

## 대전류 고속 TIG 용접 특성에 미치는 He 혼합비의 영향

오 동 수\* · 김 영 식\*\* · 조 상 명\*\*\*

\*창원기능대학 플랜트설비자동화과

\*\*부경대학교 기계공학부 기계설계·생산자동화공학전공

\*\*\*부경대학교 신소재공학부 소재프로세스공학전공

### Effect of He Mixing Ratio on the Characteristics of TIG Welding with High Current and High Speed

Dong-Soo Oh\*, Yeong-Sik Kim\*\* and Sang-Myung Cho\*\*\*

\*Dept. of Plant Facility Automation, Changwon Polytechnic College, Changwon 641-772, Korea

\*\*Major of Machine Design & Manufacturing Automation Eng., Div. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

\*\*\*Course of Materials Processing Eng., Div. of Materials Science & Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

#### Abstract

Tungsten Inert Gas(TIG) welding is today one of the most popular arc welding process because of its high quality welds and low equipment costs. Even if welding productivity increases with welding speed and current, this strategy is limited by the appearance of defects such as undercut and humping bead due to the depressed molten metal. The purpose of this study investigates the effect of He mixing ratio on the characteristics with high current and speed in TIG welding. The conclusions obtained permit to explain the arc start characteristics quantitatively and the maximum welding speed on stable bead formation with He mixing ratio for high current and speed TIG welding observed in experiments. Also through the relation of the maximum arc pressure and surface depression depth at high current and speed TIG welding, it made clear the mechanism of unstable bead formation.

\* Corresponding author : dongsoh@kopo.ac.kr

(Received February 25, 2005)

Key Words : Arc welding, TIG welding, Shield gas, He mixing ratio, Arc start characteristics, Aspect ratio(D/W), Arc pressure  $P_a$ , Penetration depth  $h_p$ , Depression depth  $h$ , Humping bead

#### 1. 서 론

TIG 용접 공정은 고품질의 용접부를 얻을 수 있고 저렴한 장비의 가격 때문에 많은 산업분야에서 필수 불가결한 용접 공정이다<sup>1-4)</sup>. 그러나 TIG 용접 공정은 수동으로 용접할 경우 용접속도를 10~15cm/min 밖에 얻을 수 없기 때문에 GMA(Gas Metal Arc) 용접에 비해 그 적용에 많은 한계를 갖고 있다. 따라서 TIG 용접 생산성 향상을 위하여 용접 아크 물리학적 관점과 기술적 입장에서 폭 넓은 연구가 진행되고 있으나, 고

속 TIG 용접은 아직 보편화되어 있지 않다<sup>4-6)</sup>.

TIG 용접에 있어서 아크 물리학적 연구는 주로 텅스텐 전극의 형상의 영향<sup>4,7-10)</sup>과 실드가스의 영향<sup>5,11-12)</sup>에 대하여 진행되어 왔다. 용접 생산성 향상을 위해서는 전류를 높이고 용접속도를 증가시켜야 한다. 그러나 대전류를 사용하게 되면 아크 압력에 의한 강한 아크력에 의해 용융지 표면의 심한 압입현상<sup>13-18)</sup>이 생기며, 언더컷(undercut), 험핑비드(humping bead), 그리고 분리비드(splitted bead)와 같은 용접결함이 발생하게 되어 고속 용접의 적용에 한계에 부딪치게 된다<sup>4-6)</sup>. 따라서 대전류 고속 용접의 적용을 위해서 플라즈

마 기류에 의한 강한 아크 력을 억제시킬 수 있는 아크 물리학적 연구가 필요하다. TIG 용접의 대전류에서 발생하는 높은 아크 력을 감소시키기 위한 방법은 다음의 3가지로 알려져 있다<sup>5,7)</sup>. 그것은 텅스텐 전극 팁의 선단각을 변화시키거나, hollow 텅스텐 전극을 사용하는 것, 그리고 실드가스로 Ar 가스 대신 He 가스를 사용하거나, Ar+He 혼합가스에서 He 가스의 량을 증가시키는 방법이다.

