

고속 TIG용접의 비드 안정성에 관한 연구

조 상 명*

A Study on the Bead Stability in High Speed TIG Welding

S. M. Cho

Key words : TIG용접(Tungsten Inert Gas Welding), 아크압력(Arc Pressure), 용융주행용접(Melt Run Welding), 험핑비드(Humping Bead), 용융지(Molten Pool), 용융지 압입(Molten Pool Depression), 뾰족전극(Sharp Electrode Tip), 선단절단 전극(Truncated Electrode Tip), 플라즈마젯(Plasma Jet), 용접속도(Welding Speed)

Abstract

TIG welding process is applied for the active metal such as aluminum and titanium, also sometimes for overlay welding of superalloy. However the welding speed to be applied is very low because of the unstable bead formed in the region of high current and high welding speed. The present study was carried out to examine the basic phenomena of high speed TIG melt run welding by the 2% Th - W electrode(dia.3.2mm) of various tip shapes.

The bead width welded by the sharp electrode tip in the process was larger than that by the truncated electrode tip. In the high current region of more than 200A, to apply the truncated electrode tip was preferable to the sharp electrode tip for high speed welding. And it was confirmed that the molten pool depression by plasma jet could be formed also at the low current of 150A less than 200A reported by S.I. Rokhlin et al. The molten pool depression was proportional to welding current square, but was varied by the shape of electrode tip.

1. 서 언

선박기관 부품용 재료로서 알루미늄, 마그네슘, 티타늄과 같은 활성이 강한 재료와 고융점의 초합금 및 정밀부품의 고급용접을 비롯하여 각종 기관 배관의 초층용접에는 주로 TIG(Tungsten Inert

Gas)용접을 적용하고 있으며, 초내열 합금과 같은 고급재료의 육성용접에도 이것이 적용되는 경우가 종종 있다. 그러나 TIG용접은 실제 수동용접의 경우 100~150mm/min의 낮은 용접속도 때문에 그 적용이 일반화 되지 못하고 있다. 따라서 지금까지 용접 생산성 향상을 위하여 용접아크 물리학

* 종신회원, 부산공업대학교

적 관점과 기술적 입장에서 폭넓은 연구가 진행되고 있으나 고속 TIG용접은 아직 보편화 되지 않고 있는 것으로 보인다^{1,2)}.

TIG용접에 있어서 아크 물리학적 연구는 주로 정지아크에 대한 시뮬레이션 또는 실험적 연구가 많이 보인다^{3 ~ 6)}. 즉 R.T.C. Choo등은 용융지의 자유표면이 아크력에 의하여 압입된(deformed) 상태를 가정하고, 정지아크하에서 시뮬레이션하여 용융지에 유입되는 열유속과 전류밀도 및 온도의 분포를 계산하였다³⁾. 또한 정지아크가 끊어졌을 때 생기는 터널비드의 발생기구를 해명하였다. S. I. Rokhlin등은 정지아크에 대한 실험에 의하여 용융지 표면의 압입(depression)깊이는 전류의 제곱에 비례하며, 전극선단 원추각 30° 및 토치 작업 각 20° 의 경우 용융지 압입은 전류200A이상에서 생기기 시작한다고 보고하고 있다⁴⁾. 또한 S. - D. Kim과 S. - J. Na는 TIG정지아크에 있어서 전자 기력, 부력, 표면장력과 플라즈마젯(plasma jet)의 용융지 표면에 대한 전단응력(shear stress)을 함께 고려하여 용입(penetration)형상을 시뮬레이션 하여 이 전단응력의 중요성을 논하고 그 영향을 평가하였다⁵⁾.

한편, 日向등은 정지 및 저속TIG용접에 의한 용입형태에 미치는 화학성분과 실드가스(shield gas)의 영향을 검토하였다⁶⁾. 또한 岡田등은 비교적 저속인 150mm/min의 용접속도로 TIG용접하면서 용융지인 양극점(anode spot)을 주의깊게 관찰하여 양극저동과 용입과의 관계를 설명하고 있다⁷⁾.

그러나 TIG용접에서 대전류 고속용접시에는 험핑비드(humping bead)와 같은 불안정 비드가 나타나며, 이로 인하여 대전류 용접시에 오히려 용접 속도를 낮추어야 하는 현상이 나타나는 것으로 알려져 있으나⁸⁾ 구체적으로 여러 용접 조건하에서 이러한 용접속도 특성곡선을 구한 결과와 고찰을 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 용융주행 용접과 육성용접등을 TIG용접에 의해 시공하는 경우 그 생산성 향상을 위하여 요구되는 고속TIG용접의 기초적 현상규명을 그 목적으로 한다. 따라서 여러 형태의 전극 선단을 사용하여 비드외관을 평가하였고, 50A ~ 300A의 전류범위에서 고속TIG용접을 실시하여

용접속도 특성곡선을 얻었으며 이에 관하여 아크 물리학적인 관점에서 고찰을 행하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

