

# CO<sub>2</sub>용접에서 용접전원에 따른 스패터 발생량의 차이

김희진 · 이창한

## The Characteristics of Power Sources on the Spatter Generation Rate in CO<sub>2</sub> Arc Welding Process

H.J. Kim and C.H. Lee



김희진/한국생산기술연구원/1953년생/용접재료 개발 및 용접파형 연구



이창한/명지대학교 및 한국생산기술연구원/1974년생/용접파형연구

### 1. 서 론

가스메탈아크용접(GMAW)에서 솔리드와이어를 사용하는 CO<sub>2</sub>용접에서는 스패터가 다량 발생하기 때문에 생산성 향상에 있어서 커다란 장애요인이 되어 왔다<sup>1~3)</sup>. 이러한 스패터 문제를 해소하기 위하여 과거 20여년 동안 용접재료 측면에서<sup>3~7)</sup> 그리고 용접전원 측면에서 여러 가지 방법이 시도되어 왔는데, 그러한 연구개발 결과 스패터 발생량도 점차적으로 감소되었다. 특히 용접전원 측면에서는 용접전류의 파형 제어 기술이 지속적으로 개발되었는데, 한편에서는 펄스전류의 펄스파형을 제어(‘펄스파형제어기술’)함으로써 one-pulse one-drop 조건이 되도록 하였으며<sup>6~8)</sup>, 또 한편에서는 스패터발생 순간에 스패터가 발생되지 않도록 하는 ‘단락전류 파형제어기술’이 일본과 미국을 중심으로 매우 활발히 제안되었다<sup>9~16)</sup>. 요즘 시판되고 있는 인버터 용접전원에는 대부분 ‘단락전류 파형제어기술’이 적용되고 있는데, 제조회사의 제어개념의 차이 및 기술수준에 따라 제어된 파형의 형상과 성능은 매우 다양하게 나타나고 있다<sup>17~20)</sup>.

따라서 용접전원을 사용하는 수요가의 입장에서는 용접전원의 성능을 평가함에 있어, 우선적으로 스패터 발생량에 대한 평가를 실시해야하는 부담을 안게 되었다. 그러나 스패터 발생량을 실험적으로 평가한다는 것은 매우 귀찮은 일일 뿐 아니라, 평가방법 자체가 국

제적으로 규격화되어 있지 않기 때문에 용접작업자의 정성적인 판단과 제조회사가 제공하는 기술자료를 토대로 구매기종을 선정하는 것이 일반적인 관행이다.

그런데 본 저자들이 과거 수년동안 CO<sub>2</sub>용접에서의 이크현상에 관한 연구를 수행하면서, 국내외에서 시판되고 있는 여러 가지 기종의 용접전원을 구매하여 파형을 확인하여 본 결과, 제어개념부터가 서로 다르다는 사실을 알게 되었다. 결국 개념의 차이로 인하여 파형형상이 다르게 나타날 뿐 아니라 스패터 발생량에 있어서도 커다란 차이가 있음을 확인할 수 있었다<sup>19,20)</sup>.

본 기술보고에서는 이러한 차이점들을 종합적으로 보고하면서, 현재까지 상용화된 파형제어 기법중에서 스패터 발생량이 최저가 되는 파형형상이 어떤것인가를 보여주고자 하였다. 이를 위하여 본 보고서에서는 SCR제어형 용접전원 1개 기종(SCR로 표기함)과 인버터제어형 용접전원 4개 기종(각각 Inverter I, Inverter II, Inverter III, Inverter IV로 표기함)의 용접파형 분석 결과와 스패터 발생량 측정결과를 사용하였는데, SCR전원은 파형제어가 적용되지 않은 전원이지만 인버터 전원의 파형제어 효과를 비교평가하기 위하여 참고용으로 사용하였다.

### 2. 용접전원의 사양

본 연구에 사용된 용접전원의 주요 사양은 Table. 1과 같다. SCR과 Inverter I은 국내에서 제조·시판하

Table 1 Specification of power supplies.

