lorentz force, Plasma

jet 및 Arc 압력 등이 있으며, 용입성 개선을 위해 효과적인 방법으로는 표면 활성화 원소 (Surface Active Element)를 소재 및 보호가스에 첨가하여 용융 pool의 대류 방향을 제어하는 것이라 보고된다¹⁾. Fig. 1에서 알 수 있듯이, 일반적인 철강소재는 온도가 상승하면 표면장력이 감소하므로, 고온인 아크 중심부 보다 저온인 아크 주변부의 표면장력이 크기 때문에 용융 pool은 중심에서 주변으로 유동하여 반구 형태의 용접부를 형성한다. 하지만 표면활성화 원소를 임계값 이상 첨가 시 고온에서 오히려 표면장력이 커 주변부에서 용접 중심부로 대류의 흐름이 바뀌는 현상을 나타내며, 깊이 방향으로 열전달이 활발해진다. 따라서 용접부의 형상도 반구 형태에서 wine cup 형태를 보이며 용입성이 개선 된다²⁾.

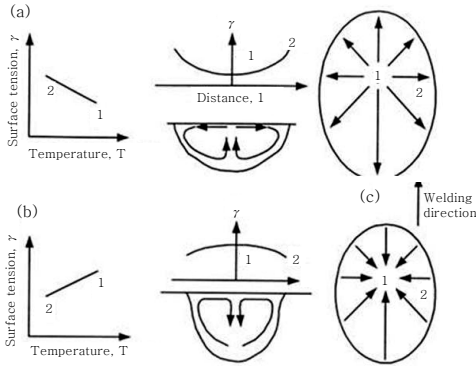


Fig. 1 Molten pool flow pattern in GTA welding: (a) without surface active element and (b) with surface active element

STS강의 GTA시 용입 특성을 향상시키기 위해서는 강재성분제어, 활성 flux 도포 및 보호가스 이용기술이 있다. 강재 내 표면 활성화 원소 (S, O, Se, Te, Bi) 등을 첨가하거나, 용접 전 용접선에 활성 flux를 도포하여 용입특성을 향상시킨다. 또한 용접공정상 GTA용접 보호가스의 성분을 제어하여 용접부 용입특성을 향상시키는 연구도 활발하게 진행되고 있다³⁻⁵⁾.

일반적인 STS강 GTA용접용 보호가스인 Ar대비 He, H₂, N₂ 경우 이온화 전압이 높아 Arc 온도가 증가하여 용입성을 개선시킨다고⁶⁾ 알려있지만 He는 Ar 대비 고가이며, H₂와 N₂는 400계 STS강에 적용 시 용접부를 취하시켜 사용이 곤란한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 400계 STS강 GTA 용접 용입성을 향상시키기 위해 Ar 보호가스에 산소를 극 미량 (0.01~1%) 혼합하여 용접을 실시하여, 산소 혼합에 따른 용입 현상, 용접부 충격 및 내식성을 평가하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 자동차 배기계 및 장식관용으로 널리 사용되고 있는 STS 439 (19Cr-Ti-LCN) 냉연강판(두께=1.5mm)을 이용하였으며 GTA용접을 위해서 폭 100mm, 길이 300mm로 가공하였다.

GTA용접은 Bead on Plate 방법으로 실시하였으며, 용접속도는 5m/min으로 고정하고 용접전류를 90~180A로 조정하였다. 보호가스는 Ar에 산소를 0.01~1wt% 혼합하였고, 유량은 20l/m이었다. 보호가스 중 산소를 극 미량으로 혼합하기 위해 자체 제작한 미소량 혼합장치를 이용하였다. 용접 시 이면에도 대기 중 공기혼입을 막기 위해 순 Ar 가스 사용하였으며, 유량은 5l/m이었다. 전극은 W-Th (Φ2mm)을 사용하였으며 아크 길이는 1.5mm로 유지하였다.

용접부 미세조직을 관찰하기 위해 광학 및 주사전자현미경을 사용하였으며, 용접 금속부 개재물을 관찰하기 위해 Image analyzer를 이용하였다. 개재물 측정을 위해 용접 상부비드 표면에서 0.5mm로 연마하였으며, 총 30 field를 측정하였고 총 측정면적 847293.5 μm² 내의 개재물 개수를 정량화하였다. 용접 후 용접 금속부의 산소 농도를 측정하기 위해 N₂/O₂ 분석기를 사용하였다.

