

**研究論文**

## CO<sub>2</sub> 용접의 천이이행 조건에서 스파터 발생과 파형인자와의 관계

강봉용\* · 이창한\*\* · 김희진\* · 장희석\*\*\*

### Relationship between Spatter Generation and Waveform Factors in Transitional Condition of CO<sub>2</sub> Welding

B. Y. Kang\*, C. H. Lee\*\*, H. J. Kim\* and H. S. Chang\*\*\*

#### Abstract

CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding has been characterized with its harsh arc compared to Ar-based shielding gases and with its high level of spatter specially in welding current range of 250~300 amperes. In this range of welding current, the metal transfer mode showed to be changed from short circuit to globular with the increase of welding voltage resulting in so-called the transitional mode in which both modes of transfer appeared together. To characterize the transitional mode, the short circuit events were divided into two groups, i. e. normal short circuit (N. S. C) which has short circuit time ( $t_s$ ) over 2msec and instantaneous short circuit (I. S. C) of  $t_s \leq 2$ msec. The experimental results showed that the number of N. S. C decreased almost linearly with the increase of welding voltage and appeared to be not related with spatter generation rate. However I. S. C became to be pronounced in the transitional condition and its number reached the maximum value at around 29.0 volts. Considering the relation with the spatter generation rate, it was found that the number of I. S. C had a very strong correlation with the spatter generation rate of the transitional condition. It was further demonstrated that spatter generation rate decreased quite linearly with the decrease of I. S. C frequency. It implies that I. S. C is the most important waveform factor controlling the spatter generation of the transitional mode, i. e. in the middle range of welding current. Based on these results, It was discussed that in the transitional mode the basic concept of waveform control for suppressing spatter generation would be different from the one applied for typical short circuit transfer mode of low welding current.

※ 1998년 1월 16일 접수

\* 정회원, 한국생산기술 연구원

\*\* 학생회원, 한국생산기술 연구원 및 명지대학교

\*\*\* 정회원, 명지대학교

## 1. 서 론

GMA용접은 솔리드(solid) 와이어를 소모전극으로 사용하는 용접법인데, 그중에서 CO<sub>2</sub>용접은 CO<sub>2</sub>가스를 보호가스로 사용하는 용접법이다. 본 용접법은 가스비용이 저렴하다는 장점 때문에 스파터 발생량이 많다는 단점에도 불구하고 국내에서는 가장 많이 사용되고 있는 용접법이다. CO<sub>2</sub>용접에서 스파터가 과다하게 발생하는 것은 반발이행(repelled transfer)이라고 하는 CO<sub>2</sub>용접의 고유특성에 기인하는 것으로서, 발생량은 250~300A 범위에서 최대치를 보여주고 있다<sup>1)</sup>. 그러나, 최근 인버터 제어기술이 용접전원에 도입·응용되면서 CO<sub>2</sub>용접의 스파터 발생량을 크게 감소시킬 수 있게 되었다.

인버터 용접전원의 특징은 용접전류 및 전압을 순간적으로 제어할 수 있다고 하는 것인데, 그로 인하여 스파터가 발생하는 순간을 포착하여 용접파형을 제어함으로써 스파터 발생을 억제시키는 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>. CO<sub>2</sub>용접에서 용접파형제어가 적용 가능하였던 것은 용접전류 및 전압이 주기적인 파형형태를 보여주는 단락이행 현상이 저전류측에서 나타나고 있고, 이러한 파형이 한 주기 진행되는 과정에서 스파터가 발생하는 순간이 규명됨으로써, 이러한 파형을 적절히 제어함에 따라 스파터 발생을 억제시킬 수 있게 되었기 때문이다. 그런데 파형을 적절히 제어하기 위해서는 기본적으로 스파터 발생을 지배하는 파형인자가 규명되어 있어야 하며, 다음으로는 규명된 인자가 어떻게 제어되어야 한다는 제어 개념이 수립되어 있어야 한다.