용접전원	입력전압 · 주파수	정격입력	출력전류	출력전압	정격사용률
SCR	3 $\phi$ , 220V(50/60Hz)	19 kVA	350A	34V	50 %
Inverter I	3 $\phi$ , 220V(50/60Hz)	16 kVA	350A	36V	60 %
Inverter II	3 $\phi$ , 220V(50/60Hz)	18 kVA	350A	36V	60 %
Inverter III	3 $\phi$ , 220V(50/60Hz)	16 kVA	350A	36V	60 %
Inverter IV	3 $\phi$ , 220V(50/60Hz)	18 kVA	350A	36V	60 %

고 있는 용접기이다. Inverter II는 외산제품인데, 파형조정 다이얼이 부착되어 있어 내장된 범위 내에서 파형조정이 가능하도록 설계되어 있는 제품이다. Inverter III는 Inverter I에 후속하는 '지연시간 제어기'를 자체 제작하여 부착한 용접전원이다. Inverter IV는 가장 최근에 시판되고 있는 외산 용접전원으로 가장 정교한 제어기법이 적용되어 있는 제품이다<sup>16)</sup>.

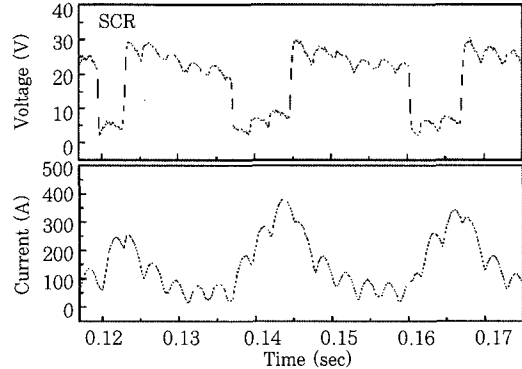
3. 용접전원별 파형특성과 스파터 발생량

GMA용접에서는 용접조건, 특히 용접전압 및 전류에 따라 여러 가지 금속이행형태가 나타나게 되는데, CO<sub>2</sub>용접에서는 용접전류가 증가함에 따라 단락이행으로부터 입상용적이행으로 천이한다. 그런데 스파터는 천이이행조건 즉, 단락이행과 입상용적이행이 혼재되어 나타나는 구간에서 최대가 되고 있다<sup>21)</sup>. 이러한 조건에서 스파터 발생량이 최대가 되는 원인은 순간단락의 발생 빈도수가 많고 정상단락의 경우에 있어서도 고전류 영역에서 아크가 재생되기 때문이라고 설명되고 있다. 따라서 지금까지 개발된 용접전원을 분석하여 보면, 0.1msec단위에서 일어나는 스파터 발생현상을 억제하기 위하여 전류파형을 어떠한 형상으로 제어할 것인가? 라는 물음에 제각기 다른 형상을 제시하고 있다.

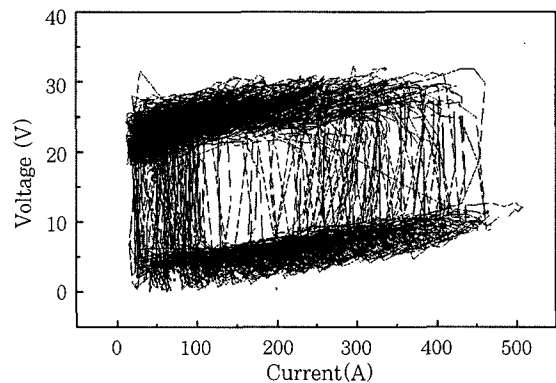
Fig. 1~5는 상기한 5개 기종의 단락이행 파형과 V-I곡선을 보여주고 있는데, 서로 상이한 형태의 형상을 보여주고 있다. 먼저 Fig. 1(a)는 SCR의 전압, 전류파형을 보여주고 있는데, 모든 파형에서 리플(ripple)이 나타나고 있다. 이러한 리플은 3상 전류를 정류하여 출력되기 때문에 1초에 360개가 생성되는데, 이는 결국 1/360초보다 짧은 시간에 이루어지는 현상에 대해서는 적절히 대응하지 못하게 된다는 것을 의미한다. 한 예로써, 단락이행과정에서 전류는 단락개시 순간부터 상승하여야 하고 아크재생 순간부터는 감소하기 시작하여야 하는데, 본 파형에서 보여주듯이 이들 순간과 위상이 맞지 않아 그렇게 되지 못하는 경

우가 대부분이다. 즉, 아크 현상변화에 따른 전류의 변화가 다소 지연되어(최대 1/360초) 나타나고 있음을 보여주는 것이다. 일반적으로 아크현상을 순간적으로 대응하는 능력을 아크응답성이라고 하는데, SCR용접전원은 응답성이 낮기 때문에 0.1msec단위에서 이루어져야 하는 파형제어 기법은 기본적으로 적용될 수 없는 것이다.