용접부의 저온 충격특성을 평가하기 위해 charpy 충격시험 (1.5mmt sub-size)을 -80~40℃의 온도범위에서 수행하여 DBTT를 측정하였다. 용접부 부식특성은 임계공식온도시험 (Critical Pitting Temperature test, ASTM G48-A)을 통해 조사하였으며 산세한 시험편을 10%FeCl₃·6H₂O용액에서 22℃ 온도에서 12시간 유지 후 무게 감량을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 용접속도를 5m/min으로 고정하고 용접전류 및 보호가스 중 산소 혼합량을 변화시켜 용접을 한 후 용입특성을 나타낸다. 보호가스로 순 Ar을 사용한 경우 용접전류를 160A이상으로 높여야 용접금속부가 완전용입이 이루어짐을 알 수 있다. 하지만 보호가스에 산소를 첨가하면 완전 용입시킬 수 있는 용접전류를 낮출 수 있으며, 산소함량이 증가시키면 용접전류를 더욱 낮출 수 있다. 즉, 산소를 0.1% 혼합하면 용접전류를 140A, 0.25% 혼합시키면 용접전류를 100A까지 낮출 수 있다. STS439강 GTA용접 시 혼합산소량을 적어도 0.1%이상 첨가 되어야만 용입성을 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3a는 보호가스로 순 Ar을 이용한 경우, 용접전류의 증가에 따른 용접부 형상의 변화를 나타낸다. 용접부 형상은 상부 비드폭 (W), 용입깊이(D) 및 용접부 형상 인자인 D/W로 나타내었다. 용접전류가 증가

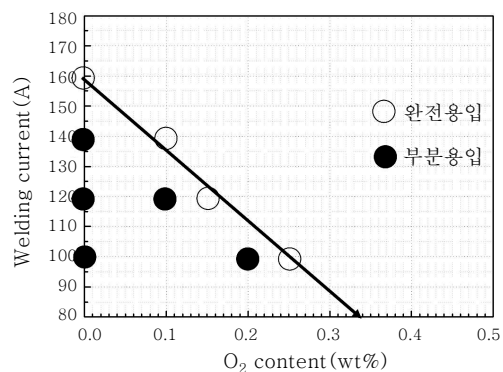


Fig. 2 Effect of welding current and oxygen content on the penetration property of GTA weld

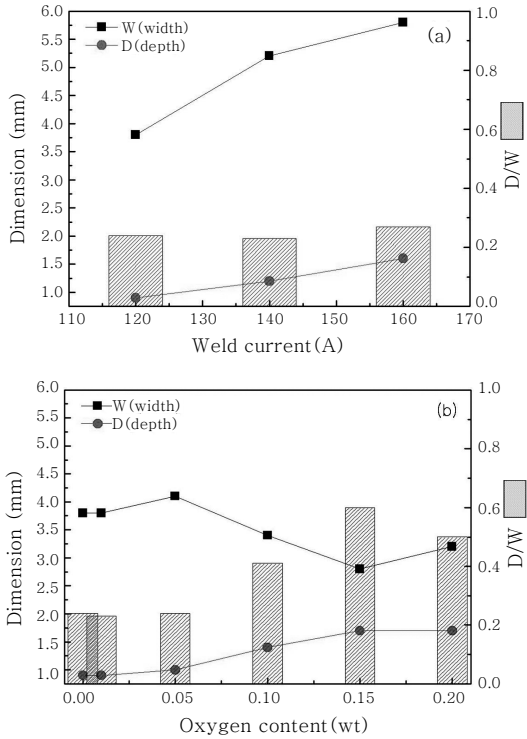


Fig. 3 Variation of GTA welding shape with welding current (a) and oxygen content (b)

하여 완전용입이 이루어질 때까지, W 및 D값 모두 증가함을 알 수 있다. 하지만 D/W값은 용접전류의 증가와 관계없이 일정한 값(=0.25)을 유지했다. 완전용입이 이루어지기 까지 D/W값이 일정하다는 용접금속부 형상 변화 없이 용접금속부 면적만 커짐을 의미하며, 용융 pool의 유동현상의 변화는 없음을 의미한다⁴⁾.

