

GTAW 펄스 용접 조건에 따른 타이타늄 정밀관의 용입, 변색 및 굽힘특성

민성환* · 안성용** · 박지태*** · 박영도**** · 강남현**,[†]

*부산대학교 하이브리드소재솔루션협동과정

**부산대학교 재료공학과

***삼화스틸 소재개발팀

****동의대학교 신소재공학과

Effects of GTAW Pulse Condition on Penetration, Discoloration and Bending Property for Titanium Tube

Seonghwan Min*, Sungyong An**, Jitae Park***, Youngdo Park**** and Namhyun Kang**,[†]

*Interdisciplinary Program in Hybrid Materials Solution, Busan National University, Busan 609-390, Korea

**Department of Materials Science and Engineering, Busan National University, Busan 609-390, Korea

***Materials development team, Samhwa steel, Busan 617-070, Korea

****Department of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

[†]Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr

(Received November 8, 2014 ; Revised November 25, 2014 ; Accepted December 4, 2014)

Abstract

The purpose of the study is to produce a mechanically improved weld and minimum variation of color through comparing unpulsed and pulsed GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) for pure titanium (CP grade7) tube. Pulsed GTAW using 60 A peak current and 20 A background current (1:9) achieved the wider window of welding conditions having part and full penetration without burn-through than the case of unpulsed GTAW. Moreover, the pulsed welding reduced a discoloration on the back bead of the weld and the size of microstructures (basket weave and serrated α). That is because the pulsed welding has it's a low heat input and severe weld flow induced from electric current variation. Furthermore, the pulsed welding improved the bending property of the welded Ti tube. The enhanced bending property for the pulsed GTAW was due to the insignificant discoloration on the weld surface with maintaining the metal polish.

Key Words : Pulsed welding, Titanium tube, Bending, Discoloration, Hardness

1. 서 론

타이타늄 정밀관은 뛰어난 내식성과 고강도 때문에 화학산업, 항공산업, IT 산업 및 레이저산업 등 특수 산업에 확대 적용되고 있다. 그러나 소재의 난가공성으로 인해 seamless tube로 제작이 곤란하고, 판재를 조판 후 용접관을 제조하고 이를 이용하여 인발공정으로 제조되고 있다¹⁻³⁾.

타이타늄 용접법으로는 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)가 많이 이용되고 있으며, 또한 GMAW (Gas Metal Arc Welding), PAW (Plasma Arc Welding), LBW (Laser Beam Welding) 및 EBW (Electron Beam Welding) 등의 용융 용접법과 FSW (Friction Stir Welding), FW (Friction Welding) 등의 고상 접합이 연구되고 있다. GTAW는 수동 및 자동용접이 가능하고 스패터가 적고 용접 입열 조절이 용이하여 고 품질의 박판 용접에 활용할 수 있으나, 생산성이 낮다

는 단점이 있다. PAW는 키홀 모드를 통해 완전용입이 가능하고, GTAW 및 GMAW보다 기공 형성 억제에 효과적으로 알려져 있다. LBW는 GTAW나 PAW보다 생산성이 높고 두꺼운 판재를 한 번에 용접할 수 있으나, 설비가 매우 크고 고가라는 단점이 있다⁴⁾.

타이타늄은 500°C 이상의 고온에서 산소, 수소, 질소 및 탄소 등의 침입형 원소와의 반응성이 매우 높아, 접합 공정 후 취약한 금속 화합물의 생성, 산화 및 기공 등의 용접 결함이 발생할 수 있다. 이는 제품 수명을 단축시키는 주요 원인이 되므로 진공 분위기 또는 불활성 분위기에서 용접이 이루어져야한다⁵⁾. 한편 펄스 용접은 종래의 용접전류에 펄스 전류를 중첩하여 용접하는 방법으로, 펄스 주파수, 베이스전류, 펄스 전류, 펄스의 폭 등을 조절함으로써 박판 등의 용접에 용이하며 타이타늄과 같이 입열 제어가 필요한 재질에 사용된다.

이처럼 순수 타이타늄 및 타이타늄 합금에 적용되는 용접공정은 다양하며, 국내외에서 펄스를 이용한 용접 연구가 일부 진행되었다⁶⁻¹⁴⁾. 그러나 플레이트 형상을 대상으로 한 레이저 용접 연구가 대부분이고, 두께가 0.5 mm 이하의 정밀관의 경우 특정 용접기술을 적용하기 위한 연구가 미비한 수준이다.

따라서 본 연구에서는 타이타늄 용접 시 가장 널리 쓰이는 GTAW 공정을 정밀관에 적용하여 일반 조건과 펄스 조건에 따른 용접부의 형상, 변색 및 굽힘 특성을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험 재료

실험재료는 주로 발전기 및 의료 부품 미세관을 제작하기 위한 인발공정용 순수 타이타늄(CP grade7) 관을 사용하였다. 관의 두께는 0.5 mm, 외경은 $\phi 5$, 길이는 25 mm로 제작되었다. CP grade7의 조성은 Table 1에 나타내었고, 순수 타이타늄 종류 중 가장 내식성이 우수하고 강도 및 연성이 적절하며, 또한 우수한 용접

Table 1 Chemical composition of titanium CP grade 7

Element	wt. %
O	0.25
B	0.03
C	0.08
H	0.015
Fe	0.30
Pd	0.12~0.25
Residuals	0.40
Ti	balanced

성 때문에 활용도가 높은 재료이다.