Fig. 1(b)는 2초 동안의 파형을 V-I곡선화한 것인데, V-I곡선은  $\square$ 자 모양의 폐곡선을 만든다. 그런데 본 폐곡선은 균일하지 못할 뿐만 아니라 아크재생순간의 최대 전류치가 450A까지 상승되어 있다. 이러한 사실은 순간단락횟수가 많고 아크재생시점에서의 폭발력이 크다는 것을 의미하기 때문에 스파터 발생량이



(a) Waveforms of SCR power supply

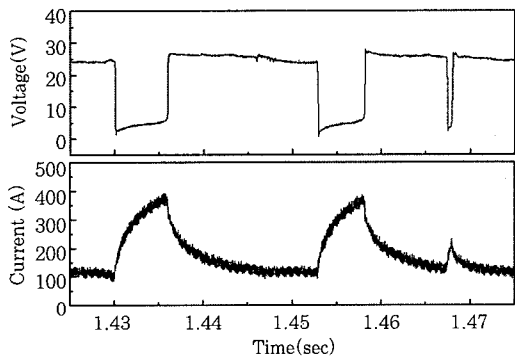


(b) V-I curves of SCR power supply

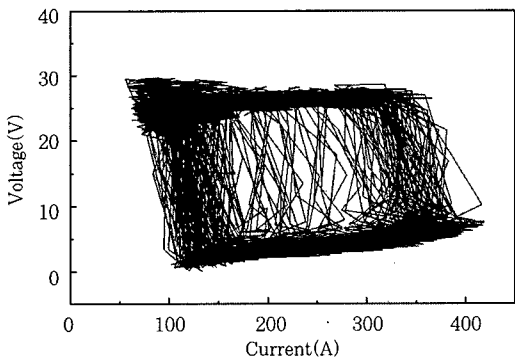
Fig. 1 Waveforms and V-I curves of SCR power supply.

많을 수밖에 없다. 실제로 스파터 발생량을 측정하여 본 결과, 대상 용접전원 중에서 가장 높은 발생율을 보여 주었다(Fig. 6).

Fig. 2(a)는 Inverter I의 파형을 보여주고 있는데, 본 전원은 8.5kHz의 주파수를 가지고 있는 전원이다. 주파수가 높기 때문에 리플이 매우 미세하게 되었고 응답성이 향상되어 단락순간과 아크재생 순간이 전류 파형에서도 명확히 나타나고 있다. 즉 단락순간부터 전류는 상승하기 시작하여 단락기간 동안 로그 함수적으로 증가하다가 아크재생순간에 급격히 감소하고 있다. 이러한 변화는 단락이행의 전형적인 파형으로 인위적인 파형제어가 적용되지 않은 용접전원이다. 따라서 본 용접전원의 V-I곡선(Fig. 2(b))과 스파터 발생량(Fig. 6)은 전술한 SCR전원과 매우 유사하게 나타나고 있다. 결국 인버터 용접전원이라고 하더라도 스파터 발생을 억제하고자 하는 파형제어를 하지 않으면 순간단락횟수나 최대 전류치를 제어할 수 없기 때문에 기능 면에서 SCR용접전원과 크게 다를 바가 없다는 것이다.



(a) Waveforms of Invert I power supply

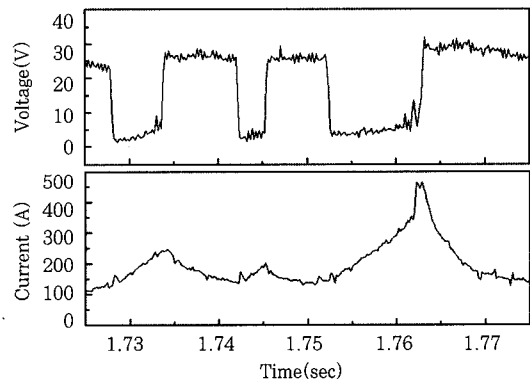


(b) V-I curves Inverter I power supply

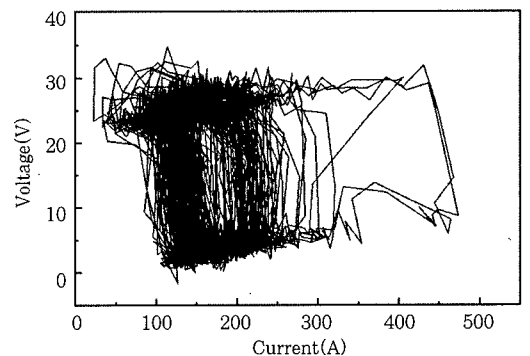
Fig. 2 Waveforms and V-I curves of Inverter I power supply.

