

研究論文

CO₂ 용접의 단락이행 조건에서 스파터 발생과 파형인자와의 관계

김희진* · 강봉용* · 이강희** · 유중돈**

Relation between Spatter Generation and Waveform factor of CO₂ Welding in Short-Circuit Condition

H. J. Kim*, B. Y. Kang*, K. H. Lee** and J. D. Yoo**

Abstract

Waveforms of CO₂ gas shielded arc welding in short circuit transfer mode was studied with the waveform analysis program, which can calculate various waveform factors such as number of short circuit event, mean and standard deviation of short circuit time and arc time. The calculated values of these factors were correlated independently or in combination with the spatter generation rate to figure out the most reliable index for evaluating spatter generation and further for arc stability. As a result of this study, it was confirmed that the spatter generation tends to decrease with the increase of short circuit frequency. Further to this, it was also found that as the short circuit frequency increases the short circuit event becomes more uniform resulting in the decrease of standard deviations (σ values) of short circuit time and arc time. This result demonstrated that these factors are strongly correlated with each other and thus any one of these factors can be used for the evaluation index. In the discussion, however, short circuit frequency was proposed for the most practical index in evaluating the arc stability of short circuit transfer mode since it is the one which could be monitored in-process condition without any complex caculation process.

1. 서 론

용접자동화 추세가 확산하면서 GMA용접이 확대 적용되고 있는데, CO₂가스를 보호가스로 사용하는 CO₂용접은 아크가 불안하고 용접 스파터 발

생량이 많다는 단점에도 불구하고 우리나라에서는 가스비용이 저렴하다는 장점이 있어 광범위하게 적용되고 있다. CO₂용접을 포함한 GMA용접에서 스파터 발생량은 용접조건, 용접전원, 용접 와이어의 종류 및 화학조성 등 여러 가지 요인에 의해 영향을 받는 것으로 알려지고 있다.^{1~4)} 이들 요인

*1997년 12월 29일 접수

* 정희원, 한국 생산기술 연구원

** 정희원, 한국 과학기술원

중에서 용접조건은 용적이행 모드를 결정하기 때문에 스파터 발생량과 매우 밀접한 관계를 가지는 인자가 된다. 본 저자들은 이미 CO₂용접의 용적이행 현상을 단락이행, 천이이행, 입상용적(globular) 이행으로 분류하고 각각의 조건에서 스파터 발생량을 측정하여 그 결과를 보고한 바 있다. (1) 이에의하면, 일정한 송급속도에서 스파터 발생량은 용접전압에 의해 커다란 변화를 보여주는데, 단락 이행 구간(저전류)에서는 스파터 발생량이 최소가 되는 용접전압 조건이 존재하고 있는 반면, 천이이행 구간(중전류)에서는 최대가 되는 조건이 존재하며, 입상 용적이행(고전류)에서는 용접전압이 증가함에 따라 단순히 증가하는 경향을 보여준다고 하였다. 이러한 결과는 용적이행 모드가 스파터 발생에 지대한 영향을 끼치고 있음을 보여 주었을 뿐만 아니라, 동일한 용적이행 모드에서도 용접전압에 따라 스파터 발생량은 커다란 차이가 있음을 보여주었다. 따라서 스파터 발생량에 미치는 용접조건의 영향을 보다 명확히 규명하고 나아가 스파터 발생량을 감소시키기 위해서는 용적이행 현상을 정량화 할수 있는 인자를 도출하는 것과 각각의 인자들과 스파터 발생량과의 상관관계를 조사하는 것이 필요하다고 하겠다.

그러나 지금까지 수행된 연구들을 살펴보면, 용적이행 현상에 대한 정량적 평가는 주로 단락이행 모드에 한정되어 있었으며, 평가결과는 용접 작업자가 느끼는 용접작업성과 비교되었다.⁵⁻⁸⁾ 예를들면 Mita등⁵⁾은 아크시간, 단락시간, 평균아크전류, 평균단락전류로 구성된 지수(Mita index)를 제시하고, 이 지수가 작을수록 아크 안정성에 대한 용접 작업자의 평가가 좋아진다고 하였다.

