

순 Ti 박판 GTA 용접부의 기계적 성질 및 성형성에 미치는 공정변수의 영향

김지훈* · 홍재근** · 염종택** · 박노광** · 강정윤*†

*부산대학교 재료공학과

**한국기계연구원 부설 재료연구소 특수합금연구그룹

The Effect of Process Variables on Mechanical Properties and Formability in GTA Welds of Commercial Pure Titanium Sheet

Jee-hoon Kim*, Jae-keun Hong**, Jong-taek Yeom**, Nho-kwang Park** and Chung-yun Kang*†

*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**Special Alloys Research Group, Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-010, Korea

†Corresponding author : kangcy@pusan.ac.kr

(Received April 20, 2010 ; Revised May 19, 2010 ; Accepted May 24, 2010)

Abstract

In this work, the effect of welding variables on weldability of gas tungsten arc(GTA) welding was investigated with experimental analysis for a commercial pure(CP) titanium (Grade.1). The GTA welding tests on sheet samples with 0.5mm in thick were carried out at different process variables such as arc length, welding speed and electrode shape. In order to search an optimum arc length with full penetration, bead-on-plate welding before butt-welding were performed with different arc length conditions. From the bead-on-plate welding results, the optimum condition considering arc stability and electrode loss was obtained in the arc length of 0.8mm. Butt-welding tests based on the arc length of 0.8mm were carried out to achieve the optimum conditions of welding speed and electrode shape. Optimum conditions of welding speed and electrode shape were suggested as 10 mm/s and truncated electrode shape, respectively. It was successfully validated by the microstructural observation, tensile tests, micro-hardness tests and formability tests.

Key Words : GTAW, Commercial pure titanium, Process variables, Arc length, Formability

1. 서 론

타이타늄 및 타이타늄 합금은 우수한 비강도, 내식성, 고온성질 및 피로성질을 가진 소재로서 항공우주 산업 뿐만 아니라 구조재료, 석유화학소재, 생체이식재료등과 같은 첨단소재와 경량화를 위한 수송기기에 폭넓게 이용되고 우수한 소재이다¹⁻³⁾. 최근에는 국내 조선 산업의 호황으로 선박의 관형 열교환기 제조에 사용되는 순수 타이타늄의 수입량도 지속적으로 증가하고 있다. 생활 수준의 향상으로 친환경 소재, 경량화, 인체친화형 소재 등의 중요성이 인식되면서 타이타늄 소재에 대

한 많은 연구가 진행되고 있으며 관련사업들이 세계적으로 빠르게 성장하고 있다^{4,5)}. 타이타늄은 상온에서 hcp 구조를 갖는 α 상과 약 883°C에서 변태하여 bcc 구조를 가지는 β 상의 동소체로 이루어져 있다. 순수 타이타늄에 합금원소를 첨가하게 되면 α 상과 β 상이 공존하는 영역이 존재하게 되며, 합금원소의 종류 및 양에 따라서 α 상과 β 상의 공존 영역이 상온 까지 확대된다. 최근에는 새로운 타이타늄 합금이 개발되면서 그 용도가 확대되고 있다. 타이타늄 합금은 크게 순 타이타늄, α 형 합금, $\alpha+\beta$ 형 합금, β 형 합금 으로 나누어진다. 타이타늄 및 타이타늄 합금의 용접 방법에는 크게 GTAW, GMAW를 비롯한 PAW, LBW 및 EBW 등의 용융 용

접 및 FSW(Friciton Stir Welding), FW(Friction Welding)등의 고상 접합이 있다. 그러나 500°C 이상의 고온에서 산소, 수소, 질소 및 탄소 등의 침입형 원소와의 반응성이 매우 커 접합 공정 후 취약한 금속간 화합물의 생성, 산화 및 기공 등의 용접 결함이 발생한다. 이는 제품 수명을 단축시키는 주요 원인이 된다. 이러한 문제점에 대한 대책으로 열간 가공 및 접합 공정은 대부분 진공 분위기 또는 불활성 분위기에서 이루어진다⁶⁾. 이처럼 타이타늄 및 타이타늄 합금에 적용되는 용접공정은 다양하며 용융 용접의 하나로, 작업성 및 경제성을 고려한 GTA 용접 공정을 이용한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다⁷⁻¹¹⁾. GTA 용접의 장점은 고품위의 용접부를 얻을 수 있으며, 자동화가 가능하며 저렴한 장비의 가격 때문에 많은 산업분야에서 널리 쓰이는 용접 공정이다. S.Lathabai⁸⁾ 등은 일반적인 GTA용접 공정과 keyhole GTA 용접 공정 후의 미세조직 및 기계적 성질을 비교하여 평가하였다. V.Sundaresan⁹⁾ 등은 DCEN 전류 조건과 DCEN 펄스 전류 조건에서 용접부 미세 조직변화가 기계적 특성에 미치는 영향에 대해 연구 하였다. 이때 펄스 변수로는 peak 전류와 base 전류는 고정하고 펄스 주기를 변수로 두어 실험을 수행하였다. V.Balasubramanian¹⁰⁻¹¹⁾ 등은 펄스 전류 조건에서 peak 전류, base 전류, 펄스 주기, 펄스유지시간의 공정변수를 주어 공정변수에 따른 인장성질을 분석하였으며 base 전류와 펄스유지시간은 기계적 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였으며, 용접부의 결정립 크기와 충격치의 상관 관계에 대해서 규명하였다. 이들의 연구 결과는 타이타늄 및 타이타늄 합금의 기계적 성질 확보를 위해 많은 참고가 될 것이라 생각된다. 하지만 seamless tube 제조를 위한 타이타늄 박판 GTA 용접에 대한 연구는 연구 단계에 그치고 있으며 용접 후 성형성에 관한 연구는 극히 미미한 실정이다. 따라서 용접 후 미세 튜브 제조를 위해서는 순 타이타늄의 GTA 용접성, 용접부 특성 및 용접 후 성형성에 대한 기초적인 연구가 필요하다 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 상용 순 타이타늄의 박판 GTA 용접에 대한 기초연구로서 용접 공정변수에 따른 미세조직 및 기계적 특성을 비교 검토하였고 최적 용접 조건을 도출 하고자 하였다.