본 연구의 목적은 저자들이 기 보고하였던<sup>11)</sup> TIG 용접의 아크 압력분포 특성에 근거하여, 실드가스로 Ar+He 혼합가스에서 He 혼합비를 변화시켜 용융주행 (melt run) TIG 용접의 대전류 고속 용접특성에 미치는 He 혼합비의 영향을 규명하는 것이다. He 혼합비의 영향을 규명함에 있어서 실드 가스의 가장 기본적인 아크 특성 중에 하나인 아크 개시 특성을 이해할 필요가 있다. 실드 가스로 He 가스를 사용하는 경우 Ar 가스에 비해 아크 점화가 불량하며 아크가 불안정하다고 알려져 있다<sup>19)</sup>. 그러나 이와 관련된 연구자의 문헌에서 실드 가스 종류에 따라 아크 개시 지연시간에 대하여 정성적으로는 논하고 있으나<sup>19)</sup>, 아직까지 He 가스가 Ar 가스에 비해 어느 정도 아크 개시 시간이 지연되는지 정량적으로 알려져 있지 않다. 따라서 대전류 영역에서 He 혼합비에 따른 아크 개시 특성을 평가하였고, STS304 판재에 He 혼합비에 따른 대전류 고속 TIG 용접을 실시하여 안정비드 영역의 최대 용접속도가 어느 정도까지 가능한가에 대하여 실험하였다. 용접하여 얻어진 표면비드 형상과 각 용접부의 단면형상들을 측정하고 평가하여 불안정 비드형상에 관하여 아크 물리학적 관점에서 고찰하였다.

## 2. 사용재료 및 실험방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서는 용가 와이어의 사용 없이 자동 용융주행에 의한 아래보기 자세의 TIG 용접을 실시하였고, 사용한 모재는 STS304 판재이다. Table 1은 STS304 판재에 대전류 고속 TIG 용접을 실시한 용접조건을 나타낸 것이다. 전극은 2% Th-W(직경 3.2mm)을 이용하

**Table 1** Welding condition for melt run TIG welding (STS304)

Material	Current	Arc length	Gas	Speed(cm/min)
STS 304 6t×50×200	300A	3 mm	Ar	20, 30, 40, 50, 60,
			He33	70, 80, 90, 100
			He67	

여 텅스텐 전극이 마이너스(-)인 DCEN(직류 정극성)을 사용하였고, 전극선단 원추 각은 45°로 가공된 sharp tip을 사용하였다. 실드 가스는 공업용 100%Ar 가스(이하 Ar 가스)와 Ar 가스에 He 가스를 혼합한 Ar+33%He(이하 He33), 그리고 Ar+67%He (이하 He67)인 He 혼합가스를 사용하였다. 실드 가스의 유량은 20 l/min로 공급 하였다.

### 2.2 실험방법

용접속도는 자동 이송대차를 사용하여 조정하였고, 토치의 작업각과 진행각은 0°로 하였다. 용접기는 300A 용량의 인버터 형을 사용하였다.

대전류 고속 TIG 용접 특성에 미치는 He 혼합비의 영향을 실험하기 위하여 He 혼합비에 따른 아크 개시 특성을 평가하였고, 그것을 위하여 아크 개시와 동시에 TIG 용접 모니터링 시스템을 사용하여 용접전류와 전압의 파형을 측정하였다.

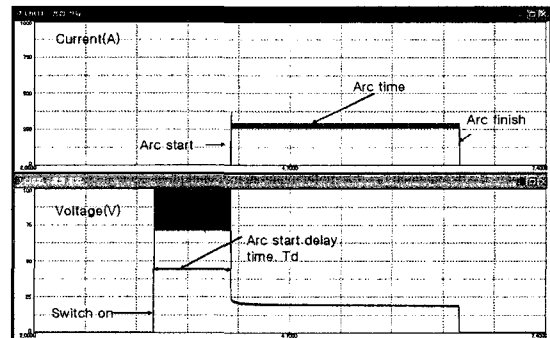
대전류 고속 용접이 가능한 용접속도에서 비드형상을 관찰하기 위하여 Table 1에서와 같이 용접속도를 20~100cm/min의 범위로 변경시켰다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 TIG 용접 아크 개시 특성에 미치는 He 혼합비의 영향

Fig. 1은 아크 개시에서부터 용접 종료 시까지 측정된 전형적인 TIG 용접파형을 나타낸 것이며, 용접파형에 나타난 아크 개시 시간, 아크 지연시간 Td, 그리고, 아크 종료시간에 대하여 정의한 것이다.

