

**研究論文**

## 고용착 GMA 용접의 Arc 안정성 및 용적이행 현상에 미치는 보호gas의 영향

경 규담\* · 천 홍정\* · 이 정현\* · 강 봉용\*\* · 김 희진\*\*

### Effect of Shielding gas Composition on Arc Stability and Transfer mode of High deposition GMA Welding

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

#### Abstract

The arc stability and the metal transfer mode of high deposition GMA welding were investigated using various compositions of shielding gas with two types of filler, ie solid wire and metal cored wire. As for a solid wire, the transfer mode changed from axial spray to rotational spray with increasing wire feed rate(welding current) and the transition current was different with the gas composition. The gas composition also affected the apparent stability of rotating arc. As for a metal cored wire, on the other hand, no transition occurred and thus spray transfer mode could be applied with the welding current over 500A(deposition rate over 300g/min). Looking for the development of high deposition GMA welding process, above results were discussed in two different ways, one is to elevate the transition current, the other is to stabilize the rotational transfer mode.

#### 1. 서 론

GMA 용접의 용착속도는 wire 돌출길이에 대해 1차 함수적으로, 용접전류에 대해서는 2차함수적으로 증가하는 관계식으로 설명되고 있는데, 실제 이들 변수를 증가시키면서 용접을 하여보면 어떤 한계치에 도달하게 된다. 본 저자들은 wire 돌출길이를 일정길이 이상으로 증가시키게 되면 용착급

속에 기공(porosity)이 혼입되어, 그이상으로 증가시킨다는 것은 용접시공 측면에서 의미가 없게 된다는 사실을 보고 한 바 있다<sup>1)</sup>. 한편 용접전류를 어느 이상으로 증가하게 되면 용적이행 현상이 axial spray 에서 rotational spray 이행으로 천이하게 되고, 천이된 rotational spray 이행은 arc가 불안하다고 알려져 있어<sup>2)</sup> 용접전류를 증가시키는 측면에서도 한계가 있게 된다.

그러나 최근 4원' 혼합gas를 사용한 TIME

\* 비회원, 현대정공

\*\* 정회원, 생산기술연구원

process가 소개되면서 rotational 이행아크를 안정화 시킬 수 있다고 보고되고 있고<sup>3)</sup> 한편으로는 metal cored wire를 사용함으로써 용착속도를 향상시킬 수 있다는 보고가 있어<sup>4)</sup> 용접전류의 사용 한계를 재조명할 필요가 있어 본 연구를 수행하게 되었다.

## 2. 실험기자재 및 실험방법

본 실험에 사용된 용접기는 최대출력 전류가 600A, SCR형 용접기였으며, wire 송급장치의 송급 속도는 최대 30m/min 및 48m/min의 2개 기종을 사용하였다.

용접재료는 MIL 100S-1 규격의 solid wire (1.2mm $\phi$ )와 AWS ER 71-T 규격의 metal cored wire (1.2mm $\phi$ )를 사용하였다. 각각에 대해 전용착 시험한 용착금속의 화학조성은 Table 1과 같다. 그리고 본 실험에 사용된 보호gas는 CO<sub>2</sub>, Ar+(2~8)% O<sub>2</sub>, Ar+(5~20)% CO<sub>2</sub>, Ar+O<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>의 3원 혼합gas, Ar+He+CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>의 4원 혼합gas 등이었다.

용접시험은 모두 bead-on-plate 용접으로 하였는데, CTWD(contact tube to work distance)를 25mm로 일정하게 유지한 상태에서 63.5cm/min의 용접속도로 모든 실험을 실시하였다. 용접이 진행되는 동안 용접 arc 형상을 육안으로 관찰하면서 일차적으로 용적이행 형태를 판단하고, 용접이 완료된 후에는 시편을 절단하여 bead 단면 형상을 확인함으로써 용적이행 형태를 보다 확실히 규명하였다. Arc 안정성은 숙련된 용접사에 의해 정성적으로 판단된 결과를 연구자가 재확인 하는 과정을 거쳐 결정하였는데, 판정결과는 용접 가능 또는 불가능으로 구분하였고, 용접가능한 경우에 있어서는 arc의 안정성을 안정과 불안정으로 구분하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 MIL 100S-1 solid wire에 대한 실험 결과

Table 2는 MIL 100S-1 wire를 가지고 8가지 종류의 보호 gas를 사용하여 용접한 시험결과를 종합적으로 보여주고 있다. 전체적으로 보아 wire 송급 속도가 20m/min 이하에서는 대부분의 gas 조성에서 용접가능한 것으로 나타나고 있지만, 25m/min 이상에서는 Ar+5%O<sub>2</sub> 및 4원 혼합gas 만이 용접 가능함을 보여 주고 있다. 각각의 gas 조성에 대한 상세 내용은 다음과 같다.

