

特輯 : 용접재료의 연구개발 동향

GMA용접의 용적이행현상에 미치는 제인자의 영향

안영호 · 이종봉 · 엄동석

Effect of Various Factors on Droplet Transfer Phenomena in GMA Welding

Y. H. An, J. B. Lee and D. S. Um



안영호/포항종합제철/1960년생/GMA용접에 있어서 arc몰리현상 및 용접재료 개발 연구



이종봉/포항종합제철/1953년생/용접부 균열방지 및 인성 향상 연구



엄동석/부산대학교/1934년생/용접구조물의 피로강도해석 및 GMA용접의Arc현상 해석 연구

1. 머리말

GMA(Gas Metal Arc)용접법은 보호가스를 사용하는 용접법으로서, 보호가스의 종류에 따라 CO₂, MAG(Metal Active Gas), MIG(Metal Inert Gas) 용접법으로 분류하기도 한다. 이들 용접법의 용접재료는 solid wire나 flux cored wire가 주로 사용되며, 반자동 또는 자동으로 용접이 가능하여 현재 조선, 자동차를 비롯한 제조업계 전반에 걸쳐 그 적용범위가 급속히 확대되고 있다. 일본에서의 용접재료 생산추이¹⁾에 의하면, 1986년에 전체 용접재료의 41%를 차지하던 피복아크 용접재료가 1994년에는 22%로 감소하고 GMA용접용 와이어를 주체로 하는 solid wire는 33%에서 41%로 증가하고 있으며, flux cored wire도 25% 정도를 차지하고 있다. 따라서 전체 용접재료 중 GMA 용접재료의 점유율이 약 70%로 증가하고 있으며, 이러한 GMA용접재료의 점유율은 산업계의 동향 및 용접의 고능률화 추이로 볼 때 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

일반적으로 용접은 고온의 아크에 의하여 와이

어 선단에 용적이 성장하고, 이러한 용적이 용융지로 이행하는 일련의 과정으로 이루어지고, 이러한 현상을 용적이행현상(droplet transfer phenomena 혹은 metal transfer phenomena 등)이라 한다. 특히 GMA용접에 있어서 용적이행현상은 보호가스의 종류, 용접조건 등에 따라서 변화되고, 용적이행현상의 안정성은 보호가스, 용접조건, 용접재료 및 용접전원 등의 특성에 의하여 결정되는 아크 안정성과 밀접한 상관성이 있다. 특히 용적이행현상의 안정성 여부에 따라 GMA용접의 문제점으로 지적되고 있는 spatter발생 특성이 결정되기 때문에, 용적이행현상 및 아크 안정성에 영향을 미치는 각종 인자들의 적절한 관리가 중요하다 하겠다.

이와 같은 관점으로부터 본 내용에서는 solid wire(1.2mm)를 대상으로, 보호가스, 용접조건 및 용접재료 등이 용적이행현상에 미치는 영향을 용접 중 아크 신호의 변화와 고속카메라에 의한 용적이행현상 관찰 결과를 중심으로 기술하였다.

2. 보호가스의 영향

GMA용접의 보호가스는 와이어 선단의 용적 및 용융지로 외부 공기가 혼입되는 것을 방지하기 위하여 사용되고 있다. 이와 같은 GMA용접법은 사용되는 보호가스의 종류에 따라 크게 세분되고 있으며, 대표적인 용접법은 100% CO₂가스를 사용하는 CO₂용접, Ar, He 등 순수 불활성가스를 사용하는 MIG용접 및 혼합가스(Ar+O₂, Ar+CO₂, He+O₂ 등)를 사용하는 MAG용접 등이 있다. 또한 사용되는 보호가스에 따라 용접 중 아크의 전기적·열적 특성이 크게 변화하고, 이로 인하여 용적이행현상, arc안정성 및 비드형상 등이 크게 영향을 받는다. IIW에서는 용접과정 중 발생하는 용적이행현상을 용접방법별로 Table 1과 같이 분류하고 있다²⁾.