Fig. 2는 TIG 용접에서 He 혼합비에 따른 아크 개시 지연시간이 얼마나 발생할 것인가를 명확하게 평가할 목적으로 He 혼합비에 따른 아크 개시 특성을 TIG 용접모니터링 시스템을 이용하여 측정한 결과를 나타낸



**Fig. 1** Definition of wave form in typical TIG welding (300A, He67)

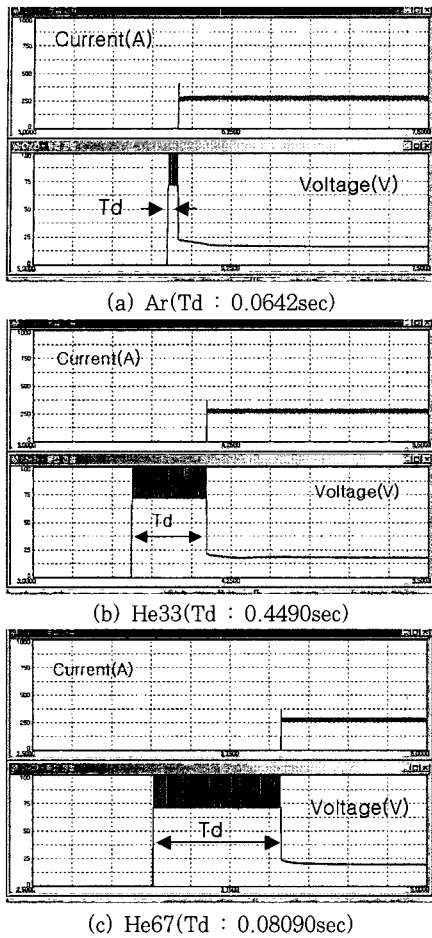


Fig. 2 Delay time Td of arc start with He gas mixing ratio

것이다. 아크 개시 지연시간(arc start delay time) Td란 ‘토치 스위치에 전원이 인가된 후 아크가 발생되기까지 무부하 전압 상태를 유지하고 있는 시간’이다.

본 실험을 통하여 He 혼합비에 따른 TIG 용접의 아크 개시 특성을 평가한 결과 He33 가스 아크와 He67 가스 아크의 경우 Ar 가스 아크에 비해 Td가 0.3848과 0.7448초 발생되었다. 불과 1초가 되지 않는 짧은 시간이지만, TIG 용접 공정을 로봇용접이나 자동용접에 적용할 경우 상기와 같이 실드 가스 종류에 따라 아크 개시 지연시간이 발생할 경우 용접 개시 부에 용접 결함이 발생할 가능성이 있다고 생각된다. 그러므로 TIG 용접을 적용할 경우 사용되는 실드 가스 종류에 따라 이러한 아크 개시 지연시간 Td를 반드시 고려하여 용접설계가 이루어져야 하며, 그에 대한 적절한 조치가 필요 할 것으로 생각된다. He 혼합비에 따른 아크 개시 지연시간이 발생하는 것은 Table 2에서 보는 것과 같이 Ar 가스와 He 가스의 이온화 전위(Ionization potential)의 차이에 의한 영향<sup>11,20)</sup>이라고 생각된다. 이온화 전위는 원자로부터 전자를 이동시켜 원자를 이

Table 2 Basic characteristics of Ar and He gas<sup>11,20)</sup>

Shield gas	Ar	He
Characteristics		
Atomic weight	39.948	4.0026
Ionization Potential (eV)	15.8	24.6
Thermal conductivity (cal/cm <sup>2</sup> /cm/°C/s)	0.406x10 <sup>-4</sup>	3.32x10 <sup>-4</sup>
Density (relative to air)	1.38	0.137

온화시키기 위하여 필요한 전압을 말하는데, He 가스는 Ar 가스에 비해 이온화 전위가 약 8.8eV 더 높은 것으로 알려져 있다<sup>11,20)</sup>.

### 3.2 고속 용접 비드 형상에 미치는 He 혼합비의 영향

Photo 1은 STS304 판재에 대전류 고속 용융주행 TIG 용접하였을 때 얻어진 표면 비드 형상과 각 용접부의 단면형상을 나타낸 것이다. Fig. 3, 4와 5는 각각 용접전류 300A 영역에서 용접속도에 따른 비드 형상에 미치는 He 혼합비의 영향을 나타낸 것이다. Fig. 3, 4와 같이 용접속도가 증가함에 따라 용접 입열의 감

Gas	Speed	Surface bead	Cross section
Ar	20cpm		
	30cpm		
	40cpm		
He33	30cpm		
	50cpm		
	70cpm		
He67	30cpm		
	60cpm		
	90cpm		

Photo 1 Surface bead and cross section for 300A

소로 용접 비드 폭과 용입 깊이가 모두 감소하는 경향을 보였다. Ar 가스 아크에 비해 He 혼합가스 아크는 용접속도가 증가함에 따라 비드 폭과 용입 깊이가 모두 아주 완만하게 저하하는 경향을 보였다. Fig. 5에서 용접속도가 증가함에 따라 Ar 가스 아크의 형상비 (aspect ratio)가 증가하는 것은 Ar 가스 아크의 경우 대전류 영역에서 아크 중심부에 아크 압력이 크게 집중<sup>11)</sup>하게 되므로 핑거비드(finger bead) 형성으로 용접 비드 폭에 비해 용입 깊이가 깊어졌기 때문이다. He33