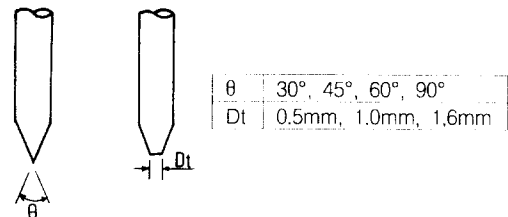
본 연구에서는 용가와이어의 사용없이 자동 용융주행(melt run)에 의한 아래보기자세의 TIG용접을 실시하였고, 사용한 모재는 연강 SS41 판재로서 두께 7.5mm로 한쪽면을 연마하여 녹을 완전히 제거한 상태에서 폭 100mm 길이 300mm로 하였다. 모재의 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of base metal (SS41), wt%

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo
0.193	0.037	<0.05	<0.05	0.89	0.013	0.021	0.011

공업용 Ar가스를 유량 7.5~10l/min로 송급하였고, 전극 마이너스극성으로 하여 직류용접만을 실시하였으며 전극은 2% Th - W전극(직경 3.2mm)으로 하였다. 용접전류의 값은 50~300A의 범위로 하였고 아크전압은 15~19V이었으며, 실험실의 온도는 5~15 $^\circ$ C로 유지되었다. 용접속도는 자동이송대차를 써서 100mm/min~1500mm/min의 범위로 조정하였으며, 운봉은 실시하지 않았다. 토치의 작업각과 진행각은 모두 직각으로 하였고 아크 길이는 2~6mm로 하였으나 주로 4mm조건에서 용접하였으며, 자기불림등의 외적 요인에 의하여 아크가 휘지 않도록 주의하여 수직 아크(normal arc)가 되도록 하였다.

용접기는 용량 300A의 트랜지스터 인버터 펄스 용접기를 사용하였고 Photo 1은 실험장치의 외관



(a) Sharp tip (b) Truncated tip

Fig. 1 Various electrodes used for TIG melt run welding

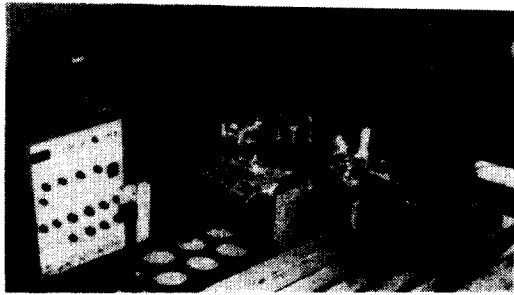


Photo 1 Appearance of experimental equipment

을 보인다.

TIG용접시에 플라즈마젯으로 인한 아크압력(arc pressure)이 용접시의 비드 불안정 현상에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Fig. 1과 같이 2종류의 전극선단 형상을 적용하였다. 즉 (a)는 뾰족전극(sharp electrode tip, 이하 sharp tip)으로서 선단의 원추각은 30°, 45°, 60° 및 90°로 하였고, (b)의 선단절단전극(truncated electrode tip, 이하 truncated tip)의 경우는 원추각의 변화는 (a)의 경우와 마찬가지로 하였으나, 선단의 직경 Dt는 0.5mm, 1.0mm, 1.6mm로 변화시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접 비드폭에 미치는 전극형상의 영향

Fig. 2는 Fig. 1의 여러가지 전극으로 모재판위에 200A, 200mm/min의 수직아크(아크길이 $l_a = 4mm$)로 용융주행 TIG용접하였을 때의 비드폭에 미치는 전극형상의 영향에 관한 결과이다. 뾰족전극의 경우 선단의 원추각이 커질수록 비드폭은 감소되는 현상을 보인다. 또한 선단절단전극을 쓰면 비드폭은 전체적으로 뾰족전극의 경우보다 작게 되며 원추각의 영향은 그다지 없는 것으로 보인다.

이러한 영향은 음극점으로 되는 전극의 선단표면에 대해서 거의 수직으로 전류가 흐르게 되어⁶⁾ 양극점인 모재 용융지와 사이에 아크가 종모양으로 형성되는 현상에 의하여 설명할 수 있다. 원추각이 작을수록 아크는 옆으로 퍼지게 되므로 양극점쪽의 아크도 커지게 된다. 용접 비드폭은 岡田

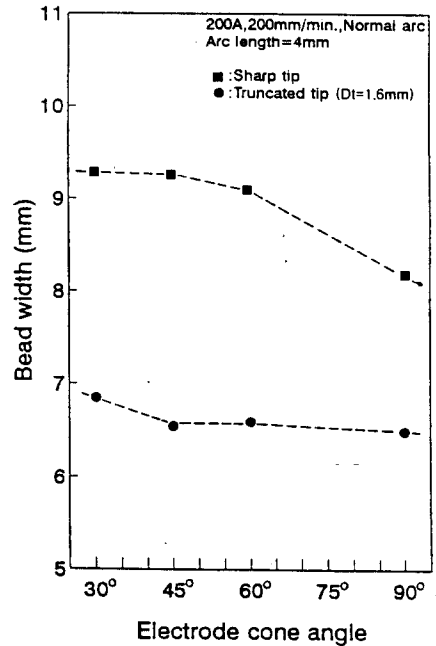
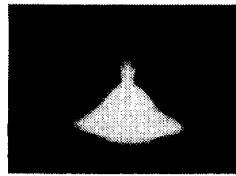
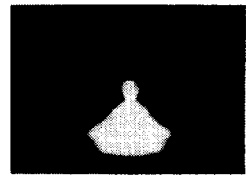