저자들은 전보에서<sup>3)</sup> 이미 단락이행(저전류) 조건에 대해 보고하였는데, 이조건에서는 스파터 발생정도를 결정하는 파형인자가 단락횟수 또는 단락이행모드의 규칙성이라고 하였다. 즉 단락횟수가 증가할수록 이행모드는 규칙화되었으며 스파터 발생율은 감소하였다. 그러나 참고문헌(1)에서도 언급하였듯이, CO<sub>2</sub>용접에서 스파터 발생량은 250~300A의 중전류조건에서 최대가 되기 때문에 이범위에서 스파터 발생과 상관관계가 높은 파형변수를 규명하는 것 또한 매우 중요하다고 하겠다. 그런데 중전류 범위에서는 단락이행과 입상용적(globular)이행이 혼재되어 나타나는 천이이행

조건이 되기 때문에, 단락이행 조건의 결과를 그대로 적용할 수는 없을 것이다. 그럼에도 불구하고, 지금까지 국내외에서 수행된 많은 연구는, 전보에서도 언급한 바와 같이, 저전류 영역인 순수 단락이행 조건에 한정되어 이루어졌을 뿐, 천이이행이 일어나는 중전류 조건을 대상으로 하여 스파터 발생과 파형인자의 상관관계를 규명하고자 하는 연구는 찾아 볼 수가 없었다. 따라서 본 연구는 천이이행 조건에서, 즉 스파터 발생량이 가장 많은 중전류 조건에서 스파터 발생량과 상관관계가 높은 파형변수를 찾고, 나아가 파형제어기술이 지향하여야 할 방향을 제시코자 하였다.

## 2. 실험 기자재 및 실험 방법

본 실험에 사용된 용접전원은 정격전류 600A의 인버터 제어형(이하 인버터 600A라 칭함)으로써 일본의 D사에서 제작된 것이었다. 그리고 비교용접 전원으로써 정격전류 350A급의 SCR 제어형(이하 SCR 350A이라 칭함)과 또 다른 인버터 제어형 350A급(이하 인버터 350A라 칭함)을 사용하였다. 그럼으로 본 논문에서 별도의 지칭이 없으면 모두 인버터 600A의 시험결과이다.

그리고, 실험에 사용된 용접재료는 전기도금 방법에 의해 Cu도금된 직경 1.2mm의 CO<sub>2</sub>용접용 와이어(JIS규격 YGW11, AWS규격, ER70S-G)로써, 와이어 화학조성은 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

용접조건은 와이어 송급속도(wire feeding rate, WFR)를 9.0m/min, CTWD(contact tip to work distance)를 16mm, 용접 속도를 350mm/min, 보호가스 유량을 25 l/min로 일정하게 한 조건에서, 용접 전압만을 23.8V~33.1V범위에서 변화 시켰다. 와이어 송급속도가 일정한 조건에서 용접전압이 증가하게 되면 용접전류는 상승하게 되는데, 실험결과 259A ~ 276A의 범위에서 증가하였다. 용접전압을 증가시키면서 각각의 조건에서 스파터 발생율(spatter generation rate, SGR)과 용접전류

· 전압파형을 측정하였다. 스파터 발생량 측정방법 및 발생을 계산방법, 그리고 파형 측정방법은 전보<sup>1)</sup>와 동일하다. 파형은 전압 및 전류 모두 10kHz의 샘플링속도로 2초동안 측정하였다. 측정된 파형으로부터 금속이행 모드(mode)를 먼저 판별하고, 파형중의 단락이행 성분에 대해서는 전산처리를 통하여 단락 특성을 규명한 다음, 단락 특성에 따른 단락횟수를 계산하였다.

### 3. 실험결과 및 검토

#### 3.1 금속이행 모드의 변화

CO<sub>2</sub>용접의 금속이행모드는 저전류측(와이어 송급 속도가 낮은 조건)에서 단락이행을, 중전류 조건에서는 천이이행을, 고전류측에서는 입상용적(globular)이행을 한다고 보고한 바 있다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 본 연구의 주제가 되는 천이이행 조건을 얻기 위하여 와이어 송급속도를 9.0m/min로 하였다. 그러나 본 조건에서도 금속이행모드는 용접전압에 따라 천이현상을 보여주었는데, 용접전압이 낮은 조건에서는 전형적인 단락이행 모드를 보이다가 용접전압이 증가함에 따라 입상용적 이행으로 완전히 천이하였다. 이렇게 천이하는 과정에서, 전보<sup>1)</sup>의 SCR 용접전원의 결과에서도 보여 주었듯이, 단락이행과 입상용적이행이 혼재되어 나타나는 조건이 나타 나는데, 이러한 이행형태를 천이이행이라고 하고, 천이이행이 나타나는 조건을 천이이행 조건이라고 하였다.