2. 사용 재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 재료는 어닐링 처리된 두께 0.5mm의 상용 순수 타이타늄 Gr.1 소재를 200(L) X 55(W)의 시험편으로 전단 후 사용하였으며, 원소재의 화학조성 및 기계적 성질을 Table 1 및 Table 2에 나

Table 1 Chemical composition of Ti(Gr.1)

Material	Chemical composition (max, %)						
	C	H	O	N	Fe	Pd	Ti
C.P Ti (Grade 1)	0.08	0.013	0.15	0.03	0.20	-	Bal.

Table 2 Mechanical properties of Ti sheet(Gr.1)

	TS(MPa)	YS(MPa)	El(%)
Rolling direction	312	258	43.9
Normal direction	296	245	45.7

타내었다. 박판 용접 이음부는 밀링 가공시 오히려 용접 이음부의 개선 정도가 저하되므로 전단 후 전단면끼리 접촉시켜 이음부 틈새를 최소화 하였다. 본 실험에서 사용된 용접기는 400A 용량의 인버터형 용접기로서 직류 정극성(DCEN)을 사용하였으며 토치를 레일 오토 캐리지에 부착하여 용접속도를 조절 하였다. 전극봉은 2%Th-W(ϕ 1.6)을 사용하였다. 용접 전 아세톤 용액과 알코올에 세척 후 건조시켜 용접부 오염을 방지하였다. 맞대기 용접 전 용입 특성에 미치는 공정변수의 영향을 파악하기 위해 Bead on plate 용접으로 용접 조건을 선정하였다. 이때 아크길이, 용접속도, 전극봉 가공형상을 주요 공정변수로 하였다. Bead on plate용접에서 완전 용입이 가능하고 용락 등의 결함이 생성되지 않는 아크길이와 용접속도 범위를 선정하였다. 전극봉 가공형상은 30°-120° 및 Truncated(30°)로 변화시켜 맞대기 용접을 실시하였다. 용접은 판재의 압연방향으로 실시하였으며 아르곤 분위기 챔버내에서 용접하였다. Fig. 1에 개략적인 실험방법을 나타내었고 GTAW 공정변수는 Table 3에 요약하였다. 용접부의 미세조직은 96ml H₂O, 2ml HNO₃, 2ml HF의 혼합용액에 에칭 후 관찰하였다. 경도는 미소경도시험기 (Micro vickers hardness testers, Mitutoyo-HM211)를 사용하여 0.5kgf의 하중으로 10초동안 유지하여 0.3mm 간격으로 측정하였다. 인장시험편은 게이지 길이가 25mm인 ASTM E8 sub-size 규격 시험편으로 용접선에 수직인 방향과 용접선에 평행한 방향으로 가공하였다. 인장시험은 만능재료시험기 (Instron-4206)를 사용하여 크로스 헤드 스피드는 1.5mm/min의 조건으로 인장특성을 평가하였다. 또한 다축응력 하에서의 성형성을 평가하기 위해 박판 만능시험기(ERICHSEN GMBH & CO KG, Model 142-40)를 사용하여 에릭슨 시험을 실시하였다. 이때, 편치의 상승

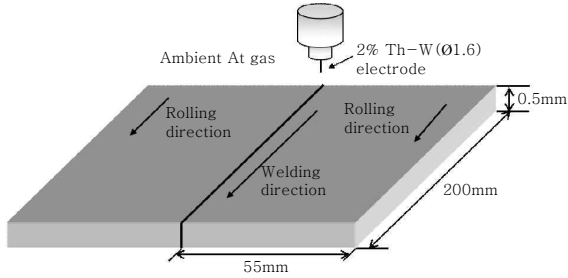


Fig. 1 Comparison of processes

Table 3 Process variables of GTAW

Arc Voltage (V)	7
Welding current (A)	30A
Electrode	2% Th-W (Ø1.6)
Shielding gas	Ar (99.9%)
Shield gas flow rate (ℓ/min)	15
Arc length(mm)	0.5, 0.8, 1.0
Electrode tip angle shape	30°, 60°, 120°, truncated(30°)
Welding speed (mm/sec)	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14

