

研究論文

GMA 용접의 용착속도에 미치는 Contact-tube와 모재간 거리의 영향

경규담* · 이정현* · 천홍정* · 박병희** · 강봉룡*** · 김희진**

Effect of Contact-tube to Work Distance on the Melting Rate of GMA Welding

K. D. Kyung*, J. H. Lee*, H. J. Chon*, B. H. Park**, B. Y. Kang*** and H. J. Kim**

Abstract

It has been well known in GMA welding process that wire feeding speed (WFS) or deposition rate increases linealy with the increase of wire extension. In this investigation, however, such an well-known relationship was reconsidered in terms of contact-tube to work distance (CTWD) instead of wire extention. To verify the proposed relationship between WFS and CTWD, bead-on-plate welding was performed with various CTWDs in the range of 15~35mm under the condition of near-constant voltage and current. As expected, the test results showed an excellent linear relation between WFS and CTWD. Furthermore, the value of the slope turned out to be quite similar to those of previous investigators obtained either theoretically or experimentally through the precise measurement of electrode extension. Present result also demonstred that the increase of CTWD could be very practical measure for increaring deposition rate without any increase of heat input. Depending on the tip recess the practical maximum of CTWD was appeared to be limited somewhere in 25~30mm mainly due to the entrappment of porocity.

1. 서 론

최근 GMA 용접기술의 개발현황을 보면 크게 두 가지 방향으로 나아가고 있음을 알 수 있는데, 하

나는 용접 스패터(spatter)를 절감시키고자 하는 방향이고, 또 다른 하나는 용착속도를 향상시키고자 하는 방향이다¹⁾. 용접 스패터 발생량을 감소시켜 보고자 하는 연구는 용접기의 inverter화로 활발히 추진되고 있으며, 용착속도를 증가시키고자 하는

* 비회원, 현대정공 기술연구원

** 정회원, 현대정공 기술연구원

*** 정회원, 생산기술연구원

연구는 새로운 용접재료를 개발하거나 새로운 조성의 보호 gas를 개발하는 방향으로 추진되고 있다. 본 연구는 용착속도 향상을, 특히 GMA 용접의 용착속도를 증가시킬 목적으로 수행한 일련의 연구과정 가운데 초기단계의 결과로써 기초연구 성격을 가지고 있다.

GMA 용접의 용착속도, 또는 GMA 용접의 wire 송급속도(WFS)는 다음식과 같이 와이어 돌출길이(electrode extension, L)에 대해 1차함수적으로 증가한다고 알려져 있다²⁾. 특히 고전류 영역에서는 WFS가 (1)식의 두번째항에 의해 지배되는데, 그 정도는 L 값의 크기에 의해 결정된다.

$$WFS = aI + bLI^2 \quad (1)$$

여기서 WFS = Wire Feeding Speed

L = Electrode extension

I = Welding current

a, b = Proportional constants

상기식은 지금까지 여러연구자가 실험을 통하여 그 정당성을 입증하여 왔는데, 육안으로는 L 값을 정확하게 측정할 수 없기 때문에 이를 확대 영상화할 수 있는 특수한 장치, 즉 video camera 또는 고속 camera 등이 필요하였다. 그러나 용접 현장에서는 이를 간단히 측정할 수 있는 방법이 없기 때문에 L값의 중요성에도 불구하고 이에 대한 어떠한 규제도 적용치 못하고 있다.

더구나 단락이행에서는 arc 길이가 0 에서부터 일정길이 까지 순간적으로 반복되는 값을 가지기 때문에 L값을 정의할 수 없는 경우가 있는가 하면, globular 이행 또는 spray 이행에서는 와이어(wire) 선단에 용적(molten drop)이 매달려 있는 형태이거나 송곳모양을 하고 있어서 어느지점을 선단으로 정의하느냐에 따라 L값은 차이가 있을 수 있다.

따라서 본 연구에서는 보다 손쉽게 측정할 수 있고 정의할 수 있는 거리, 즉 contact tube의 선단으로부터 모재까지의 거리(contact-tube to work distance, 이하 CTWD라 칭함)를 변수로 하여 상기식을 검토해 보고, 그 결과로부터 와이어 송급속도에 미치는 CTWD의 영향을 실험적으로 규명코자 하였다.