Fig. 1은 금속이행 모드가 변화하는 과정을 보여주는 용접전압 · 전류파형들인데, 23.6V로 용접전압이 낮은 경우에는 단락기간과 아크기간이 명확히 구분되어 나타나는 전형적인 단락이행 모드의 파형을, 33.6V와 같이 전압이 높은 조건에서는 입상용적이행에 단락이행이 가끔 혼입되어 나타나는 파형을 보여준다. 그런데 29.0V에서는 단락이행 중간 중간에 (화살표로 표시한) 입상용적 이행이 혼입되어 있는, 즉 두가지 이행형태가 모두 나타나는 천이이행 파형을 보여주고 있다. 이러한 천이과정은 V-I페곡선(Fig. 2)의 형상변화에서도 뚜렷히 나타나고 있는데, 용접전압이 증가함에 따라 금속이행모드가 단락이행에서 입상용적이행으로 천이 되면서 단락이행 특성인 사각형 모양의 V-I페곡선의 면적이 축소되고, 그 숫자 또한 현격히 감소하고 있다.

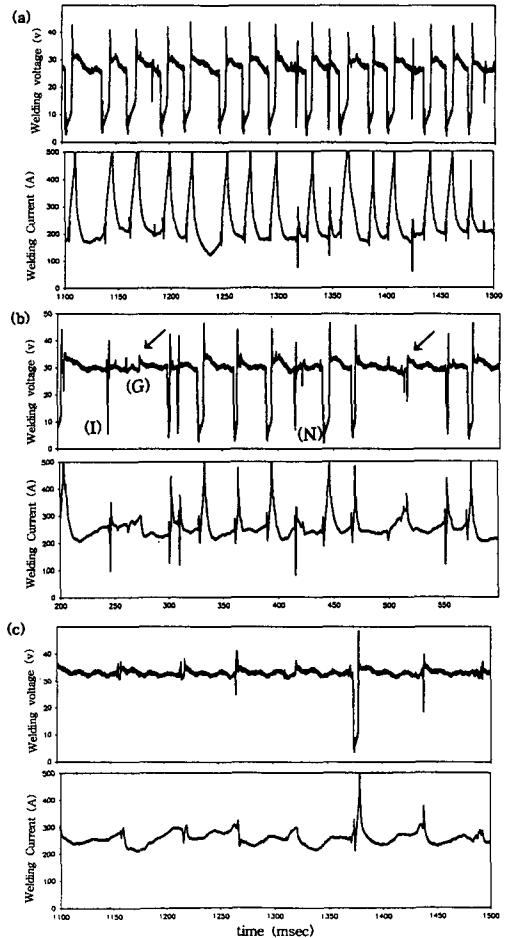


Fig. 1 Waveforms recorded with welding voltages of (a) 23.8V, (b) 29.0V and (c) 33.1V.

#### 3.2 단락 특성의 변화

단락이행에 있어서 단락 특성은 단락시간( $t_s$ )의 크기에 따라 순간단락( $t_s \leq 2\text{msec}$ )과 정상단락( $t_s > 2\text{msec}$ )으로 구분된다고 하였다. 이러한 단락 특성에 미치는 용접전압의 영향을 보기위하여 Fig. 1의 조건에서 2초동안 기록된 파형을 분석하여 단락시간에 따른 단락횟수를 계산하여 Fig. 3의 그림으로 보여주었다. 이 그림에서 보여주듯이 정상적인 단락 이행조건(23.8V 조건)에서는 단락특성이 2msec를 기준으로 하여 순간단락군과 정상단락군으로 확실히 구분되어 나타나고 있다. 이러한 단락 특성은 저전류 단락이행 조건에서도 동일하게

