

GMAW 용적이행 현상에 미치는 Ca의 영향

安玲鎬* · 方國守* · 李鍾鳳* · 張來雄*

Effect of Ca on Droplet Transfer Phenomena in GMA Welding

Y.H. Ahn*, K.S. Bang*, J.B. Lee* and R.W. Chang*

Key Words : Gas Metal Arc Welding(GMA용접), Calcium(Ca), Welding Workability (용접작업성), Droplet Transfer Cycle(용적이행주기), Short circuit Transfer(단락이행), Globular Transfer(Globular이행), Arcing Time (아크 시간), Spatter(스패터)

Abstract

Droplet transfer modes due to welding conditions and the effect of Ca in welding wire on droplet transfer were investigated.

Droplet transfer mode in CO₂ welding was classified into 2 modes, that is, short circuit and globular transfer, with increasing welding current and voltage.

With increasing Ca content in wire, repulsive pressure due to vaporization of Ca was considerably increased. In short circuit transfer region, arcing time was increased and droplet transfer cycle was decreased, with increasing Ca content. In globular transfer region, welding condition for globular transfer was lower current region, with increasing Ca content.

1. 서론

GMA(Gas Metal Arc)용접은 용접 공정의 자동화 추세에 따라 적용율이 급신장되고 있으며, 그중 CO₂ 용접은 경제적이고 고능률이라는 점때문에 특히 많이

이용되고 있다. 그러나 CO₂용접시의 스패터 발생 및 아크 불안정의 문제는 스패터의 제거를 위한 작업 공수의 증가 및 자동화율의 저하등을 초래하여 이를 해결하기 위한 노력이 계속되고 있다¹⁻³⁾.

CO₂용접시의 스패터 발생은 아크 안정성과 직접적인 관계가 있으며, 용접 와이어중의 미량원소, 용접조건, 용접전원 및 보호가스 등 여러가지 요인에

* 정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

의해 영향을 받는 것으로 알려지고 있다⁴⁻⁸⁾. 이들 요인중 용접 와이어의 주요 화학조성인 C, Mn, Si, Al, Ti 함량과 스패터 발생율의 관계는 어느 정도 조사되어 있고⁶⁸⁾, Ca도 스패터의 발생을 조장시키는 원소로 보고되고 있다⁹⁾. 특히, Ca의 경우 일반적으로 소재의 품질 향상 및 제조공정상 소량 첨가되는 원소로서 그 영향에 대하여 보다 상세한 검토가 필요하지만, 기본적으로 생각되는 용접시 아크 안정성 측면에서의 검토등 아직 불명확한 점이 많다.

따라서, 본 연구에서는 아크 안정성에 미치는 Ca의 영향을 상세히 검토하기 위하여 와이어의 Ca함량에 따른 용적이행 특성, 즉 용적이행형태, 용적이행주파수 및 아크시간 등의 변화를 정량적으로 평가함으로써, CO₂용접시 용접부 품질 및 용접 작업성의 향상에 기여하고자 했다.

2. 실험방법

2.1 시험재 및 용접조건

시험재는 직경 1.2mm의 저전류 CO₂용접용 와이어로서, 기본성분은 JIS YGW12에 상당하는 재료를 사용하였다. Table 1은 시험재의 화학성분을 나타낸 것으로, Ca함량은 0, 12, 35 ppm으로 변화시켰다. 용접은 인버터 용접전원을 사용하여, Table 2에 나타낸 바와 같이 전류를 저전류, 중전류 및 대전류 영역으로 크게 구분하였다. 즉, 대전류 영역은 280, 320A, 중전류 영역은 200, 220, 250A, 저전류 영역은 120, 140, 160A로 변화시켰으며, 용접속도는 30cm/min로 일정하게 하였다. 각 전류 조건별 용접전압 변화는 용접 가능한 범위로 한정하고, 최저전압으로부터 최대전압까지 2V씩 증가시켰다.

2.2 아크 안정성 평가

Fig.1은 용적이행현상을 평가하기 위하여 자체 제작한 용접아크 평가장치의 구성도를 나타낸 것으로, 신호감지부, 신호처리부 및 신호저장부로 이루어져 있다. 신호감지부는 용접중 아크전류 및 아크전압을 감지하는 센서들로 구성되어 있다. 또, 신호처리부는 신호감지부로부터 감지된 아날로그신호를 증폭(아크전류 증폭율 : 100, 아크전압 증폭율 : 0.0625), 필터링하는 신호조절기(cut off frequency : 10kHz) 및 디지털신호로 변환하는 신호변환기로 이루어져 있으며, 신호저장부는 기억용량 102Mbyte 인 컴퓨터를 사용하여, 신호변환기로부터의 신호를 해석 및 저장토록 하였다.