Fig. 3b는 120A 용접전류에서 Ar 보호가스에 산소 혼합량을 0~0.2%로 증가시켜 용접한 후 용접부 형상의 변화를 나타낸다. Ar 보호가스 중 산소가 0.1% 미만 혼합한 경우, 혼합량이 증가하여도 W, D값은 동시에 증가하며 D/W 값은 0.25를 유지함을 알 수 있다. 이는 동일 용접입열량에서 용접금속부 면적만 증가함을 의미하는데, 0.1%미만의 극 미량 산소를 혼합한 경우는 용융 풀의 유동 방향에는 변화가 없지만 산소 혼입에 의해 용융 풀의 반응을 활발하게 하여 용접금속부의 용융 및 열전도를 촉진시켰기 때문에 판단된다. 하지만 산소 혼합량이 0.1%이상인 경우 용접금속부 형상은 변화하였다. W값은 감소하지만 D값은 증가하여 D/W 값은 급격히 증가하였다. 산소혼합량을 더욱 증가시켜 용접금속부가 관통 (완전 용입)된 산소함유량 0.15%까지 W값은 감소하고 D값은 증가하여 D/W값은 증가하였다. 하지만, 완전용입 된 후 산소혼합량을 0.2%로 증가시키면 D는 더 이상 증가할 수 없기 때문에 상부 비드

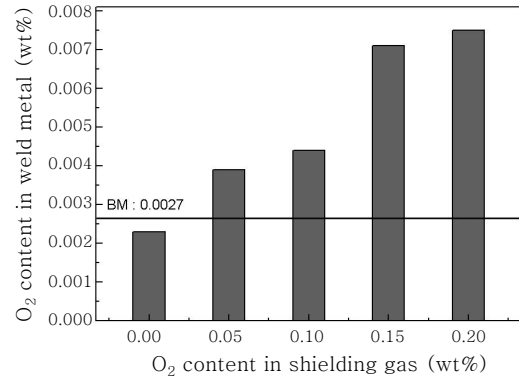


Fig. 4 Oxygen content in GTA welding with oxygen content in shielding gas

면적만 증가하여 D/W는 다시 감소하였다. 보호가스 중 산소 첨가에 의해 용접부 형상이 반구 형태에서 wine cup 형태로 변화되며 형상 변화 (유동 pattern 변화)위한 임계 산소량이 있음을 확인 하였다.

Fig. 4는 용접전류 및 보호가스 중 산소혼합량에 따른 용접금속부 산소량을 측정된 결과이다. 모재의 산소함유량은 약 0.0023wt%(23ppm)이었으며, 보호가스로 순수 Ar을 사용한 경우 용접전류의 변화에 따른 용접금속부 산소량은 차이가 없었다. 하지만 보호가스 중 산소를 혼합한 경우 산소혼합량 증가에 따라 용접금속부의 산소함량이 증가함을 알 수 있다. 산소가 0.01% 혼합된 경우 산소함량은 순 Ar을 사용한 경우와 유사하나 0.05%이상 혼합 시 용접금속부의 산소함량 증가에 기여함을 알 수 있다. 용접전류 120A에서 용접금속부의 완전용입을 위해 70ppm이상 산소가 있어야 함을 확인하였다. 하지만 용접전류에 따라서 용접금속부 완전 관통을 위한 요구 산소량을 변화 하며, 용접전류가 증가할수록 양은 줄어들 것으로 판단된다.

하지만, 보호가스 중 산소혼합량이 1%이상 증가시키면 용융 풀 표면에 두꺼운 산화층이 생성되어 산소 흡수 및 용융 pool 대류현상을 방해하여 용입성 향상효과가 사라지며⁷⁾ 산소혼합량을 2%이상 증가시켜, 용접금속부의 산소함량이 350ppm이상 증가하면 D/W는 감소하여 용입성을 오히려 감소한다고 보고 하였다⁴⁾.

보호가스 중 산소 혼합하여 용접금속부 산소량 증가에 따른 용입특성 개선의 원인에 대해서, Y. Koji등은 다음과 같은 결과를 통해 설명하고 있다⁸⁾. 고속카메라를 이용하여 용융 풀의 대류 거동을 관찰한 결과, 용접금속부의 산소량이 증가할수록, 용융 풀 표면의 슬래그들이 용융 풀의 중심부로 이동함을 관찰하였고, 또한 슬래그의 이동속도도 빨라진다고 보고하였다. 따라서 산소혼합량의 증가는 용접금속부의 유동방향의 변화 및

유동속도 증가에 따른 두께방향으로의 열전달을 용이하게 하여 용입성을 크게 개선시키는 것으로 판단된다.