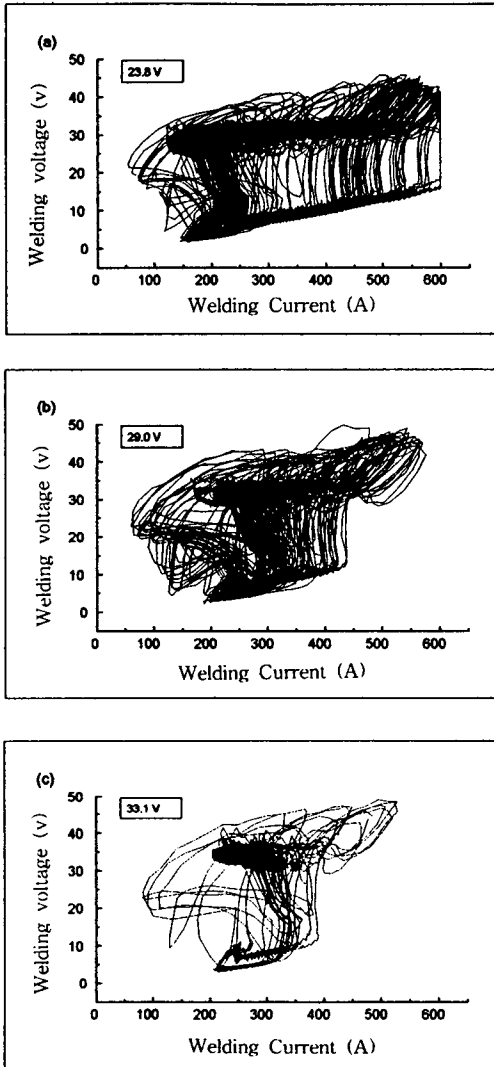


Fig. 2 V-I loops made with welding voltages of (a) 23.8V, (b) 29.0V and (c) 33.1V.

보여 주었던 특성이<sup>3)</sup>. 그러나 전압이 증가하여 천이이행 조건 (29.0V 조건) 이 되면, 정상단락의 횟수는 현격히 감소하면서 순간단락 횟수는 크게 증가하고 있다. 전압이 더욱 증가하여 33.1V가 되면 정상단락뿐만아니라 순간단락 횟수도 모두 감소하여 입상용적 이행으로 천이되었음을 보여주는 데 이때에도 단락현상은 가끔 발생하고 있다.

이상과 같은 단락특성 (정상단락 및 순간단락 횟수)의 변화를 용접전압 변화에 따라 살펴보면

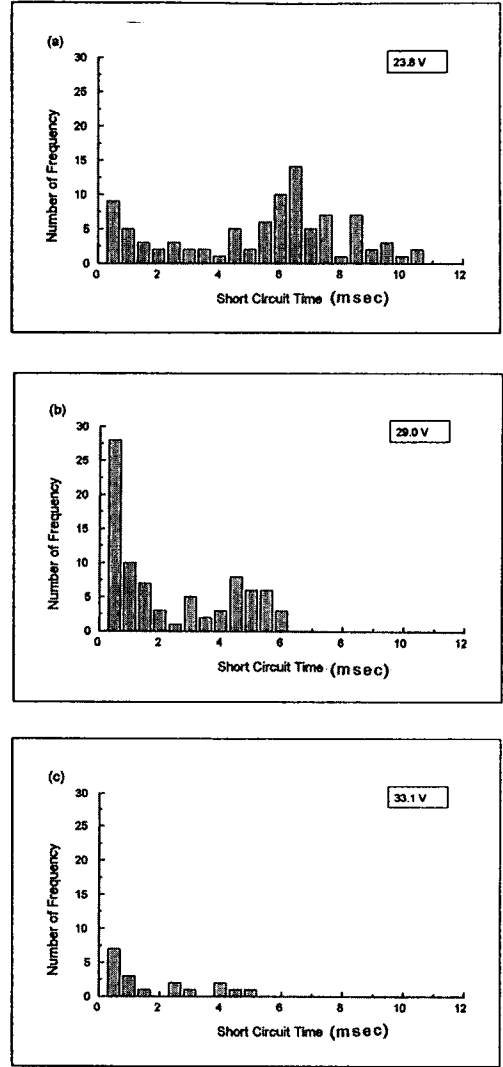


Fig. 3 Results of statistical analysis of short circuit time.

Fig. 4와 같은데, 정상단락은 (N.S.C) 용접전압이 증가함에 따라 직선적으로 감소하는 반면, 순간단락 (I.S.C)은 증가하다가 감소하는 경향을 보여 주어 29V에서 최대 25회/sec에 도달하였다. 그리고 전체 (total) 단락횟수는 28V이상의 용접전압에서 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있는데 이러한 변화는 금속이행 모드의 천이과정과 관련된 것으로 생각된다.

결국 금속이행이 단락이행에서 입상용적이행으

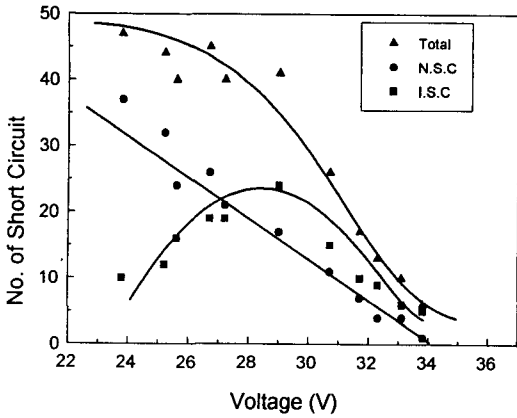


Fig. 4 Result of statistical analysis on the number of short circuit with welding voltage.