다음으로 Fig. 3(a)는 Inverter II의 파형을 보여 주는데, 본 파형의 특징은 단락기간 동안에 용접전류가 제어되고 있다는 것이다. 일정전류에 도달하기 전

까지는 매우 완만하게 직선적으로 증가하다가, 일정전류에 이르러서도 단락이 해방되지 않으면 전류가 450A이상으로 급격히 상승하여 단락해방을 촉진하고 있다는 것이다. 이렇게 일정전류를 경계로 하여 전류 상승 기울기가 변화하는 것으로 보아 본 용접전원에는 파형제어 기능이 확실히 적용되어 있음을 알 수 있다. 그리고 전류는 먼저 단락순간이 감지됨과 동시에 기설정된 바대로 전류상승속도를 낮게 제어하게 되면 아크재생 시점에서의 최대 전류치를 낮게 유지할 수 있는데, 이를 Fig. 3(b)의 V-I곡선에서 보다 확실히 보여주고 있다. 본 그림에서 알 수 있듯이, V-I폐곡선은 서로 다른 크기의 두가지  $\square$ 자로 구성되어 있는데, 대부분은 최대전류가 300A 이하인 작은  $\square$ 자 모양이고 나머지는 최대전류가 450A정도인 커다란  $\square$ 자 모양이다. 이렇게 최대 전류치를 낮게 제어코자 한 기본개념은 아크 재생시점에서의 폭발력을 적게 하여 스파터 발생을 다소나마 억제코자 한 것이다. 그리고 순간단락이 발생하더라도 전류상승 정도가 적기 때문에 대립의 스파터는 발생하지 않을 것으로 예상된다. 실제로 Fig. 6에서 보듯이 본 용접전원의 스파터 발생량은 중전류 범위에서, SCR 및 Inverter I에 비해, 현저한 감소를 보여 주고있다. 이러한 결과로부터 아크재생시점의 전류치를 낮게 유지하는 제어는 중전류 범위에서



a) Waveforms of Inverter II power supply

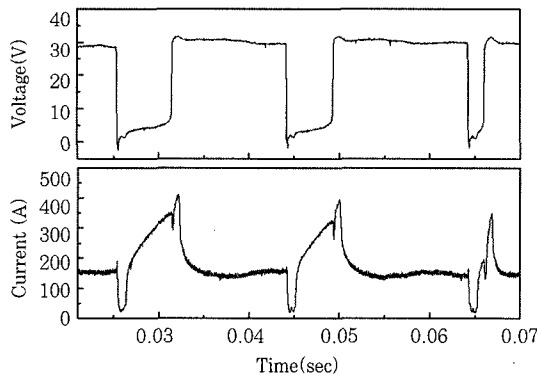


(b) V-I curves Inverter II power supply

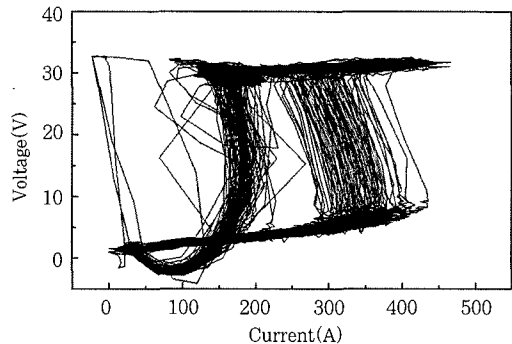
Fig. 3 Waveforms and V-I curves of Inverter II power supply.

스패터 발생을 억제하는데 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 본 제어기법을 적용하더라도 저전류 영역에서는 효과가 나타나지 않고 있다. 이는 제어를 하지 않더라도 저전류측에서는 최대전류가 300A이하이기 때문이다. 본 제어기법에서의 또 하나의 한계는 V-I폐곡선의 작은  $\alpha$ 자 내부가 깨끗하지 못하다는 것이다. 이는 결국 본 제어기법으로는 순간단락을 억제할 수 없다는 것을 의미한다.