2. 연구 배경

식(1)에서 알 수 있듯이 와이어 송급속도(WFS)는 전류와는 2차함수 관계에 있지만, 와이어 돌출길이(L)과는 1차함수의 관계를 가지고 있다. 그러한 관계 때문에 동일한 전류 조건에서 L 값에 따른 WFS의 변화를 측정하게 되면, 직선관계를 얻게 되고, 그 직선 기울기로부터 비례상수 b 값을 구할 수 있었다³⁻⁵⁾.

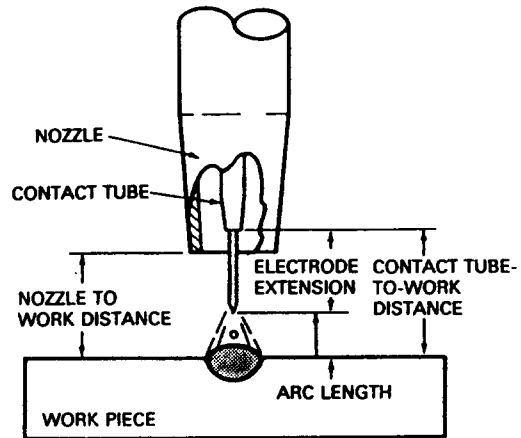


Fig. 1 Gas metal arc welding terminology

그런데 본 연구에서는 L 값 대신에 CTWD를 이용하고자 하는 것으로, CTWD는 Fig. 1 에서 보듯이 와이어 돌출길이와 아크길이(arc length, l)의 합으로 표시된다. 단 여기서의 arc length(l)는 모재 표면으로부터 wire 전극까지의 거리로 하였다.

$$CTWD = L + l \quad (2)$$

이를 (1) 식에 대입하면,

$$\begin{aligned} WFS &= aI + b(CTWD - l)I^2 \\ &= (aI - bI^2l) + bI^2(CTWD) \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 실험적으로 용접전류와 아크길이를 일정하게 유지시켜 줄 수만 있다면 (3)식의 첫째항은 상수항이 되어 WFS와 CTWD는 1차함수적인 거동을 하게 될 것이다. 그런데 아크길이는 용접전압

에 크게 의존하는 변수이므로, 용접전압을 동일하게 하면 아크길이는 어느정도 일정하게 유지할 수 있을 것이다. 결국 용접전압과 전류를 일정하게 한 상태에서 CTWD의 변화에 따른 WFS의 변화를 측정하게 되면, 그 결과는 1차함수적인 관계를 보여주게 될 것이기 때문에, 그 기울기(=bI)와 주어진 전류값으로부터 (1)식의 비례상수 b값을 손쉽게 구할 수 있다는 가정이 성립한다.

3. 실험재료 및 시험방법

본 연구에 사용된 용접재료는 1.2mmφ의 MIL 100S-1 규격의 solid wire 이었으며, 보호가스(gas)는 Ar+2% O₂를 사용하였으며 유량은 25 l/min로 하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 용접재료의 화학조성을 보여주고 있다.

Table 1. Chemical composition (wt. %) of MIL 100S-1 wire

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
0.05	0.28	1.61	0.11	1.66	0.34	0.006	0.002

본 연구의 모든 실험은 bead-on-plate 용접으로 하였다. 28mm 두께의 강판 위에 31.5cm/min (12.4in/min)의 용접속도로 150mm 정도의 실시하였는데, 용접이 진행되는 동안 wire 송급속도, 용접전류 및 전압을 측정하였다. 와이어 송급속도는 와이어 송급장치의 모타 전압으로부터 측정하였으며, 용접전류 및 전압은 arc monitoring system을 이용하여 2초 간격으로 측정하였다. 용접이 진행되는 동안 arc 상태를 관찰하였으며, 용접후에는 판재를 절단하여 비드의 단면을 관찰하였다.