속도는 5mm/min로 고정하여 시험을 수행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 Bead on plate 용접 특성

3.1.1 아크길이에 따른 용입특성

Fig. 2는 전극봉 가공형상을 60로 고정하고 아크길이 및 용접속도에 따른 이면 비드 생성 유무를 나타내었다. Fig. 3은 용량 및 이면비드가 생성되지 못한 용접시편의 비드 형상을 나타낸 것이다. 입열량(Q=IV/v)이 105J/mm(용접속도 2mm/sec이하)이상의 경우 모든 아크길이 조건(0.5mm-1mm)에서 입열 과다로

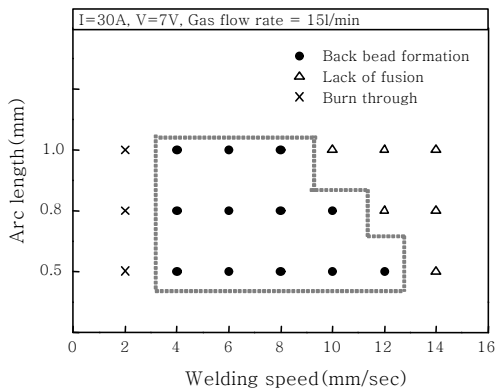


Fig. 2 Back bead formation according to process variables of bead on plate

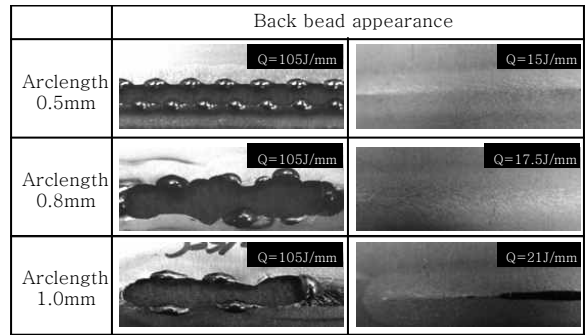


Fig. 3 Back bead appearance according to arc length and heat input

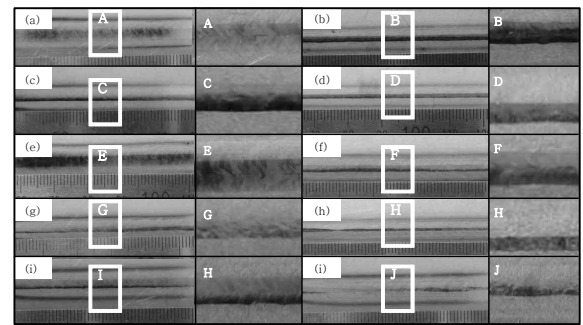


Fig. 4 Bead appearance according to arc length and welding speed : (a) 0.5mm, 6mm/sec (b) 0.5mm, 8mm/sec (c) 0.5mm, 10mm/sec (d) 0.5mm, 12mm/sec (e) 0.8mm, 6mm/sec (f) 0.8mm, 8mm/sec (g) 0.8mm, 10mm/sec (h) 0.8mm, 12mm/sec (i) 1.0mm, 6mm/sec (j) 1.0mm, 8mm/sec

인한 용량이 발생하였다. 아크길이 0.5mm의 경우 입열량 15J/mm(용접속도 14mm/sec)조건에서는 이면비드가 생성되지 않았으며 0.8mm의 경우는 17.5J/mm(용접속도12mm/sec), 1.0mm의 경우 21J/mm(용접속도 10mm/sec) 이하의 입열량 조건에서 이면비드가 생성되지 않았음이 확인되었다. Fig. 4는 아크길이 및 용접속도에 따른 비드표면을 나타내었다. 타이타늄 용접부는 산화 오염정도에 따라 여러가지 색으로 변화된다. 용접부가 은색, 금색, 담황색, 갈색을 띠면 합격으로, 청색, 회색을 띠면 불합격으로 평가한다¹²⁾. 본 실험에서는 용접 전 Ar 가스를 충분히 퍼징하여 이물질 및 공기를 배제하였으며 그 결과 모든 조건에서 산화오염이 양호한 접합부를 얻을 수 있었고 용접결함인 피트(Pit)나 블로우홀(Blow hole)은 발견되지 않았다. 아크길이가 짧을수록 낮은 입열량 조건에서도 완전 용입이 가능하였고 텅스텐 전극봉의 손상 및 아크 안정성을 고려해 0.8mm 아크길이를 가장 적합한 공정으로 판단

하였다.