Fig. 5a는 보호가스 중 산소혼합량의 증가에 따른 용접금속부의 산화개재물의 분포를 나타내며, Fig. 5b는 각각의 개재물을 SEM 및 EDS분석한 결과이다. 용접금속부에서 관찰되는 개재물은 크기 및 화학적조성에 따라 크게 3가지 형태로 나눌 수 있는데, 크기가 0.5 μ m 미만인 Ti (C,N)계 석출물, 0.5 ~ 1 μ m인 Al-Ti-O계 산화물 및 1 μ m 이상인 Al-Ti-Mg-Ca-O계 산화물 등이다. 용접 보호가스로 순 Ar을 사용한 경우, Al-Ti-Mg-Ca-O계 산화물과 미세 Ti (C,N) 석출물이 주로 관찰되었으나, 보호가스 중에 산소를 혼합한 경우 Al-Ti-O계 산화물 수가 급격히 증가하였다. 일반적으로 400계 STS강 모재에는 제강, 압연 및 열처리 공정을 거치면서, 미세 Ti(C, N)이 석출되거나, 제강과정 중 완전하게 제거 되지 않은 복합 산화개재물 (Al-Ti-Mg-Ca-O) 등이 존재한다. 순 Ar을 보호가스로 사용하여 용접한 경우는 외부 공기의 혼입이 차단되기 때문에 용접금속부에는 모재부에 비해 크기 및 형상의 변화는 있지만 동일한 조성의 석출물 및 산화개재물 외에는 생성되지 않았을 것으로 판단된다. 하지만 Ar 보호가스에 산소를 혼합한 경우는 산소와 용융 pool의 반응에 의해 모재에

존재하는 산화개재물 외 Al-Ti-O계 산화물이 생성되었을 것으로 판단된다. 용접은 급 가열/냉각과정을 거치기 때문에 모재와 같이 복합산화물이 생성될만한 충분한 시간의 부족으로 인해 Al-Ti-O계 산화개재물이 주로 생성되었을 것으로 사료된다. 용접 중 산소와의 반응에 의해서 생성된 Al-Ti-O계 산화물을 모재에 존재하는 Al-Ti-Mg-Ca-O계 산화물에 비해 크기 및 편차가 적고 고르게 용접금속부에 분포하였다.

Fig. 6은 완전용입이 이루어진 각각의 용접전류 및 용접보호가스 조성 (안정적인 완전용입부 형성을 위해 최소 산소혼합량 대비 각각 0.05 ~ 0.1%상향)에 따른 GTA용접부 충격에너지의 변화를 나타낸다. 400계 STS강은 결정구조상 저온에서 파괴모드가 연성에서 취성으로 변화하는 DBTT특성을 보이며 용접부 DBTT특성은 400계 STS강이 각종 부품으로 적용되기 위해 필수적으로 보증해야 하는 항목이다. 순 Ar을 이용하여 용접한 경우, DBTT는 약 -45 $^{\circ}$ C였으며, 보호가스 중에 산소를 혼합한 경우도 거의 유사하거나, 약간 우수한 결과를 나타낼 수 있다. 일반적으로 용접금속부에 개재물양이 증가하면 DBTT가 상승한다고 알려져 있다⁹⁾. Y.Koji등은 용접금속 중 42ppm의 산소함량은 용접부 DBTT에 영향을 미치지 않는다고 보고하였다¹⁰⁾. 하지만 본 실험결과 0.2%산소가 혼합된 보호가스를 적용한 경우 용접금속부에 약 75ppm의 산소가 측정되었고, 산소 혼입에 따른 산화개재물량의 증가에도 불구하고 DBTT가 저하하지 않았다. 산소가 혼입되었음에도 충격특성의 저하가 없는 원인으로서는 용입성 개선에 따른 저입열조건 적용으로 용접금속부 결정립 크기 및 비드폭이 감소하였기 때문으로 판단된다. 즉 개재물은 많아 졌으나, DBTT의 다른 영향자인 결정립 크기 및 비드폭의 감소로 개재물의 영향을 감소시켰기 때문이다. 따라서 용접보호가스로 산소를 미량 (0.3%이하)혼