CTWD는 15~35mm의 범위에서 2~5mm 간격으로 변화를 주었으며, tip recess는 2mm를 기준으로 하고 필요에 따라 7 또는 12mm로 하였다. Tip recess 조절을 위해서는 Fig. 2와 같이 길이가 긴 nozzle을 제작하여 사용하였다.

본 실험의 기본 용접조건은 용접전압 28V에 용접전류 310A이었는데, 이는 CTWD가 15mm 인 상태에서 설정된 조건이다. 이후 CTWD를 23mm 이상으로 증가시키는 과정에서 arc 길이의 변화가

육안상으로 확실히 감지되는 경우에는 용접전압을 미세 조정하여 초기의 arc 길이가 유지되도록 하였다. 이와같은 전압조정을 위해서, 그리고 각각의 조건에서 용접전류를 310A로 맞추기 위해서는 수회의 예비시험이 필요하였다. 이러한 과정을 거쳐 실험조건이 완전히 설정된 상황에서 본 bead-on-plate 용접이 실시되었다.

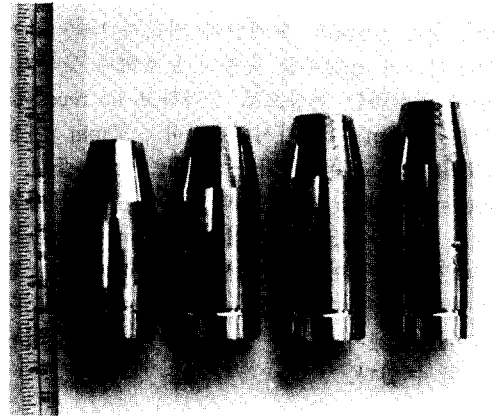


Fig. 2 Various size of nozzles made for longer tip recess

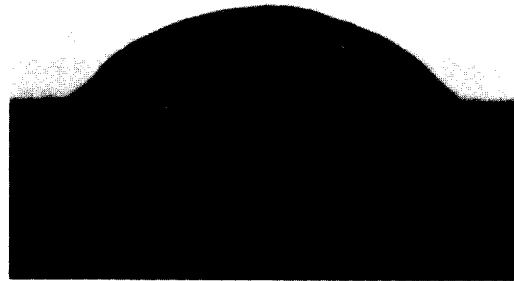


Fig. 3 Cross-section of bead showing the blow hole marked by arrow. (CTWD=30mm, tip recess=2mm)

4. 시험결과 및 검토

4.1 용접 가능한 최대 CTWD

Tip recess 길이를 2mm로 한 상태에서 CTWD를 초기 15mm에서 2mm씩 증가시키면서 실험을 진행한 결과, 외관상으로는 CTWD가 30mm까지 증가하여도 용접은 가능한 것으로 보였으나, 그 이상에서는 아크가 다소 불안정해지고 비드(bead) 표면에 기공이 다량 발생하였다. Fig. 3은 내부에 기공이 존재하는 비드(CTWD=30mm, tip recess=2mm) 부분의 단면을 보여주고 있다. 이와같은 기공발생은 nozzle과 모재간의 거리가 너무 멀어서 보호가스가 용접부를 충분히 보호하지 못하기 때문에 발생하는 현상으로 생각하고 tip recess를 7 또는 12mm로 증가시켰던 바, 30mm 이상의 CTWD에서도 용접 가능하였다. 예를 들면, tip recess가 12mm 인 경우에 있어서는 용접 가능한 최대 CTWD가 35mm 이었는데, 35mm에서는 Fig. 3과 같은 기공이 다시 발생하기 시작하였다. 결국 용접가능한 최대 CTWD는 tip recess에 따라 다소 차이는 있겠지만 기공 발생 여부에 의해 결정된다고 할 수 있다.

4.2 용접전류 및 전압의 변화

Table 2는 본 연구에서 실시한 총 14번의 bead-on-plate 용접의 용접조건을 보여주고 있는데, 이 table에서 보여주는 용접 전압과 전류값은 각각의 평균치이다. 2초간격으로 측정된 실제 용접전류·전압의 분포는 Fig. 4과 Fig. 5에서 보여주고 있는데, 용접전압은 최대 0.7V, 전류는 13A 정도의 변동폭을 보여주었다. 그리고 전과정을 통하여 용접전압 및 전류를 CTWD 변화에 무관하게 일정하게 유지하고자 계획하였으나, Fig. 4와 5에서 보여주는 바와같이, 그렇게 하지 못하였다.