3.1.2 비드폭에 미치는 전극봉 형상의 영향

전극봉 형상이 비드폭에 미치는 영향을 알아보기 위해 아크길이는 0.8mm로 고정시킨 상태에서 전극봉 가공형상 및 용접속도에 따라 용접을 수행하였다. 실제로 Cho¹³⁾의 연구에서도 알 수 있듯이 전극봉 가공각이 커질수록 비드폭이 감소되는 경향을 나타내었는데 이는 음극점으로 되는 전극의 표면에서 아크는 거의 수직방향으로 발생되므로 양극점인 모재와 용융지와의 사이에 아크가 종(bell)모양으로 형성된다. 따라서 전극봉 가공각이 작을수록 아크도 옆으로 퍼지게 되므로 비드폭도 커지게 됨을 알 수 있다¹⁴⁻¹⁵⁾. Fig. 5는 용접속도 및 전극봉 형상에 따른 비드폭 변화를 나타낸 것이다. 전극봉 가공각도가 커질수록 비드폭은 좁아졌고, 동일 용접조건에서 120로 가공된 전극봉보다 Truncated 가공된 전극봉을 사용할 경우 가장 좁은 비드폭을 얻을 수 있었다. 동일 전류조건에서 입열량이 낮을수록, 즉 용접속도가 빠를수록 비드폭은 더 좁아지는 것이 확인되었다. 비드폭이 기계적 성질 및 성형성에 미치는 영향을 알아 보기위해 전극봉 형상 및 용접속도에 따른 맞대기 용접을 수행하였다.

3.2 GTA 용접부에 미치는 공정변수의 영향

3.2.1 용접부 경도 분포 및 미세조직

Fig. 6은 아크길이 및 용접속도에 따른 맞대기 용접의 용입 특성을 나타내었다. 용입 특성 관찰은 Bead on plate 용접을 통해 얻은 완전 용입 범위내에서 아크 길이 및 전극봉 가공 형상에 따라 분석하였다. 맞대기 용접의 경우 Bead on plate 용접과 다른 특성을 나타내었고, 더 낮은 입열량 조건에서 용락이 발생되었다. 이는 이음부의 미세한 틈새차로 인해 발생된 것으로 생각되며, 박판 GTA 용접의 경우 이음부의 개선 정

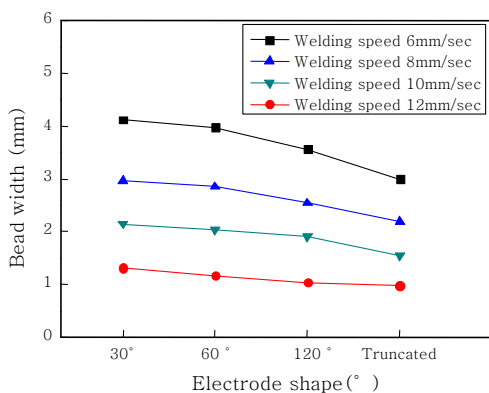


Fig. 5 Effect of electrode shape and welding speed on bead width

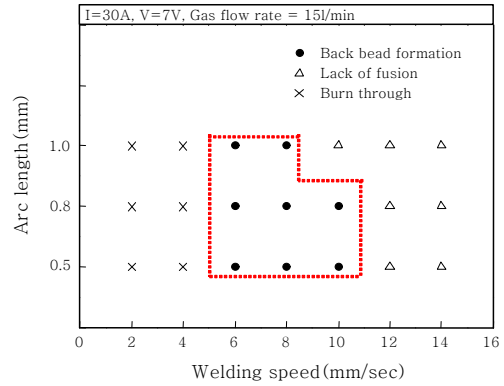


Fig. 6 Back bead formation according to process variables of butt joint

도가 중요한 요인으로 작용할 수 있다 판단된다. 용접 후 경도 분포는 미세조직과 깊은 상관관계를 나타낸다. 따라서 용접속도 및 전극봉 가공형상에 따른 경도분포를 확인하였으며 경도 변화의 원인을 미세조직을 통해 분석하고자 하였다. 완전 용입이 발생한 용접속도 조건에서 전극봉 가공형상에 따라 각 조건별로 용접부 중심에서 모재에 이르기까지의 경도 분포를 조사하였다. Fig. 7은 본 실험의 용접속도 범위 중 가장 저속인 6mm/sec와 가장 고속인 10mm/sec의 조건에서 전극봉 형상에 따른 경도 분포를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 경도분포는 용접속도 및 열영향부에서 최고 경도값을 나타내었고 열영향부를 거쳐 모재쪽으로 갈수록 경도값은 감소하는 경향을 보인다. 용접속도 및 전극봉 가공형상에 따라 비드폭과 열영향부의 크기는 차이를 보였지만 6mm/sec-10mm/sec 용접속도 범위에서는 경도값의 큰 변화는 발생하지 않았다. 경도값은 모재에서 평균 120Hv의 값을 나타내었고 용접부와 열영향부의 경우 모재에 비해 130~135Hv 정도로 약간 높아진 것을 확인 하였다. 용접속도에 따른 냉각속도 차이로 인해 용접부의 경도차이가 있을 것으로 예상하였으나 모든 조건에서 경도분포는 비슷한 양상을 나타내었다. 이러한 경도 분포의 원인을 파악하기 위해 부위별 미세조직을 분석하였다. Fig. 8은 전극봉을 Truncated 가공 후 용접속도 10mm/sec의 조건으로 GTA 용접시 부위별 미세조직을 나타내었다. 용접부와 열영향부(평균 250 μ m)는 모재(평균 23 μ m)에 비해 조대한 결정립을 나타내며 입열량이 증가 할수록 용접부의 결정립 크기가 증가함을 확인하였다. 모재는 등축 α 결정립을 나타내었다. 용융 후 용접부의 결정립의 크기는 핵생성 속도 N과 성장속도 G에 의하여 영향을 받으며 N/G가 작을수록 결정립은 크게 성장한다. 순 타이타늄의 경우 핵생성 사이트로 작용할 불순물 원소가 거의 없기 때문에 용접부의 조대해진 결정립이 관찰되는 것으로 판단