국내에서는 원등⁶⁾ 이 Mita 지수를 재평가하여 아크시간과 단락시간의 표준편차만으로 구성된 보다 간단한 지수를 제안하였는데, 제안된 지수의 평가대상으로는 Mita지수를 사용하였다. Liu등⁷⁾은 단위시간당 발생하는 단락횟수를 측정한 결과 주어진 전류에서 단락횟수가 최대가 되는 전압조건이 용접작업자가 가장 선호하는 조건과 일치한다고 하였다. 그 밖에도 Arai등⁸⁾은 아크시간의 표준편차가 아크 안정성과 강한 상관 관계를 가지고 있다고 하였고, Shinoda등⁹⁾은 단락이행 V-I곡선에서 V-I면적의 표준 편차가 작을수록 안정된 아크라고 하였다.

이상과 같이 앞서 수행한 모든 연구에서는 아크 안정성 평가지수가 여러가지 형태로 정량화 되어 있을 뿐만 아니라, 지수의 타당성을 검증하는 비교대상을 작업자의 평가에만 의존함으로써 정성적인 검증에 그치는 한계가 있었다.

따라서 본 연구에서는 용접 작업성을 확실히 정량화하기 위한 목적으로 이를 스파터 발생량으로 대체하고, 보다 넓은 전류 범위에서 평가 가능한 인자를 도출하기 위하여 이행모드 별로 분리하여 각각에 대해 평가하고자 하였다. 즉 앞서 언급한 용적이행 구간별로 주요한 파형인자를 정량적으로 평가하고, 이의 결과를 스파터 발생량과 연계시켜 상관성이 가장 높은 파형인자를 규명하고자 한 것이다. 본 보에서는 일차적으로 단락이행 조건에서 보여주는 파형인자와 스파터 발생량의 상관관계를 검토하였다.

2. 실험 기자재 및 실험 방법

본 실험에 사용된 용접 전원은 350A급 SCR제어 형으로써 국내 S사에서 제작된 것이었다. 실험에 사용된 용접재료는 전기도금 방법에 의해 Cu도금된 직경1.2mm의 CO₂용접용 와이어(KS 및 JIS규격 YGW11, AWS규격 ER70S-G) 로써, 와이어 화학 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition (wt. %) of welding wire

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.07	0.78	1.37	0.014	0.009	0.26

본 연구에서는 별도의 스파터 발생량 측정 실험을 행하지 않고 전 보에서 보여준 실험 결과를 일부 활용하였는데, 본 연구에 사용한 실험 결과는 Table 2와 Fig. 1과 같다.

본 연구에 사용된 시험 결과는 와이어 송급속도를 3.6m/min로 일정하게 한조건에서 용접 전압을 16.6V~23.4V범위에서 변화 시키면서, 각각의 조건에서 측정된 스파터 발생율(SGR)과 용접전류·전압파형이다. 모든 조건에 금속이행형태는 단락이행 모드였으며, 스파터 발생율은 Fig. 1에서 보듯이 용접전압이 증가함에 따라 감소하였다가 증가하

Table 2. Welding conditions and the result of spatter generation rate (SGR)

WFR* (m/min)	GTWD** (mm)	Travel speed (mm/min)	Voltage (V)	Current (A)	SGR (%)	
3.6	14	250	16.6	165	1.85	arc stop
			17.9	162	0.85	
			19.9	153	0.67	
			20.2	158	0.89	
			21.7	143	1.18	
			22.1	148	1.19	
			23.4	139	3.18	arc stop

* WFR = wire feeding rate

** CTWD = Contact tip to work distance

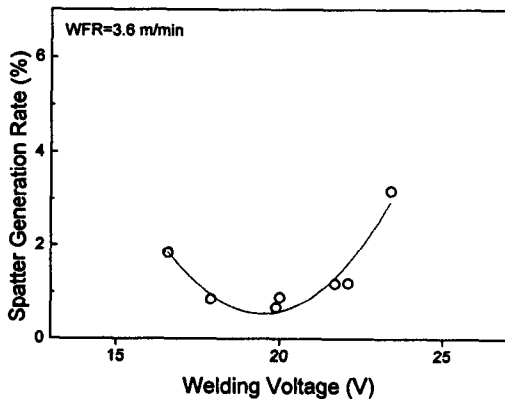


Fig. 1 Spatter generation rate versus rate versus welding voltage setting in the condition of short circuit transfer mode

는 경향을 보여주어 19.9V에서 최소의 발생율을 보여주었다. 용접전압이 16.6V와 23.4V인 경우에는 아크가 매우 불안정하였으며, 아크가 진행되는 동안 아크끊김 현상이 1초당 2~3회 발생하였다.