용접전압은 CTWD가 22mm가 될때까지는 일정하게 유지시킬 수 있었으나, 그 이상에서는 arc 길이가 다소 줄어드는 경향이 감지되어 이를 보완하기 위하여 조금씩 증가시킨 결과, CTWD가 35mm가 될때까지 3.6V 정도 증가되었다(Table 2). 이는 용접작업자가 arc 길이를 동일하게 유지하기 위하여 독자적으로 판단하여 조정한 것이다.

용접전류는 예비시험을 통하여 310A 가 되도록 와이어 송급속도를 설정한 상태에서 본 용접시편에 용접을 실시하였는데, 본 용접에서는 다소의 차이를 보여주어 평균 전류에 있어서 최대 319A,

Table 2. Welding conditions and test result of bead-on-plate welding (welding speed = 3.15m/min)

Test No	Welding Conditions				Result	
	CTWD (mm)	Tip recess (mm)	Voltage (V)	Current (A)	WFS (m/min)	Deposition Rate (g/min)
1	15	2	28.2	308	8.9	78.3
2	17	2	28.2	314	9.4	82.7
3	19	2	28.2	303	10.2	89.8
4	21	2	28.2	307	10.8	95.0
5	23	2	28.7	313	12.1	106.5
6	25	2	29.2	309	12.6	110.9
7	27	2	30.0	310	13.4	117.9
8	30	2	30.3	299	14.2	125.0
9	25	7	29.2	319	12.4	109.1
10	27	7	30.2	319	13.2	116.2
11	30	7	30.2	309	14.0	123.2
12	32	7	31.4	311	14.7	129.4
13	30	12	30.2	304	14.0	123.2
14	35	12	31.8	299	15.6	137.3

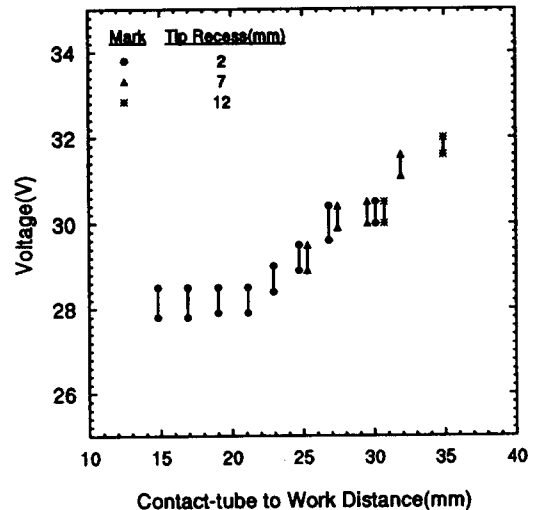


Fig. 4 Welding voltage adjusted with the change of CTWD

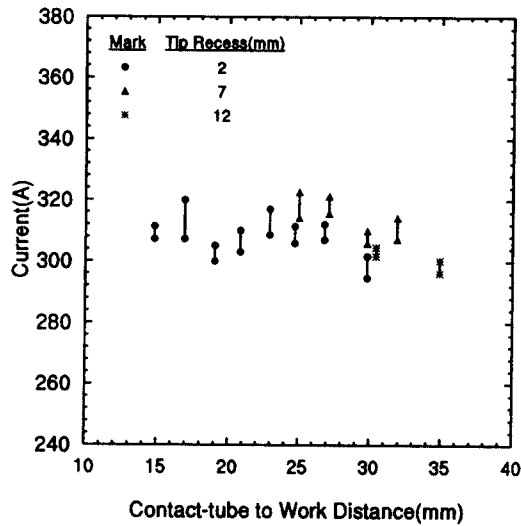


Fig. 5 Resultant welding current with the change of CTWD

최소 299A의 전류치를 보여 주었다 (Table 2).