로 천이하는 과정에서 전체 단락이행 횟수와 정상 단락 횟수는 모두 감소하지만, 순간단락 횟수만은 천이과정에서 최대치를 기록하게 된다. 이러한 사실은 순간단락현상이 천이이행 모드를 대표할 수 있는 특성이 될 수 있을 뿐만 아니라, 천이이행모드를 정량화할 수 있는 지표로 사용될 수 있음을 의미한다.

### 3.3 천이이행 조건에서의 파형분석

지금까지의 파형분석 결과로부터, 천이이행은 정상적인 단락이행과 입상용적이행에 의해 급속이행이 이루어지는데, 그 과정에서 순간단락현상이 다수 혼입되어 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 천이이행조건에서는 3가지의 현상이 동시에 나타나게 되는데, 이러한 각각의 현상을 Fig. 1(b)의 천이이행 파형에 표시하였다. (N)은 정상단락이행이 일어나고 있는 파형부분을, (I)는 단락시간이 1msec정도인 순간단락 부분을, (G)는 입상용적이행이 일어나고 있는 부분을 보여주고 있다. 한편, 이들 각각의 특성을 비교하기 위하여 각각의 부분을 V-I 폐곡선화한 것이 Fig. 5(a), (b), (c)이다.

정상단락의 경우(Fig. 5(a))는 시계반대방향으로 진행되는 폐곡선을 형성하는데, 폐곡선의 모양은 사각형이며 파형제어 효과에 의해 사각형의 모서리 부위가 심하게 변형되어 나타나고 있다. 그 결과 전압 및 전류의 변동 폭은 각각 45V 및 400A로 변동폭이 넓은 것이 특징이다. 다음으로, 순간단락의 경우는

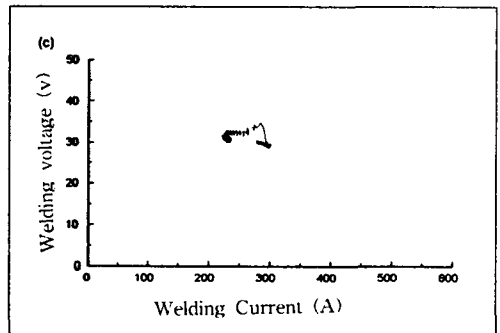
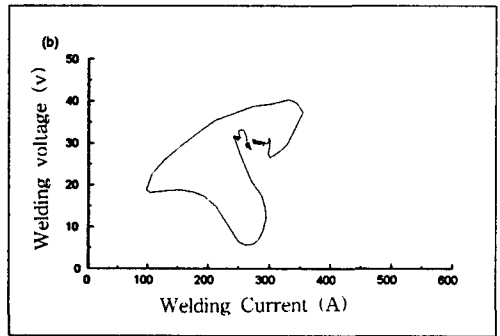
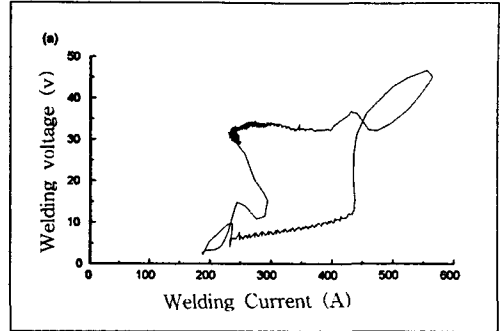


Fig. 5 V-I loops made with a part of waveform marked (a) by N, (b) by (I) and (c) by (G) in Fig. 2(b).

(Fig. 5(b)) 시계방향으로 진행되는 V-I 폐곡선을 형성하는데, 그 모양은 사각형이 되지 못하고 있다. 이는 단락시간이 짧아 전류상승을 동반하지 못한 상태에서 파형제어 효과가 중첩되어 저전류측으로 쏠려서 나타나기 때문이다. 따라서 전압 변동폭은 정상 단락의 경우와 마찬가지로 매우 크지만, 전류 변동폭은 250A정도로 크게 감소된다. 한편, 입상용적이행에서는 용적이 와이어 선단부로부터 이탈하는 순

간 아크 길이가 증가하는 관계로, Fig. 1(b)의 (G) 표시 부분과 Fig. 1(c)에서 보여주듯이, 용접전압은 순간적으로 4~5V정도 상승하고, 용접전류는 70~80A정도 감소하고 있다. 그리고 입상용적이행은 용접전압 파형상에서 불연속부를 남기는 특징을 보여주고 있다. 따라서 Fig. 1(b)의 (G)부분의 V-I곡선은 시계반대방향으로 진행되는 개곡선을 보여주게 되는데, 입상용적이행이 반복되면 나선형과 같은 곡선이 될 것으로 예상된다.