#### Ar + O<sub>2</sub> 혼합가스

Ar+O<sub>2</sub> 혼합가스는 산소함량을 2, 5, 8%의 세가지 조성에 대하여 시험을 실시하였는데, Ar+2%O<sub>2</sub>의 경우는 22.3m/min(419A, 38V)의 wire 송급속도까지, 그리고 Ar+8%O<sub>2</sub>의 경우는 23.7m/min(451A, 41V)의 송급 속도까지 아크 안정성이 유지되었으나, 그 이상에서는 arc가 불안정 하고 송급속도를 더욱 증가 시키게 되면 간헐적으로 폭발성 아크가 발생되어 정상적인 용접이 불가능하였다. Ar+5%O<sub>2</sub>의 경우에는 27.3m/min(471A, 42V)까지도 아크 안정성 및 스패터 발생정도가 양호한 것으로 나타났으며, 그 이상에서는 용접 arc가 불안정하게 되면서 다량의 스패터가 발생하였다.

용접비드 단면형상을 관찰하여 본 결과 wire 송급 속도가 16.7m/min 이하에서는 axial spray 이행을 하여 bead 단면이 finger 형상을 보여 주었으나, 20.8m/min 이상에서는 O<sub>2</sub> 함량에 관계없이 아크가 회전하는 rotational spray 이행을 하여 Fig. 1~3에서 보여주는 바와같이 사발모양의 용입형상을 보여주었다. 따라서 Ar+O<sub>2</sub> 혼합 gas에 있어서는

Table 1. Chemical Composition of weld deposit

Filler/Shielding gas	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
MIL 100S-1/Ar+5%O <sub>2</sub>	0.07	0.24	1.28	0.01	0.001	0.12	1.49	0.37
ER71-T/CO <sub>2</sub>	0.08	0.49	1.53	0.01	0.01			

**Table 2.** Variation of arc stability and transfer mode with the change of wire feeding rate and shielding gas

Shielding gas	Wire Feeding Speed (m/min) / Deposition Rate (g/min)						
	16.7/148	20.8/184	22.3/198	23.7/210	26.7/237	27.3/242	29/257
Ar+2%O <sub>2</sub>	○ A	○ R	○ R	△ R	×		
Ar+5%O <sub>2</sub>	○ A	○ A	○ R	○ R	○ R	△ R	×
Ar+8%O <sub>2</sub>	○ A	○ A	○ R	○ R	△ R	×	
Ar+5%CO <sub>2</sub>	○ A	○ A	△ R	×			
Ar+10%CO <sub>2</sub>	○ A	○ A	×				
Ar+0.5%O <sub>2</sub> + 8%CO <sub>2</sub>	○ A	○ A	○ R	△ R	×		
Ar+0.5%O <sub>2</sub> + 10%CO <sub>2</sub>	○ A	○ A	△ R	×			
Ar+He+CO <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	○ A	○ A	○ A	○ A	○ R	○ R	△ R

○ : Stable arc and weldable    △ : Unstable arc but weldable    × : Unstable arc and not-weldable  
 A : Axial spray    R : Rotational spray

rotational 이행이 안정된 상태에서 이루어지는 범위가 존재하고 있음을 보여주었다.

Ar + CO<sub>2</sub> 혼합가스

Ar+CO<sub>2</sub> 혼합가스에서는 CO<sub>2</sub> 함량을 5%, 10%로 하였는데, 20.8m/min (386~403A, 38V)까지는 안정된 arc를 보여주었으나, 그 이상에서는 불안정한 arc를 보여주었다.

용접 아크모양 및 비드 단면형상을 관찰해 본 결과, 용접이 가능한 20.8m/min 이하에서는 axial spray 이행을 하고 있음을 알 수 있었다. Rotational spray 이행이 일어나는 경우에는 CO<sub>2</sub> 함량에 관계 없이 아크상태가 불안정하여 스파터 발생량/입자크기가 급격히 증가하였다. 따라서 이 경우에는 rotational 이행이 안정화 되는 범위가 존재하지 않음을 알 수 있었다.