용접조건 및 Ca함량에 따른 용적이행현상의 변화는, 용접중 500msec 동안의 아크전압 변화를 각 조건당 3회씩 반복 측정하여 용적이행형태를 평가하고, 그래픽처리를 통하여 용적이행주파수 및 아크시간 등을 측정하였으며, 이때 용적이행주파수 및 아크시간은 평균값으로 하였다. 또, 용접중 용적이행현상은 고속카메라에 의한 직접 관찰도 병행했으며, 그때의 촬영속도는 3000 frame/s으로 하였다.

한편, GMA용접시 용적에 작용하는 표면장력의

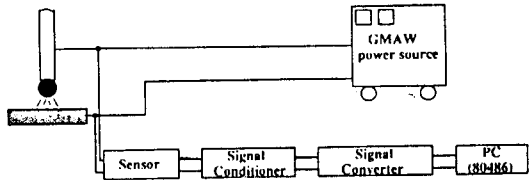


Fig.1 Schematic diagram of welding arc evaluation apparatus

Table 1 Chemical compositions of wires used

Mark	C	Si	Mn	P	S	Ti	Ca(ppm)	Remarks
C0	0.11	0.92	1.60	0.010	0.008	0.01	-	JIS :
C1	0.11	0.88	1.56	0.007	0.005	0.01	12	YGW12
C3	0.09	0.87	1.58	0.011	0.005	0.01	35	

Table 2 Welding conditions

Welding method	Dia. (mm)	Polarity	Current (A)	Speed (cm/min)	Others
CO ₂	1.2	DCRP	120,140,160	30	• Power source : Inverter • Gas flow rate : 20 l/min • Torch gap : 15min
			200,220,250		
			280,320		

측정은 稻垣등¹⁰⁾이 제안한 측정법을 사용하였다. 시험재의 전용착금속을 taper형으로 기계가공한 시험편을 사용하여 용가재없이 GTA(Gas Tungsten Arc) 용접법으로 bead-on-plate용접을 실시하고, 표면장력은 용접중 용락되는 임계두께를 측정하여 稻垣등¹⁰⁾이 제안한 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$\gamma \doteq 4.3 \frac{E \cdot I}{t_{\max} \cdot \sqrt{v}} \quad (1)$$

- γ : 표면장력(dyne/cm)
- E : 용접전압(V)
- I : 용접전류(A)
- t_{\max} : 용락임계두께(mm)
- v : 용접속도(cm/min)

본 내용에서는, 편의상 용접중의 순간적인 용접 전압치를 아크전압으로 표기하여 평균 전압치의 의미인 용접전압과 구분했다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 용접 아크 평가 장치에 의한 용적이행 해석

Fig.2는 저전류 용접조건인 140A에서의 전형적인

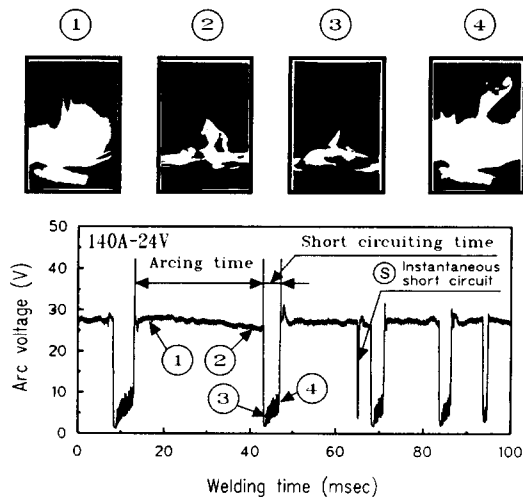


Fig.2 Droplet transfer phenomena and change of arc voltage in low current range

용적이행현상을 나타낸 것이다.

아래쪽 그림은 용접아크 평가장치로 측정한 용접 시간에 따른 아크전압의 변화이며, 위쪽 사진은 용적이행현상을 고속카메라로 직접 관찰한 결과이다. 각 번호의 사진은 그림의 동일 번호 위치에 상당하는 현상과 일치한다. 이와같은 결과로 부터, 용적이행은 와이어선단에 용적을 형성하는 아크시간(①~②)과 와이어선단의 용적이 용융지로 이행하는 단락시간(③~④)으로 이루어지며, 이것이 전형적인 단락이행(Short circuit transfer)현상¹¹⁾과 일치함을 알 수 있었다. 저전류 영역에서의 용접은 이러한 일련의 과정이 반복되는 것이지만, 실제로는 이러한 이행현상의 예도 Fig.2에서 ⑤로 표시한 바와 같은 순시단락 현상도 발생하여 아크 안정성을 저해시킨다.