### 3.4 스패터 발생율의 변화

용접전압에 따른 스패터 발생율의 변화는 Fig. 6에서 보여주고 있는데, 용접전압이 증가함에 따라 증가하다가 감소하는 경향을 보여주어 29.0V에서 최대치인 3.78%를 기록하였다. 이러한 경향은 SCR용접전원의 실험결과<sup>1,4)</sup> 매우 유사한데, 단지 최대치가 다소 낮아졌을 뿐이다. 이러한 경향을 용적이행 특성과 비교하여 보면, 결국 단락이행에서 입상용적이행으로 천이하는 천이조건에서 스패터 발생율이 최대가 된다고 할 수 있다. 또한 Fig. 6의 스패터 발생율의 결과를 Fig. 4의 단락이행 특성과 비교하여 보면, 전체단락 횟수 및 정상단락 횟수는 상관성이 전혀 없음을 알 수 있다. 그러나, 순간단락 횟수는 순간단락 횟수가 최대가 되는 조건에서 스패터 발생율이 최대가 될 뿐만아니라, 순간단락 횟수가 증가함에 따라 스패터 발생율도 증가하는 경향을 보여주고 있어서 스패터 발생율과 상관관

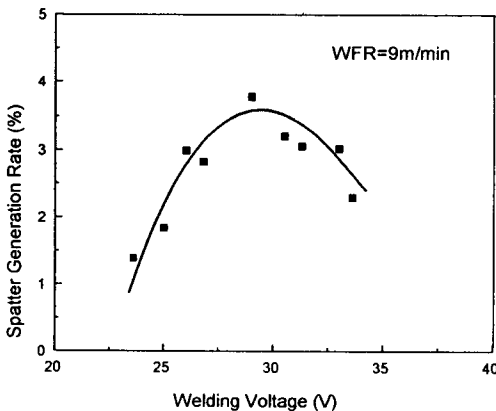


Fig. 6 Variation of spatter generation rate with welding voltage.

계가 매우 높은 인자임을 알 수 있다.

전보<sup>3)</sup>에서는, 저전류 단락이행 조건에서 스패터 발생율과 상관관계가 높은 인자를 규명하면서, 전체 (total) 단락횟수는 상관관계가 매우 높지만 순간 단락 횟수는 상관성이 적은 인자라고 하였다. 그러나, 본 연구의 중전류 범위에서는 순간단락횟수가 상관성이 가장 높은 인자가 되고 있다. 이러한 사실은 스패터 발생량 또는 아크 안정성 등을 평가함에 있어 하나의 평가 지표 (index)로써 저전류에서부터 고전류까지 전체를 평가하기 어렵다는 것을 의미하는 것이다. 예를 들면 단락이행 조건에서 유추된 평가지표 (index)를 가지고 중전류 범위에서 나타나는 천이이행 조건을 평가할 수 없다고 하는 것이다.

그와 마찬가지로, 스패터 발생을 억제시키는 파형 제어개념을 수립함에 있어도 용접조건에 따른 이행모드의 변화를 고려하여야 할 것이다. 즉 단락이행 조건에서는 단락이행의 횟수를 증가시키거나 규칙성을 향상시키는 방향으로 이루어져야 하지만, 천이이행 조건에서는 순간단락 횟수를 감소하는 방향으로 수립되어야 할 것이다. 그리고 입상용적이행 조건에서는 파형 자체가 뚜렷히 규명되어 있지 않기 때문에 파형제어 개념이 수립될 수 없다고 하겠다. 다시 말하면, 정상단락이나 순간 단락현상은 파형제어에 의해 제어가 가능하지만, 입상용적 이행현상은 제어할만한 파형특성을 가지지 못하기 때문에 제어가 불가능하다는 것이다. 그러나 Fig. 1(c)에서 보듯이, 입상용적이행조건이라고 하여도 입상용적이행만에 의해 모든 이행이 이루어지는 것이 아니고, 일부 정상단락과 순간단락이 혼입되어 있으므로 이들을 제어함으로써 스패터 발생량을 다소나마 줄일 수 있을 것이다.