용접 전류 전압파형은 스패터 발생량 실험을 하는 동안에 '용접 전류·전압 파형 측정장치'를 이용하여 20kHz의 샘플링 속도로 2초동안 측정하고 전산처리 하여 필요한 파형변수를 계산하였다. 전산처리에 의해 구하고자 한 파형변수는 단락횟수(short circuit frequency), 단락기간(short circuit time)과 아크기간(arc time)의 평균 및 표준편차 등이었다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 단락이행의 구분

Fig. 2는 단락이행의 용접전류 전압파형을 보여 주고 있는데, 전압파형에서 단락기간(t_s)과 아크기간(t_a)이 확실히 구분되어 나타나고 있다. 그런데 본 그림에서 화살표로 표시한 단락은 단락기간이 매우 짧은 경우로써 전류의 상승이 거의 동반되지 않고 있다. 따라서 이와같은 단락은 정상적인 단락과 구분하여 생각할 필요가 있었기 때문에 단락기간 분포를 도표화하여 보았다.

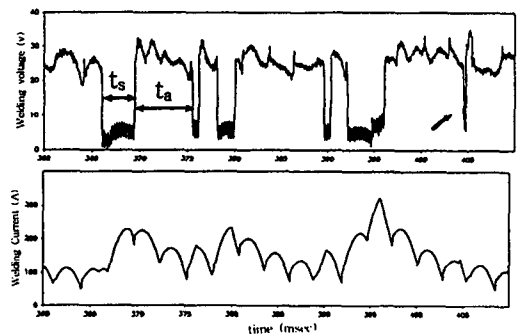


Fig. 2 Typical waveform of short circuit transfer

Fig. 3은 단락기간에 따른 단락횟수의 분포를 보여주고 있는데, 이로부터 단락기간은 최하 0-0.2msec에서 최대 9.6-9.8msec에 걸쳐 분포하고 있음을 알수 있었고, 이들의 밀집된 분포형태로부터 단락기간이 2msec이하인 단락군과 2msec이상

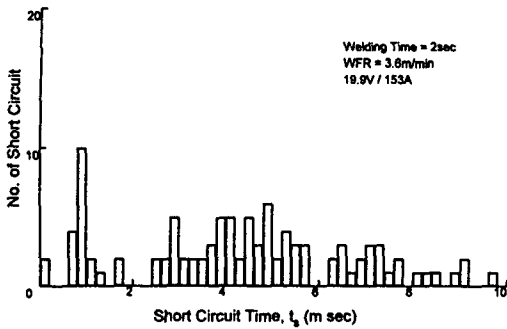


Fig. 3 Result of statistical analysis on the short circuit time

인 단락군으로 구분할 수 있었다. Arai등⁸⁾은 전자를 'A형 단락' 후자를 'B형 단락' 이라고 하였는데, 본 보고서에서는 전자를 순간단락 (instantaneous short circuit) 이라 하고, 후자를 정상단락 (normal short circuit) 이라고 명명 하였다. 순간단락은 용융지의 요동과 와이어 끝에 형성된 용적의 흔들림으로 인하여 용적과 용융지에 순간적으로 접촉 되었다가 바로 떨어지는 현상으로 실제 용융금속의 이행은 일어나지 않는 것으로 설명되고 있다.⁸⁾ 그리고 순간단락은 단락의 초기 상태에서 바로 재아크 상태로 진행되기 때문에 스파터 발생의 원인이 되고 이 때에 발생되는 스파터는 크기가 크다고 하였다.¹⁰⁾