Table 1. IIW classification of metal transfer

Designation of transfer type	Examples of welding process
<ul style="list-style-type: none"> ● Free flight transfer (1) Globular <ul style="list-style-type: none"> - Drop - Repelled (2) Spray <ul style="list-style-type: none"> - Projected - Streaming - Rotating 	Low-current GMAW CO ₂ shielded GMAW Intermediate current GMAW Medium-current GMAW High current GMAW
<ul style="list-style-type: none"> ● Bridging transfer (1) short-circuiting (2) Bridging without interruption 	short-arc GMAW, SMAW Welding with filler wire addition
<ul style="list-style-type: none"> ● Slag-protected transfer (1) Flux-wall guided (2) Other modes 	SAW SMAW, FCAW, ESW

GMA용접의 용적이행 현상은 용적에 작용하는 역학적 인자들에 의하여 결정되고, 주요한 역학적 인자로서는 ① 표면장력(Surface tension) ② 중력(Gravitational force) ③ 전자기력(Electromagnetic force) ④ 증기압(Vapor pressure) 등이 알려지고 있다³⁾. 이러한 역학적 인자 중 표면장력 및 증기압은 용적이행을 억제하고, 반면에 중력은 용적이행을 조장한다. 한편 전자기력은 전류(I)의 제곱에 비례하며, 보호가스의 종류에 따라 용적이행을 조

장하기도 하고, 억제하기도 한다. 즉 CO₂용접의 경우 보호가스의 특성상 열적 핀치(Thermal pinch)가 발생하여 아크가 용적의 하부에 집중함으로써, 전자기력은 용적이행을 억제하는 역할을 함에 따라 대전류 용접조건에서 globular이행현상으로 용접이 이루어진다. 반면에 MAG/MIG용접에서는 열적 핀치가 발생하지 않아 아크가 용적을 폭 넓게 감싸고, 이로 인하여 전자기력은 용적이행을 조장하는 역할을 함으로써 대전류 용접조건에서 spray이행현상으로 용접이 이루어지는 것으로 알려지고 있다⁴⁾.

Fig. 1은 보호가스에 따라 용적이행현상이 명확히 구분이 되고 있는 대전류 용접조건에 대한 것으로, 320A-36V CO₂용접과 MAG용접의 전형적인 용적이행현상을 아크 전압의 변화로서 나타낸 것이다. 먼저 CO₂용접의 경우는 용접시간에 따른 아크 전압의 변화는 일정한 주기성을 나타내며, 용적이행에 따른 아크 전압의 강하가 다소 인식되는 전형적인 globular이행 형태를 보이고 있다⁵⁾. 한편 Ar-CO₂를 보호가스로 사용한 MAG용접의 경우는 전자기력이 용적이행을 조장하는 역할을 함으로써 용적은 작은 물방울 형태로 와이어로부터 이탈하여 용융지로 이행됨에 따라 아크 전압 강하가 거의 발생하지 않는 전형적인 spray이행 형태를 나타낸다. 이러한 용적이행현상의 차이는 고속 카메라를 사용하여 직접 관찰함으로써 확인할 수 있다. Photo. 1은 320A-36V의 대전류 영역에서 CO₂용접과 MAG용접의 용적이행현상을 관찰한 것으로서,

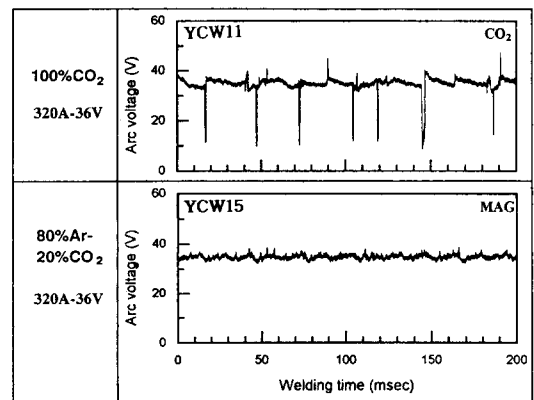


Fig. 1 Change of arc voltage in large current range (320A)

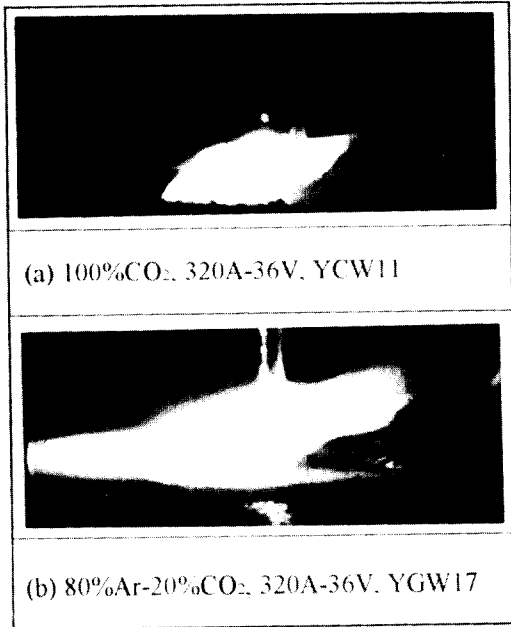


Photo.1 Droplet transfer phenomena in 320A-36V (2000frames/s)

CO₂용접의 경우는 buried-arc형태의 전형적인 globular이행현상을 보이고 있으며, MAG용접의 경우는 아크가 용적 및 용융지를 넓게 감싸고 있으며 용적의 형상을 명확하게 관찰할 수는 없으나 전형적인 spray이행현상을 보임을 확인할 수 있다.