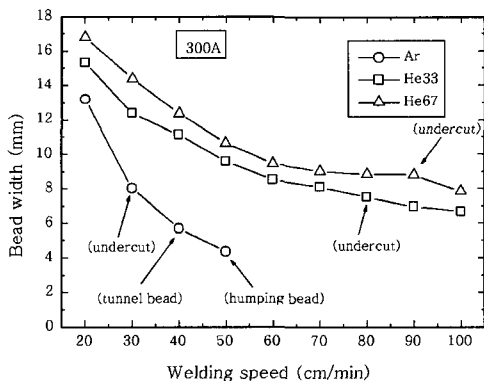


Fig. 3 Relation between welding speed and bead width

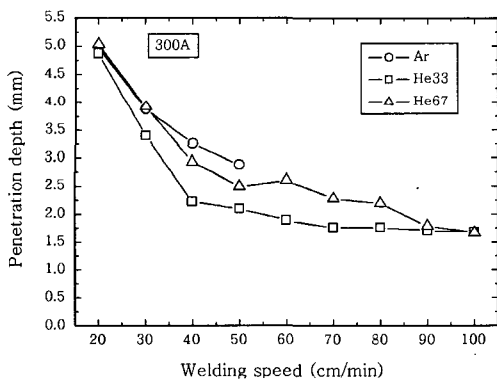


Fig. 4 Relation between welding speed and penetration depth

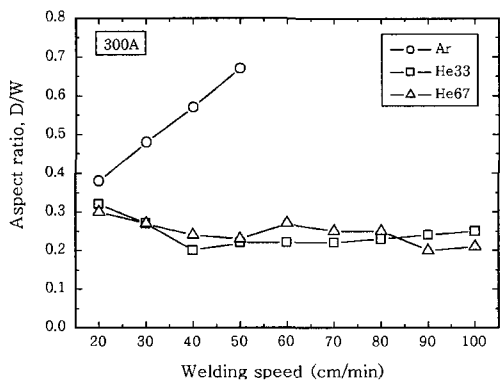


Fig. 5 Relation between welding speed and aspect ratio

가스 아크와 He67 가스 아크의 경우 용접속도가 증가하더라도 형상비는 0.20~0.25 정도의 값을 보이며, Photo 1과 같이 안정된 비드형상을 나타내고 있다.

Photo 1에서와 같이 Ar 가스 아크인 경우 용접속도 20cm/min에서 언더컷과 험핑비드와 같은 불안정한 비드가 형성되지 않았다. 용접속도가 30cm/min으로 증가한 경우 용접 비드 폭 토우 부 양쪽에 육안으로 구분할 수 있을 정도의 거의 직선적인 언더컷이 발생하였다. 용접속도를 40cm/min 이상으로 증가시키면 심한 언더컷과 험핑비드가 발생되기 시작하며, 터널비드도 형성되었다.

이에 비해 Ar 가스에 He 가스를 혼합한 He 혼합가스를 사용한 경우 언더컷과 험핑비드와 같은 불안정한 비드가 형성되지 않는 안정비드 최대 용접속도가 현저하게 증가하였다. Photo 1과 같이 He33 가스 아크와 He67 가스 아크의 경우 고속 용접에서도 일정한 속도까지 매우 안정한 비드 외관과 단면 형상을 보이고 있다. Fig. 3에 나타난 것과 같이 He33 가스 아크와 He67 가스 아크의 경우 순수한 Ar 가스 아크에 비해 안정비드 최대 용접속도가 70cm/min과 80cm/min까지 증가하였다. 즉 실드 가스로 Ar 가스를 사용한 경우 20cm/min이지만, He67 가스에서는 80cm/min까지 안정된 비드가 얻어지므로 He 혼합가스의 사용에 의해 4배의 용접속도 증가 효과가 얻어졌다. 따라서 He 혼합비는 대전류 고속 TIG 용접 특성에 매우 큰 영향을 미치며, He 혼합비가 증가할수록 대전류 고속화가 더욱 증가됨을 알 수 있다.

실드가스로 순수한 Ar 가스를 사용한 경우 용접전류가 중·대전류 영역으로 증가할수록 용접전류의 공급에 비례하여 증가하는 플라즈마 기류에 의한 아크 압력에 의한 아크 력의 증가<sup>4,7-8,11)</sup>에 의해 불안정한 비드가 발생된다고 생각된다. 따라서 안정비드가 얻어지는 용접속도가 낮아진 것이다. 대전류 고속 TIG 용접의 불안정비드 형성에 관한 구체적인 관계는 다음 절의 아크 물리학적 고찰에서 기술한다.