4.3 CTWD 변화에 따른 용착속도의 변화

Table 2의 실험결과는 CTWD 증가함에 따라 와이어 송급속도 (WFS)가 증가하게 됨을 보여주고 있는데, CTWD가 본 연구의 실험범위인 15mm에서 35mm까지 증가하는 동안 wire 송급속도는 8.9m/min에서 15.6m/min로 증가하였다. 이와 같은 wire 송급속도를 용착속도로 환산하면 78.3g/min와 137.3g/min이 되는데 이는 CTWD가 1mm 증가할때마다 용착속도가 3.0g/min씩 증가하게 된다는 것을 의미한다. 또한 이러한 사실은 용접전압 및 전류가 동일한 조건에서, 즉 용접입열이 동일한 상황에서 단순히 CTWD만을 증가시켜도 용착속도를 2배까지 향상시킬 수 있음을 의미하는 것이다.

Table 2의 결과를 보다 시각적으로 보여 주기 위하여 도표화 한 것이 Fig. 6이다. 이 그림은 CTWD와 WFS (또는 용착속도)가 완전한 직선관계를 가지고 있음을 보여주고 있는데, 이는 연구배경에서 유추한 바와 같다. 그리고 tip recess 길이는 2, 7 및 12mm 등으로 변화가 크지만, 이의 영향은 거의 없음도 확인시켜 주고 있다.

Fig. 6에서 보여주는 직선관계를 토대로 최소화

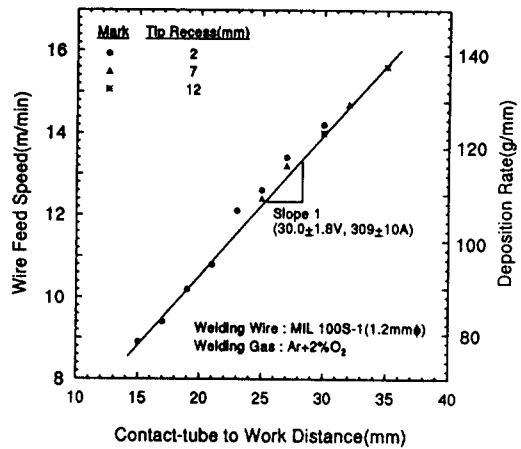


Fig. 6 Linear relationship between CTWD and WFS obtained with the condition of constant apparent arc length

송법을 이용하여 기울기를 구한다면, 이로부터 b 값을 계산하여 보면 $6.02 \times 10^6 / \text{sec} \cdot \text{A}^2$ 라는 값을 얻게 된다. 본 보고에서는 이렇게 구한 기울기를 slope 1 이라고 명명하고, 이로부터 계산된 b값을 b_1 이라고 하였는데, 이는 결보기 arc 길이를 일정하게 유지한 상태에서 얻은 14개의 data를 모두 이

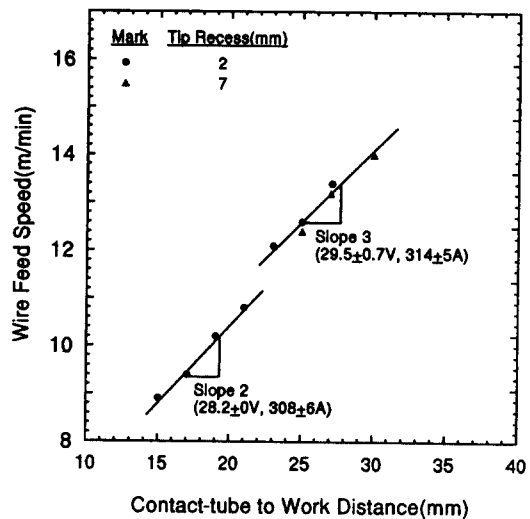


Fig. 7 Linear relationship between CTWD and WFS obtained with near-constant voltage and current condition

용하여 얻어진 수치이다.