2.2 정밀관 용접지그 설계 및 제작

타이타늄 정밀관의 경우 조관 품질에 따라 용접 수행에 여러 가지 변수가 있을 수 있다. 또한 조관 품질이 우수하다 하더라도 용접 수행 중 발생하는 열변형으로 인해 직진도에 큰 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 시험편의 고정 및 직진도 유지를 위한 지그 제작이 필수적이다. Fig. 1과 같이 Core 부분은 열전도성이 높은 황동으로 제작하였고, 다른 부분도 알루미늄으로 제작하여 용접열에 의한 지그 손상을 최소화 하였다. 핸들을 이용하여 작동용 블록을 움직여 시험편을 고정하였으며, 시험편이 열변형 될 때 지그에서 분리되는 것을 방지하기 위해 Core 부분 홀의 깊이는 시험 외경(5 mm)의 2/3으로 제작하였다.

Fig. 2는 실제 제작한 튜브용접 지그의 실물 사진이

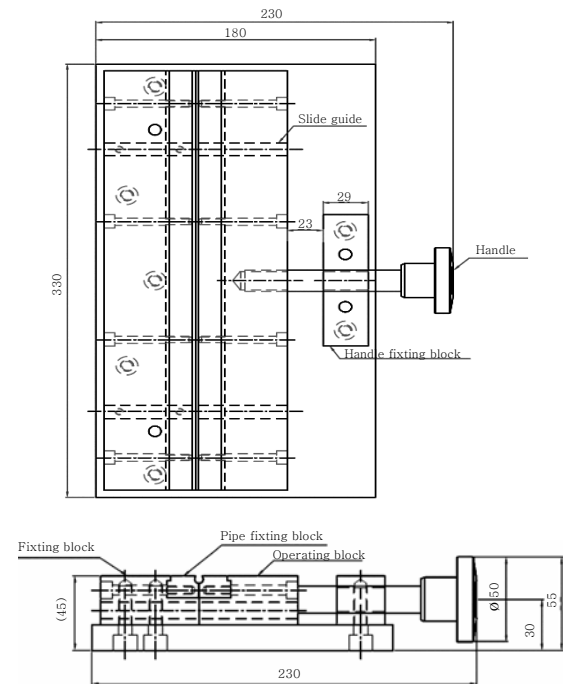
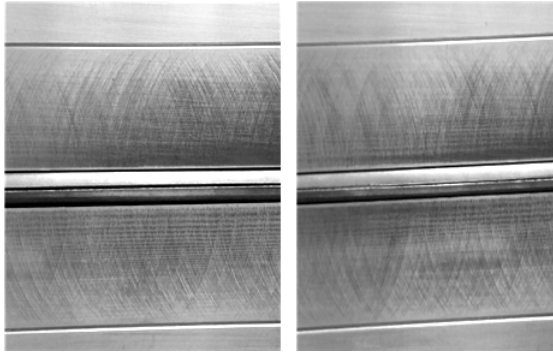


Fig. 1 Jig drawing for tube welding



Fig. 2 Welding jig manufactured for Ti tube



(a) Open jig (b) Closed jig
Fig. 3 Gap control for open and closed jig

다. Fig. 3은 튜브를 지그에 장착 후 핸들을 조이지 않아 열려있는 튜브의 모습과 핸들을 조여 닫혀있는 튜브를 보여준다. 타이타늄 미세관의 용접에는 Fig. 3b와 같이 닫혀있는 튜브를 만들어 튜브의 직진도와 겹을 줄여야만 우수한 용접부를 얻을 수 있었다.

2.3 용접 조건

언펄스 용접은 미세관에서 용락 발생을 최소화 할 수 있도록 전류 20~40 A, 속도 7~13 mm/s, 아크 길이 0.5~1.5 mm 범위에서 수행하였다. 펄스 용접은 언펄스 용접과 동일한 아크 길이 0.5~1.5mm를 유지하면서 또한 동일한 용접 생산성을 확보하기 위하여 용접속도를 7~13 mm/s로 유지하고, 입열량을 조절하기 위하여 background current (BC) 15~20 A, peak current (PC) 45~60 A, Frequency 6Hz, PC:BC를 1:9¹⁵⁾로 설정하여 수행하였다. 또한 용접부의 산화를 방지하기 위하여 아르곤 가스를 보호가스로 사용하여 토치부분에서 18 l/min의 유량으로 용접부 후행에서 10 l/min의 유량으로 보호가스를 주입하였다. 그러나 Ti 정밀관 내부에는 별도의 보호가스를 주입하지 않고 실험하였다. 자세한 용접 조건 및 이에 따른 입열량 계산은 Table 2에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접조건에 따른 비드 건전성