3.2 용접 전압에 따른 파형변수의 변화

단락이행의 특징은 단락상태와 아크 상태가 순차적으로 일어난다는 것이다. 따라서 단락횟수는 이러한 이행현상을 가장 쉽게 정량화 할 수 있는 변수가 된다. Fig. 4는 용접전압과 단위시간당 발생하는 단락횟수와 용접전압과의 관계를 보여준다. 단락은 순간단락과 정상단락 으로 구분하여 각각의 변화를 보여주고 있는데, 모두 용접전압이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 정상단락은 17.9V에서 최대치인 65회가 되었으며, 순간 단락은 19.9V에서 최대치인 20회에 도달하였다. 그리고 전체 단락횟수는 19.9V에서 최대치인 77회에 도달하였는데, 이 조건은 스파터 발생량이 최소가 되는 조건과 일치하였다. 따라서 단락횟수는 스파터 발생량과 상관성이 높은 인자라고 할 수 있다. 한편 전체단락 횟수가 최대가 되는 조건은 순간단락이 최대치가 되는 조건이기도

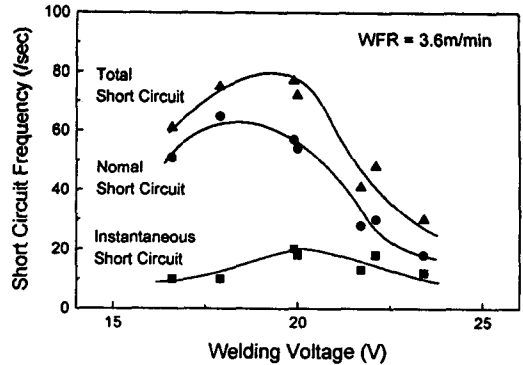


Fig. 4 Result of statistical analysis on the number of short circuit

하다. 앞에서도 언급하였듯이 순간단락은 입자 크기가 큰 스파터를 발생시키기 때문에 스파터 발생량을 증가시키는 역할을 한다고 알려져 있는데, 본 연구의 결과에서는 그러한 경향을 보여주지 않고 있다. 즉 저전류 단락이행 조건에서는 순간단락 현상이 스파터 발생량에 커다란 영향을 주지 못한다고 할 수 있다. 이는 아마도 와이어 끝에 생성되는 용융금속의 양과 크기가 작은 상태에서 단락현상이 일어나기 때문이라고 생각된다.

다음으로는 용접전압에 따른 단락기간(t_s)의 평균값과 표준편차의 변화를 도표화 하였는데, 그 결과를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 단락기간의 평균 (mean (t_s))은 전압이 증가함에 따라 초기에는 감소하다가 20V이상에서는 3.1~3.4V 범위에서 일정한 값을 보여주고 있는 반면, 표준편차($\sigma(t_s)$)는 감

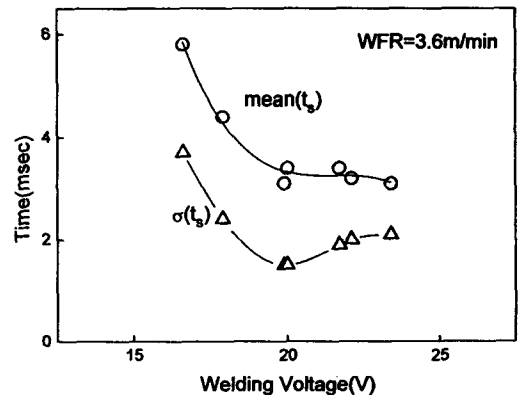


Fig. 5 Mean and standard deviation of short circuit time versus welding voltage setting.

소하다가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이들결과를 Fig. 1의 스파터 발생량 결과와 비교하여 보았을 때 단락기간의 평균치는 스파터 발생량과 상관성이 없는 것으로 보이며, 단락기간의 표준편차는 스파터 발생량과 유사한 경향을 보여주어 어느 정도 상관성이 있음을 알 수 있다. 한편 Fig. 6는 아크기간의 평균(mean(t_a))과 표준편차($\sigma(t_a)$)를 용접 전압에 따라 도표화 한 것인데 모두 용접전압이 증가함에 따라 초기에는 감소하다가 증가하는 모양을 보여주어 스파터 발생률의 결과와 유사한 경향임을 알 수 있었다. 특히 표준편차의 변화는 스파터 발생량과 거의 동일한 양상을 보여주어 상관성이 매우 높다는 것을 알 수 있었다.