한편, Fig.3은 대전류 용접조건인 320A에서의 전형적인 용적이행현상을 나타낸 것이다. 용접시간에 따른 아크전압의 변화는 일정한 주기성을 보이고 있지만, 단락이행형태와는 달리 용적이행이 명확하지 않다. 이러한 형태의 변화도 고속카메라로 관찰한 이행현상과 아크전압의 변화를 동조시켜 검토했다. 그 결과 직접관찰을 위한 부대장치의 미비로 명확한 사진의 제시는 곤란하지만, 전형적인 globular이행¹¹⁾ 형태임을 확인 할 수 있었다. 보다 명확한 현상 규명을 위해 동일한 방식의 직접관찰에 의한 검토를 계속 하겠지만, 우선 금번 관찰 결과에 근거한 이행현상을 그림 위쪽에 모식도로서 나타냈다. 즉, 대전류 용접조건에서는 현저한 전자기력이 용적의 하부에 작용하여 용적을 부상시킨다. 따라서 용적이행은 성장한 용적이

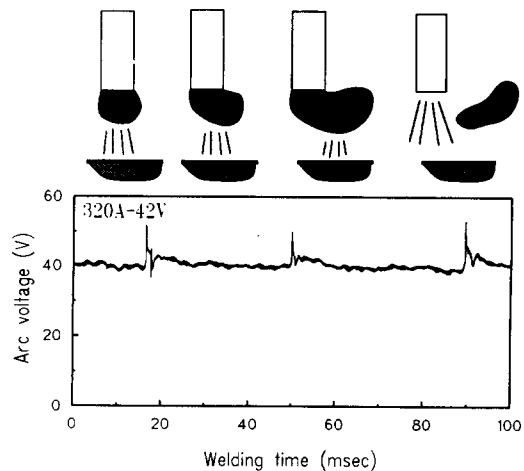


Fig.3 Change of arc voltage in high current range

와이어 선단으로 부터 이탈하여 용융지로 비행하는 형태로 이루어진다.

이상과 같이, 용접아크 평가장치에 의한 용접중 용적이행주파수 및 형태를 평가함으로써 용적이행현상을 해석할 수 있을 것이다. 따라서, 본 장치를 사용하여 와이어중 Ca함량에 따라 아크시간, 용적이행주파수 및 용적이행형태의 변화 등을 중점적으로 조사했다.

3.2 용접조건에 따른 아크전압의 변화

Ca 무첨가재를 사용하여 저전류, 중전류 및 대전류 영역에서의 용접조건에 따른 아크전압의 변화를 검토했다.

Fig4는 저전류 영역에서 용접전류 및 용접전압에 따른 아크전압의 변화를 나타낸 것이다. (a)는 용접전압이 22V로 일정한 조건에서 용접전류만을 120A 및 160A로 변화시킨 경우로서, 전류의 변화에 관계없이 용적이행은 전형적인 단락이행형태를 보이며, 용적이행주파수 및 아크시간도 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 또 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이, 140A의 일정전류 조건에서 용접전압만을 20V 및 26V로 변화시킨 경우도 용적이행은 단락이행형태를 보이고 있다. 그러나 용접전압이 증가함에 따라 용적이행주파수는 현저히 감소하고, 아크시간도 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 저전류 영역의 경우 용적이행형태는

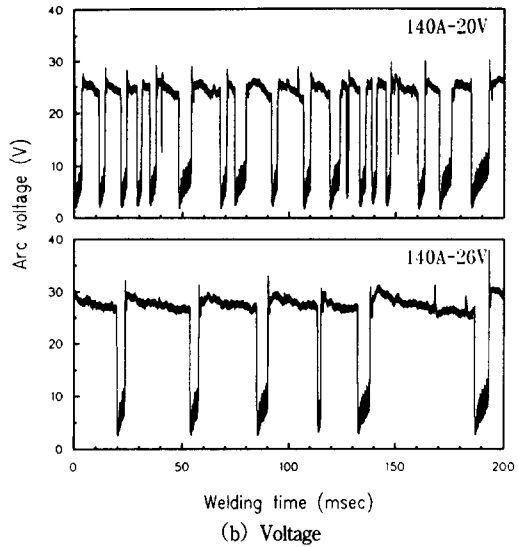
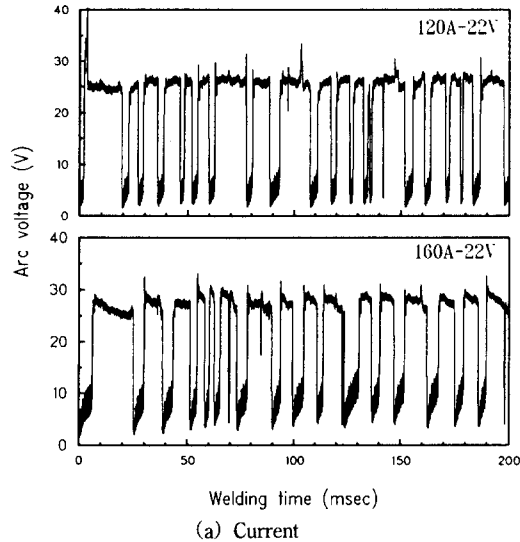


Fig.4 Change of arc voltage in low current welding conditions

단락이행형태를 보이며, 아크시간 및 용적이행주파수는 용접전류의 변화에는 무관하지만 용접전압의 변화에는 크게 의존하고 있다.