용접 조건별 타이타늄 정밀관의 비드형상을 관찰하였다. 용접전류 20 A의 경우 아크가 불안정하여 7~13 mm/s 용접속도 구간에서 용입 발생이 없었다. Table 3은 정밀관 용접 후 상부비드를 나타낸 표로써, 40 A 이상의 높은 용접전류에서는 용락(burn through)이 빈번하게 발생하였고, 30 A로 용접전류를 낮추면 용접속도가 느

Table 2 Welding conditions

Weld voltage 10V		
Current(A)	Velocity (mm/s)	Heat input (J/mm)
30	7	42.9
	10	30.0
	13	23.1
40	7	57.1
	10	40.0
	13	30.8
45/15 (PC/BC, 1:9)	7	25.7
	10	18.0
	13	13.9
60/20 (PC/BC, 1:9)	7	34.3
	10	24.0
	13	18.4

* Heat input = Voltage × Current / Velocity

Table 3 Top bead and penetration for unpulsed weld condition

Weld condition		Arc length(mm)		
Current (A)	speed (mm/s)	0.5	1.0	1.5
30	7	Burn through	Burn through	
	10			
	13			Not melted
40	7	Burn through	Burn through	
	10	Burn through	Burn through	
	13	Burn through		

린 7 mm/s에서만 용락이 발생하였고, 13 mm/s의 빠른 용접속도일 때 용접 불가(Not melted) 현상이 관찰되었다. 펄스 용접에서는 Table 4에서와 같이 언펄스 용접보다 저입열 조건인 45/15 A의 경우, 0.5 mm 아크길이와 7 mm/s 속도에서만 완전용입이 발생하였고, 용접불가 현상이 빈번하게 관찰되었다. 입열량을 높은 60/20 A 펄스 용접의 경우, 느린 속도 7 mm/s 조건에서 완전용입이 가능하였고, 속도를 높인 10~13 mm/s에서는 이번 비드까지는 용접이 되지 않은 부분 용접(part penetration)이 가능하였다. Table 2에 계산하였듯이 60/20 A 펄스 용접의 입열량은 30 A 언펄스 용접의 동일한 용접속도에서보다 ~20% 낮은 값을 가지고 있지만, 펄스 용접은 부분 용접 및 완전용

Table 4 Top bead and penetration for pulsed weld condition

Weld condition		Arc length(mm)		
Current (A)	speed (mm/s)	0.5	1.0	1.5
45/15 (PC/BC)	7		Not melted	Not melted
	10	Part penetration	Not melted	Not melted
	13	Not melted	Not melted	Not melted
60/20 (PC/BC)	7			
	10	Part penetration		Part penetration
	13	Part penetration	Not melted	Part penetration

입이 가능한 용접가능 조건이 넓어진 장점을 가지고 있었다. 또한 용락이 발생하지 않고 부분/완전용입이 발생한 언펄스 및 펄스용접 조건의 용접부에서는 크랙 또는 기공 등의 결함이 발견되지는 않았다.

Fig. 4와 5는 언펄스 용접조건에서 상부 및 이면 비드의 너비를 나타낸다. 용접전류가 증가하면 비드 너비는 증가하였고, 용접속도가 빨라질 때 비드 너비는 감