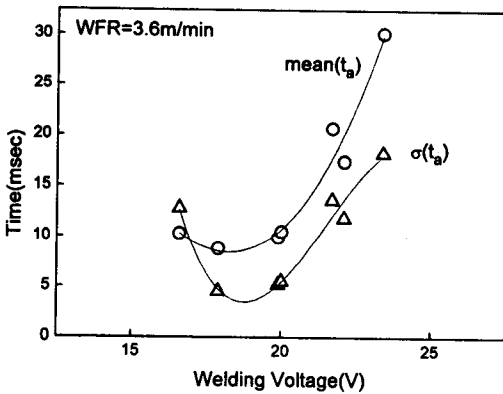


Fig. 6 Mean and standard deviation of arc time versus welding voltage setting.

다음으로, 스파터 발생량과 상관성이 높아 보이는 $\sigma(t_a)$ 와 $\sigma(t_w)$ 의 곱을 용접전압에 따라 플롯(plot)한 결과, Fig. 7에서 보는 바와 같이 스파터 발생량의 변화와 거의 동일한 모양의 곡선을 얻을 수 있었다. 그리고 스파터 발생량과 상관성이 높은 단락횟수와 $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ 는 Fig. 8에서 보듯이 직선적인 관계를 보여주는데, 이러한 결과로부터 단락횟수와 $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ 는 상호상관성이 매우 높은 인자라는 사실을 알 수 있었다.

3.3 파형인자와 스파터 발생율과의 관계

지금까지의 결과에서 알 수 있듯이, 스파터 발생량과 가장 상관성이 높은 파형인자는 단락횟수와 $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ 라 할 수 있다. 따라서 이들과 스파터 발생량의 상관관계와 상관성 정도를 보기 위

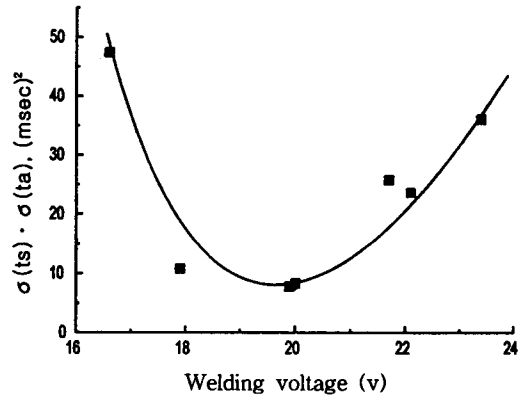


Fig. 7 Variation of $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ with welding voltage setting

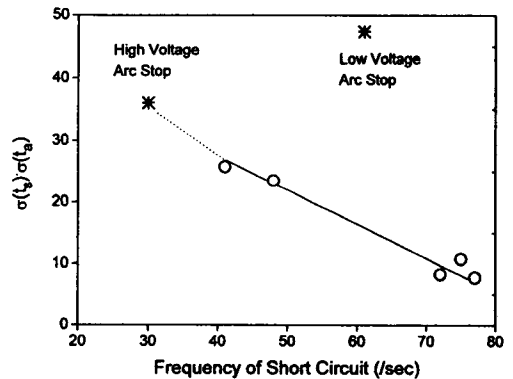


Fig. 8 Variation of $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ with the frequency of total short circuit

하여 각각을 그림화하였는데, 그 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에서 보여주고 있다. 먼저 Fig. 9는 총 단락 횟수와 스파터 발생량의 관계를 보여주는 그림인데, 이 그림에서 아크 끊김이 발생한 두조건을 제외시키면 단락횟수와 스파터 발생율은 거의 직선적인 관계를 보여 주고 있다. 즉 단락횟수가 증가할수록 스파터 발생율은 직선적으로 감소한다고 할 수 있다.

다음으로 Fig. 10는 $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ 와 스파터 발생율과의 관계를 보여주는 그림인데, 아크 끊김이 발생한 한 조건을 제외하면 이 또한 거의 직선적인 관계를 보여주었다. 다시말하면 $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ 의 값이 적어질수록 스파터 발생량은 직선적으로 감소한다고 할 수 있다. 여기서 $\sigma(t_a) \cdot \sigma(t_w)$ 가 적