한편, 중전류 영역에서 용접전류 및 용접전압에 따른 아크전압의 변화를 Fig5에 나타냈다. (a)는 용접전압이 28V로 일정한 조건에서 용접전류만을 200A 및 250A로 변화시킨 경우로서, 용적이행은 저전류영역에서와 같이 용접전류의 변화에 관계없이 단락이행형태를 보이고 있다. 또, 용적이행주파수 및 아크시간도 용접전류의 변화에는 거의 무관하지만, 용접전류가 다소 높은 250A의 경우에는 순시단락현상이 다소 증가하고 있다. 한편, (b)는 용접전류가 (a)와 동일한 200A 및 250A의 조건에서 용접전압을 32V로 높힌 경우로서, 두 경우 모두 단락이행형태와 함께 globular이행형태 (화살표 부분)가 혼재되어 있음을 알 수 있다. 즉, 중전류 영역에서는 용접전압의 증가에 따라 용적이행형태가 단락이행으로 부터 globular이행으로 변화하는 전이영역이 존재함을 알 수 있다.

Fig6은 대전류 영역에서 용접조건에 따른 아크전압의 변화를 나타낸 것이다. (a)는 32V의 일정한 용접전압 조건하에서 용접전류를 280A 및 320A로 변화시킨 경우로서, 용접전류의 변화에 관계없이 용적이행형태는 단락이행과 globular 이행이 혼재된 형태를 보이고 있다. 그러나 용접전류의 증가에 따라 단락이행 회수는 감소하고 순시단락회수가 증가하는 경

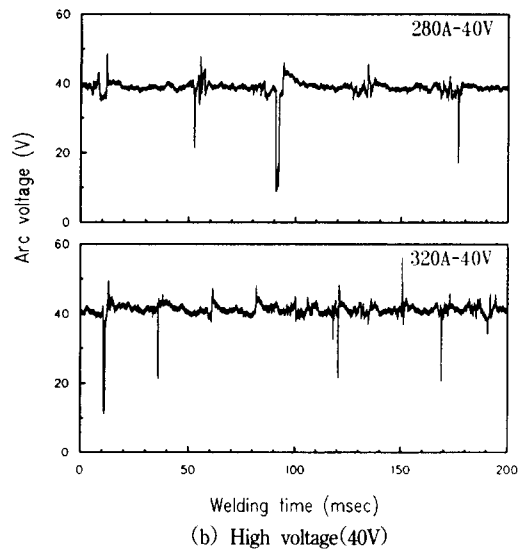
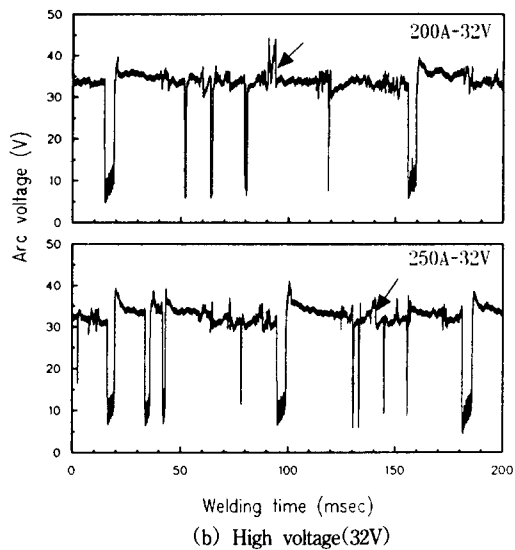
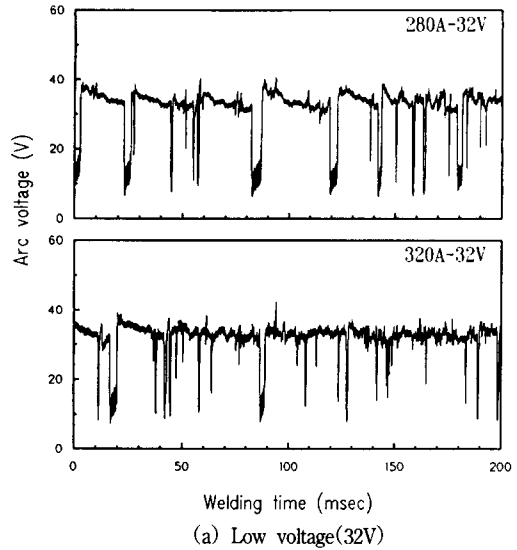
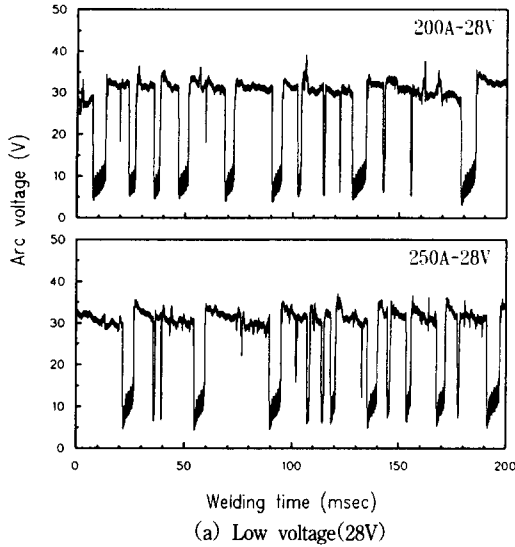