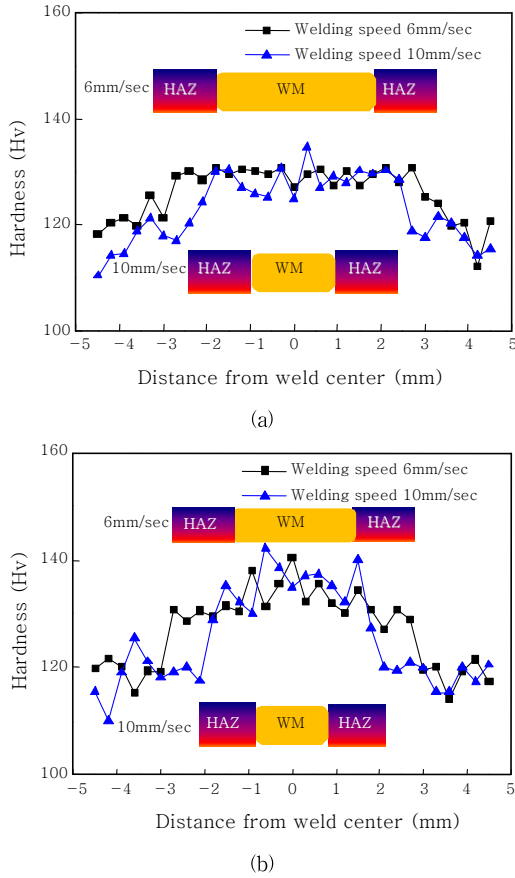


Fig. 7 Hardness distribution according to electrode shape and welding speed : (a) 30 (b) Truncated

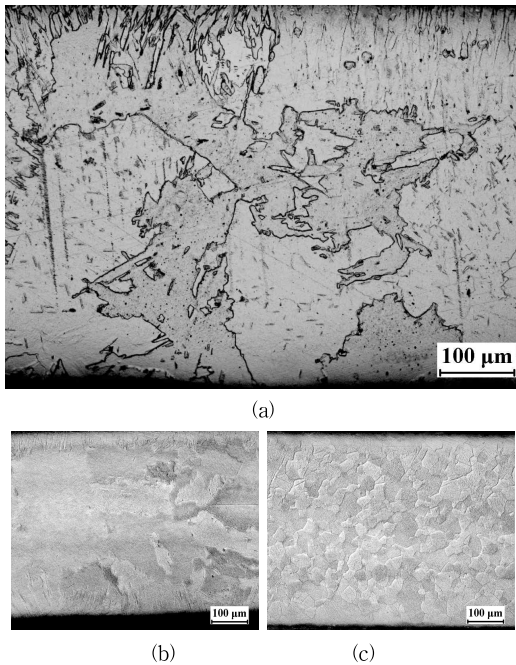


Fig. 8 Microstructure from center of weld metal to base metal : (a) Weld metal (b) HAZ (c) Base metal

된다. 또한 용융 후 빠른 냉각 속도와 대기의 침입형 원소로 인하여 상변화가 일어났으며 이로 인해 용접부에 조대한 serrate α 와 acicular α 결정립이 관찰된다. 결정립이 조대해 졌음에도 모재에 비해 경도가 증가된 원인은 용융 후 빠른 냉각속도의 원인으로 판단된다. 하지만 용접속도에 따른 냉각 속도 차이에도 불구하고 공정변수에 따라 경도 분포 차이가 크게 차이나지 않는 이유는 순 타이타늄의 경우 결정립 성장은 있으나 상변태는 하지 않는 다는 것이 가장 큰 이유라 판단된다.

3.2.2 인장특성평가

앞 절에서 전극봉 가공형상 및 용접속도는 경도 분포에 크게 영향을 미치지 않았으나, 공정변수에 따른 용접부 및 열영향부의 미세조직과 비드폭은 인장성질에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 용접속도 및 전극봉 가공형상을 공정변수로 두어 인장시험을 실시하였다. 인장시험은 용접선과 수직한 방향과 용접부 특성을 비교 평가하기 위해 용접선과 평행한 방향의 2가지 시험편을 사용하였다. Fig. 9는 용접부와 수직한 방향으로 인장시험편을 가공 후 전극봉 가공형상 및 용접속도