### 3.5 용접전원에 따른 단락 특성의 변화

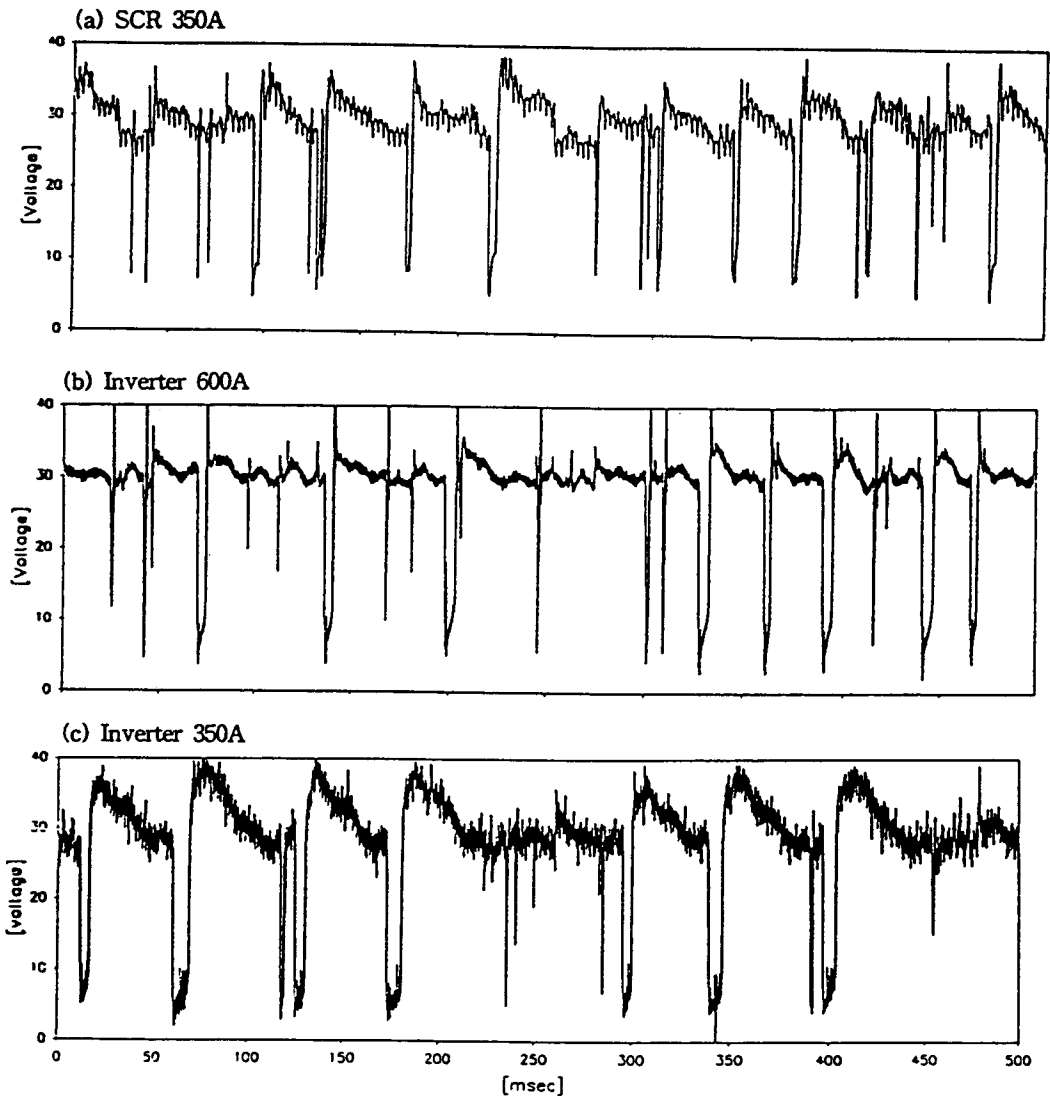
전절에서 천이이행 조건의 스패터 발생을 억제하기 위해서는 순간단락 횟수를 감소시키는 방향으로 파형제어 개념이 수립하여야 함을 제시하였다. 이와같은 제안의 타당성을 검증하기 위하여 SCR 350A 및 인버터 350A와같은 2개 기종의 용접전원을 추가하여 평가하였다. 용접은 스패터 발생율이 최대가 되는 29.0V에서 실시하고, 스패터 발

**Table 2.** Experimental results of three different power sources.

Power Source	Welding Condition		Experimetal Result				
	WFR (m/min)	Voltage (V)	Current (A)	No. of I. S. C/sec	No. of N. S. C/sec	Total No. of S. C	SGR** (%)
SCR 350A	9.0	28.8	266	32	13	45	4.70
Inverter 600A	9.0	29.0	264	24	17	41	3.78
Inverter 350A	9.0	28.7	262	8.5	15.5	24	2.06