Fig. 4(a)는 단락순간에 전류를 급격히 저하시킨 Inverter III의 파형이다. 본 용접전원은 앞에서 설명한 Inverter I에 저자가 개발한 제어기를 부착한 것이다. 전압신호로부터 단락순간이 감지되면 용접전류를 50A이하로 강하시키고 그 상태에서 0.8msec 유지한 다음 제어기능이 해지되도록 한 시제품이다. 본 제어의 기본개념은 단락순간에 발생할 수 있는 아크 반발력을 최소화하여 순간단락이 발생하지 않도록 하는 것이다. 실제로 본 제어기법을 적용한 결과 순간단락현상이 거의 나타나지 않았는데, 이러한 사실을 Fig. 4(b)의 V-I폐곡선에서 보여주고 있다. 본 그림에서 보여주는 V-I폐곡선은 다소 변형된 형상의  $\alpha$ 자 모양을 하고 있지만, 그 형상이 매우 규칙적인 뿐만 아니라  $\alpha$ 자 내부가 매우 깨끗한 것을 알 수 있다. 이로부터 본 제어기법은 순간단락현상을 억제하는데 매우 효과



(a) Waveforms of Invert III power supply



(b) V-I curves Inverter III power supply

Fig. 4 Waveforms and V-I curves of Inverter III power supply.

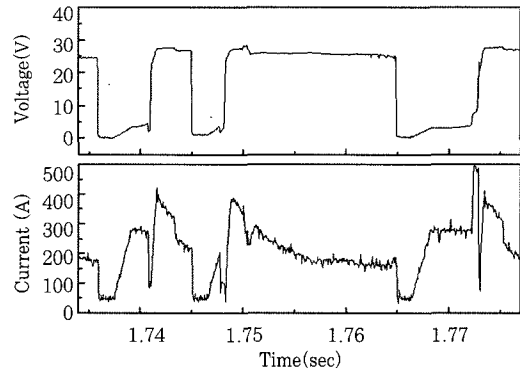
적임을 알 수 있다. 특히 제어기를 부착하지 않았을 때의 V-I곡선(Fig. 2(b))의 내부와 비교하여 보면, 본 제어기능의 효과를 보다 확실히 알 수 있다.

그런데 Fig. 4(a)의 파형을 보면, 제어기능이 완전히 해지된 상태임에도 불구하고, 아크재생 직후에 펄스전류가 부가되어 나타나고 있다. 이러한 펄스전류의 효과는 Inverter IV의 파형을 설명하면서 언급하겠지만, 이 또한 순간단락의 생성을 억제하는데 기여한 것으로 생각된다. 결국 본 제어기법이 적용되면 단락순간의 전류강하와 함께 아크재생 직후에 펄스전류 파형이 부가되기 때문에 Fig. 4(b)의 V-I폐곡선에서  $\alpha$ 자의 두 꼭지점이 밖으로 돌출되어 나타나게 된다.

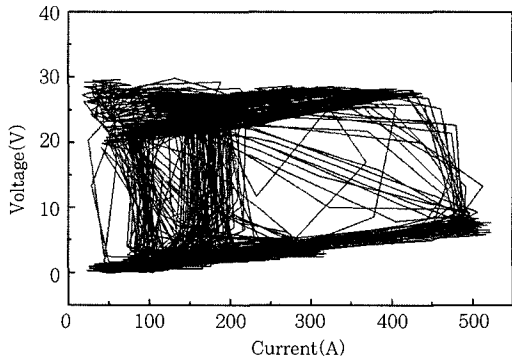
이상에서 설명한 제어의 효과는 스패터 발생량의 감소로 나타나게 되는데, Fig. 6에서 보는 바와 같이 감소정도는 Inverter IV와 비슷하게 나타나고 있으며, 저전류영역을 포함한 전 전류범위에서 그 효과가 나타나고 있다.

마지막으로 Fig. 5(a)는 가장 최근에 개발된 Inverter IV의 파형을 보여주는데, 본 파형의 특성 및 제어 개념에 대해서는 저자에 의해 본 학회지를 통하여 자세히 보고된 바 있다<sup>20)</sup>. 이를 보다 간략히 정리하면 다음과 같다

먼저 순간단락을 방지하기 위하여 단락순간에 전류



(a) Waveforms of Invert IV power supply



(b) V-I curves Inverter IV power supply

Fig. 5 Waveforms and V-I curves of Inverter IV power supply.