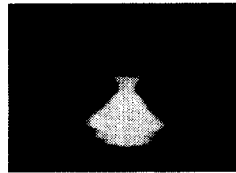
Fig. 2 Effect of electrode shape on bead width



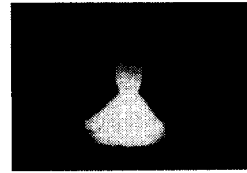
(a) 30° sharp tip



(b) 45° sharp tip



(c) 60° sharp tip



(d) 45° truncated tip

Photo 2 Appearance of arc by various shape of electrodes(arc length = 4mm)

등이 보고한 바와 같이 양극점(anode spot)의 크기에 비례하여 증가한다⁷⁾. 선단절단전극의 경우는 선단의 평탄한 부분에서 대부분의 전류가 흐르고 측면에서는 전류가 그다지 흐르지 않기 때문에 양극점의 크기가 원추각에 의하여 심하게 변하지 않고, 이로 인하여 비드폭도 두드러진 변화를 보이지

않는 것으로 판단된다.

Photo 2 (a), (b), (c), (d)는 원추각 $\phi=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 의 뾰족전극 및 선단직경 $Dt=1.6\text{mm}$ 인 선단절단전극(원추각 $\phi=45^\circ$)을 사용하여 두꺼운 동판 위에서 정지 아크를 발생하여 촬영한 것이다. 아크 길이는 모두 4mm로 위의 실험과 동일하게 유지하였다. 원추각이 작아지면 역시 아크가 옆으로 심하게 퍼지는 것을 사진에서 볼 수 있고, 이와 같이 양극점이 커져서 비드폭이 증가하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 3은 전극의 원추각을 45° 로 일정하게 하고 아크길이를 4mm로 유지하면서 용융주행 TIG용접하였을 때 선단절단전극에 의한 비드폭 Wt 와 뾰족전극에 의한 비드폭 Ws 의 비 Ws/Wt 를 전류의 변화에 대하여 도기한 것이다. 200A이하의 낮은 전류에서는 이 비가 크지만 250A 이상에서는 1.1에 접근하게 됨을 알 수 있다. 즉 전류가 높아지면 직경 3.2mm의 전극에서는 선단의 절단(평탄화) 유무가 비드폭에 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 원추각 45° 인 여러 전극을 써서 아크길

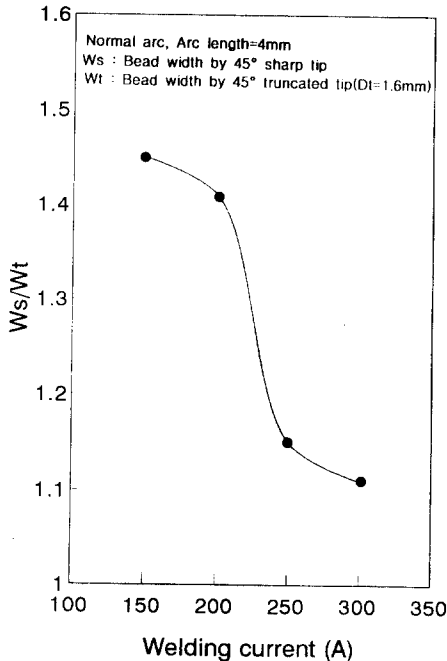


Fig. 3 Effect of welding current on the ratio of bead width by the sharp tip and the truncated tip