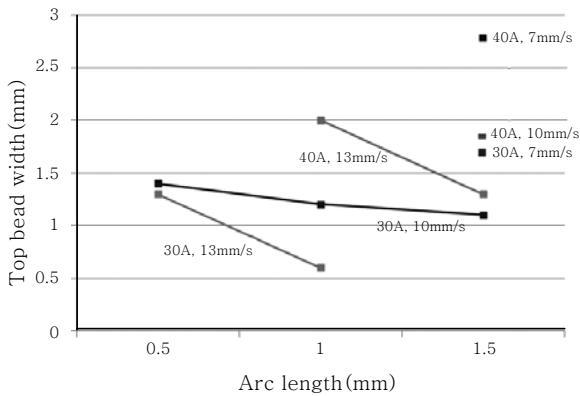


Fig. 4 Top bead width for un-pulsed welding

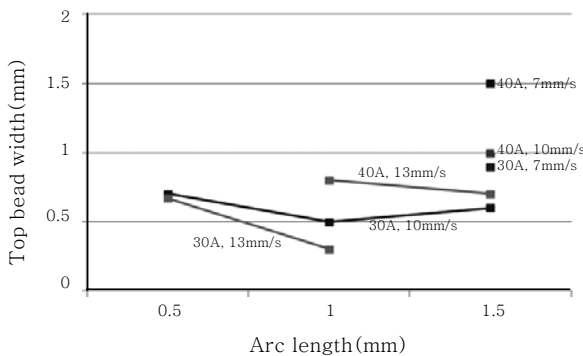


Fig. 5 Back bead width for un-pulsed welding

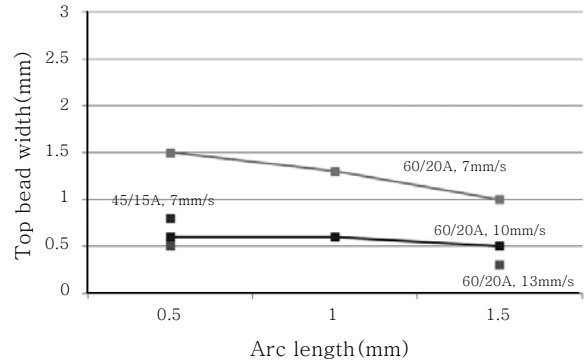


Fig. 6 Top bead width for pulsed welding

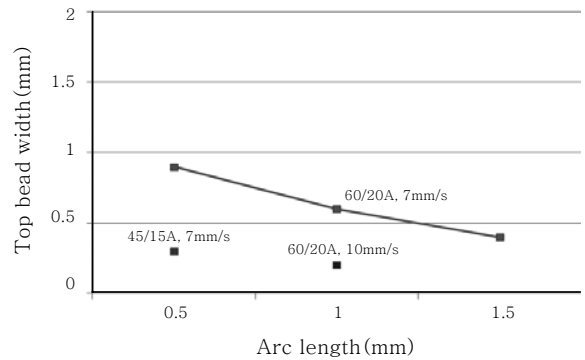


Fig. 7 Back bead width for pulsed welding

소하였다. 또한 아크길이가 길어지면 비드 너비는 감소하였다.

Fig. 6과 7은 펄스 용접조건에서 부분 용접부를 포함하여 상부 및 이면 비드의 너비를 표시하였다. 펄스 용접 또한 용접전류가 증가하면서 비드 너비는 증가하였고, 용접속도가 빨라지면 비드 너비는 감소하였으며, 아크길이가 길어지면 비드 너비는 감소하였다. 또한 펄스 용접의 상부 및 이면 비드의 너비는 언펄스 용접에 비해 낮은 입열량을 가지므로 좁아진 것을 알 수 있다.

3.2 용접조건에 따른 비드 변색

순수 타이타늄의 경우 산화에 의한 변색 정도에 따라 금속 광택이 있는 은백색, 금색, 보리색, 보라색, 청색을 띠는 용접부는 양호한 산화 정도를 나타내는 것으로 보고되고 있다¹⁶⁾. 그러나 금속광택이 없는 청백색, 암회색, 백색, 황백색 순으로 변하면 용접부의 산화에 의한 변색으로 연성이 저하된다고 보고되고 있다. Table 5는 완전용입이 된 언펄스 용접부의 이면 비드 색상 변화를 나타낸다. 언펄스 조건 중 용접전류 30 A, 용접속도 13 mm/s, 아크길이 0.5~1.0 mm의 이면부 색상은 금속광택이 있는 금색, 보리색을 보이고 있다. 또

Table 5 Discoloration in un-pulsed weld condition

Weld condition		Arc length(mm)		
Current (A)	speed (mm/s)	0.5	1.0	1.5
30	7	Burn through	Burn through	
	10			
	13			Not melted
40	7	Burn through	Burn through	
	10	Burn through	Burn through	
	13	Burn through		

Table 6 Discoloration in pulsed weld condition

Weld condition		Arc length(mm)		
Current (A)	speed (mm/s)	0.5	1.0	1.5
45/15 (PC/BC)	7		Not melted	Not melted
	10	Part penetration	Not melted	Not melted
	13	Not melted	Not melted	Not melted
60/20 (PC/BC)	7			
	10	Part penetration		Part penetration
	13	Part penetration	Not melted	Part penetration

한 용접전류 30 A, 용접속도 10 mm/s, 아크길이 0.5~1.0 mm의 조건에서는 광택 있는 은백색 또는 청색의 이면 비드 색상을 보이고 있으므로, 이러한 용접 조건은 용접부 산화에 의한 연성 저하는 없을 것으로 판단된다.

용접전류 30 A, 용접속도 7 mm/s, 아크길이 1.5 mm 조건에서도 광택 있는 은백색 또는 청색의 이면 비드 색상을 보이지만, 용접속도를 10 mm/s로 증가시키면 금속광택이 없는 청백색의 용접부 이면 비드 색상을 보였다.

용접전류 40 A, 아크길이 1.5 mm의 용접조건에서 용접속도가 7~10 mm/s인 경우 금속광택이 있는 은백색의 이면비드 색상을 가지고 있었으나, 용접속도가 빠른 13 mm/s의 조건에서는 금속광택이 없는 청백색을 나타내어 용접부 연성이 저하될 수 있으므로 3.5절 굽힘시험에서 이에 대한 검증이 필요할 것이다.

언펄스 용접부 이면 비드 색상 변화를 관찰한 결과, 용접속도가 빨라지거나 아크길이가 길어지면, 용접토치와 후행 보호가스의 역할이 감소하여 용접부 산화 정도가 심해지는 것으로 판단된다.