### 3.3 아크 압력분포에 의한 불안정 비드 형성의 고찰

#### 3.3.1 아크 압력과 표면장력이 용융지 압입깊이에 미치는 영향

3.2절에서 고찰한 것과 같이 실드 가스로 Ar 가스만을 사용하여 대전류 고속 용접을 하게 되면, 험핑비드와 언더컷과 같은 불안정한 비드 형성에 의해 어떤 한 계속도(critical travel speed) 이상 용접이 불가능하였다. 이러한 불안정 비드의 형성은 결국 대전류 영역

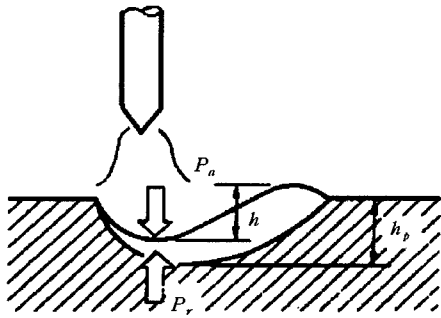


Fig. 6 Correlation of molten pool and plasma stream motion<sup>6)</sup>

에서 플라즈마 기류에 의해 발생하는 아크 압력분포에 의한 결과이다<sup>4,7-8,11)</sup>.

용융지에 작용하는 아크 압력과 용융지의 압입깊이 및 표면장력에 의한 압력의 관계는 Fig. 6과 같고, 그것은 다음과 같이 설명할 수 있다<sup>4,6)</sup>.

$$P_a = \rho gh + P_\gamma \tag{1}$$

여기서,

$P_a$  : Arc pressure

$\rho$  : Density of molten metal

$g$  : Gravitational acceleration

$h$  : Depression depth

$P_\gamma$  : Pressure by surface tension of depressed molten metal

$h_p$  : Penetration depth

식 (1)에서 압입깊이  $h$ 는 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$h = \frac{P_a - P_\gamma}{\rho g} \tag{2}$$

TIG 용접에서 용융지는 플라즈마 기류에 의한 아크 압력  $P_a$ 에 의해 Fig. 6과 같이 깊게 압입된 상태로 된다. 즉 식 (1), (2)와 같이  $P_a$ 가 크게 되면, 전극 직하에서 용융지 표면의  $h$ 가 깊게 된다. 용접전류를 일정하게 하고 용접속도를 높이면, 용접 입열 감소에 의해 용입 깊이가  $h_p$ 가 작게 됨과 동시에 용융금속 량이 작게 된다<sup>6)</sup>. 그래서  $P_a$ 에 의해 용융지 밑 부분에 고체 벽이 노출하게 되고, 그에 따라 정상적인 용융지 형성이 곤란하기 때문에 불안정한 비드가 형성될 것으로 판단된다.

### 3.3.2 최대 아크 압력 $P_{max}$ 에 의한 압입깊이 $h$ 의 추정

Fig. 7은 대전류 영역에서 실드 가스 종류에 따라 아크 중심에서 반경 방향으로 양극인 모재위에 작용하는 아크 압력  $P_a$ 의 분포를 나타낸 것이다<sup>11)</sup>. 대전류 영역인 용접전류 300A에서 Ar 가스 아크는 He 혼합가스 아크에 비해 양극인 모재위에 작용하는 전체 압력의 91%가 아크 중심부를 기준으로 직경 2.0mm 이내에  $P_a$ 가 집중하여 작용 한다<sup>11)</sup>. 그에 비해 He 혼합가스 아크의 최대 아크 압력  $P_{max}$ 은 Ar 가스 아크에 비해 현저하게 낮았지만, 아크 반경방향으로 넓게 분포하고 있다<sup>11)</sup>. 이와 같이 대전류 영역에서 순수한 Ar 가스 아크에서는 아크 중심부인 아크 직하에서  $P_a$ 가 크게 증가하므로 언더컷과 험핑비드와 같은 불안정 비드를 형성하게 된 것으로 생각된다.

동일한 전극을 쓰고 전류만을 변화시킬 경우 아크 력  $F_{arc}$ 는 전류의 제곱에 비례하고<sup>17)</sup>,  $P_{max}$ 도 전류의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있다<sup>6,13,18)</sup>. 또한 실험적 연구에 의하면 용융지의 압입깊이  $h$ 는  $F_{arc}$ 에 비례하며, 전류의 제곱에 비례한다고 보고되어 있다<sup>17)</sup>.