4원 혼합가스

4원 혼합가스는 일명 TIME 가스라고도 알려져 있는데, 본 연구에서는 문헌5)을 토대로하여 Ar-26%He-8%CO<sub>2</sub>-0.5%O<sub>2</sub>의 조성으로 제조하여 사용하였다. 본 gas의 용접에서는 27.3m/min (482A,

44V)까지도 양호한 상태에서 용접이 진행되었다. 그 이상에서는 스파터 발생정도/입자크기가 증가하고 아크상태가 불안정하여졌다. Bead의 단면형상은 Fig. 2~3에서 보여 주고 있는데, 22.3m/min (428A, 41V)에서는 axial spray 이행 상태를 보여 주고 있으나 27.3m/min에서는 완전히 rotational spray 이행으로 천이되었음을 보여주고 있다. 이는 4원 혼합가스에 있어서도 Ar+O<sub>2</sub> gas와 마찬가지로 rotational spray 이행이 안정한 arc 상태에서 이루어지는 영역이 존재함을 확인할 수 있었다.

Ar + O<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub> 혼합가스

4원 혼합gas는 He을 다량 포함하고 있어 경제적이 못하다는 약점이 있기 때문에, He 성분을 제외 시킨 Ar+O<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> 혼합가스를 제조하여 사용하였다.

시험결과 Ar+0.5%O<sub>2</sub>+10%CO<sub>2</sub> 가스의 경우에는 Ar+CO<sub>2</sub> 가스의 경우와 마찬가지로 20.8m/min (401A, 40V)까지는 안정된 axial spray 이행을 하여 (Fig. 1) 용접 가능하였으나, 그 이상에서는 rotational spray 이행이 일어나면서 아크상태가 불안정하여지고, 스파터 발생량/입자크기가 증가하

여 용접이 불가능하였다. 그러나 Ar+0.5%O<sub>2</sub>+8% CO<sub>2</sub> 가스의 경우에는 22.3m/min (425A, 41V) 까지 용접이 가능하였고, 용적 이행은 rotational spray 이행 형태를 보여주었다 (Fig. 2).

Shielding Gas	Welding Current/ Voltage	Cross-section of weld bead	Transfer Mode
Ar+2%O <sub>2</sub>	417A/36.3V		Rotational
Ar+10%CO <sub>2</sub>	411A/38.3V		Axial
Ar+10%CO <sub>2</sub> +0.5%O <sub>2</sub>	410A/40.5V		Axial

Fig. 1 Cross-section of weld bead made with WFR=20.8m/min

Shielding Gas	Welding Current/ Voltage	Cross-section of weld bead	Transfer Mode
Ar+5%O <sub>2</sub>	443A/38.8V		Rotational
Ar+26%He+8%CO <sub>2</sub> +0.5%O <sub>2</sub>	428A/41.2V		Axial
Ar+8%CO <sub>2</sub> +0.5%O <sub>2</sub>	433A/40V		Rotational

Fig. 2 Cross-section of weld bead made with WFR=22.3m/min

### 3.2 Metal cored wire 에 대한 실험 결과

Metal cored wire (non-slag type) 를 사용하고 용접 gas를 Ar+5%O<sub>2</sub>, Ar+20%CO<sub>2</sub>, 및 100% CO<sub>2</sub>로

Shielding Gas	Welding Current/ Voltage	Cross-section of weld bead	Transfer Mode
Ar+26%He+8%CO <sub>2</sub> +0.5%O <sub>2</sub>	482A/44.4V		Rotational
Ar+5%O <sub>2</sub>	475A/39.0V		Rotational

Fig. 3 Cross-section of weld bead made with WFR=27.3m/min

바꾸어 가면서 실시한 시험결과를 Fig 4에서 보여주고 있는데, 이들은 용접가능한 조건에서 취한 결과들이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 사용 gas의 조성에 관계없이 35m/min 이상의 wire 송급 속도에서도 용접이 가능하였으며, 특히, 100% CO<sub>2</sub>에서는 spatter 발생량이 다소 많아 보였지만 최대 용접와이어 송급속도인 48m/min (587A, 54V) 에서도 용접이 가능한 것으로 나타났다.