다음으로는 연구배경에서 설명한 바와같이 용접 전압과 전류를 일정하게 한 상태를 만들기 위하여 전체 14개의 data 가운데 용접전압 및 전류가 보다 일정하게 유지된 data 만을 모아 Fig. 7과 같이 2개의 직선을 만들어 보았다. slope 2는 test No. 1~4의 data를 이용한 것으로써 용접전압은 모두 28.2V로 일정하고 용접전류는 $\pm 6\text{A}$ 의 편차를 보여주는 data들이다. slope 3은 test No. 5~11 (No. 8은 제외)의 data를 이용한 것으로, 전압은 $\pm 0.8\text{V}$, 전류는 $\pm 5\text{A}$ 의 편차를 보여주는 data들로 구성되어 있다. 같은 방법으로 각각의 직선에서 기울기를 구하고 이로부터 b 값 (b_2 및 b_3)를 계산하여 보면 각각 $b_2 = 5.71 \times 10^{-5}/\text{sec} \cdot \text{A}^2$, $b_3 = 4.90 \times 10^{-5}/\text{sec} \cdot \text{A}^2$ 이 된다.

Table 3은 이상과 같이 계산된 3가지의 기울기 값들을 비슷한 조건에서 구한 기존의 연구결과들과 비교한 것이다. 이를보면 b_1 은 Lesnewich³⁾의 실험 결과와 근사한 수치를 보여주고 있으며, b_2 는 Matzuda⁵⁾가 이론적으로 계산한 값과 거의 일치하고 있으며, b_3 는 Hirata⁶⁾의 실험결과와 유사한 수치를 보여주고 있다.

Table 3 Experimentally and theoretically determined values of coefficient, b , in Eq. (1) and (3)

Researcher	b Value (1/sec · A ²)	Materials used
Lesewich ³⁾	6.16×10^{-5}	mild steel (1.2mm ψ) pure Ar gas
Halm ψ ⁴⁾	6.63×10^{-5}	Si-Mn steel (1.18mm ψ) Ar+2% O ₂ gas
Matzuda ⁵⁾	5.86×10^{-5}	Theoretically calculatel
Hirata ⁶⁾	4.63×10^{-5}	mild steel (1.2mm ψ) pure Ar gas
Present study		
b_1 (Slope 1)	6.02×10^{-5}	MIL 100S-1 (1.2mm ψ)
b_2 (Slope 2)	5.71×10^{-5}	Ar+2% O ₂ gas
b_3 (Slope 3)	4.90×10^{-5}	

앞에서도 언급하였듯이 기존의 연구들은 모두 광학기기를 사용하여 와이어 돌출길이(L)를 정밀측정하고, 이를 변수로 하여 (1)식으로 부터 b

값을 계산한 반면, 본 연구에서는 현업에서도 간단히 측정할 수 있는 CTWD를 변수로 하여 (4)식으로 부터 b 값을 구한 것이다. 따라서 본 연구의 시험방법은 인위적인 요소가 많고 부정확한 측면이 많다는 것은 부인할 수 없다. 그러나 Table 3에서 보여주는 비교 결과는 기존의 연구결과와 매우 유사함을 보여줌으로써 본 연구에서 사용된 실험방법이 상당한 신뢰성을 가지고 있음을 보여 주고 있다. 특히 b_2 값은 겉보기 arc 길이 뿐만아니라 용접전압과 전류가 거의 일정한 상태에서 얻어진 값이므로 본재료의 b 값으로 간주하여도 무방할 것으로 생각된다.

4.4 용접 bead 형상

Fig. 8은 14가지 용접조건에서 얻어진 용접 비드의 단면 형상을 보여주고 있다. 모두가 finger type 형상으로써 용적이행 형태가 spray 이행을 띠고 대변하여 주고 있는데, 이는 용접중 아크기둥 형상을 관찰하여 판단한 결과와 동일하였다. 그러나 이들 bead 단면 형상을 보다 자세히 살펴보면, 본시험의 최대용착조건인 #14 bead의 경우에는 bead 하부에 형성된 돌기부위가 다소 넓어져 있음을 확인할 수 있는데, 이와같은 bead 형상 변화를