\* WFR ; Wire Feeding Rate

\*\* SGR ; Spatter Generation Rate



**Fig. 7** Relationship between spatter generation rate and the number of I. S. C.

생율과 단락특성을 평가하였으며, 평가결과는 Table 2와 같다. 이 표에서 보는 바와 같이, 용접 조건이 동일함에도 용접전원의 기종에 따라 스파터 발생율은 커다란 차이를 보여주고있다. 본 연구에서 사용된 인버터 600A는 3.78% 인데 반하여, 비교평가용으로 채택한 SCR 350A 및 인버터 350A는 각각 4.70% 및 2.06%이었다.

한편, 단락특성에 따른 단락횟수를 비교하여 보면, 먼저 정상단락 횟수는 인버터 전원에서 다소 많아지는 경향이 있지만 그렇게 큰 차이는 보여주고 있지 않다. 그러나 순간단락 횟수는 기종에 따라 커다란 차이를 보여 주고 있는데, SCR 350A에서 32회/sec이던 것이 인버터 600A에서는 24회/sec로, 인버터 350A에서는 8.5회/sec로 감소하였다. 이를 스파터 발생율 결과와 비교하여 보면, 예상한 바와 같이, 순간단락 횟수가 감소함에 따라 스파터 발생율도 감소함을 알 수 있는데, 이들간의 상관성 정도를 보기 위하여 그림화한 것이 Fig. 7이다. 비록 데이터 포인트가 세점에 불과 하지만 이들간에는 거의 직선적인 상관관계가 있음을 보여주었다. 즉 순간단락 횟수가 감소하면 스파터 발생율은 직선적으로 감소한다는 것이다. 이러한 결과는 적어도 천이이행 조건에서 만든 스파터 발생율이 순간단락 횟수에 의해 지배되고 있다는 것을 의미한다. 따라

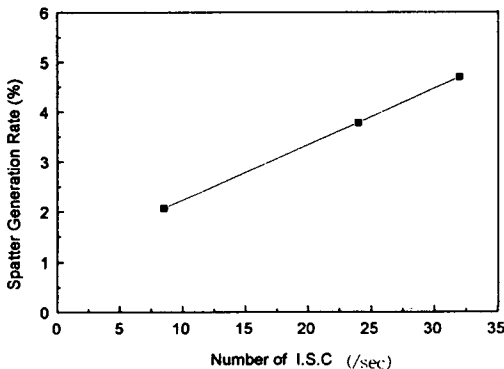


Fig. 8 Relationship between spatter generation rate and the number of I. S. C.

서 천이이행 조건에서의 파형제어 개념은 순간단락 현상을 억제할 수 있는 방법이 되어야 하며, 실제 파형제어 기능을 갖춘 인버터 용접전원은 이러한 개념의 파형제어를 응용되고 있는 것이다.

그러나 스파터 발생량을 지배하는 인자가 저전류층의 단락이행 조건에서는 단락횟수 또는 규칙성인 바, 파형제어 효과를 위해서는 이들을 동시에 적용할 수 있는 제어기법이 되어야 할 것이다.

#### 4. 결 론

CO<sub>2</sub>용접에서 스파터 발생량이 최대가 되는 천이이행조건(증전류 범위)에서 스파터 발생율과 파형인자와의 상관관계를 검토한 결과, 스파터 발생율은 순간단락 횟수에 의해 지배되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 용접 파형제어에 의해 스파터 발생을 억제하기 위해서는 순간단락 현상을 억제할 수 있는 제어 개념이 도입되어야 하는데, 실제 상업화 되어있는 인버터 용접전원에서는 정도의 차이는 있지만 그러한 개념이 응용되고 있음을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. 강봉용, 김희진 : CO<sub>2</sub>용접의 스파터 발생에 미치는 용적이행 모드의 영향, 대한용접학회지, 제15권, 제2호 (1997), pp. 140-148
2. 김기철, 강문진, 조시훈 : GMA/GTA 용접전원 System 및 제어기술, 대한용접학회지, 제14권, 제3호 (1996), pp. 1-11
3. 김희진, 강봉용, 이강희, 유중돈 : CO<sub>2</sub>용접의 단락이행 조건에서 스파터 발생과 파형인자와의 관계, 대한용접학회지, 투고중
4. H. Yamamoto : Recent advances in inverter controlled gas shielded arc welding power sources and their application in Japan, IIW Doc. XII-1148-89 (1989)