를 강하시키는데 이는 Inverter III와 동일한 개념이다. 아크재생 순간 아크폭발력에 의해 발생하는 스파터를 억제하기 위하여 아크재생 직전의 순간을 감지하여 전류를 급격히 강하시킴으로써 100A이하의 전류 상태에서 아크가 재생되도록 한다. 그리고 아크가 재생된 후에는 바로 강력한 펄스 전류파형을 부가함으로써 용융지를 강한 아크력으로 밀어내어 불규칙한 용융지 유동에 의해 발생할지도 모르는 순간단락현상을 방지코자 하였다. 특히 단락 말기에 낮은 전류상태에서 아크가 재생토록 제어함으로써, V-I곡선이 Fig. 5(b)에서 보여주는 바와 같이, 꺾자 모양이 되도록 하였다. 본 그림에서는 꺾자의 기둥이 되는 두 개의 뚜렷한 세로축을 볼 수가 있는데, 200A에서 나타나는 세로축이 단락순간이며 100A에서 보여주는 세로축이 아크재생 순간이다. 따라서 단락순간의 전류보다도 낮은 전류상태에서 아크가 재생되고 있다. 그러나 비록 빈도 수는 적지만 500A의 고전류 상태에서도 일부 아크가 재생되고 있음을 보여주고 있어, 완벽한 제어가 이루어지고 있지 못함을 알 수 있다.

상기한 바와 같이 용접류를 정교하게 제어한 결과, Inverter IV의 스파터 발생율은 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 매우 낮은 수준으로써, 낮은 정도는 Inverter III와 비슷한 수준이다. Inverter III와의 제어기법의 차이는 아크재생순간의 제어가 있고 없고의 차이인데, 이러한 차이에도 불구하고 스파터 발생율의 차이가 없다고 하는 것은 아크재생순간의 제어가 스파터 발생량에 미치는 효과는 적을 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 이는 향후 보다 정확히 규명되어야 할 사항이다.

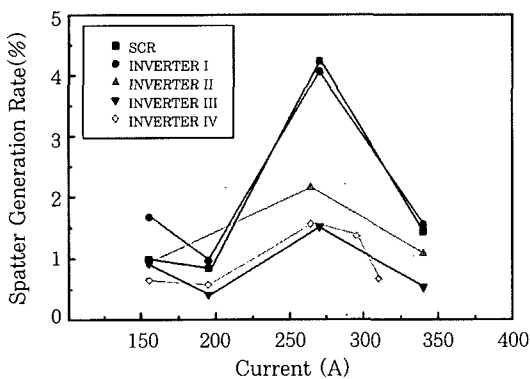


Fig. 6 Spatter generation rates of different power supplies.

#### 4. 맺음말

인버터 용접전원은 인버터 소자를 사용하는 전원을 통칭하여 사용되고 있는데, 이러한 인버터기술은 용접

전원의 크기와 중량을 획기적으로 감소시켰을 뿐만 아니라 용접전류 파형제어에 의한 스파터 절감에 크게 기여한 기술이다. 그러나 제어기술이 발달하는 과정에서 여러 가지 제어기법이 적용되어, 제어 효과 또한 매우 다양하게 나타나고 있다. 본 기술보고에서는 스파터 발생율에 미치는 용접전류 파형제어의 효과를 보여주었는데, 본 보고에서 보듯이 파형제어를 하지 않은 인버터 전원은 SCR전원과 다를 바가 없다. 그리고 파형제어를 하고있다고 하더라도, 제어기법에 따라 그 효과는 매우 다르게 나타나고 있다. 따라서 인버터 용접전원을 선택함에 있어 전원이 가지는 전류파형만은 필히 측정하여, 스파터 발생을 억제하기 위하여 어떠한 제어기법을 활용하였는지를 확인할 필요가 있다. 측정된 파형에서 다음과 같은 제어방법중 일부가 적용되어있으면 효과적인 파형제어라 판단할 수 있다.