Fig.5 Change of arc voltage in medium current welding conditions

Fig.6 Change of arc voltage in high current welding conditions

향을 보이고 있다. 또, (b)는 용접전류가 (a)와 동일한 280A 및 320A의 조건에서 용접전압을 40V로 증가시킨 경우로서, 일시적인 단락현상은 보이지만 용접전류의 변화에 관계없이 전형적인 globular이행현상을 나타내고 있다. 즉, 대전류 영역에서는 용접전압이 일정치 이상으로 증가하면, 순시단락현상, 단락이행 및 globular이행이 혼재된 형태로 부터, 안정된 globular이행 형태로 변화함을 알 수 있다.

3.3 아크전압의 변화에 미치는 Ca의 영향

Fig.7은 전형적인 단락이행 형태를 보인 140A-22V의 저전류 영역에서 Ca함량에 따른 아크전압의 변화를 나타낸 것으로, Ca함량의 증가에 따라 용적이행 형태는 변화하지 않지만, 용적이행주파수가 감소하고 아크시간이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 Ca함량이

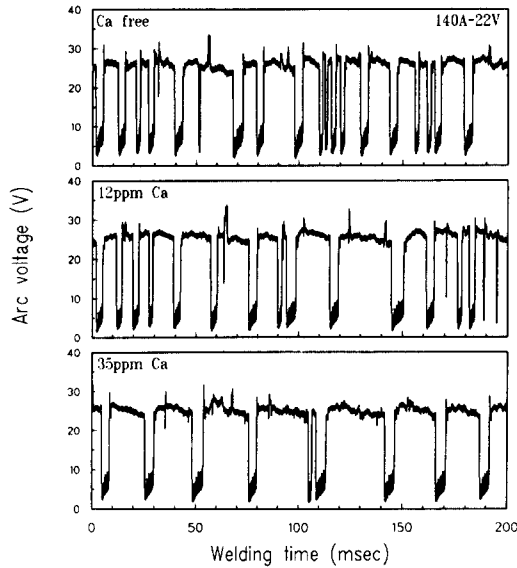


Fig.7 Effect of Content on arc voltage change in low current range

35ppm정도 첨가되면, 저전류 영역에서도 160A-28V의 비교적 높은 용접전류 및 전압조건에서는 globular이행형태가 나타나기 시작함을 확인했다. Fig.8은 저전류영역에서 단락이행형태만을 보이는 조건 범위에서의 Ca함량에 따른 용적이행주파수 및 아크시간의 변화를 정량적으로 나타낸 것으로, Ca함량이 증가함에 따라 용적이행주파수는 감소하고 아크시간은 증가하는 경향을 보이고 있다. 예로서, 120A-22V의 용접조건에서 Ca 무첨가재 및 35ppm 첨가한 경우의 용적이행주파수는 각각 78회/s 및 48회/sec로서 Ca함량이 증가함에 따라 약 40% 정도 감소하고 있다. 또, 동일한 재료들에 대한 아크시간은 각각 8msec 및 18msec으로, Ca함량이 증가함에 따라 약 2.3배 길어짐을 알 수 있다. 이상과 같이 용적이행이 단락이행형태로 이루어지는 저전류 영역의 경우, 와이어중 Ca함량의 증가는 용적이행주파수를 감소시키고 아크시간을 증가시킨다.

Fig.9는 단락이행형태를 보이는 220A-28V의 중전류영역에서 Ca함량에 따른 아크전압의 변화를 나타낸 것이다. Ca 무첨가재 및 12ppm 정도 소량 첨가한 경우는 저전류영역에서의 현상과 동일하다. 즉, Ca함량의 증가에 따라 용적이행형태는 단락이행형태로서 변화가 없지만, 용적이행주파수는 감소하고 아크시간은 증가하고 있다. 그러나 Ca함량이 35ppm인 경우는 단락이행형태도 부분적으로 존재하지만, 일부 구간