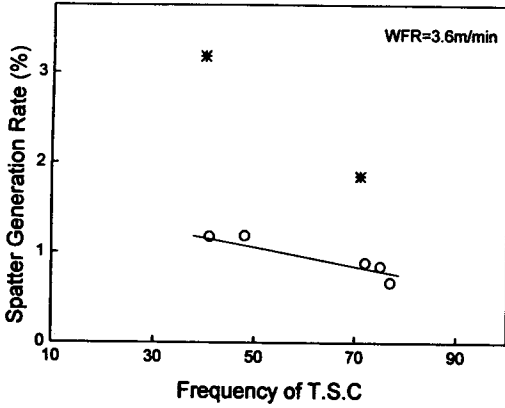


Fig. 9 Relation between spatter generation rate and frequency of total short circuit

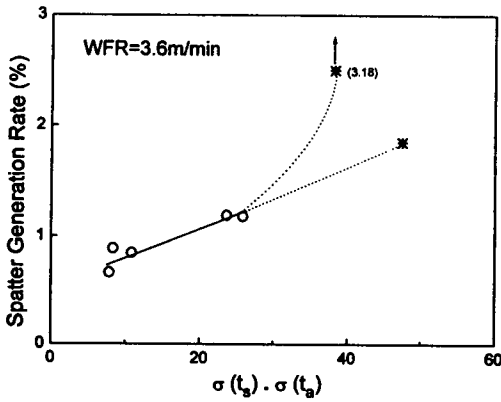


Fig. 10 Relation between spatter generation rate and $|\sigma(t_s) \cdot \sigma(t_a)|$

어진다고 하는 것은 단락과정이 보다 규칙적으로 일어난다고 하는 것을 의미하는데, 이는 V-I폐곡선으로 확인할 수 있다. Fig. 11은 3가지 용접전압 조건에서의 V-I폐곡선을 보여주는데, $|\sigma(t_s) \cdot \sigma(t_a)|$ 값이 가장 작은 19.9V 조건은 최대 전류치가 350A 정도로 낮고 V-I폐곡선의 면적이 작으며, 폐곡선이 상대적으로 규칙화 되었음을 알 수 있다. 앞에서도 언급하였듯이 Shinoda등⁹⁾은 폐곡선 면적의 표준편차로써 아크 안정성을 평가하면서, 표준편차가 작아질수록 아크 안정성이 증가한다고 하였는데, 이는 결국 단락이행 규칙성을 의미하는 것으로 본 연구의 $|\sigma(t_s) \cdot \sigma(t_a)|$ 와 상관성이 높은 인자라고 할 수 있다. 즉 단락이행과정이 규칙적으로 일어

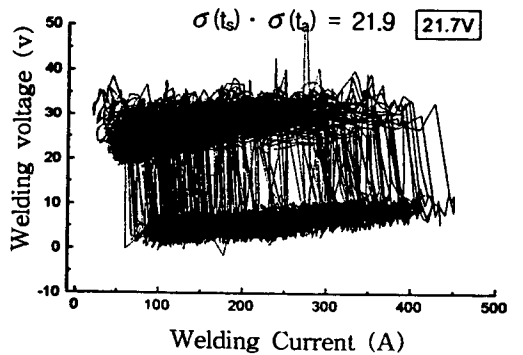
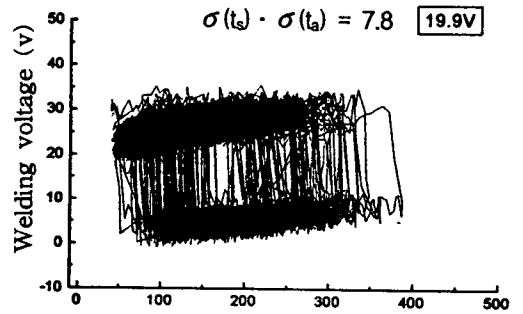
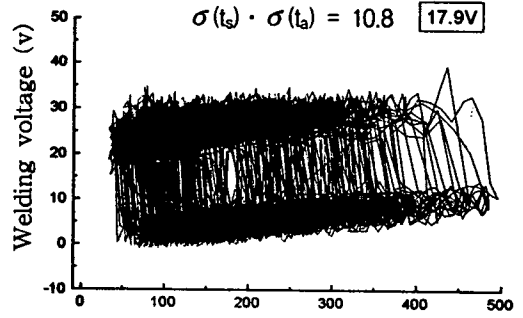