한편 저전류 용접조건에서는 CO₂용접과 MAG용접의 용적이행 현상은 유사한 형태를 나타낸다. Fig.2는 CO₂용접의 경우 저전류 용접조건에서 발생하는 전형적인 용적이행현상의 예로서, 140A - 24V 용접조건에서 용접시간에 따른 아크 전압의 변화를 나타낸 것이다. 용적이행 현상은 용적이 성장하는 arcing시간(그림 중 ①, ②, ③)과 성장한 용적이 용융지와 단락되어 용융지로 이행이 이루어지는 단락시간(그림 중 ④, ⑤)으로 명확히 구분되어지는 단락이행현상을 보이고 있다⁵⁾. 이러한 단락이행현상 이외에 순간적으로 단락은 발생하지만 이행이 되지 못하고 단시간 내에 단락이 파괴되는 불안정한 현상인 순간단락현상도 관찰되고 있다. 이러한 저전류 CO₂용접의 용적이행 현상은 MAG용접의 경우에도 유사하게 관찰된다. Photo.2는 140A-22V의 용접조건에서 CO₂용접과 MAG용

접의 용적이행 현상을 고속 카메라로 관찰한 것이다. CO₂용접과 MAG용접 모두 arcing과 단락시간으로 이루어지는 전형적인 단락현상을 보이고 있으나, MAG용접의 경우 CO₂용접에 비하여 아크가 용적을 폭 넓게 감싸고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 저전류 용접조건에서는 보호가스의 종류에 따라 용적이행현상의 변화가 인식되지 않고, 모두 단락이행현상으로 나타나는 원인에 대해서는 3장에서 언급한다.

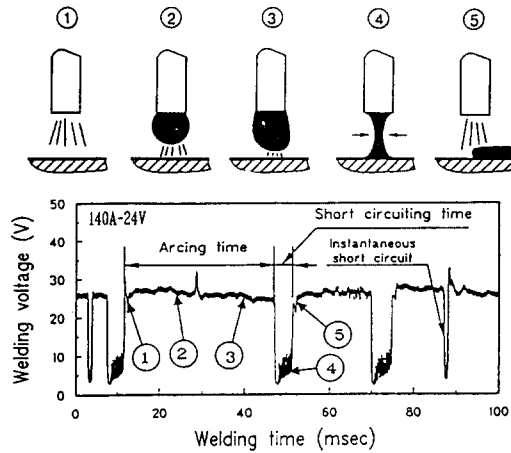


Fig. 2 Change of arc voltage in small current range (140A)

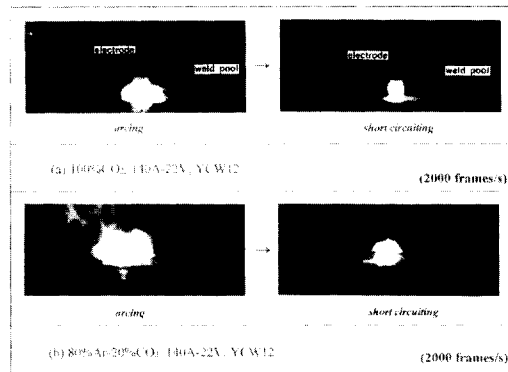


Photo.2 Droplet transfer phenomena in low current range

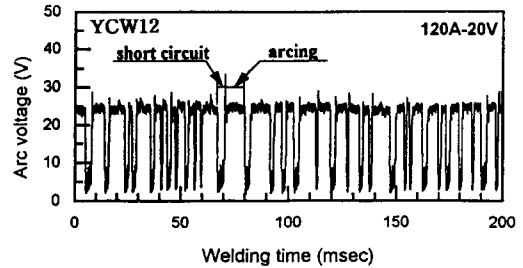
3. 용접조건의 영향

3.1 용접전류의 영향

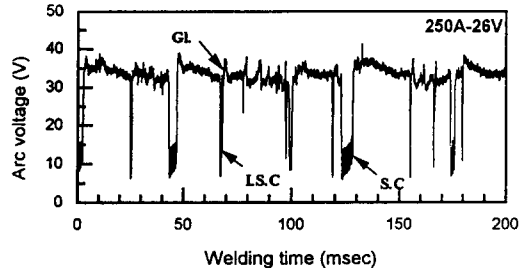
GMA용접에 있어서 용접전류는 용적이행 형태를 결정하는 주요한 변수이다. 즉 용접전류의 세기에 따라 용적이행 형태가 구분되어지며, 용접전류의 범위는 저전류, 중전류 및 대전류 영역으로 나누어 진다.