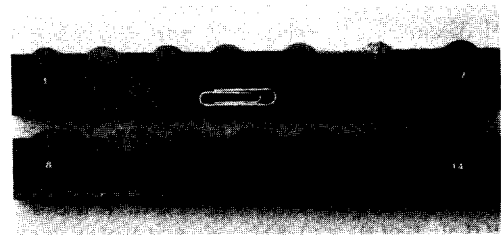


Fig. 8 Cross-section of 14 different beads made with welding conditions shown in Table 2

Fig. 9에서 보다 확실하게 보여주고 있다. 이그림에서 확인할 수 있듯이 CTWD가 32mm 이상의 조건에서는 용접 bead 모양 자체에 변화가 나타나고 있다. 이와같은 결과는 CTWD가 어느 수준 이상이 되면 용적이행 양상에 다소의 변화가 있음을 의미하는 것인데, 본 연구에서는 이와같은 변화에 대해 확실한 규명을 하지 못하였다. 그러나 와이어

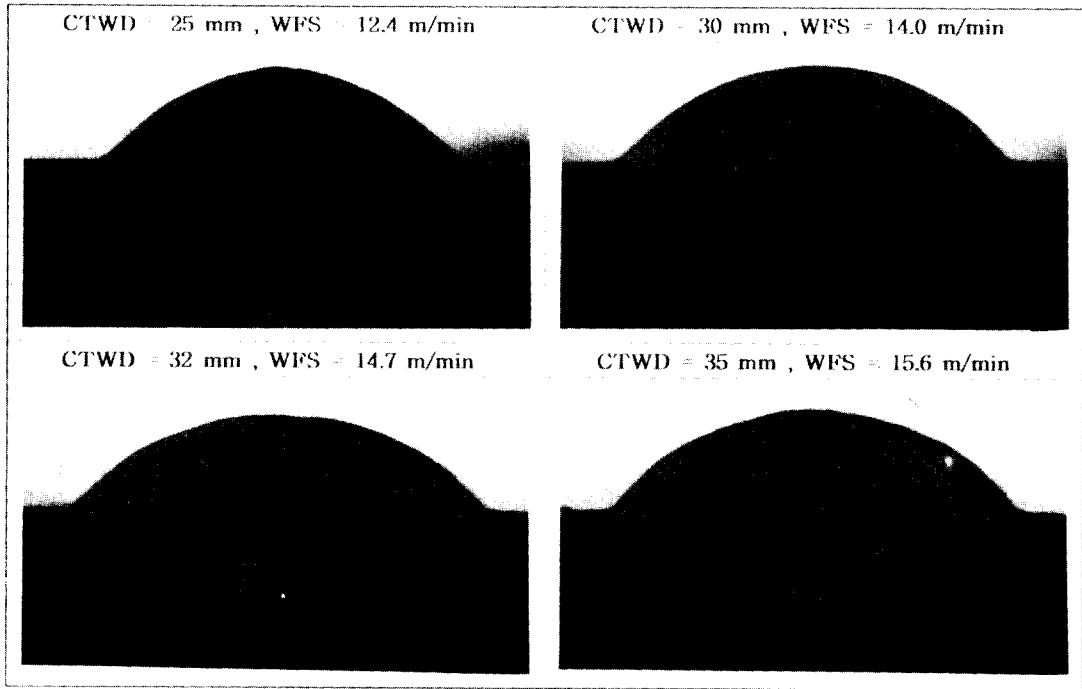


Fig. 9 Details of bead contour with longer CTWDs

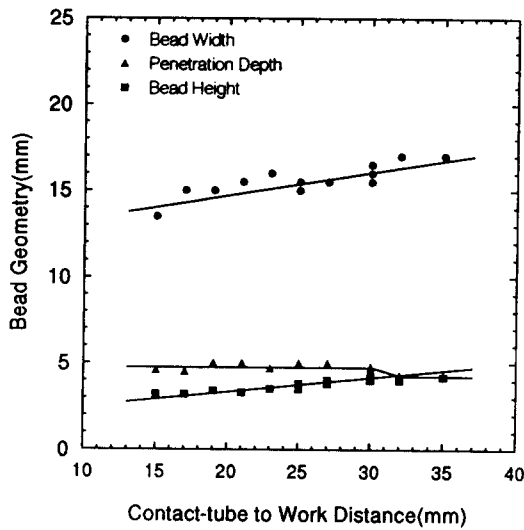


Fig. 10 Variation of bead geometry with CTWD

돌출길이가 길어지게 되면 낮은 전류에서도 rotating 이행 현상이 나타나게 된다는 Lesnewich⁷⁾의 보고를 참고하면 용적이행 천이현상으로서의 해석이 가능하다. 실제로 그가 제안한 실험식에 의하면 L=30mm 및 35mm의 조건에서 axial/rotating spray의 천이전류는 각각 363A 및 324로 계산되어 지는데, 이들은 본 연구에서 적용한 전류 값 (310A) 보다 크게 높지 않아 천이의 초기단계에서 나타나는 bead 형상의 변화라고 할 수 있다.

그 밖에 용접비드 형상의 척도가 되는 비드폭, 비드높이, 용입깊이를 측정하여 CTWD를 변수로 하여 plot 하여 보면 Fig. 10과 같은 관계를 보여준다. CTWD의 증가에 따라 용착속도가 증가하기 때문에 bead의 폭과 높이는 당연히 증가하지만, 용입 깊이는 용접전류 및 전압이 일정하게 유지된 관계로 커다란 변화를 보여 주지 않고 있다. 일정함으로 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 단지 CTWD가 32mm 이상이 되는 조건에서는 용입 깊이가 다소 줄어드는 양상을 보여주고 있는데, 이 또한 금속이행이 rotating 이행으로 천이되고 있

음을 간접적으로 증명해 주고 있다.⁸⁾

5. 결 론

본 연구에서는 지금까지 잘 알려진 와이어 돌출 길이(wire extension)과 와이어 송급속도 사이의 상관관계를 CTWD와 wire 송급속도의 관계로 재해석 하고, 해석된 관계를 입증하기 위해 용접전압(또는 아크 길이) 및 전류를 실험실적으로 가능한 수준에서 최대한 동일하게 유지한 상태에서 bead-on-plate 용접을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Wire 송급속도는 CTWD의 증가에 따라 직선적으로 증가한다.