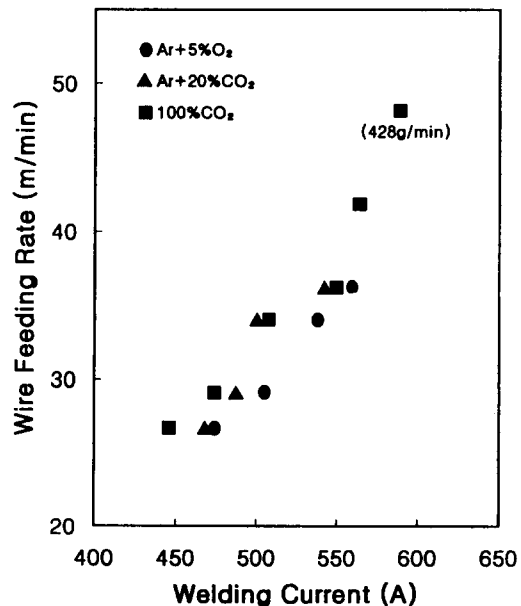


Fig. 4 Wire feeding rate of metal cored wire with welding current

Fig. 5는 용접비드 단면형상을 관찰한 결과를 보여주고 있는데, 가스 조성에 관계 없이 모두 finger 형상을 보여주고 있었다. 이러한 사실은 metal cored wire의 경우 고전류 영역에서도 rotational spray 이행 현상이 나타나지 않음을 의미하는 것이다. 그리고 100% CO<sub>2</sub>의 경우에는 전범 위에 걸쳐 globular 이행 형태를 보여 주었는데, Fig. 6는 wire 송급속도가 36.2 및 48.4m/min 에서 나타난 bead 단면 사진으로써 전형적인 globular 이행에서 나타나는 전형적인 bead 형상을 보여 주고 있다.




Shielding Gas	Welding Current/Voltage	Cross-section of weld bead	Transfer Mode
Ar+5%O <sub>2</sub>	524A/42.6V		Axial
Ar+10%CO <sub>2</sub>	521A/44.4V		Axial
Ar+20%CO <sub>2</sub>	535A/47.7V		Axial

Fig. 5 Cross-section of weld bead made with metal cored wire and welded with WFR=36.2m/min



WFR(m/min)	Welding Current/Voltage	Cross-section of weld bead	Transfer Mode
36.2	521A/50.2V		globular
48.4	567A/50.8V		globular

Fig. 6 Cross-section of weld bead made with metal cored wire and welded with CO<sub>2</sub> gas shielding

## 4. 검토

### 4.1 Rotational arc 안정성에 미치는 보호 gas의 영향

고전류 영역에서 GMA 용접의 용적이행 형태는 용접전류가 증가함에 따라 axial spray 이행이 rotational spray 이행으로 천이된다는 사실은 여러 연구자들에 의해 보고 된바 있다<sup>2,3)</sup>. 그러나 그와 같은 천이가 보호gas의 조성에 따라 어떻게 영향을 받는지에 대해서는 심도 있게 연구된 바 없는 것 같다.

그럼에도 불구하고 최근 TIME process가 소개되면서 rotational spray 이행이 새로이 언급되기 시작하였는데, 주된 내용은 지금까지 불안정하다고 알려져 있는 rotational spray 이행이 4원 혼합 가스에 의해 안정화 시킬 수 있었다는 것이다. 결국 이들의 의견을 종합하면, 용접전류가 증가함에 따라 용적이행이 axial spray 에서 rotational spray로 천이 하는데, rotational spray 이행은 특성상 axial spray 이행보다 불안정 하기 때문에 이를 활용하기 위해서는 특수한 조성의 보호가스를 사용해야만 한다는 것이었다. 그러나 본 연구결과는 이와같은 의견이 보다 넓은 의미에서 재해석 되어야 함을 보여 주었다.

먼저 그와 같은 천이 현상이 solid wire 에서는 일어나지만 metal cored wire 에서는 일어나지 않으므로 상기의 의견은 solid wire에 한정시켜야 한다는 것이다.

두번째로 rotational spray 이행의 안정성은 가스 조성에 따라 차이가 있지만 특수한 조성의 보호 gas만이 이를 안정화 시킬 수 있다는 주장은 적절치 못하다 하겠다. 왜냐하면 4원 혼합gas 외에도 Ar+5%O<sub>2</sub>의 경우는 rotational spray로 천이가 이루어진 상태에서 상당히 높은 전류까지 안정된 아크 상태를 보여 주고 있기 때문이다.

### 4.2 천이전류에 미치는 보호gas의 방향

Solid wire 에서 발생하는 천이현상은 보호 가스 조성에 따라 천이전류에 차이를 주고 있음을 보여 주었다. 즉 Fig. 1 에서 보듯이, WFR=20.8m/min

(410~417A)에서, Ar+10%CO<sub>2</sub>, Ar+10%CO<sub>2</sub>+0.5% O<sub>2</sub>, 4원 혼합가스는 axial spray 이행상태를 유지하지만 Ar+2%O<sub>2</sub>의 경우는 이미 rotational spray로 천이를 마친 상태에 있다. Wire 송급속도가 22.3m/min(428~443A)로 증가하게 되면 4원 혼합 gas만 axial spray 이행을 유지하고 그밖의 다른 보호 가스는 완전히 rotational 이행으로 천이된 상태가 된다(Fig. 2). 이들 결과를 천이전류 측면에서 검토하여 보면 (Ar+O<sub>2</sub>) → (Ar+CO<sub>2</sub>, Ar+CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>) → (Ar+He+CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>)의 순으로 천이 전류가 높아짐을 알 수 있다.