Fig. 3(a)는 CO₂용접의 저전류 조건에 대한 용적이행 현상을 나타낸 것이다. 용적이행 현상은 전형적인 단락이행 형태를 보이고 있다. 이러한 이행 형태는 대략 200A이하의 구간에서 안정화되는 경향을 나타낸다. Fig. 3(c)는 대전류 CO₂용접의 전형적인 용적이행 형태의 예를 나타낸 것으로, 저전류 영역과는 달리 자유비행 이행형태를 나타내며, 전술한 바와 같이 전형적인 globular이행현상을 보이고 있다. 한편 Fig. 3(b)에서 나타낸 바와 같이 중전류 영역은 저전류 영역의 용적이행로부터 대전류 영역의 용적이행 형태로 변화하는 천이영역으로서 이행 현상이 공존하는 양상을 보이고 있다. 즉 단락이행 현상(그림 중 S.C : Short circuit), globular이행 현상(그림 중 Gl. : Globular) 및 순간단락 현상(그림 중 I.S.C : Instantaneous short circuit) 등이 혼재되어 있음을 알 수 있다. 또한 MAG용접의 경우에도 용접전류에 따른 용적이행 현상의 변화는 CO₂용접과 유사한 형태를 보이고 있으며, 다만 대전류 용접조건에서 spray이행 현상을 나타내고 천이영역에서는 단락이행과 spray이행이 혼재된 양상을 나타낸다⁶⁾.

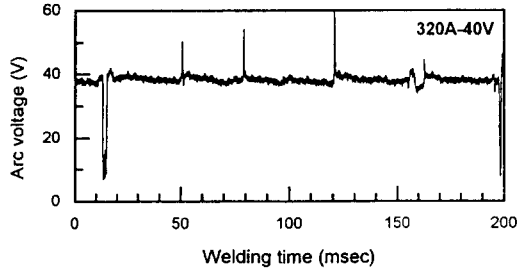
용접전류에 따른 용적이행 현상의 변화는 용적에 작용하는 전자기력의 증가가 주된 원인이다. 즉 CO₂용접 및 MAG의 저전류 영역에서는 용적에 작용하는 전자기력이 상대적으로 작기 때문에 용적이행은 와이어 선단에서 성장한 용적 자체의 중력이 지배적으로 작용함으로써 단락이행으로 이루어 지지만, 대전류 조건에서는 전자기력이 현저히 증가함에 따라 용적이행은 자유비행 이행형태를 나타내며, 이러한 경우에 전술한 바와 같이 CO₂용접에서는 globular이행 현상으로, MAG용접에서는 spray이행 현상으로 이루어진다.



(a) 120A-20V



(b) 250A-26V



(c) 320A-40V

Fig. 3 Effect of welding current on droplet transfer

3.2 용접전압의 영향

용접전압은 아크 길이에 직접적인 상관성이 있으며, 용접전압 V는 다음과 같은 식으로 나타내어진다⁷⁾.

$$V = k \cdot L \dots\dots\dots ①$$

V : 용접전압

k : 전위구배 (Potential gradient)

L : 아크 길이

전위구배 k는 보호가스의 종류에 의하여 결정되고, 동일한 보호가스에서 용접전압은 아크 길이에

의하여 결정되어 진다. 즉 바꾸어 말하면 용접전압이 변화하면 아크 길이가 달라지게 되며, 이러한 아크 길이의 변화는 용적이행 현상에 크게 영향을 미친다. Fig. 4는 CO₂용접의 저전류 용접조건인 120A에서 용접전압을 18V로부터 26V로 변화시켜 용적이행 현상의 변화를 관찰한 예이다. 용적이행은 용접전압의 변화에 관계없이 전형적인 단락이행 형태를 보이고 있지만, 용접전압이 증가함에 따라 arcing시간은 점차 증가하고 있으며, 이로 인하여 용적이행 주파수가 현저히 감소하고 있음을 알 수 있다. 용접전압이 증가함에 따라 용적이행 주파수가 감소하는 것은 아크 길이가 증가하기 때문이며, 이로 인하여 이행되는 용적의 크기가 커지게 된다. 이와같이 용적이행에 수반되는 용적의 크기가 지나치게 커지면 아크가 불안정하게 되고, 용접중에 발생하는 spatter가 대량화될 가능성이 있다는 보고도 있다⁸⁾. 이와 같은 용접전압의 효과는 Photo. 3에서 나타난 바와 같이 고속 카메라를 사용한 용적이행 현상의 관찰 결과에서도 확인할 수 있다.