Cho<sup>4)</sup>는 이러한 천이영역에서 액체인 용융지에 대한 플라즈마 젯에 의한  $h$ 는 용입깊이  $h_p$ 와 같다고 판단하였고, 플라즈마 젯에 의한 용융지의  $h$ 는 대략 전류의 제곱에 비례하지만, 전극에 형상에 따라 현저하게 변화됨을 확인하였다.

또한 용융지의 최대  $h$ 는 Lin과 Eagar의 연구<sup>13)</sup>에서와 같이  $P_a$ 와 비례하며, 전류의 제곱에도 비례한다고 보고되어 있다. Fig. 8은 Lin과 Eagar의 연구에 근거하여<sup>13)</sup> 저자들이 기 보고하였던<sup>11)</sup>  $P_{max}$ 과 용융지 표면의  $h$ 와의 관계를 나타낸 것이다.

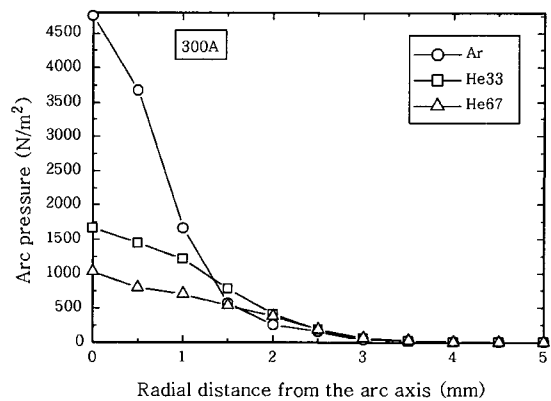


Fig. 7 Arc pressure distribution of low current and high current range with He gas mixing ratio

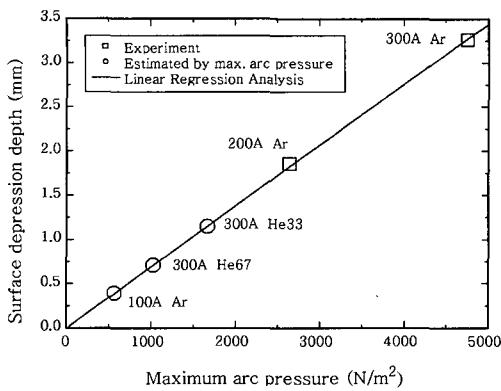


Fig. 8 Relation between surface depression depth of molten pool and maximum arc pressure

Fig. 6에서 용융지 표면의  $h$ 는 모재위에 쌓아진 덧살을 포함하여 정의하고 있다<sup>6)</sup>. 그러나 본 연구에서  $h$ 는 모재위의 덧살을 제외하고 모재 표면에서부터 압입된 깊이로 정의하여 고찰한다. 그것은 용접 입열에 의한  $h_p$ 와 모재 표면으로부터 압입된 용융지 표면의  $h$ 를 비교하여 불안정한 비드 형성에 관하여 고찰하기 위한 것이다.

Fig. 8에서 용접전류 200A와 300A의 Ar 가스에 대한  $P_{max}$ 은 측정된 값<sup>11)</sup>이고, 용융지 표면의  $h$ 는 본 실험에 의한 측정된 값이다. 그러나 100A의 Ar 가스와 대전류 영역인 용접전류 300A의 He33 가스와 He67 가스의 용융지 표면의  $h$ 는 200A와 300A의 Ar 가스의 측정된  $h$ 의 값에 의해 얻어진 자료를 선형 회귀 분석하여 측정된  $P_{max}$ <sup>11)</sup>으로부터 추정된 값을 나타낸 것이다.

본 실험에서 200A와 300A의 Ar 가스에 대한 측정된  $h$ 와  $P_{max}$ 와의 관계는 Lin과 Eagar의 연구<sup>13)</sup>에서와 같이  $P_a$ 에 비례하는 경향을 보이며, Fig. 8과 같이 용융지 표면의  $h$ 는  $P_{max}$ 에 비례하여 증가한다. 중전류 영역인 200A와 대전류 영역인 300A의 Ar 가스 아크에서 측정된 용융지 표면의  $h$ 에 비해 300A의 He33 가스와 He67 가스의  $P_{max}$ 가 현저하게 낮을 뿐 아니라, 추정된 용융지 표면의  $h$  또한 매우 작다. 그 결과 대전류 고속 용접 시 He33 가스 아크와 He67 가스 아크의 경우 험핑비드가 발생되지 않았다고 생각된다. 즉 He 혼합가스를 사용하면 대전류 고속 용접에서도 험핑비드가 발생하지 않을 정도로 용융지 표면이 압입된다고 판단된다.