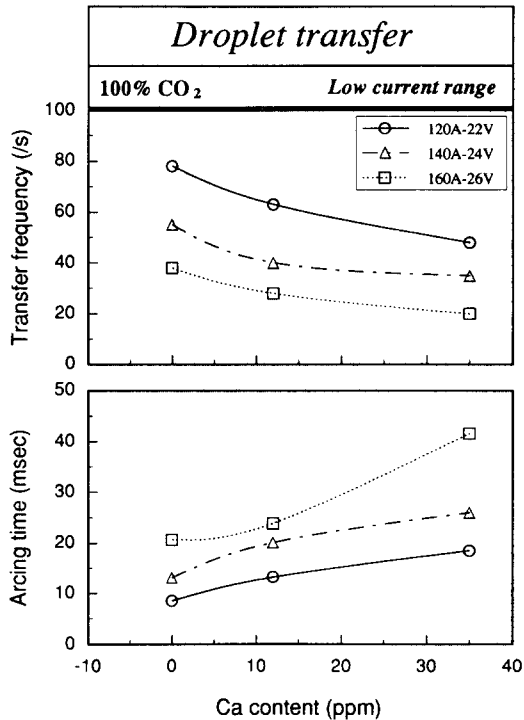


Fig.8 Effect of Ca content on droplet transfer cycle and arcing time

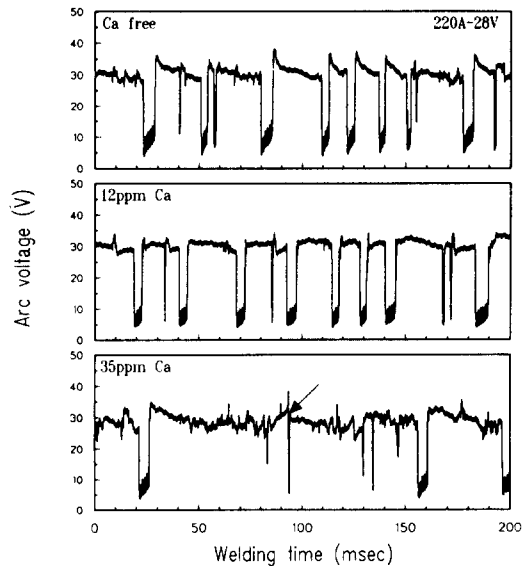


Fig.9 Effect of Ca content on arc voltage change in medium current range

(화살표 부분)에서 globular이행형태가 존재함을 볼 수 있다. 중전류 영역에서도 200A-32V로 용접전류 및 전압이 비교적 높게되면, Ca 무첨가재 및 12ppm 정도 소량 첨가한 경우에도 globular이행형태가 나타나기 시작함을 알 수 있었다. 이와 같이, 중전류 영역에서는 단락이행형태를 나타내는 동일한 용접조건에서도 Ca이 일정량 이상으로 첨가되는 경우 또는 Ca무첨가재도 용접전류 및 전압이 비교적 높게되면, 단락이행형태와 globular이행형태가 혼재하는 천이영역으로 변화하고 있다.

한편, Fig.10은 320A-42V의 대전류 영역에서 Ca함량에 따른 아크전압의 변화를 나타낸 것으로, Ca무첨가재 및 35ppm 첨가재 모두 전형적인 globular이행형태의 아크전압 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서, 대전류 영역에서는 저전류 및 중전류 영역과 상이하여 안정된 globular이행현상을 나타내며, 이 영역에서의 Ca첨가는 용적이행형태의 변화에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

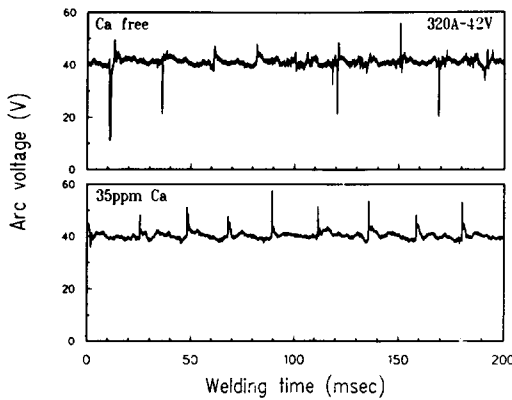


Fig.10 Effect of Ca content on arc voltage change in high current range

3.4 용적이행현상에 미치는 Ca의 영향

Fig.11은 실험한 전용접조건 범위에서 각 시험재의 아크전압의 변화를 관찰함으로써 판단한 용적이행형태의 변화를 종합적으로 나타낸 것이다. 용적이행형태의 영역은 시험재에 관계없이 저전류-저전압 조건에서의 단락이행 영역과, 대전류-고전압 조건에서 나타나는 globular이행 영역, 또 비교적 대전류-저전압 조건에서 볼 수 있는 단락이행과 globular이행이 혼