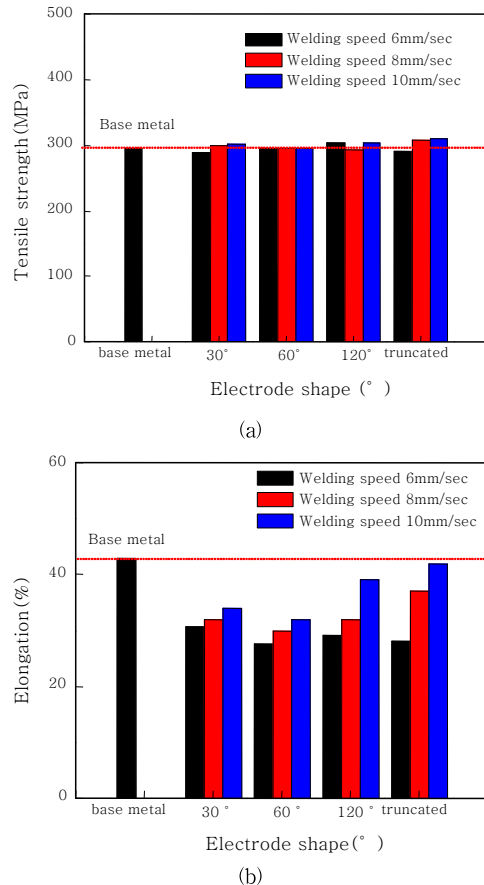


Fig. 9 Transverse tensile properties according to electrode shape and welding speed : (a) Tensile strength (b) Elongation

에 따른 인장강도 및 연신률 변화를 나타내었다. 공정 변수와 상관없이 모든 조건에서 열영향부와 용접금속이 아닌 모재에서 파단이 일어났다. 용접부의 인장강도는 모든 조건에서 모재인장강도(296MPa)값과 유사한 특성을 나타내었다. 그러나 용접속도가 빠르며 전극봉 가공각도가 커질수록 연신률은 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 가장 좁은 비드폭을 얻은 조건인 truncated 용접봉, 용접속도 10mm/sec의 조건의 경우 모재대비 95%의 연신율을 나타내었고 6mm/sec의 용접속도에서는 모재대비 60%의 연신율을 나타내었다. Fig. 10은 용접부에 수직인 인장 시험편의 인장 후 실측 사진을 나타내었다. 가공각도가 작고, 용접속도가 느릴수록 비드폭이 커 경화된 부위가 넓다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 경화된 용접부에서는 단면 수축이 거의 일어나지 않았기 때문에 연신율은 모재보다 낮으며 경화된 부위가 좁을수록 연신률은 모재와 거의 유사한 값을 가지게 된다는 것이 확인 되었다. 용접부의 인장 특성을 비교 평가하기 위해 용접선과 평행한 방향으로 시험편을 가공하여 인장 시험을 실시한 결과를 Fig. 11 및 Fig. 12에 나타내었다. 용접속도가 빠르고 전극봉 가공각도가 커질수록 용접부의 인장성질은 우수하였다. truncated 가공된 전극봉을 사용하여 10mm/sec의 용접속도에서 용접된 시험편의 인장강도는 310MPa

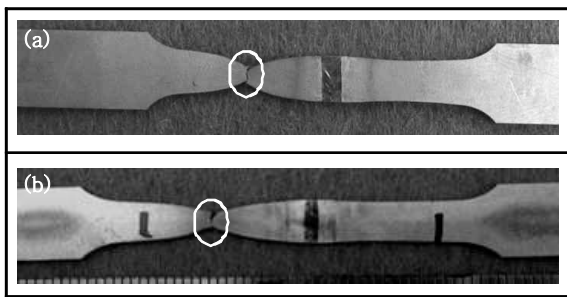


Fig. 10 Fracture configuration of transverse tensile specimens : (a) 30°, 6mm/sec (b) Truncated, 10mm/sec

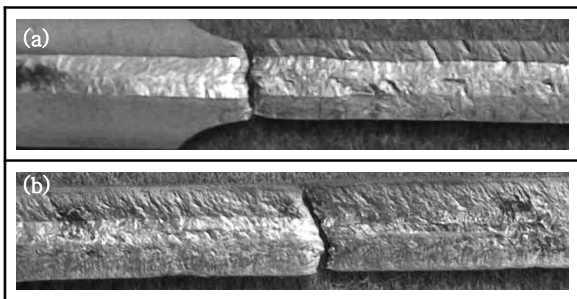


Fig. 11 Fracture configuration of longitudinal tensile specimens : (a) 30°, 6mm/sec (b) Truncated, 10mm/sec

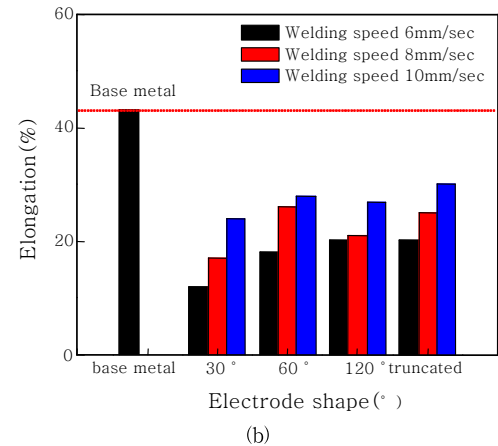
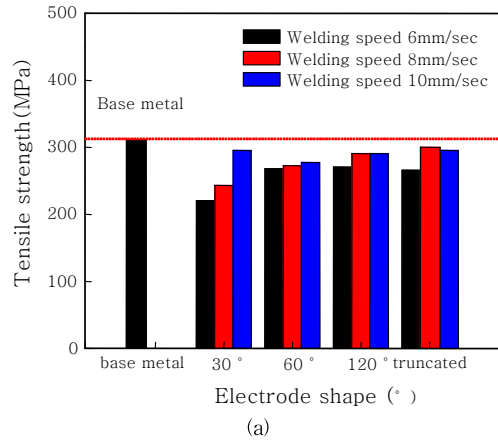