Fig. 5는 CO₂용접의 320A 대전류 용접조건에서 용접전압을 32V로 부터 40V로 변화시킨 경우 아크 전압의 변화로서 용적이행 현상을 관찰한 것이

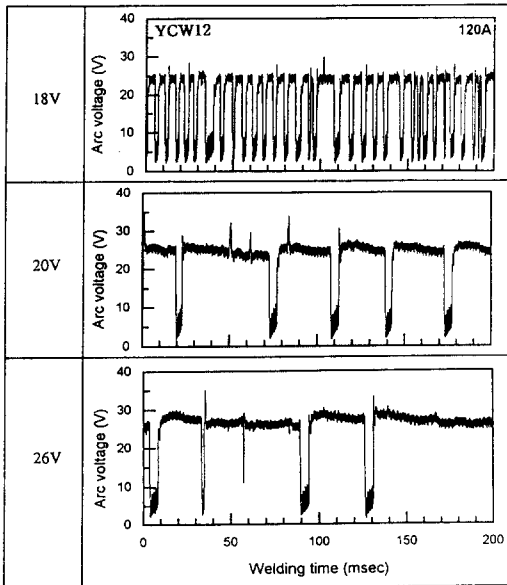


Fig. 4 Effect of welding voltage on droplet transfer in small current range (120A)

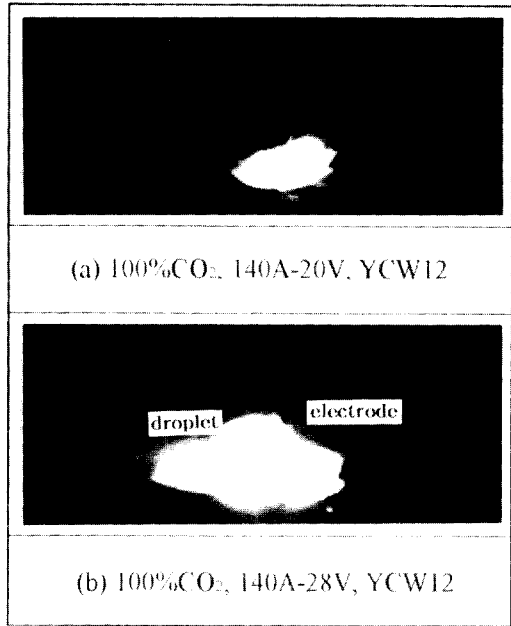


Photo.3 Effect of welding voltage on droplet transfer phenomena in 140A of CO₂ welding (2000frames/s)

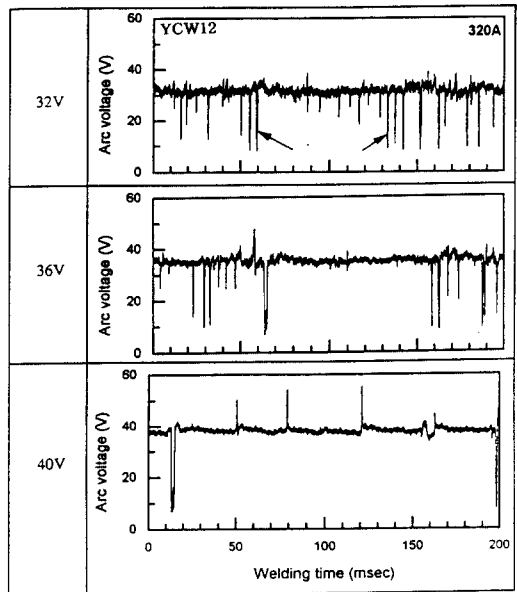


Fig. 5 Effect of welding voltage on droplet transfer in large current range (320A)