Fig. 11 V-I closed loops of three different conditions

날수록 스페터 발생량은 감소한다고 할 수 있다. 결국 금속이행이 단락 이행모드로 이루어지는 저전류 영역에서는 스페터 발생이 최소화 되는 최적의 용접 전압조건 이라고 하는 것이 단락횟수가 최대가 되는 조건이며, 그 조건에서는 단락이행과정이 가장 규칙적으로 일어나는 조건이라고 할 수 있다. 이러한 사실은 지금까지 여러 연구자들이 보고한 안정성 지수가 비록 다양한 형태로 표현되었다고 하지만, 이들 지수간의 상호 연관성이 매우 높기 때문에, 결과적으로 이들 모두 아크 안

정성 평가 지표로서 유효하였던 것이다. 그러나 실제 이들 평가지표를 활용하는 측면에 있어서는 평가지표에 따라 복잡한 계산 과정을 거쳐야 하기 때문에 많은 차이를 보여준다. 따라서 본 연구에서는 단락횟수를 아크 안정성 평가 지표로 제안하고자 하는데, 이는 스파터 발생량과의 상관성이 높을 뿐만 아니라, 복잡한 계산과정을 거치지 않고도 가능하기 때문이다. 특히 단락횟수는 복잡한 계산 과정을 거치지 않고도 측정가능하고, 실시간 평가가 가능하기 때문에 이를 아크 안정성의 평가 지표로 하는것이 현실적으로 가장 바람직 하다고 하겠다.

4. 결 론

CO₂ 용접의 단락이행 조건에서 스파터 발생량과 파형변수와의 상관관계를 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 스파터 발생량과 상관성이 높은 파형변수는 단락횟수와 $\sigma(t_w)$, $\sigma(t_w)$ 그리고 $|a(t_w) \cdot \sigma(t_w)|$ 이었으며, 실시간 평가를 위해서는 계측이 간단한 단락횟수를 평가지표로 하는 것이 바람직 하다고 하겠다.

2) 스파터 발생량은 단락횟수가 증가 할수록 직선적으로 감소하였는데, 단락횟수가 증가하면 $|a(t_w) \cdot \sigma(t_w)|$ 도 직선적으로 감소하여 단락이행 과정이 보다 규칙화 되어가는 경향을 보여 주었다.

3) 용접 전압 조건에 따라 순간단락 횟수는 20회 정도까지 증가하였으나 스파터 발생량에는 크게 영향을 주지 못하였다.

참 고 문 헌

1. 강봉용, 김희진 : CO₂용접의 스파터 발생에 미치는 용적이행 모드의 영향, 대한용접학회지, 제15권, 제2호 (1997), pp.140-148

2. 안영호 : GMA 용적이행 현상에 미치는 제인자의 영향, 신기술 신상품 용접기술 세미나, 생산기술연구원 (1996)
3. E.K.Stava : Low spatler Welding, Australasian Welding Journal, 4th Quarter, (1995), p.21
4. H. Yamamoto : Recent advances in inverter controlled arc welding power sources and their application, J. of Japan Welding Soc. Vol. 58, No.4 (1989), p.273
5. T. Mita, A. Sakabe and T. Yokoo : Quantitative estimatipon of arc stability on CO₂ gas shielded arc Welding, 일본용접학회 논문집, 제5권, 제 1호, (1987), pp.75-80
6. 원윤, 부광석, 조형석 : GMAW공정에서 아크 안정성의 실시간 측정, 대한용접학회지, 제8권, 제1호 (1990), pp.31-42
7. S. Liu, T. A. Siewert : Metal transfer in gas metal arc welding, Welding J., Vol.68, No.2, (1989). pp.52s-58s
8. T. Arai ,M. Kobayashi, T. Yamada, M. Rokujo, K. Hirakoso and T. Kaneko : The investigation of arc phenomena by means of a computer, 일본용접학회지, Vol. 1, No.3, (1983), pp.317-322
9. T. Shinoda and M. Nishikawa : Monitoring and signal processing of Short Circuiting metal transfer of metal active gas welding process, Proceedingo of Int. Conf. on Joining of materials, May 31~June 2 (1995), pp.558-565
10. Y. Shuyian and G. Zheng : Effect of arc physics on developing CO₂ arc welding, China Welding, Vol.3, No.1 (1994), p.1