이 4mm로 유지하면서 전류 200A, 속도 200mm/min의 조건으로 용융주행 TIG용접하였을 때 얻

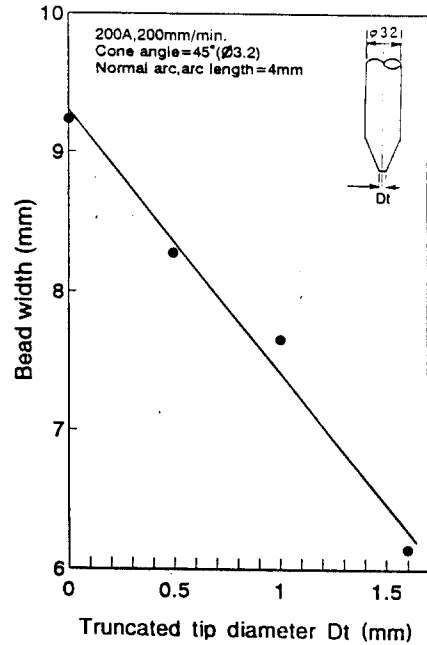


Fig. 4 Effect of truncated tip diameter on bead width

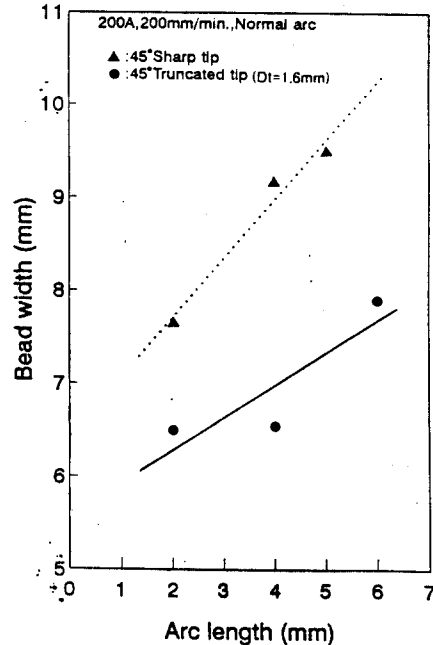


Fig. 5 Effect of arc length and electrode shape on bead width

어진 비드폭의 변화를 보인 것이다. $Dt=0$ 인 뾰족 전극에서 $Dt=1.6\text{mm}$ 인 선단절단전극으로 변환에 따라 비드폭은 거의 직선적으로 감소하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 전류 200A, 속도200mm/min의 조건으로 원추각 45° 인 뾰족전극과 선단절단전극($Dt=1.6\text{mm}$)을 사용하였을 때 아크길이와 비드폭의 관계를 보인 것이다. 여기서 뾰족전극을 사용하였을 때는 아크길이 6mm에서 험핑비드가 생겼기 때문에 5mm까지의 관계만을 나타내었다.

Fig. 5의 실험범위에서는 어느 전극의 경우도 비드폭은 거의 아크길이에 비례하여 증가하지만, 뾰족전극을 써서 얻은 비드폭이 보다 크며 아크길이에 심하게 의존함을 보인다.

3.2 고속용접시의 용접속도 특성곡선에 미치는 전극 형상의 영향

Photo 3은 45° 뾰족전극을 쓰고, 전류 200A(아크길이 4mm)로 하여 여러 용접속도에서 용융주행 TIG용접하였을 때의 비드 외관을 보인다. 같은 전류로 용접하여도 용접속도가 빨라지면 험핑비드가 생기고 용접속도가 더욱 증가하여 450mm/min로 되면 험핑비드에 이어 분리비드(split bead)가 생기는 것을 볼 수 있다.

Photo 4는 45° 뾰족전극을 쓰고, 전류 250A, 속도150mm/min의 조건으로 용접하였을 때의 비드 외관과 각부의 단면모양을 보인다. 여기서 (b)의 단면사진은 전형적인 터널비드(tunnel bead)를 보이고, (c)는 전형적인 손가락 비드



(a) 200A 200mm/min



(b) 200A 250mm/min

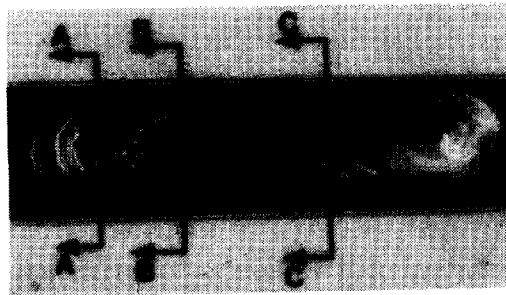


(c) 200A 350mm/min



(4) 200A 450mm/min

Photo 3 Appearance of bead by various welding speed(45° sharp tip, 200A)



(a) Bead surface



(b) Section A - A



(c) Section B - B

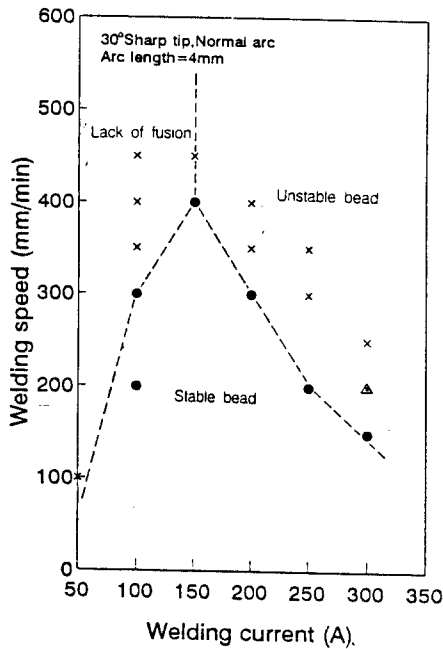


(d) Section C - C

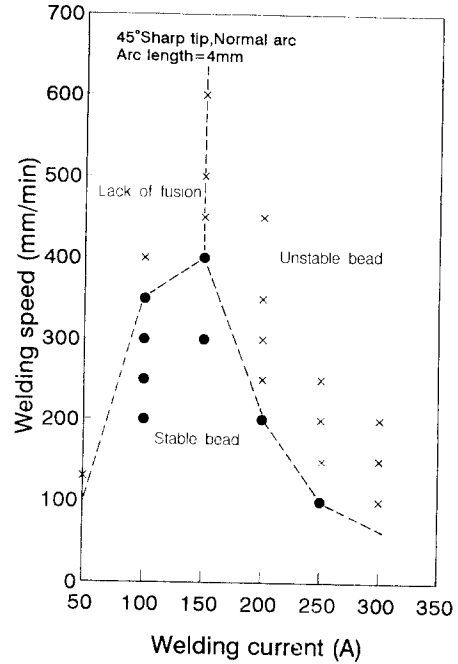
Photo 4 Bead surface and cross section by 45° sharp tip(250A, 150mm/min)