다. 32V로 용접전압이 낮은 경우는 아크 전압 변화의 주기성도 관찰되지 않으며, 순간단락현상(그림 중 화살표)이 많이 발생하고 불안정한 단락현상도 부분적으로 관찰되고 있어 아크가 매우 불안정함을 알 수 있다. 반면에 용접전압이 36V 정도로 증가하면 아크 전압의 주기성이 명확하고, 불안정한 순간단락 현상도 감소함으로써 안정된 globular이행을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 globular이행으로 용접이 이루어지는 대전류 용접 조건에서는 아크 안정화를 위하여 적정 용접전압의 설정이 필요함을 알 수 있다. 이와 같은 용접전압의 효과는 고속 카메라를 통한 관찰로서도 확인할 수 있으며, 그 결과를 Photo.4에서 나타내었다. 용접전압이 34V인 경우, 아크는 용융지 내에 함몰된 상태로 유지되어 buried-arc상태로 용접이 진행되지만, 용접전압이 40V로 높아진 경우에는 용융지의 직상에서 아크가 유지된다. 따라서 용접전압이 지나치게 낮은 경우에는 아크 길이가 불충분하여 용적과 용융지 사이에 형성된 아크가 매우 불안정한 상태로 되지만, 반면에 용접전압이 적절히 설정되면 안정된 globular이행을 나타낸다. 그러나 용접전압이 지나치게 높으면 가스 팽창 및 폭발 등과 같은 불안정한 아크 현상에 기인하여 아크가 불안정한 상태로 되기 때문에, 적정 용접전압을 유지하여 안정된 buried-arc상태로 용적이 주위의 용융지로 이행될 수 있도록 하여야 한다. 이러한 적정 용접전압에 대하여는 아크 전류와 아크 전압의 표준편차로서 최적 용접전압 범위를 설정할 수 있다는 보고도 있다⁸⁾. MAG용접에서도 용접전압이 34V로 낮은 경우에는 아크 길이가 충분하지 못하여 전형적인 spray이행현상은 보이지 않지만,

38V인 경우에는 아크 길이가 충분히 유지됨에 따라 전형적인 spray이행현상을 나타낸다. 한편 spray이행에 있어서도 과도한 용접전압의 설정은 지나친 아크 길이를 유발하여 아크 안정성을 저해할 가능성이 있기 때문에 용접전압을 적절히 관리하는 것이 매우 중요하다.

4. 용접재료의 영향

GMA용접재료에는 Si, Mn 및 Ti 등과 같은 탈산원소가 미량 첨가되어 있다. 용접재료에 있어 탈산원소 첨가의 목적은 ① 용접 아크 및 용적이행의 안정화, ② Spatter와 blow hole 발생 억제, ③ 용융 금속 중의 산소량 저감 등을 위한 것으로 알려지고 있다⁹⁾. KS, JIS 및 AWS 등에서는 C, Si, Mn 및 Ti 등과 같은 성분원소의 함량을 기준으로 용접재료를 구분하고 있다. Table 2는 연강 및 490 MPa 급 고장력강용 용접재료의 규격을 정리한 것으로서, AWS에서는 보호가스의 범위를 명확하게 구분하고 있지는 않지만, KS나 JIS에서는 보호가스별로 용접재료를 구분하고 있다. KS에서 구분하고 있는 용접재료는 크게 Si-Mn계인 YCW12 (100% CO₂용, JIS YGW12상당), YCW16 (80%Ar+20% CO₂용, JIS YGW16상당)과 Si-Mn-Ti계인 YCW11 (100%CO₂용, JIS YGW11상당), YCW15(80%Ar+20%CO₂용, JIS YGW15 상당) 등으로 구분되고 있으며, 이들 용접재료에 따른 용적이행현상의 특징은 다음과 같다.

Table 2. Examples of specification of mild steel or 490 N/mm² grade solid wires

Shielding gas	KS D7025	JIS Z3312	AWS A5.18
100% CO ₂	YCW11	YGW11	ER70S-2
	YCW12	YGW12	ER70S-3
	YCW13	YGW13	ER70S-4
	YCW14	YGW14	ER70S-5
			ER70S-6
80%Ar-20% CO ₂	YCW15	YGW15	(ER70S-2 상당)
	YCW16	YGW16	(ER70S-3 상당)
	YCW17	YGW17	ER70S-G

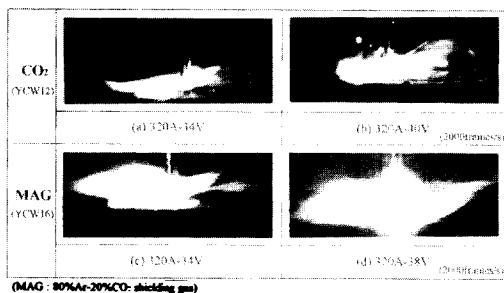


Photo.4 Effect of welding voltage on droplet transfer phenomena in 320A

Fig. 6은 Si-Mn계인 YCW12와 Si-Mn-Ti계인 YCW11 용접재료에 대하여 140A-22V 및 320A-36V 용접조건 각각의 아크 전압 변화를 비교하여 나타낸 것이다¹⁰. 먼저 저전류 용접조건인 140A-22V의 경우 용적이행현상은 용접재료에 관계없이 전형적인 단락이행현상을 보이고 있지만, YCW12에 비하여 YCW11 용접재료의 경우 arcing시간이 길어지는 경향(그림 중 화살표)이 있다. 한편 대전류 용접조건인 320A-36V에서는 YCW12의 경우 순간단락 현상(그림 중 화살표)이 현저하며 아크전압의 주기성이 관찰되지 않지만, YCW11의 경우는 순간단락 현상이 감소하고 아크전압의 주기성도 관찰됨으로써 YCW12에 비하여 안정한 아크상태를 보이고 있다.