### 3.3.3 압입깊이 $h$ 에 의한 불안정 비드 형성 메커니즘 규명

Fig. 9는 3.3.2절에서 고찰하였던 추정된 압입깊이  $h$ 와 Fig. 4의 용접속도에 따른 용입 깊이  $h_p$ 와의 관계로 정리하여 나타낸 것이다. Fig. 9 안에 표시한 점선은 Fig. 8에서 고찰한 것과 같이 용접조건에 따라 측정된 용융지 표면의  $h$ 와 최대 아크 압력  $P_{max}$ 에 의해 추정된  $h$ 를 나타낸 것이다.  $h_p$ 는 용접 입열에 의해 결정되며, 용접속도가 증가함에 따라 용접 입열의 감소에 의해  $h_p$ 는 작게 되므로  $h_p$ 는 용접 입열에 의존한다. 그러나 용융지 표면의  $h$ 는 단지 아크 압력  $P_a$ 에 의해 결정되며 용접속도와 전혀 관계가 없다. 즉 용접 전류, 전극 선단형상과 실드 가스의 종류가 결정되면  $P_{max}$  값이 결정되므로 용융지 표면의  $h$ 를 예측할 수 있게 된다. Photo 1과 Fig. 3에서와 같이 실드 가스로 순수한 Ar 가스를 사용한 경우 용접속도가 40cm/min 이상에서 터널비드와 험핑비드가 발생되었는데, 그것은 Fig. 9와 같이  $h_p$ 와 용융지 표면의  $h$  값이 거의 같게 되었기 때문이다. 즉  $h_p$ 가  $h$ 와 같게 되면 용융지 하부의 고체부가 노출되어 정상적인 용융지 형성이 곤란하게 되므로 터널비드와 험핑비드가 발생된 것이다. 그러나 실드가스로 He 혼합가스를 사용한 경우 용융지 표면의  $h$ 가  $h_p$ 보다 아주 낮은 쪽에 위치하고 있어 험핑비드는 전혀 발생할 가능성이 없다고 생각된다. 따라서 He 혼합비는 용융지 표면의  $h$ 에 크게 영향을 미치며, He 혼합가스를 사용하면 대전류 고속 TIG 용접이 가능해진다는 것을 확인할 수 있었다.

Photo 2 (a)와 (b)는 대전류 영역인 300A에서 실드가스로 Ar 가스를 사용한 경우 핑거비드와 터널비드

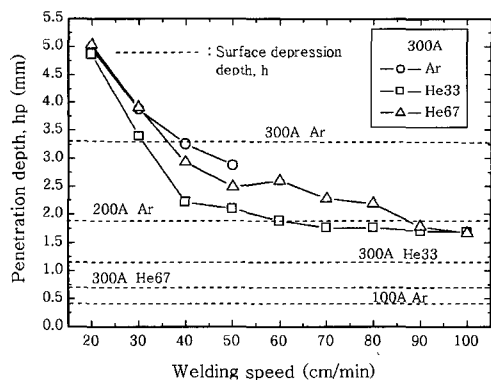


Fig. 9 Relation between penetration depth and surface depression depth

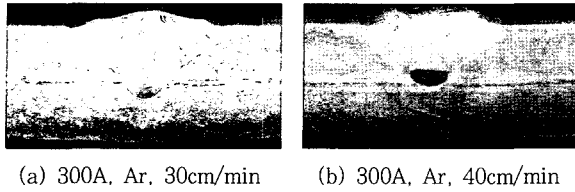


Photo 2 Illustration of weld bead profile between finger bead and tunnel bead

가 형성된 것을 비교하여 나타낸 것이다. Photo 2 (a)와 같이 핑거비드가 형성된 조건인 용접속도 30cm/min에서는 용접 입열의 감소와 크게 증가된  $P_a$ 에 의해 비드의 토우 부 양쪽에 언더컷이 발생되었지만, 충분한 용접 입열에 의해 모재부에 정상적인 용입이 생성된 경우이다. 그러나, 용접속도를 40cm/min로 증가시키면 용접 입열의 부족에 의해 언더컷이 발생되며 크게 증가된  $P_a$ 에 의해 용융지 표면의  $h$ 와  $h_p$ 가 거의 같게 되어 터널비드가 형성되게 된 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