반면 펄스용접을 수행한 경우 이면 비드의 색상은 Table 6에서와 같이 모든 용접조건에서 금속광택이 있는 은백색을 보이고 있어, 펄스 용접이 타이타늄 산화물 생성 저감에 효과적이라 판단된다. 이는 저입열 펄스용접의 조건에서 Ti 증발이 줄어들어, TiO_x의 산화 흡 발생이 감소한 결과로 판단된다. 용접조건에 따른 용접부 및 열영향부의 변색 메커니즘을 밝히기 위한 표면 산화 및 질화층에 대한 정량/정성분석은 현재 진행 중이고, 펄스 용접 조건에 따른 용접부 형상 및 건전성 확보가 본 연구의 주요 목적이므로, 차후 논문에서 발표하겠다.

3.3 용접조건에 따른 미세조직

Fig. 8은 순수 타이타늄(CP grade7) 정밀관 모재부의 광학현미경 미세조직을 나타내며, Fig. 9는 언펄스와 펄스 용접조건에 대한 대표 미세조직을 비교하였다. 공정 변수에 따라 용접부 상부 비드 및 이면 비드의 폭은 차이가 있지만(Fig. 4~7), 용융부에 나타난 미세조직의 종류는 큰 변화가 관찰되지 않았다. 모재부에서는 판상(platelike)의 등방성 구조(equiaxed α phase)가 나타나며, 언펄스 용접부에서는 serrated α 상이 관찰되었다. 또한 용융부 표면에서 O, N 같은 침입형 원소의 고용에 의해 생성되는 basket weave 형태의 조직이 관찰되었다.

펄스 용접부에서도 언펄스 조건의 용접부와 비슷한 미세조직이 관찰되었다. 그러나 펄스 용접부의 경우 Fig. 10에서와 같이 더욱 미세한 serrated α 및 basket weave 미세조직을 가지는 것으로 관찰되었다. Fig. 10의 언펄스 용접조건(40 A, 13 mm/s)의 경우, 입열량은 30.8 J/mm으로 계산되었고, 펄스 용접조건(60/20 A, 7 mm/s)에서는 34.3 J/mm으로 계산되

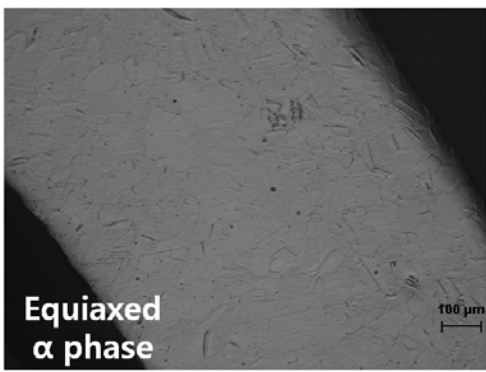


Fig. 8 Microstructure of base metal

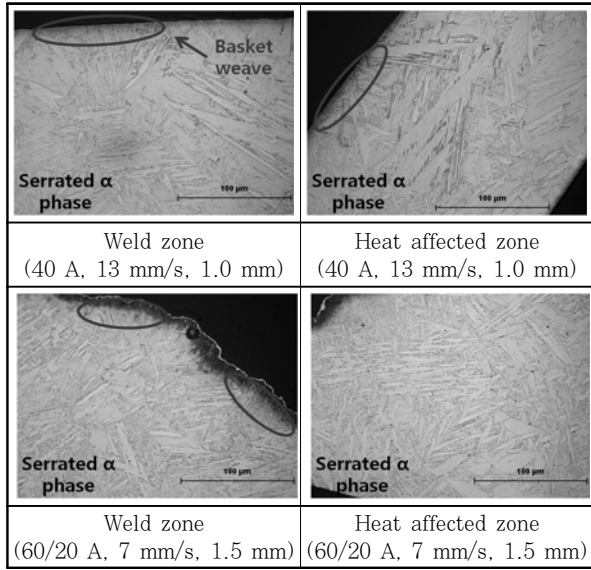
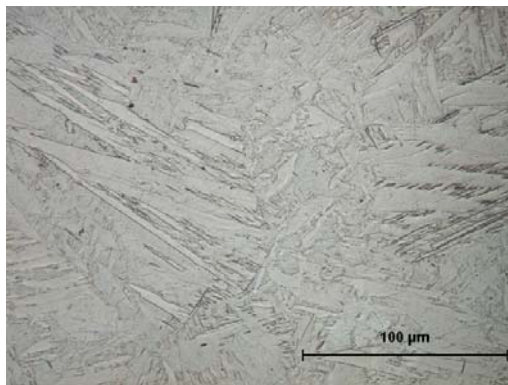
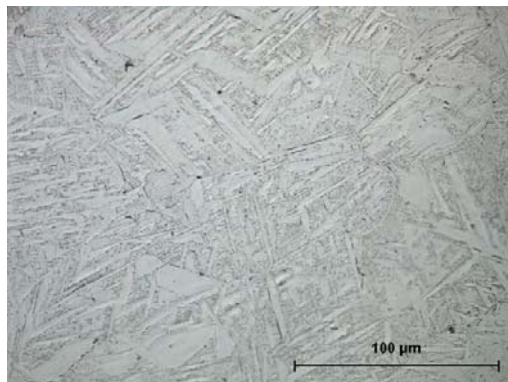