Fig. 7은 CO₂용접에서 용접조건에 따른 용적이행 형태의 변화를 용접전류와 용접전압으로 정리한 것이다¹⁰. 용적이행 형태는 YCW12 및 YCW11 용접재료 모두 저전류 조건에서는 단락이행영역, 대전류 조건에서는 globular이행영역, 또한 증전류-저전압 조건에서는 단락이행으로 부터 globular이행으로 변화하는 천이영역으로서 전형적인 100% CO₂용접의 이행형태의 변화를 보이고 있다. 한편 globular이행 형태가 나타나기 시작하는 용접조건 및 안정적인 globular이행이 가능한 용접조건 범위는 용접재료에 따라 차이가 있다. 즉 Si-Mn계인 YCW12 용접재료의 경우 200A-32V(그림 중 화살표) 부터, Si-Mn-Ti계인 YCW11 용접재료의 경우는 160A-28V(그림 중 화살표) 부터 나타나고 있어, Ti첨가에 따라 globular이행이 나타나는 용접조건이 저전류-저전압측으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 또한 안정한 globular이행영역의 용접조건 범위도 YCW11 용접재료의 경우가 YCW12 용접재료에 비하여 넓어짐을 알 수 있다.

이상과 같이 용접재료 종류에 따라 용적이행현상은 많은 차이를 보이고 있으며, 이는 용접재료 중에 첨가되는 Ti의 효과 때문인 것으로 보고되고 있다^{10,11}. 즉 Ti이 첨가된 용접재료를 사용하면, 동일한 용접조건에서 아크 길이가 증가함으로써, 저전류 단락이행영역에서는 arcing시간이 길어지고, 중·대전류 영역에서는 globular이행을 위한 용접조건 범위가 넓어지게 된다. 따라서 보호가스 종류와 용접전류 범위에 따라 적절한 용접재료를 선정하는 것이 아크 안정성 및 spatter발생 측면에서

중요하다. CO₂용접의 경우, 저전류 단락이행영역에 대해서는 Ti이 첨가되지 않은 YCW12계 용접재료가 대전류 globular이행영역에서는 Ti이 첨가된 YCW11계 용접재료의 선정이 바람직하다. MAG용접의 경우 저전류 단락이행영역에 대해서는 Si-Mn계인 YCW16에 상당하는 용접재료가, 대전류 spray이행영역에 대해서는 Ti이 첨가된 YCW15에 상당하는 용접재료가 적합하다.

최근 GMA용접의 자동화 추세에 따라 용접재료 측면에서 가장 요구되고 있는 것은 spatter발생을 억제하는 것이며, 이를 위하여 용접재료 성분원소의 제어를 통하여 spatter발생량을 종래재의 1/2~1/3 수준으로 저감할 수 있는 용접재료가 개발 시

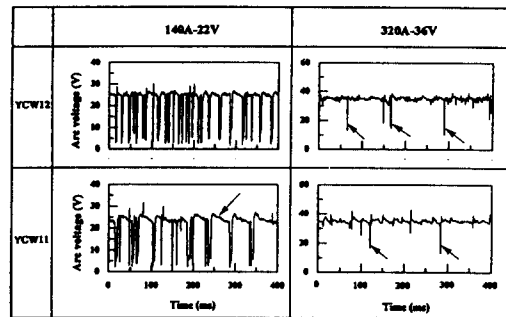


Fig. 6 Comparison of the changes of arc voltage using YCW12 and YCW11 wire in CO₂ welding