Fig. 12 Longitudinal tensile properties according to electrode shape and welding speed : (a) Tensile strength (b) Elongation

(rolling direction)의 모재와 비교해 95%인장강도를 얻을 수 있었다. 하지만 연신률은 모재와 비교하여 30%이상, 용접부와 수직인 인장시험편 대비 20% 이상 감소된 것이 확인 되었다. 경화된 용접 금속부가 모재보다 낮은 인장 강도를 가지는 원인은 Fig. 11에서 나타난 바와 같이 용접부의 조대화 된 결정립에서 높은 변형률로 심하게 가공되었을 경우 변형된 결정립 내부에서 전위 재배열과 결정립계로의 전위 소멸 등에 의해 일어나는 연속재결정이나 기하학적 재결정으로 인해 오렌지 필 현상을 유발하여 용접부의 연신률 및 인장성질이 떨어지는 것으로 판단된다.

3.2.3 성형성 평가

인장시험의 단축응력상태는 성형공정 중에서 재료가 받는 응력상태와 다르고 판재의 표면마찰특성과 금형조건 등을 고려하고 있지 않아 실제 공정과 상관성이 결여되어있다. 따라서 용접 후 성형공정 조건들을 고려한 성형성 평가를 위해 에릭슨 시험을 실시하였고 균열 발생하기 전까지 성형된 높이인 에릭슨 값을 측정하였다.

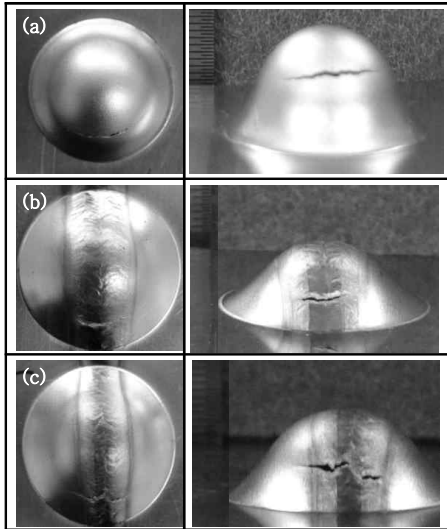


Fig. 13 Fracture configuration in Erichsen test : (a) Base metal (b) 30°, 6mm/sec (c) Truncated, 10mm/sec

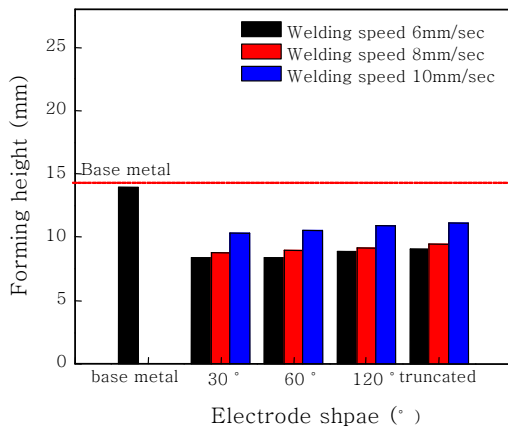


Fig. 14 Forming height according to electrode shape and welding speed

Fig. 13은 에릭슨시험 후 파단된 양상을 보여주고 있다. 에릭슨 시험후의 시험편은 모든 조건에서 용접선에 수직인 방향으로 파단이 일어났으며 주 균열은 용접부에서 발생한 후 모재쪽으로 전파하였다. 즉 본 연구에서 설정한 공정변수 조건에서는 크랙이 용접선을 따라 연속적으로 형성되는 것을 방지 할 수 있는 것으로 판단된다. Fig. 14는 공정변수에 따른 성형높이를 모재와 비교하여 나타내었다. 용접속도가 느릴수록 낮은 성형높이를 나타내고 있으며 용접속도가 가장 고속인 10mm/sec 용접속도의 경우 모재대비 약 80%에 해당하는 다소 높은 성형성을 나타내었다. 용접속도가 가장 저속인 6mm/sec의 경우 모재대비 약 61%로 낮은 성형높이를 나타내었다. 전극봉 가공각도가 커질수록 성형높이는 미세하게 증가하는 것을 확인하였다. 또한 용

접속도 변화에 따른 비드폭이 좁을수록 연신율과 성형성은 상호 비례관계임을 확인하였다. 이상의 결과로부터 용접속도가 빠르고 truncated 가공된 전극봉을 사용할 경우 성형성이 우수하다는 것을 확인하였다. 또한 용접부의 조대해진 조직은 성형성에 불리한 영향을 미치며 용접부가 좁을수록 용접 후 성형에 유리할 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 상용 순수 타이타늄 박판의 GTA용접성을 알아보기 위한 기초연구를 수행하였고 용접성에 미치는 공정변수의 영향을 검토 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아크길이가 짧을수록 낮은 입열량 조건에서도 완전 용입이 이루어져 적합한 공정으로 판단되나 텅스텐 전극봉의 손상이 크므로 전극봉 손상 정도를 고려해 0.8mm 아크길이가 적합한 공정으로 판단하였다.