- i) 전류상승지연 및 지연시간동안 저전류상태 유지
- ii) 전류상승속도제어에 의한 아크재생순간의 전류치 억제
- iii) 아크재생 직전의 순간을 감지하여 전류강하
- iv) 아크재생 직후에 펄스파형 부여

#### 참고 문헌

1. 이성근, 서성필 : 스텐리스강 용접의 스파터에 관한 연구, 대한용접학회지, 제2권, 제2호(1984), p.13
2. 강봉용, 김희진 : CO<sub>2</sub> 용접의 스파터 발생에 미치는 용적이행 모드의 영향, 대한용접학회지, 제15권 제2호(1997), p.72-80
3. M. Sugisaki, M. Kosyou : Adoption of Spatterless Wire : Welding Technique, Vol.44, No.11(1996), p.10
4. M. Sakashita, T. Kataoka : KM-50S Spatterless Wire for Gas Shielded Arc Welding, Kawasaki Steel Technical Report, No. 33, Jan.(1996), p.17
5. 안영호, 이종봉, 최원규, 엄동석 ; MAG용접의 Spatter 발생 및 아크현상에 미치는 S의영향, 대한용접학회 1999년도 춘계학술발표대회 개요집, p.150.
6. H. Matsui, H. Suzuki ; Restraint of spatters scattered in high-speed gas-shielded arc welding with solid steel wire, Toyota Thechnology, Vol. 37, No. 2(1987), p.190

7. T. Ito, F. Koshiishi, M. Sato, T. Suga, M. Ushino ; A Study on spatter reduction in pulsed CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol. 15, No. 3(1997), p. 432
8. P. Boughton, G.J. MacGregor ; Control of short circuiting in MIG-welding, Welding Research International, Vol. 4, No. 2(1974), p.31
9. T. Ogasawara, T. Maruyama, T. Saito, M. Sato, Y. Hida ; A Power Source for Gas Shielded Arc Welding with New Current Waveforms, Welding Journal, Vol. 66, No. 3(1987), p.57
10. T. Mita ; Waveform Control Method in CO<sub>2</sub> Gas Shielded Arc Welding, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol. 6, No. 2(1988), p. 209
11. H. Yamamoto, S. Harada, T. Yasuda ; The effect of wave shape on the reduction of spatter generation during high speed pulsed MAG welding , IIW Doc. XII-1146-89(1989)
12. Lincoln Electric ; 스패터를 감소시키기 위한 단락형 용접시스템 제어 방법 및 장치, 대한민국 특허 공고번호 91-1003(1991)
13. E. K. Stava ; The surface-tension-transfer power source ; A new low-spatter arc welding machine, Welding Journal. Vol. 72, No. 1(1993), p.25
14. H. Yamamoto ; Recent Advances in the Welding Power Systems for Automated Welding, Journal of the Japan Welding Society, Vol. 64, No. 6(1995), p.45
15. 이창한, 김희진 ; CO<sub>2</sub> 용접에서 스패터 발생에 미치는 지연시간 제어의 영향, 1999, 투고중
16. CO<sub>2</sub> MAG 용접기 SENSARC LS350, KOBE 기술 Guide, Vol. 37, No. 330(1997), p.8
17. Y. Sakai, T. Suga ; Trend of MAG/MIG Welding, Welding Technique, Vol. 41, No.2(1993), p. 62
18. 김희진, 김용석 ; CO<sub>2</sub> 용접의 용접 스패터 저감을 위한 용접전류 파형제어 개념, 대한용접학회지, 제16권, 제3호 (1998), p.10-17
19. 김희진, 이창한 ; GMA 용접전원의 파형제어기법 분석, 대한용접학회지, 제16권, 제5호(1998), p.39
20. 김희진, 이창한 ; GMA 용접전원의 최신 파형제어기법 분석, 대한용접학회지, 제16권, 제6호 (1998), p.26
21. 강봉용, 이창한, 김희진, 장희석 ; CO<sub>2</sub>용접의 천이이행조건에서 스패터 발생과 파형인자와의 관계, 대한용접학회지, 제16권, 제4호(1998), p. 39
22. 김희진, 강봉용, 이강희, 유중돈 ; CO<sub>2</sub>용접의 단락이행 조건에서 스패터 발생과 파형인자와의 관계, 제16권, 제3호(1998) p.85-94
23. 용접아크 현상 해석 및 응용기술개발, 공기반과제 최종 보고서, 산업자원부(1999)