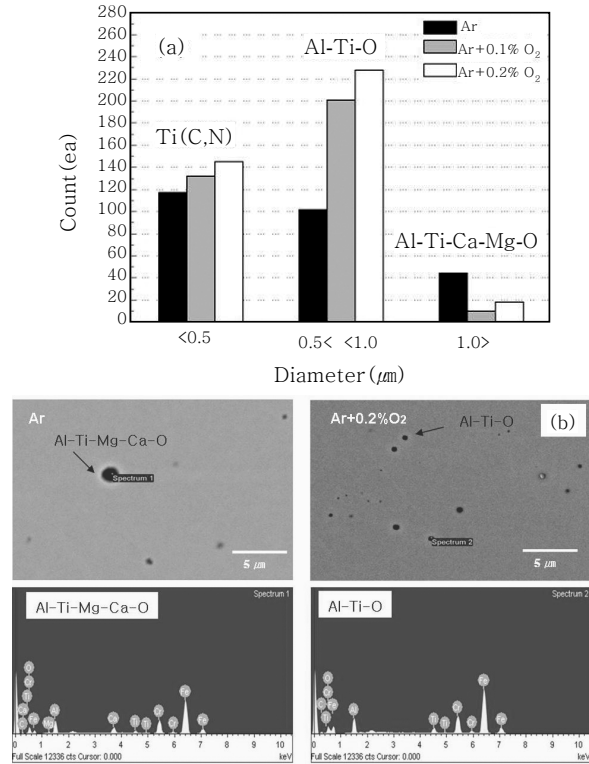


Fig. 5 Variation of inclusion (oxides and precipitates) (a) and chemical composition of oxide (b) in GTA weld with oxygen content in shielding gas.

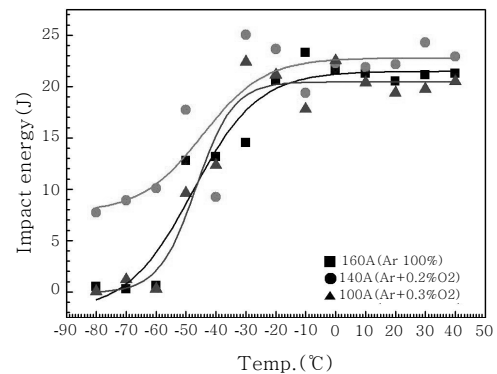


Fig. 6 Effect oxygen content on Charpy impact properties in the fully penetrated GTA weld

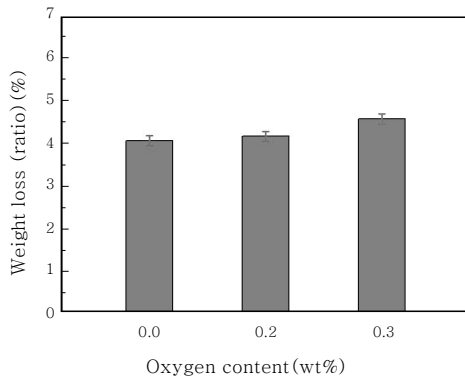


Fig. 7 Effect oxygen content on corrosion properties in the fully penetrated GTA weld

합한 경우, 용접금속부의 DBTT특성에는 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 용접전류 및 용접보호가스 조성에서 용접한 GTA용접부 부식특성을 나타낸다. 보호가스 중에 산소혼합량이 증가할수록 부식 시험 전후의 시편 무게 감소율이 증가하였다. 산소가 0.2% 혼합된 경우는 무게감소가 크지 않지만, 0.3% 첨가한 경우는 무게 감소율이 증가하여 부식이 빨리 진행됨을 알 수 있다. 용접부 내식성의 저하는 용접금속부의 산화개재물의 양이 증가하여, 개재물과 기시간 계면에서 공식(pitting)발생을 용이하게 하였을 것으로 판단된다. Y.Koji등은 용접금속 중 42ppm의 산소함량은 용접부 내식성(공식전위 및 cycle 부식시험)에 전혀 영향을 미치지 않는다고 보고하였으며¹⁰⁾ 본 연구에서 산소 혼합량 0.2% (용접금속부 산소량 약 75ppm)까지는 내식성을 어느 정도 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구 결과에서 산소를 0.1% 혼합하면(Fig. 4) 용접금속부의 산소량이 약 42ppm 검출되었기 때문에, 순 Ar을 사용했을 경우와 동등수준의 용접부 내식성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 보호가스 중 산소를 혼합하여 용접(1.8m 연속용접)한 후 전극 tip 형상 변화를 나타낸다. 용접 전의 전극 tip은 W, Th 및 O로 구성되었으며 주로 W계 산화물로 이루어져 있다. 순 Ar을 이용하여 용접한 경우도 용접 전극은 사용전과 산소 함량이 약간 증가하지만 조성적 변화는 없었다. 하지만 산소함량이 증가할수록 전극 tip의 중간부분에 산화물이 집중적으로 생성되었다. EDS로 분석한 결과 Th 및 O의 함량이 증가함을 확인하였고, 이는 Th이 고온에서 전극 표면으로 확산되어 산소와 반응하여 전극 표면으로 용출되었을 것으로 사료된다. 하지만 전극 tip부분은 여전히 W계