- (2) 상기의 직선관계로 부터 구한 (1)식의 비례상수 b 값은 본실험의 부정확성에도 불구하고 기존의 이론적, 실험적 연구결과와 매우 유사한 수치를 보여 주었다.
- (3) CTWD 증가에 따라 wire 송급속도의 증가하게 되면 용접 비드의 폭과 높이는 증가하였으나, 용입 깊이는 일정하게 유지되다가 CTWD가 어느수준 이상이 되면 용입깊이는 오히려 작아지는 경향을 보여주었다.

Reference

1. 김 희 진 : 용접생산성 향상을 위한 용접기술

의 발전 방향, 대한용접학회지, 제11권, 제4호, (1993). pp 1-9.

2. Welding Handbook, 8th edition, p.117
3. A. Lesnewich : Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding, Part I-Control of electrode melting, Welding Journal, Vol. 37, No. 8(1958), p343-S
4. E. Halmöy : Wire melting rate, droplet temperature, and effective anode melting potential, Proc. Int. Conf. Arc Physics and Weld Pool Behavior, Paper 29, (1979), pp. 49-57
5. F. Matsuda, M. Ushio and Y. Tanaka : Metal transfer characteristics in pulsed GMA welding, Transactions of JWRI, Vol. 12, No. 1, p. 9(1983)
6. Y. Hirata : Physics of Welding(Ⅲ), Melting rate and temperature distribution of electrode wire, J. of Japanese Welding Soc., Vol. 63, No. 7, p(1994), 484 (1994)
7. A Lesnewich : Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding, Part II -Control of metal transfer, Welding Journal, Vol. 37, No. 9, (1958). pp. 418s-425s
8. Gas metal Arc Welding의 용착속도 향상 기술 개발에 관한연구, 통상산업부 공업기반기술사업 보고서(1996)