Fig. 9 Microstructural behavior with respect to pulsed conditions



〈40 A, 13 mm/s, 1.0 mm, Unpulsed condition〉



〈60/20 A, 7 mm/s, 1.5 mm, Pulsed condition〉

Fig. 10 Weld microstructure at different pulsed conditions

었다 (Table 2). 즉, 펄스 용접이 언펄스 용접보다 큰 입 열량을 가지고 있었지만, 펄스용접의 펄스에 의한 용융액의 유동이 활발해져 결정립 핵생성이 활발해지고 성장은 억제되었기 때문에 미세한 조직을 보이는 것으로

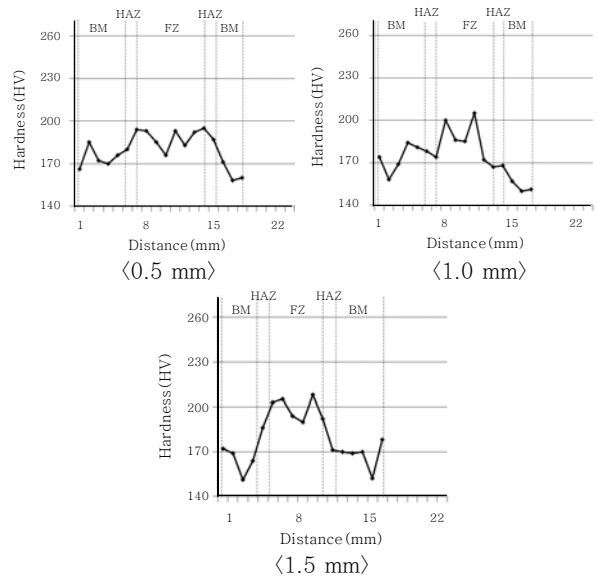


Fig. 11 Effects of arc length on hardness distribution for unpulsed conditions (30 A, 10 mm/s)

판단된다. 따라서 펄스 용접부가 미세화된 serrated α 및 basket weave 조직을 보이는 것은, 저입열량에 의한 영향보다는 펄스에 의한 용융액의 활발한 유동현상이 더욱 큰 영향을 끼친 것으로 판단된다.

3.4 용접조건에 따른 경도

Fig. 11은 언펄스 30 A, 10 mm/s 용접조건에서 아크길이를 0.5~1.5 mm로 변화함에 따라 용접부 단면의 중심부를 따라 측정된 경도를 비교하였다. 모재에 비하여 열영향부와 용접부의 경도가 증가하는 거동을 보인다. 이는 용접부와 열영향부에서 O, N 같은 침입형 원소의 고용에 의해 생성되는 미세조직으로 알려진 basket weave 또는 serrated α 결정립이 관찰되는 것과 관련성이 있다. 동일 전류 및 속도의 언펄스 용접 조건에서 아크 길이가 증가함에 따라 용접부 경도값은 큰 변화 없이 190~210 Hv 범위의 값을 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 언펄스 40 A, 1.5 mm 아크길이 용접 조건에서 용접속도 7~13 mm/s 변화에 따른 경도 변화를 비교하였다. 30 A 언펄스 용접에서와 동일하게 열영향부와 용접부의 경도가 모재에 비하여 증가하는 거동을 보인다. 그러나 용접 속도가 증가함에 따라 냉각속도가 증가하고 보호가스의 역할이 감소하여 O, N 같은 침입형 원소의 고용에 의해 생성되는 미세조직이 증가하고, 이에 따라 용접부의 경도가 증가할 것으로 예상하였다. 그러나 용접속도 7~13 mm/s 범위에서 용접부 경도값은 큰 변화 없이 190~210 Hv 범위의 일정한 값을 가지는 것으로 보인다.

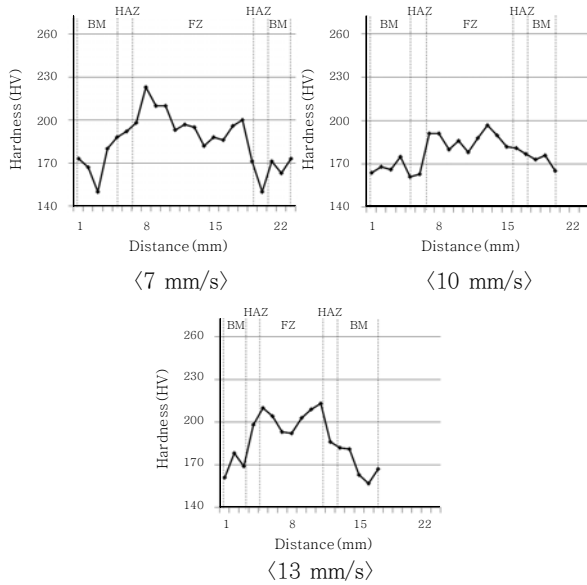


Fig. 12 Effects of welding velocity on hardness distribution for unpulsed conditions(40 A, arc length 1.5 mm)