대전류 고속 TIG 용접 특성에 미치는 He 혼합비의 영향을 규명하기 위하여 아크 개시 특성과 STS304 판재에 고속 용접하여 얻은 비드형상에 대하여 아크 물리학적 관점에서 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) TIG 용접모니터링 시스템에 의해 아크 개시 특성을 측정함으로써 Ar 가스에 He 가스를 혼합하여 사용하면 아크 개시 지연시간이 길게 되어 아크 개시 특성이 저하한다는 것을 정량적으로 확인하였다.
- 2) Ar 가스에 비해 He 혼합가스의 안정비드 최대 용접 속도는 현저하게 증가하며, 300A에서 Ar 가스에 비해 He67 가스의 경우 4배의 고속 용접이 가능하였다.
- 3) Ar 가스 아크에 의한 최대 아크 압력  $P_{max}$  과 용융지 표면의 최대 압입깊이  $h$ 의 관계를 써서 He 혼합에 따른  $h$ 의 추정 기법을 개발하였다.
- 4) Ar 가스에 의한 용융지 표면의 압입깊이  $h$ 는 최대 아크 압력  $P_{max}$ 에 비례함을 실험적으로 확인하였으며,  $P_{max}$ 와  $h$ 에 의해 불안정 비드 형성 메커니즘을 설명하였다.

#### 참 고 문 헌

1. AWS : Welding Handbook, Vol. 2, 8th Ed (1991), 74-75
2. Yutaka Kimura, Susumu Harada, Toyoyuki Satoh, Keiki Ariga, and Katsuhiko Yasuda : Application of He-DCEN · TIG Orbital Welding to Aluminium Piping, Journal of JWS, 15-1(1997), 45-50(in Japanese)
3. G. R. Cannell and R. P. Ruth : Closing Spent Nuclear Fuel Canisters with GTAW, Welding Journal, 82-12 (2003), 28-32
4. Sang-Myung Cho : A Study on the Bead Stability in High Speed TIG Welding, KOSME, 18-3(1994), 68-77 (in Korean)
5. 란카스타-編著 : 溶接アーク物理, 社団法人 溶接協會溶接アーク物理研究委員會(1990)(in Japanese)
6. 日本溶接協會編 : 新版ティグ溶接法の基礎と實際, 産報出版(1992)(in Japanese)
7. M.L. Lin and T.W. Eagar : Pressure Produced by Gas Tungsten Arcs, Metallurgical Transactions B, 17B(1986), 601-609
8. K. Hiraoka, A. Okada and M. Inagaki : Effect of Electrode Geometry on Maximum Arc Pressure in Gas Tungsten Arc Welding, Journal of JWS, 3-2 (1985), 246-252(in Japanese)
9. K. Hiraoka, A. Okada and M. Inagaki : Effect of He Gas on Arc Characteristic in Gas Tungsten Arc Welding, Journal of JWS, 3-2(1985), 241-246(in Japanese)
10. H. Nishikawa, K. Yoshida, T. Maruyama, T. Ohji, Y. Suita, and K. Masubuchi : Gas Hollow Tungsten Arc Characteristics Under Simulated Space Environment, Science and Technology of Welding and Joining, 6-1(2001), 12-16
11. Dong-Soo Oh, Yeong-Sik Kim, and Sang-Myung Cho : The characteristics of Arc Pressure Distribution by Shield Gas Mixing Ratio in TIG Welding, Journal of KWS, 23-1(2005), 41-47(in Korean)
12. Dong-Soo Oh, Yeong-Sik Kim, and Sang-Myung Cho : Derivation of Current Density Distribution by Arc Pressure Measurement GTA Welding, Science and Technology and Welding and Joining, accepted for publication 2005(reference paper No. STWJ 511)
13. M.L. Lin and T.W. Eagar : Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry, Welding Journal, 64-6 (1985), 163s-169s
14. P.F. Mendez and T.W. Eagar : Estimation of the Characteristic Properties of Weld Pool during High Productivity Arc Welding, Mathematical Modelling of Weld Phenomena 5, Institute of Materials, London, U.K., 2001, 67-94
15. P.F. Mendez and T.W. Eagar : Penetration and Defect Formation in High-Current Arc Welding, Welding Journal, 82-10(2003), 296s-306s
16. C.S. Wu, P.C. Zhao, and Y.M. Zhang, Numerical Simulation of Transient 3-D Surface Deformation of a Completely Penetration GTA Weld, Welding Journal, 83-12(2004), 330s-335s
17. S. I. Rokhlin and A. C. Guu : A Study of Arc Force, Pool Depression, and Penetration During Gas Tungsten Arc Welding, Welding Journal, 72-12 (1992), 381s-390s
18. 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, Welding Journal, 69-9(1990), 346s-361s
19. W. R. Recchelt, J. W. Evancho and M. G. Hoy : Effect of Shielding Gas on Metal Arc Welding Aluminum, Welding Journal, 59-5(1980), 147s-155s
20. M. Suban and J. Tušek : Dependence of Melting in MIG/MAG Welding on the Type of Shielding Gas Used, Journal of Materials Processing Technology, 119(2001), 185-192