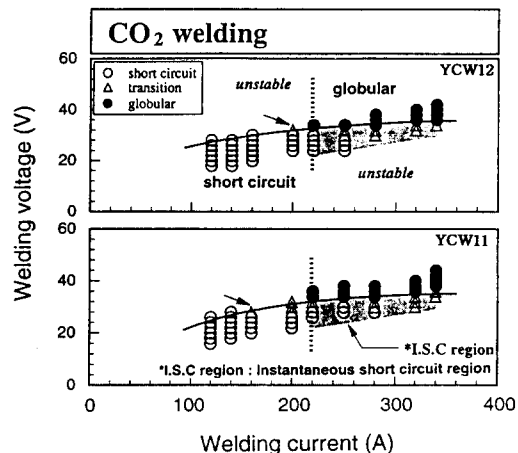


Fig. 7 Variation of droplet transfer modes with welding conditions

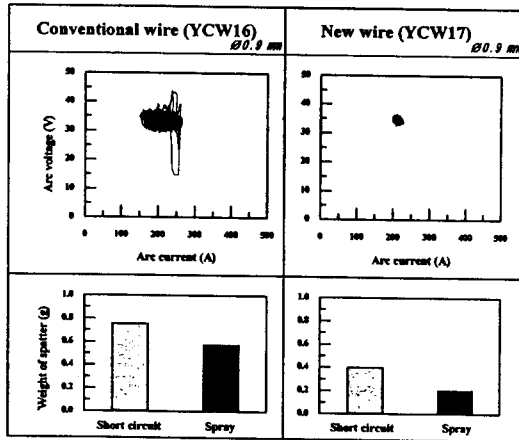


Fig. 8 Arc stability and spattering characteristics of low spatter wire in MAG welding (YCW17)

판되고 있다. Fig. 8은 개발된 저 spatter 용접재료 (YCW17상당)와 종래재의 아크 안정성 및 spatter 발생량을 비교하여 나타낸 것이다. 종래재의 경우는 MAG용접시 전형적인 spray이행 현상은 나타나고 있으나, 아크 전압과 아크 전류의 변동은 다소 인식되고 있다. 반면에 저 spatter 용접재료의 경우는 아크 전류 및 아크 전압의 변동이 거의 인식되지 않는 매우 안정된 spray이행 특성을 보이고 있으며, 이러한 향상된 아크 안정성으로 인하여 용접시 발생하는 spatter발생량은 종래재에 비하여 단락이행 영역에서는 약 50% 및 spray이행 영역에서는 약 70%로 대폭적인 감소가 가능하였으리라 판단된다.

본 내용에서 언급하지 않은 주요한 인자로서 용접전원을 들 수 있으며, 이에 대하여는 최근 용접출력을 고속제어함으로서 아크 안정성을 대폭 개선할 수 있는 출력과형제어, fuzzy제어형 전원등과 같은 새로운 전원의 개발에 대하여 많은 보고가 있다¹²⁾. 특히 신제어 전원과 용접재료와의 적절한 조합을 통하여 spatter발생을 종래 용접기술에 비하여 1/9 수준까지 억제할 수 있는 극저spatter 용접기술도 소개되고 있다¹³⁾.

참 고 문 헌

1. 溶接技術 編集部 : 統計にみる日本の溶接産業, 溶接技術, 44-11 (1996), pp. 127~135
2. Classification of metal transfer, IIW, DOC. - F-173-76
3. 安藤弘平, 長谷川光雄 : 溶接アーク現象, 産報出版, (1967), pp. 203~208
4. 益本 功, 岡田明之 : 現代溶接技術大系 第7巻, 産報出版, (1980), pp. 44~49
5. 안영호, 방국수, 이종봉, 장래용 : GMAW용적이행현상에 미치는 Ca의 영향, 대한용접학회지, 12-3 (1994), pp. 76~84
6. 안영호 : GMAW용적이행현상에 미치는 제인자의 영향, KAITECH 용접기술세미나 자료집 (1996), pp. 13~39
7. 益本 功, 岡田明之 : 現代溶接技術大系 第7巻, 産報出版, (1980), pp. 33~40
8. 安玲鎬, 李鍾鳳, 嚴東錫 : 그로비ュラ移行域におけるスパッタ発生におよぼすアーク電流およびアーク電壓の影響, 溶接學會全國大會講演概要, 第57集 (1995), pp. 100~101
9. 山内信幸, 阿草一男 : 가스시ールド 아크溶接現象に及ぼす微量元素の影響に関する日本の研究の現状, 溶接學會誌, 50-11 (1981), pp. 35~41
10. 안영호, 이종봉, 방국수, 엄동석 : CO₂용접시 스파터발생에 미치는 Ti의 영향, 대한용접학회지, 14-5 (1996), pp. 106~112
11. I. Masumoto, A. Sekiguchi, S. Kawasaki : Effect of Titanium in steel Electrode Wire for CO₂ Arc Welding on the Usability and Mechanical Properties of Weld Metal, IIW Doc. -B-135-73
12. 原田長二, 中利昭, 安田哲夫 : 溶接電源から見たマグ・ミグ溶接の知能化, 溶接技術, 43-2 (1995), pp. 106~114
13. 管哲男 : 스파ッタはどこまで防止できるか? (2), 溶接學會誌, 59-8 (1990), pp. 17~21