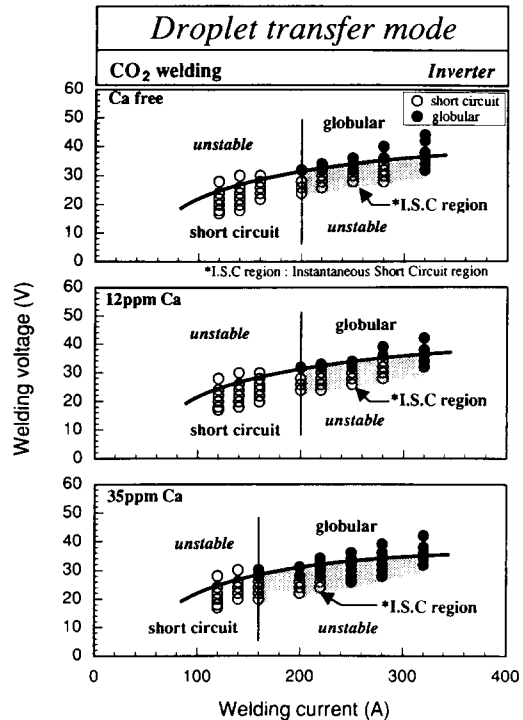


Fig.11 Variation of droplet transfer modes at various welding conditions

재하고 순시단락이 다량 발생하는 천이영역으로 구분했다. Ca 무첨가재와 12ppm정도로 소량 첨가재는 용접조건에 따른 용적이행형태의 변화가 거의 동일함을 알 수 있다. 그러나, Ca이 35ppm정도 첨가되면 globular이행이 나타나는 용접조건은 저전류-저전압 측으로 이동함으로써, 단락이행 영역은 좁아지고, globular이행 영역은 현저히 확대됨을 알 수 있다.

이와같이 와이어중에 첨가된 Ca은, 저전류 용접조건에서는 아크시간을 길게하여 용적이행주파수를 감소시키고, 중·대전류 용접조건에서는 globular이행이 나타나는 용접조건을 저전류-저전압측으로 이동시킨다. 이러한 Ca의 영향은 Ca이 아크분위기하에서 용적에 작용하는 힘의 균형에 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.12는 용적에 작용하는 대표적인 힘인 중력, 표면장력, 전자기력, 와이어중 성분원소 증발에 기인한 반발력 등과, 이들이 용적에 작용하는 효과를 나타낸 자유도(Free-body diagram)를 나타낸 것이다. CO₂용접중 용적이행을 조장하는 힘은 용적자체의 중력(F_G)이며, 용적이행을 억제하는 힘은 표면장력(F_S), 전자

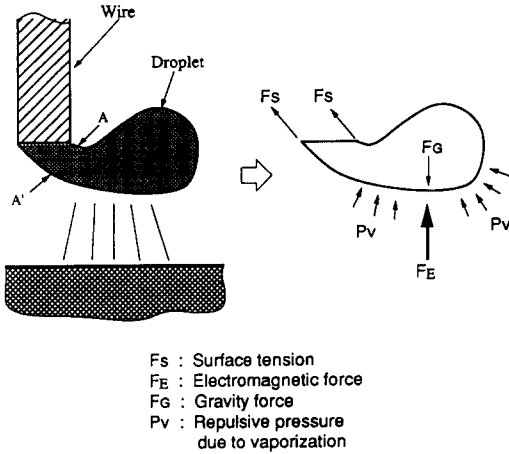


Fig.12 Free body diagram

기력에 기인한 힘(F_E) 및 와이어중 성분원소의 증발에 따른 반발력(ΣP_v) 등으로 이루어진다고 알려지고 있다¹²⁾. 따라서 용적이행형태는 이행을 조장하는 힘인 F_G 와 억제하는 힘들의 합인 ($F_s + F_E + \Sigma P_v$)와의 균형에 의존된다고 볼 수 있다.

Ca과 같은 와이어중의 성분은 중력 및 전자기력의 변화에는 거의 무관하겠지만, 표면장력과 증발에 기인한 반발력에는 직접적인 영향을 미치리라 생각된다. Fig.13은 Ca함량에 따른 용적에 작용하는 표면장력의 변화를 나타낸 것으로, 표면장력은 Ca함량이 12ppm에서 35ppm으로 증가함에도 불구하고 평균 1750 dyne/cm 정도의 일정한 값을 나타내고 있다. 이것은 본 시험 범위내에서는 Ca함량의 변화가 용적의 표면장력에 거의 영향을 미치지 않음을 의미하는 것이다. 반면에 용접중 증발에 기인한 반발력은 Ca함량의

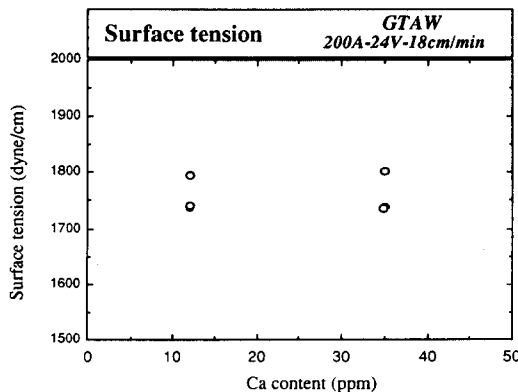


Fig.13 Effect of Ca content on surface tension

변화에 크게 영향을 받으리라 추측된다. 즉, 아크상태에서의 용적온도는 1600~1800℃이고, 이 온도에서 Ca의 증기압은 1.81~4.53 atm으로서¹³⁾, 고온의 아크분위기하에서는 Ca의 현저한 증발에 기인하여 용적을 떠받치는 반발력(ΣP_v)이 현저히 증가할 것이다.