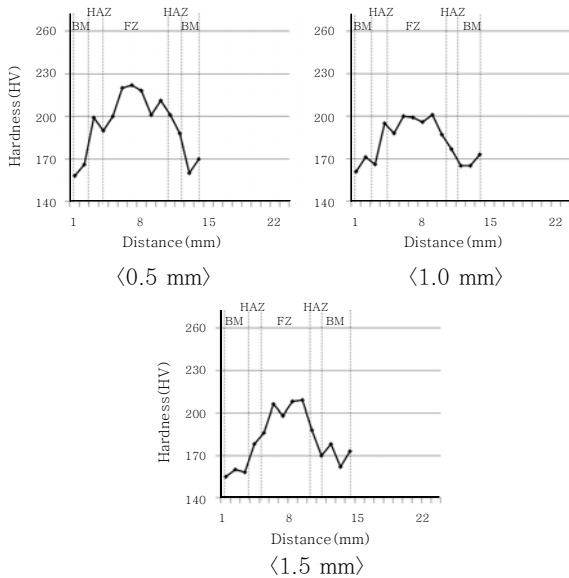


Fig. 13 Effects of arc length on hardness distribution for pulsed conditions (60/20 A, 7 mm/s)

Fig. 13은 펄스 60/20 A, 7 mm/s 용접조건에서 아크길이를 0.5~1.5 mm로 변화함에 따른 경도 변화를 비교하였다. 언펄스 용접부에서와 동일하게 아크 길이가 0.5~1.5 mm 변화에 따라 용접부 경도값은 200~220 Hv 범위의 일정한 값을 가지는 것으로 판단된다.

용접조건별 경도는 Fig. 11~13에서와 같이 유의 수준 이상의 큰 변화를 나타내지 않았고, 이는 본 연구에서 사용한 모재가 CP grade7의 순수 타이타늄이므로 용접 후 응고 시 상변태가 없고 및 편석 발생도 매우

미미하기 때문에 판단된다. 그러나 용접 시 산화물 생성에 의한 변색과 경도 변화에 대한 연관성에 대해서는 더욱 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.5 용접조건에 따른 굽힘특성


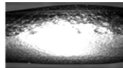
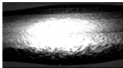

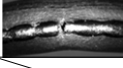
관 형상의 경우, 인장강도 평가가 어려운 경우 굽힘 시험(bending)이나 평편 시험(flattening)을 실시하여 기계적 강도를 평가한다. 본 연구에서는 직경 5 mm의 정밀관 용접부를 ASTM E290의 V-굽힘을 모사하여, 시험편을 90도 구부린 후 용접부 상부 비드의 균열 여부를 관찰하였다.

Table 7에서와 같이 언펄스 완전용입 용접부를 평가한 결과, 용접전류 30 A, 용접속도 10 mm/s, 아크길이 1.5 mm 및 용접전류 40 A, 용접속도 13 mm/s, 아크길이 1.0~1.5 mm 조건의 용접부에서 파단 현상이 관찰되었다. 펄스조건에서는 Table 8과 같이 용접전류 60/20 A, 용접속도 10 mm/s, 아크길이 1.0 mm 조건에서 국부적으로 비드폭이 아주 좁게 생성된 이면 비드 부분에 미세한 파단이 발생하였다. 용접부 표면의 변색정도를 나타낸 Table 5와 Table 7의 굽힘실험 결과를 비교하면, 용접부 상부 비드 표면이 금속광택을 잃고 청백색으로 변색이 된 모든 펄스 용접부에서 굽힘 시험 후 크랙이 발견되었다. 지난 연구에서 Ti 용접부 표면이 금속광택 없는 청백색으로 변하면 산화에 의해 연성이 저하된다고 보고하였다¹⁶⁾. 따라서 용접부 산화물 또는 질화물 형성에 의한 변색을 방지 또는 저감할 수 있는 펄스 용접조건에서 보다 우수한 굽힘 특성을 가지는 용접부를 확보할 수 있었다.

Table 7 Bended tubes for unpulsed conditions

Weld condition		Arc length(mm)		
Current (A)	speed (mm/s)	0.5	1.0	1.5
30	7			
	10			
	13			
40	7			
	10			
	13			

Table 8 Bended tubes for pulsed conditions

Weld condition		Arc length(mm)		
Current (A)	speed (mm/s)	0.5	1.0	1.5
45/15 (PC/BC)	7			
	10			
	13			
60/20 (PC/BC)	7			
	10			
	13			

4. 결 론

본 연구는 두께 0.5 mm 외경 $\phi 5$ 의 순수 타이타늄 (CP grade7) 정밀관을 사용하여, 펄스 및 언펄스 GTAW 조건에 따른 용접부의 건전성, 변색, 굽힘파단을 연구하였다.