2) 아크길이 0.8mm, 입열량 범위 21~52.5J/mm 조건에서 완전 용입을 얻을 수 있었으며 용접속도가 빠르며 전극봉 가공각도가 커질수록 또는 truncated 된 전극봉 사용시 좁은 비드폭을 얻을 수 있었다.

3) 용접부 경도 분포는 용접속도 및 전극봉 가공각도는 경도분포에 크게 영향을 미치지 않음을 확인하였으며 용접부가 모재보다 조금 더 경화 된 것이 관찰 되었다. 이는 등축 α 결정립에서 용융 후 재응고시 핵생성 사이트가 적어 조대한 결정립을 가지며 빠른 냉각 속도와 대기의 침입형 원소로 인한 상변화로 인해 용접부에 조대한 serrate α와 acicular α 결정립이 관찰된다. 이러한 α 결정립들이 모재보다 높은 경도의 원인으로 판단된다.

4) 용접부와 수직인 방향으로 인장 시험편을 가공 후 인장시험을 한 결과 공정변수와 상관없이 모든 조건에서 용접금속 및 열영향부가 아닌 모재에서 파단이 일어났고, 인장강도 값은 모재와 유사하거나 그 이상의 값을 보였다. 연신율은 용접속도가 빠를수록, 전극봉 가공각도가 클수록 증가하는 경향을 보였는데 이는 경화된 용접부 폭이 좁을수록 연신률이 증가한다고 판단 된다.

5) 용접부의 특성을 알아보기 위해 용접부와 평행한 방향으로 인장시험편을 가공 후 인장 시험을 실시하였으며 그 결과 인장강도는 모재와 유사하거나 그 이상의 값을 나타내었으나, 연신률은 모재대비 30% 이상 감소하였다.

6) 성형성 시험 결과 전극봉 가공각도가 클수록, 용

접속도가 빠를수록 우수한 성형높이를 가지며 가장 비드폭이 좁은 truncated 전극봉을 사용하고, 용접속도 10mm/sec 조건에서 모재대비 80%의 성형높이를 나타내었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 “부품소재 기술지원사업”의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이용태 : 타이타늄, 한국 철강신문, 2009 (in Korean)
2. R. L. Little : Welding and Welding Technology, McGraw-Hill Book Co., (1973) 217
3. W.R. Oates, A.M. Saitta, Welding Handbook, vol. 4, eighth edition., AWS, (1998) 488
4. D. Eylon, J.A. Hall, C.M. Pierce and D.L. Ruckl : Metall. Trans. A, 7A (1976) 1817-1826
5. H. Margolin, J.C. Williams, J.C. Chesnutt and G. Lutjering : Proc. of the 4th int's Conf. on Ti, 1 (1980) 169-216
6. Thomas BG, Beckermann C : Modeling of casting, welding and advanced solidification processes VIII. Warrendale, PA, The Minerals, Metals and Materials Society (1998)
7. Byoung Hyun Yoon, Suk Hwan Kim and Woong-seong Chang : Recent Trend of Welding Technology for Ti and Ti Alloys, Journal of KWJS, 25-5 (2007) 22-28 (in Korean)
8. S. Lathabai, B.L. Jarvis, K.J. Barton : Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium, Materials Science and Engineering A299 (2001) 81-93
9. S. Sundaresan, G.D. Janaki Ram, G. Madhusudhan Reddy : Microstructural refinement of weld fusion zones in α - β titanium alloys using pulsed current welding, Materials Science and Engineering A262 (1999) 88-100
10. V. Balasubramanian, V. Jayabalan, M. Balasubramanian, : Effect of current pulsing on tensile properties of titanium alloy, Materials and Design 29 (2008) 1459-1466
11. M. Balasubramanian, V. Jayabalan, V. Balasubramanian : Effect of microstructure on impact toughness of pulsed current GTA welded α - β titanium alloy, Materials Letters 62 (2008) 1102-1106
12. AWS G2 Committee on Joining Metals and Alloys : Guide for the Fusion Welding of Titanium and Titanium alloys, ANSI:AWS G2.4/G2.4M (2007) 18
13. S.M.Cho : A study on the bead stability in high speed Tig welding, Journal of the Korean society of marine engineers, 18-3 (1994) 68-77 (in Korean)
14. 岡田 明, 中村 治方 : GTA溶接における陽極舉動と母材の溶融に及ぼす影響, 溶接學會論文集, 12-1 (1994) 94-100 (in Japanese)