(finger bead)를 보이고 있으며 (d)는 정상적인 용입모양을 보인다. 즉 Photo 4는 갖가지의 특징적

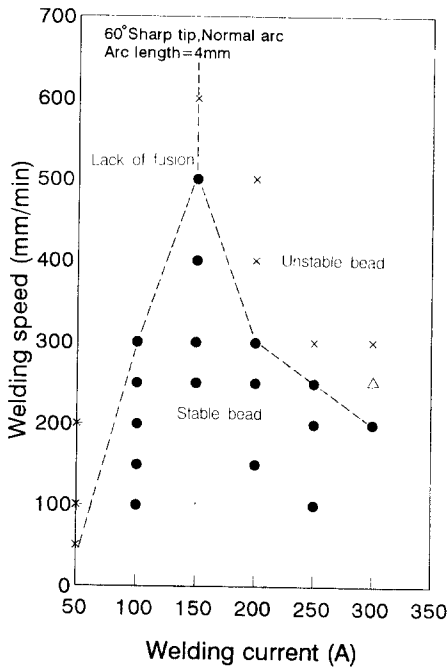
인 비드형상이 나타난 것으로서 이 용접속도에서 비드는 안정 상태에서 불안정 상태로 천이하는 것



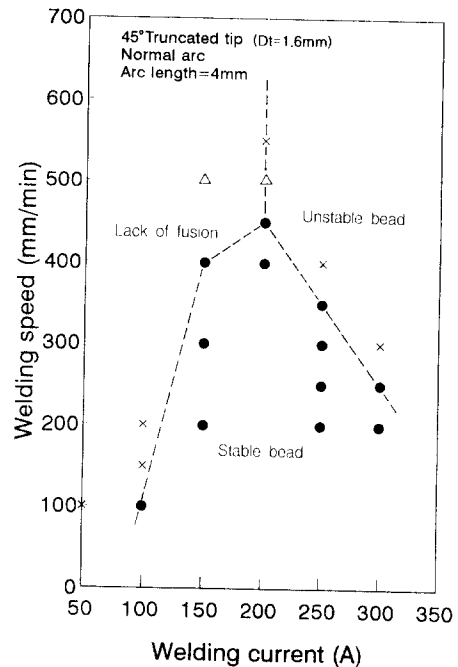
(a) 30° sharp tip



(b) 45° sharp tip



(c) 60° sharp tip



(d) 45° truncated tip (Dt=1.6mm)

Fig. 6 Welding speed characteristic curve by various electrode tip

으로 보인다.

Fig. 6 (a), (b), (c), (d)는 여러 형태의 전극을 써서 각 수준의 전류 조건하에서 용접속도를 변화시키면서 자동 용융주행 TIG용접을 실시하여 비드가 Photo 3의 (a)와 같이 되면 ●기호로 표시하고 Photo 3 (b), (c), (d)와 같이 되면 ×기호로 표시하였다. 다만 토우부에 육안으로 구별할 수 있는 정도의 언더컷이 생기면 △기호를 썼다. Fig. 6의 (a), (b), (c)에 있어서 150A이하의 용융부족(lack of fusion) 영역 및 (d)의 200A이하의 용융부족 영역은 입열량의 부족으로 비드형성이 제대로 되지 않은 경우이다. 안정된 비드는 ●기호이하의 속도 영역인 안정 비드(stable bead)영역에서 얻어진다 고 할 수 있다. 여기서 안정 비드영역의 상한곡선을 용접속도 특성곡선(welding speed characteristic curve)이라 한다.

Fig. 6 (a), (b), (c)에서 150A까지는 전류의 증가에 따라 용접속도 특성곡선은 상승하지만 그 이상의 전류가 되면 이 특성곡선은 급격히 강하함을 알 수 있다. 즉 전류가 150A이상 이 되면 용접시의 플라즈마젯으로 인한 아크압력이 증가하여 용융지

에 압입현상이 생겨서 험핑비드나 분리비드와 같은 불안정 비드(unstable bead)가 나타난다. 한편 Fig. 6 (d)는 200A까지 특성곡선은 증가한 후 다시 감소하는 경향을 보이고 불안정 비드는 200A이상의 대전류 영역에서 발생하는 것으로 나타났다.

150A이하의 전류 영역에서는 뾰족전극을 쓰는 것이 고속용접에 유리하지만, 200A이상의 대전류 영역에서는 선단절단전극을 쓰는 것이 고속용접에 유리하다고 할 수 있다.

Fig. 7 (a), (b)는 원추각의 변화에 따라 안정 비드가 얻어지는 용접속도 특성곡선을 나타낸 것이다. (a)는 뾰족전극을 쓰고 전류는 200A로 일정하게 유지하여 얻은 것으로서 원추각이 45°일 때 극소점을 보이고, 30°의 경우는 오히려 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이 현상은 平岡등이 측정 한 아크압력의 특성을 이용하여 설명할 수 있다.* 平岡등은 용접속도 특성곡선을 직접 구하지는 않았지만 용융지에 대한 최대아크압력은 전류와 음극점의 전류밀도의 積에 비례하며, 이 이론을 쓰면 뾰족전극의 원추각45°일 때 최대아크압력이 가장 크게 됨을 실험적으로 입증하였다. 최대아크압력