따라서, Ca함량이 증가함에 따라 단락이행시 아크시간이 길어지고, globular이행이 나타나는 용접조건이 저전류측으로 이동하는 이유를 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다. 먼저 단락이행시 Ca함량이 증가함에 따라 아크시간이 길어지는 것은, Ca함량의 증가에 따라 용적이행을 억제하는 힘의 합인 ($F_s + F_E + \Sigma P_v$)이 현저히 증가하기 때문이다. 즉, Ca함량이 작은 경우에는 용적이행을 억제하는 힘의 합인 ($F_s + F_E + \Sigma P_v$)이 상대적으로 작기 때문에 힘의 균형에 의하여 작은 용적으로서도 단락이 이루어진다. 그러나, Ca함량이 많은 경우에는 Ca의 증발에 의하여 용적에 작용하는 반발력(ΣP_v)이 현저히 증가함에 따라 힘의 균형이 $F_G < (F_s + F_E + \Sigma P_v)$ 의 조건으로 되기 때문에, 결국 단락이 이루어지려면 더 큰 용적이 필요하게 될 것이다. 한편, Ca함량이 많은 경우에 globular이행이 나타나는 용접조건이 저전류측으로 이동하는 것은, Ca함량이 증가하면 비교적 저전류측에서도 용적이행을 억제하는 힘의 합인 ($F_s + F_E + \Sigma P_v$)이 쉽게 증가함에 따라 힘의 균형이 $F_G < (F_s + F_E + \Sigma P_v)$ 으로 되고, 이러한 힘의 균형하에서는 용적이 부상됨에 따라 단락이행형태보다는 globular이행형태를 나타내게 되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

이상과 같이 용적이행에 미치는 와이어중 Ca의 영향을 평가하기 위하여 용접조건 변화에 따른 아크시간, 용적이행주파수 및 용적이행형태등을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용적이행현상을 평가하기 위하여 제작된 용접아크 평가 장치로 용접조건 전 범위에 대한 용적이행형태, 용적이행주파수 및 아크시간등의 평가가 가능하였다.

2) 용적이행형태가 단락이행인 120A~160A 영역에서, 용접전압이 증가하면 용적이행주파수는 감소하고 아크시간은 길어진다. Globular이행으로 용접이 이루어 지는 280A이상 영역에서는, 전압이 일정치 이상으로 증가하면 안정한 globular 이행을 나타낸다.

3) 용적이행이 단락이행형태로 이루어지는 120A~160A 영역에서는, 와이어중 Ca함량이 증가할수록 아크시간은 길어지고 용적이행주파수는 감소한다.

4) 단락이행, globular이행 및 순시단락 현상등이 혼재하는 200A 이상의 영역에서는, 용접 와이어중 Ca함량이 증가할수록 globular이행이 나타나기 시작하는 용접조건이 저전류 측으로 이동하며, globular이행 영역이 확대된다.

5) 이상과 같은 Ca의 효과는 고온의 아크중에서 Ca의 현저한 증발현상에 따른 반발력이 증가하기 때문이다. 이러한 반발력의 증가는 용적이행을 억제하는 힘의 합력을 증가시켜, 용적을 부상시킴에 따라 용적이행을 억제하기 때문이다.

참 고 문 헌

- 1) 木村乾男 他：炭酸가스아크용접におけるスパッタについて, 溶接技術, No.2 (1984), pp.76~78
- 2) 野嶋成樹：炭酸가스아크용접용ワイヤの選び方, 使い方, 溶接技術, No.1 (19179), pp.20~30
- 3) 奥田直樹：溶接材料の種類とその特性, 使い分け(上), 溶接學會誌, Vol.56, No.1 (1987), pp.44~54
- 4) S.Rhee : Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding, Welding Research Supplement, No.10 (1992), pp.381s~386s
- 5) 藤原紀六 他：スパッタ低減の效果的方法, 溶接技術, No.2 (1985), pp.511~58
- 6) 三田常夫：スパッタはとこまで防止できるか? (1), 溶接學會誌, Vol.59, No.8 (1990), pp.12~16
- 7) 菅哲男：スパッタはとこまで防止できるか? (2), 溶接學會誌, Vol.59, No.8 (1990), pp.17~21
- 8) 山内信幸：ガスシールドアーク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象, 溶接學會誌, Vol.50, No.11 (1981), pp.35~41
- 9) 안영호 외：CO₂용접 Spatter발생에 미치는 미량원소의 영향, 대한용접학회 추계학술발표 개요집, (1990), pp.14~16
- 10) 稻垣道夫 他：溶接加工, 誠文堂, (1971), pp.257~259
- 11) 安藤弘平 他：溶接アーク現象, 産報出版, (1967), pp.281~287
- 12) 安藤弘平 他：溶接アーク現象, 産報出版, (1967), pp.203~208
- 13) 音谷登平 他：カルシウム鋼, 丸善株式会社, (1981), pp.6~8