결국 4원 혼합가스는 천이전류가 가장 높기 때문에 axial spray 영역이 고전류 측으로 크게 확장되어 있으며, 그 결과 가장 높은전류에서도 아크 안정성이 높은 axial spray 이행을 얻을 수 있는 가스 조성이 되었다.

### 4.3 고용착 GMA 용접기법 개발 방향

고용착 GMA 용접에서 보호가스의 역할은 크게 두가지로 설명될 수 있는데, 하나는 axial spray 이행에서 rotational spray 이행으로 바뀌게 되는 천이 전류를 결정하는 것이고, 두번째는 rotational spray 이행의 안정성 정도를 결정한다는 것이다. 따라서 고용착 GMA 용접의 보호가스로써 가장 바람직한 것은 천이전류를 높게 하면서도, rotational 아크의 안정성을 향상 시키는 것이라고 하겠다. 본 연구에서는 이 두가지 조건을 모두 온전히 만족시키는 가스조성을 찾을수는 없었지만, 4원 혼합가스와 metal cored wire는 천이전류를 높게 가져간 것이 주요 특징이었으며, Ar+5%O<sub>2</sub> 가스는 rotational spray 이행의 아크 안정성을 상대적으로 향상 시킨점이 특징이라 할 수 있었다.

특히 metal cored wire 가 고용착 용접에 사용될 수 있었던 것도 axial spray 이행 영역을 고전류측으로 획기적으로 확장시킬 수 있었음에 기인하고 있다고 할 수 있는데, 이는 보호 가스 조성 측면에서 온전히 달성할 수 없었던 고(高)용착속도(300g/min)를 용접재료 측면에서 접근하여 해결한 예라 할 수 있다. 따라서 앞으로 metal cored wire는 고용착 용접기법을 개발함에 있어 매우 중요한 위치를 차지 하게 될 것으로 예상되는데, 실용화

하는 측면에서는 용접 fume 발생과 같은 문제점이 보다 폭 넓게 연구 되어야 할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

고전류 고용착 GMA 용접에서 보호가스의 조성 과 용접재료를 바꿔가면서 최대 용착속도, 용적이행 현상 및 아크 안정성 등을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Solid wire가 사용된 경우에는, 와이어 송급속도(용접전류)가 증가함에 따라 axial spray 에서 rotational spray 이행으로의 천이가 일어나는데, 천이가 일어나는 전류는 보호가스의 조성 에 따라 차이를 주었다. 더구나 보호가스의 조성은 rotational spray 이행의 아크 안정성에도 영향을 주었다.

(2) 4원 혼합가스를 사용하여 최대 242g/min(wire 송급속도:27.3m/min)의 용착속도를 얻을 수 있었는데, 이는 본 가스가 안정한 axial spray 영역을 고전류측으로 확장시켜 높은 전류에서도 아크 안정성을 유지할 수 있었기 때문이다.

(3) Ar+5%O<sub>2</sub> 가스를 사용한 경우에는 237g/min(wire 송급속도:26.7m/min)의 용착속도를 얻을 수 있었는데, 이는 본 가스가 rotational spray 이행 아크를 안정화 시킨데 기인한 바 크다.

(4) Metal cored wire를 사용한 경우에는 300g/min 이상의 용착속도를 얻을 수 있었는데, 이는 본 재료가 어떤 보호가스 조성에서도 천이 현상을 보이지 않아 고전류 영역에서도 rotational spray 이행이 나타나지 않아서 아크가 불안해지지 않기 때문이다.

## 참 고 문 헌

1. 김희진, 강봉용, 경규담, 천홍정, 이정현, 박병희 : WFS=al+bLI2에서 b값의 실험적 측정, 대한 용접학회 춘계학술 발표(1996)
2. 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.
3. J. G. Church and H. Imaizumi : Welding characteristics of new welding process, TIME process, IIW Doc. XII-1199-90(1990).
  4. "新 metal계 flux cored wire "MX-55"에 대하여" 神戸製鋼技報, Vo.39(1990-10), p.1
  5. Welding Journal, Vol. 72, No. 5(1993), p.18