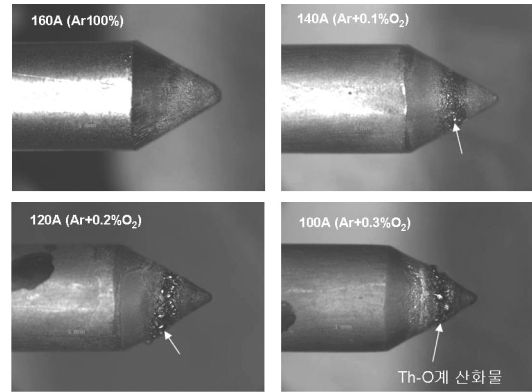


Fig. 8 Effect oxygen content on W-Th electrode shape change after continuous GTA welding (1.8m length)

산화물이 그대로 존재하였다. 하지만 Th-O계 산화물이 생성되어도, 전극 형상은 그대로 유지 되었으며, 1.8m 용접도중은 아크 소멸 및 용입특성 변화는 없었다. 추후 더욱 긴 시간 용접을 통해 전극 수명에 대한 연구를 진행할 예정이다.

5. 결 론

400계 STS강의 용입성을 향상 위해 보호가스중에 산소를 미량 첨가하여 GTA용접 후 용입성, 용접부 형상 변화, 용접부 충격 및 부식특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보호가스 중에 산소 혼합량을 증가할수록 용접부 완전용입에 필요한 용접전류를 크게 감소시킬 수 있었다.
- 2) 용입성의 향상은 임계량 이상의 산소 혼입에 따른 용융 풀 유동방향의 변화 및 속도 증가에 의한 깊이 방향으로 열전달이 용이하기 때문이다.
- 3) 산소혼합에 따라 용접금속부의 산화개재물의 양은 증가하였으나 크기 및 분포는 매우 고르게 분포함을 알 수 있다.
- 4) 용접금속부 산소혼입에 따른 저온 충격특성에는 영향이 없었으나, 내식성은 약간 열위함을 알 수 있다.
- 5) 산소혼합에 따라 전극 tip에 중간부분에 Th-O계 산화물의 생성이 증가하였으나 1.8m 연속용접 시까지는 아크소멸 및 용입성 차이는 없었다.

참 고 문 헌

1. 용접접합 편람 : I 철강 및 비철재료, 대한용접접합학회, 2008, 16 (in Korean)
2. C.R. Heple and J. R. Ropper: Weld. Journal. 60-8

- (1981) 143S-145S
3. 平田弘征, 小川和博: 용접학회논문집, **18-2** (2000), 208-213 (in Japanes)
 4. S.D.Lu, H. Fujii, M. Tanaka and K. Nogi: : GTA weld shape variations on SUS304 stainless plates under He-O₂ mixed shielding, Preprints of the National Meeting of JWS, **2005S** (2005) 43-44 (in Japanes)
 5. T. Ochiai, T. Satoh, H. Fujii, S. Lu and K. Nogi : Effect of shielding gas on penetration of double shielded GTA welding, Preprints of the National Meeting of JWS, **2006S** (2006) 58-59 (in Japanes)
 6. The Avesta Welding Manual-Practice and products for stainless steel welding, Avesta Welding AB (2005), 89-94
 7. S. Lu, H. Fujii, M. Tanaka, K. Nogi : Mechanism of Weld shape Variation in CO₂ shielding gas addition GTA welding Preprints of the National Meeting of JWS, **73** (2003)196-197 (in Japanes)
 8. Y. Koji, O. Kenji and O. Moriaki : Effect of Oxgyen Content on Penetration Depth in TIG Arc Weld Metal of Ferritic Stainless Steel, Preprints of the National Meeting of JWS, **2007S** (2007)136-137 (in Japanes)
 9. N. J. Petch : Philosophical Magazine (Ser.8), (1958) 1089-1094
 10. Y. Koji, H. Tsunehisa, O. Kenji and O. Moriaki : Effect of Oxgyen Content on Performance in TIG Arc Welding Metal of Ferritic Stainless Steel, Preprints of the National Meeting of JWS, **2008s** (2008) 78-79 (in Japanes)