1) 타이타늄 정밀관의 조관 품질 및 용접 열변형을 극복하여 용접부의 직진도와 갭을 개선할 수 있는 지그를 설계 및 제작하여, 언펄스 및 펄스 용접 조건을 최적화하였으며, 크랙, 용락 및 기공이 없는 부분/완전용입 용접부를 획득하였다.

2) 용접 전류가 높고 용접 속도가 느리며 아크 길이가 짧은 용접조건에서 용접부의 비드 너비가 증가하였다. 또한 언펄스 용접에 비해 펄스 용접은 동일한 용접 속도일 경우 낮은 입열량을 가지고 있어 용락현상이 감소하여, 넓은 공정 윈도우를 가지고서 부분/완전용입이 가능하였다.

3) 완전용입 언펄스 용접 Ti 정밀관의 굽힘시험에서 크랙을 보인 용접부의 이면 비드는 모두 금속광택을 잃은 청백색으로의 변색이 있었다. 금속광택을 잃은 청백색으로의 변색은 용접부의 연성을 저감할 수 있으므로, 금속광택을 유지하는 은백색의 이면 비드를 얻을 수 있는 저입열 펄스 용접기술을 이용하여 더욱 우수한 굽힘 특성을 가진 용접부를 제작할 수 있었다.

4) 타이타늄 용접부는 O, N 등 침입형 원소의 고용에 의해 생성되는 basket weave 및 serrated α 미세조직이 관찰되었다. 저입열의 펄스 용접조건에서는 펄스에 의한 용융액의 활발한 유동때문에 결정립 성장이 억제되어, 언펄스 용접부의 미세조직보다 미세화된 결정립이 관찰되었다.

5) 본 실험의 용접조건 범위에서는 용접 속도 및 아

크 길이의 차이, 펄스 용접으로 인한 결정립 미세화가 정도에 미치는 영향이 크지 않은 것을 확인하였다. 그러나 Ti 용접 시 산화 또는 질화물 생성에 의한 변색과 정도 및 굽힘특성의 연관성은 더욱 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Reference

- 이용태 : 타이타늄, 한국 철강신문, 2009 (in Korean)
- R. L. Little : Welding and Welding Technology, McGraw-Hill Book Co., (1973) 217
- W.R. Oates, A.M. Saitta : Welding Handbook, vol. 4, eighth edition., AWS, (1998) 488
- Yoon, Byoung-Hyun, Kim, Suk-Hwan, Chang, Woong-Seong : Recent Trends of Welding Technology for Ti and Ti Alloys, Journal of KWJS, **25-5** (2007), 22-28 (in Korean)
- Thomas BG, Beckermann C : Modeling of casting, Welding and advanced solidification process VIII. Warrendale, PA, The minerals, Metals and Materials Society (1998)
- Kawahito Yousuke, Kito Masayuki, Katayama Seiji : In-process monitoring and adaptive control for gap in micro butt welding with pulsed YAG laser, Journal of physics. D, applied physics, **40-9** (2007), 2972-2978
- Richter K., Behr W., Reisinger U : Low Heat Welding of Titanium Materials with a Pulsed Nd:YAG Laser, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, **38-1** (2007), 51-56
- LIN Mau-Chin, LIN Sheng-Chieh, WANG Yu-Tsai : Fracture Resistance of Nd:YAG Laser-welded Cast Titanium Joints with Various Clinical Thicknesses and Welding Pulse Energies, Dental materials journal, **26-3** (2007), 367-372
- Balasubramanian M., Jayabalan V., Balasubramanian V. : Optimizing pulsed current parameters to minimize corrosion rate in gas tungsten arc welded titanium alloy, International journal of advanced manufacturing technology, **39-5/6** (2008), 474-481
- Casalino G, Ludovico A.D : Finite element simulation of high speed pulse welding of high specific strength metal alloys, Journal of materials processing technology, **197-1/3** (2008), 301-305
- Jong-Do Kim, Myung-sub Kwak : Lab Weldability of Pure Titanium by Nd:YAG Laser, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, **32-2**(2008), 315-322 (in Korean)
- Yang Mingxuan, Qi Bojin, Cong Baoqiang : Effect of pulse frequency on micro-structure and properties of Ti-6Al-4V by ultrahigh-frequency pulse gas tungsten arc welding, International journal of advanced manufacturing technology, **68-1/4** (2013), 19-31
- Yang Z., Qi B., Cong B. : Effect of pulse frequency on weld appearance behavior of TC4 titanium alloys,

- Transactions of the China Welding Institution, **34-12** (2013), 37-40
14. Torkamany M.J, Malek Ghaini F., Poursalehi R : Dissimilar pulsed Nd:YAG laser welding of pure niobium to Ti-6Al-4V, Materials & design, **53** (2014), 915-920
 15. S. Sundaresan, Janaki Ram G.D., Madhusudhan Reddy G : Microstructural refinement of weld fusion zones in α - β titanium alloys using pulsed current welding, Materials science & Engineering, **A262** (1999), 88-100
 16. Chae-Hun, Lee : Electron beam weldability of commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy, Proceedings of KWJS, **48** (2007), 360-362 (in Korean)