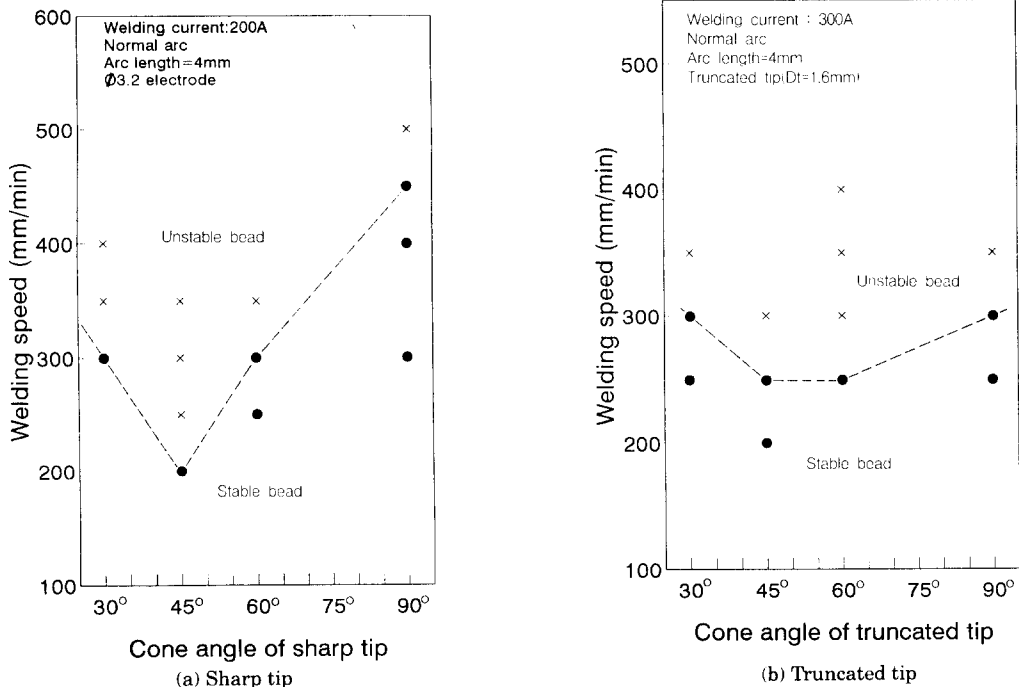


Fig. 7 Welding speed characteristic curve by the electrode tip with various cone angle

이 높으면 험핑비드가 쉽게 생기고 안정비드가 얻어지는 용접속도는 낮아지며, 이에 따라 45° 뾰족전극의 경우에 극소점이 나타난다고 할 수 있다. 아크압력과 용접속도에 관한 구체적인 관계는 다음 절의 아크물리학적 고찰에서 기술한다.

한편, Fig. 7 (b)는 전류를 300A로 일정하게 두고, 선단직경 $Dt=1.6\text{mm}$ 인 선단절단전극의 원추각을 변화시켰을 때의 용접속도 특성곡선이다. 선단절단전극의 경우는 전체적으로 원추각의 변화에 따라 특성곡선이 그다지 심하게 변하지 않는 특징을 보인다.

Fig. 8은 Fig. 1 (b)의 각종 선단직경 Dt (원추각 45°)를 가진 선단절단전극을 써서 전류 200A에서 얻은 용접속도 특성곡선이다. 같은 전류로 용접하는 경우라도 전극선단이 뾰족한 경우보다 평탄한 경우가 높은 속도까지 안정된 비드가 얻어지는 것을 알 수 있다. 이 용접전류 200A의 경우, 뾰족전극에 대한 선단절단전극의 용접속도 증가효과는 200mm/min에 대한 450mm/min로서 2.25배이었다. 그러나 Fig. 6 (b)와 (d)의 전류 250A에 대한 결과를 보면, 뾰족전극에서는 100mm/min이지만,

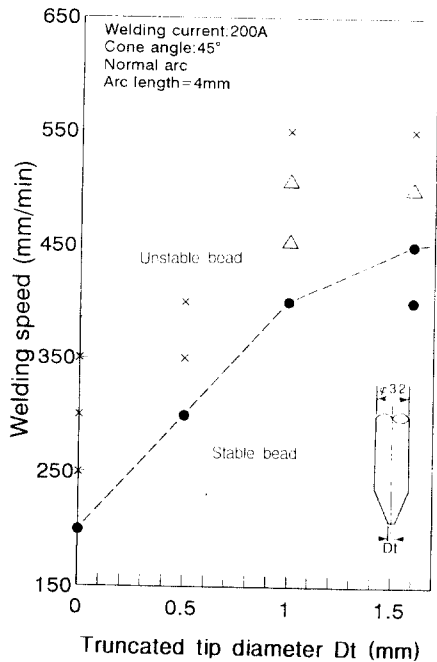


Fig. 8 Welding speed characteristic curve by the truncated tip with various tip diameter

선단절단전극에서는 350mm/min까지 안정된 비드가 얻어지므로 3.5배의 속도 증가 효과가 얻어졌다. 즉 선단절단전극이 용접고속화에 미치는 효과는 대전류 영역에서 보다 현저하게 됨을 알 수 있다.

3.3 용융주행 TIG용접시의 불안정 비드 형성에 관한 아크물리학적 고찰

Fig. 9는 R. T. C. Choo 등이 직경 2.7mm의 원통형 전극을 써서 아크길이 6.3mm로 시뮬레이션하여 얻은 최대아크압력을 인용하여⁸⁾ 그 값과 용접전류의 제곱에 대한 관계를 본 연구에서 도시하여 본 것이다. 동일한 전극을 쓰고 전류만을 변화시킬 경우는 S. I. Rokhlin 등이 발표한 바와 같이 아크력(arc force)은 전류의 제곱에 비례하고⁹⁾, 최대아크압력도 전류의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다¹⁰⁾. 그러므로 Fig. 9의 관계는 직선이 되는 것이 타당하다고 할 수 있다. 그러나 이러한 이론만에 의해서는 전극의 형상에 의존하는 아크압력의 변화까지 설명할 수는 없다. 平岡 등은 최대아크압

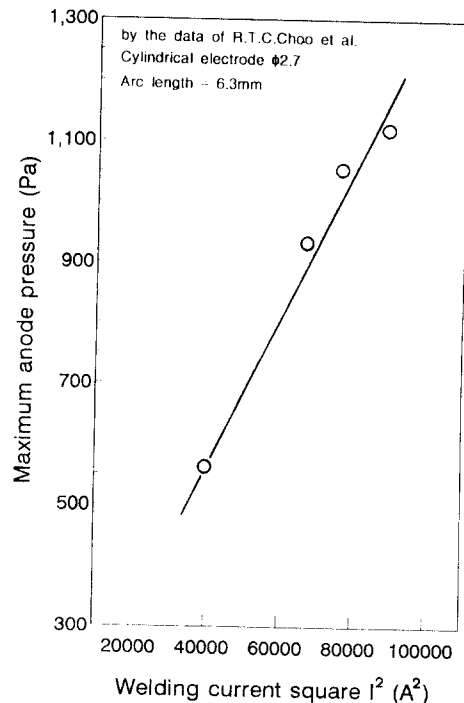


Fig. 9 Relation between maximum anode pressure and welding current square by the data of R. T. C. Choo et al.

력은 전류와 음극전류밀도의 積에 비례하는 관계를 갖는다고 보고하였다⁹⁾. 전극 형상이 달라지면 Fig. 9의 직선의 방정식이 변하게 됨을 의미한다.

한편, 아크압력과 용융지의 압입깊이 및 표면장력의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있는 것으로 알려지고 있다^{1,2)}.

$$Pa = \rho gh + Pr \tag{1}$$

여기서,

Pa : 아크압력

ρ : 용융금속의 밀도

g : 중력가속도

h : 용융지의 압입깊이

Pr : 용융지에 형성되는 압입홈의 표면장력에 의한 압력

위의 관계로부터 얻어지는 압입깊이 h가 입열에 의한 용입깊이 hp와 같게 되면 홈 아래의 고체벽이 직접 플라즈마젯에 노출되어 금속의 용융 및 증발이 동시에 생기기 때문에 Photo 4 (c)와 같이 손가락 모양으로 심하게 파여들어간다. 여기에 용융금속의 일부가 덮여지면 Photo 4 (b)의 터널 비드로 된다. 이런 천이 영역에서는 Photo 4 (b), (c), (d)의 어떤 비드도 생길 수 있다. 따라서 이러한 천이 영역에서는 액체인 용융지에 대한 플라즈마젯에 의한 압입깊이 h는 (d)의 용입깊이와 같다고 판단하여도 큰 오차는 없을 것으로 사료된다.

한편, S. I. Rokhlin 등은 실험적 연구에서 용융지의 압입깊이가 아크력에 비례하며, 전류의 제곱에 비례함을 보고하였다⁴⁾.

Fig. 10은 용융지의 압입깊이와 전류의 관계를 확인하기 위하여 Photo 4와 같은 천이 영역에서 얻은 비드를 절단하여 용입을 측정하여 그 값을 압입깊이로 간주하여 평가한 결과이다. 여기서도 압입깊이 h는 대략 전류의 제곱에 비례하여 S. I. Rokhlin 등의 결과와 일치하지만, 뾰족전극의 경우가 선단절단전극의 경우보다 h가 현저히 큰 것을 알 수 있다.

결국, 본 연구에서는 플라즈마젯에 의한 용융지의 압입깊이는 전류의 제곱에 비례하지만 전극의 형상에 따라 현저하게 변하게 됨을 확인할 수 있었다. 또한 S. I. Rokhlin 등의 보고(원추각 30°, 작입

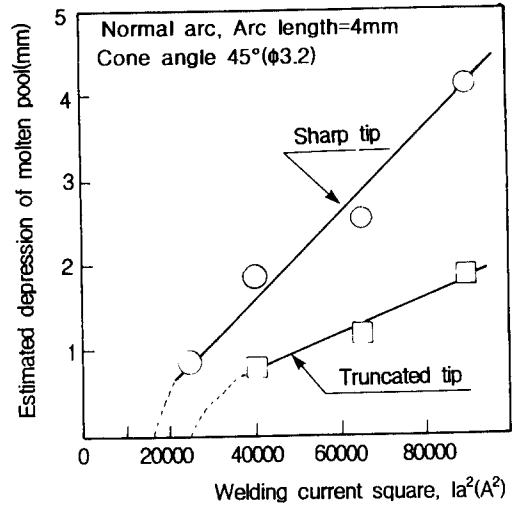


Fig. 10 Relation between estimated depression of molten pool and welding current square by the present experiment.

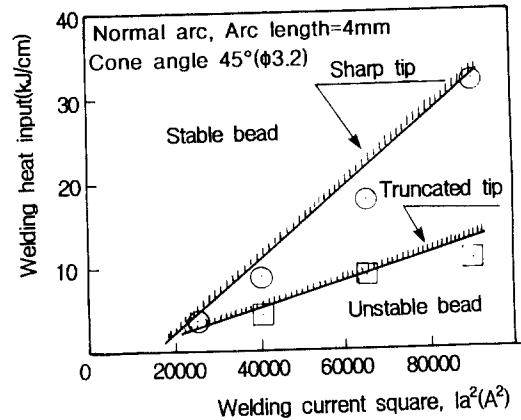


Fig. 11 Evaluation of welding stability by using the welding current and heat input

각 20°에 의하면 용융지의 압입은 200A이상의 높은 전류에서 생긴다고 하지만, 본 연구에서와 같이 원추각 45° 작입각 0°의 경우는 150A에서도 압입이 생기는 것을 Fig. 10 및 Fig. 6 (a), (b), (c)를 통하여 확인할 수 있다.

Fig. 11은 본 연구에서 고안한 것으로서 불안정 비드를 방지하기 위한 용접입열조건을 도식한 것

이다. 용융지의 압입깊이 h 는 용접속도와는 무관하고 전류와 전극의 형상등에 의존하지만 용입깊이 h_p 는 입열조건에 의존한다. 따라서 Fig. 11은 전극과 전류가 주어지면 h 는 미리 결정되므로 충분한 입열량이 되도록 용접속도를 늦게 하여 h_p 가 커지도록 하여야만 불안정 비드를 방지할 수 있음을 의미한다.

4. 결 론

초합금과 같은 선박용 재료의 용접과 육성용접 등을 TIG용접에 의해 시공하는 경우 생산성 향상을 위하여 요구되는 고속TIG용접에 관한 기초적 현상 규명을 목적으로 하여 직경 3.2mm인 전극의 선단형상을 여러가지로 바꾸어 연강판위에 자동용융주행 TIG용접을 실시하여 비드 형상을 관찰하였으며, 아크물리학적 관점에서 고찰을 행하여 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

1) 용접비드의 폭은 선단절단전극보다 뾰족전극에 의한 경우가 크게 되지만 전류가 250A 이상으로 높아지면 그 차이는 현저히 감소하며, 아크길이 가 커지면 비드폭도 증가한다.

2) 여러가지 원추각을 가진 뾰족전극과 선단절단전극에 의한 용접속도 특성곡선을 구하여 고속용융주행 TIG용접의 실용화를 위한 기초자료를 확립하였다. 즉 150A 이하의 전류영역에서는 뾰족전극을 쓰는 것이 고속용접에 유리하지만, 200A 이상의 대전류 영역에서는 선단절단전극을 쓰는 것이 고속용접에 유리하다.

3) 뾰족전극에 의한 경우 용접속도 특성곡선은 원추각 45° 근방에서 뚜렷한 극소점이 생겼지만, 선단절단전극의 경우는 그것이 원추각에 그다지 의존하지 않는 것으로 나타났다.

4) 플라즈마젯에 의한 용융지 압입은 원추각 45° 작업각 0° 이면, S. I. Rokhlin 등이 주장하는 200A보다 낮은 150A의 용접전류에서도 생길 수

있음을 확인하였다.

5) 플라즈마젯에 의한 용융지 압입은 전류의 제곱에 비례하지만 전극의 형상에 따라 크게 변하였다. 즉 같은 대전류로 용접하여도 아크압력이 크게 되는 뾰족전극에 의한 경우가 선단절단전극보다 큰 압입이 생기므로 대전류 영역에서는 고속용접이 곤란하다.

참고문헌

- 1) 란카스타-編著: 溶接アークの物理, 社團法人溶接學會, 溶接アーク物理研究委員會, (1990).
- 2) 日本溶接協會 編: 新版テイク溶接法の基礎と實際, 産報出版, (1992).
- 3) R. T. C. Choo, J. Szekely and R. C. Westhoff: Modeling of High - Current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool, Journal of Welding Research, Jeffrey. D. Weber Editor, (1990), pp. 346s - 361s.
- 4) S. I. Rokhlin and A. C. Guu: A Study of Arc Force, Pool Depression, and Weld Penetration During Gas Tungsten Arc Welding, Welding Research Supplement, (Aug. 1993), pp.381s - 390s.
- 5) S. -D. Kim and S. -J. Na: Effect of Weld Pool Deformation on Weld Penetration in Stationary Gas Tungsten Arc Welding, Welding Research Supplement, (May. 1992), pp. 179s - 193s.
- 6) 日向輝彦, 安田克彦, 春日幸生, 恩澤忠男: 移動TIGアークによる溶込み形態と實用 継手の溶接: 溶接學會論文集, 第12巻 第1號, (1994), pp. 58 - 63.
- 7) 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, 第12巻 第1號, (1994), pp. 94 - 100.
- 8) 前掲書 1) p. 138.
- 9) 平岡和雄, 岡田 明, 稻境道夫: TIGアークにおける最大アーク壓力に及ぼす電極形狀 の影響, 溶接學會論文集, 第3巻 第2號, (1985), pp. 10 - 16.
- 10) 前掲書 2) p. 31.